



UNIVERSIDAD CATÓLICA
de Colombia

**FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL**

ANÁLISIS DEL EFECTO QUE TIENE LAS FORMAS DE LAS PILAS EN EL
COMPORTAMIENTO HIDRODINÁMICO Y EN EL TRANSPORTE DE
SEDIMENTOS DE FONDO PARA UN TRAMO DEL RIO MAGDALENA EN EL
DEPARTAMENTO DE BOLIVAR - COLOMBIA, MEDIANTE LA MODELACIÓN EN
IBER.

ELABORADO POR:
YURI FERNANDA SIERRA SALINAS
CÓDIGO: 507402
JOHN SEBASTIAN FAJARDO BECERRA
CÓDIGO: 507434

**BOGOTÁ, D. C.,
2021**



UNIVERSIDAD CATÓLICA
de Colombia

**FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL**

**PROPUESTA DE TRABAJO DE GRADO
(Modalidad Trabajo de Investigación)**

ANÁLISIS DEL EFECTO QUE TIENE LAS FORMAS DE LAS PILAS EN EL
COMPORTAMIENTO HIDRODINÁMICO Y EN EL TRANSPORTE DE
SEDIMENTOS DE FONDO PARA UN TRAMO DEL RIO MAGDALENA EN EL
DEPARTAMENTO DE BOLIVAR - COLOMBIA, MEDIANTE LA MODELACIÓN EN
IBER.

ELABORADO POR:
YURI FERNANDA SIERRA SALINAS
CÓDIGO: 507402
JOHN SEBASTIAN FAJARDO BECERRA
CÓDIGO: 507434

DIRECTOR
DIEGO ALEJANDRO PULGARIN

**BOGOTÁ, D. C.,
2021**

Nota de Aceptación

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Bogotá D.C. abril de 2020



Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0)

This is a human-readable summary of (and not a substitute for) the [license](#). [Advertencia](#).

Usted es libre de:

Compartir — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato

Adaptar — remezclar, transformar y construir a partir del material

La licencianta no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia

Bajo los siguientes términos:



Atribución — Usted debe dar [crédito de manera adecuada](#), brindar un enlace a la licencia, e [indicar si se han realizado cambios](#). Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licencianta.



NoComercial — Usted no puede hacer uso del material con [propósitos comerciales](#).



CompartirIgual — Si remezcla, transforma o crea a partir del material, debe distribuir su contribución bajo la [misma licencia](#) del original.

No hay restricciones adicionales — No puede aplicar términos legales ni [medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otras a hacer cualquier uso permitido por la licencia](#).

DEDICATORIA

Primeramente, a Dios por la vida, a nuestros padres que nos apoyaron y nos brindaron todo incondicionalmente, a nuestros hermanos por su ayuda y acompañamiento a lo largo de la carrera, sobrinos, familiares, amigos y a las personas que ya no están Orlando Isaías Cuadros Dávila y Rosendo Salinas, porque gracias a todos logramos un crecimiento personal y profesional.

A nuestro tutor y al Ingeniero José Javier Oliveros por su colaboración en la realización de esta investigación.

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	10
2. ANTECEDENTES	11
3. ESTADO DEL ARTE.....	15
3.1. Transporte de sedimentos de fondo en corrientes naturales	15
3.2. Modelación en Iber	16
4. JUSTIFICACIÓN	17
5. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	18
6. MARCO DE REFERENCIA	19
6.1. MARCO TEÓRICO.....	19
6.1.1. Arrastre de sedimentos.....	19
6.1.2. Arrastre de sedimentos por escorrentía directa	21
6.1.3. Transporte de sedimentos en corrientes naturales	21
6.1.4. Distribución de transporte de sedimentos	21
6.1.5. Propiedades de los sedimentos	22
6.1.6. Formas de lecho idealizadas en canales aluviales	22
6.1.7. Erosión en pilares de puentes.....	23
6.1.8. Erosión local en pilares	24
6.1.9. Determinación de la Erosión Local en Pilares.....	24
6.1.10. Teoría de arrastre de sedimentos	25
6.1.11. Iber	26
6.1.12. Modelo numérico Iber.....	26
6.1.13. Transporte de fondo (Manual referencia hidráulico de Iber).....	28
6.1.14. Ecuación de Meyer-Peter Müller (1948)	29
6.1.15. Ecuación de Engelund-Hansen, 1967.....	30
6.2. MARCO CONCEPTUAL	31
7. OBJETIVOS	24
7.1. OBJETIVO GENERAL	24
7.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	24
8. ALCANCES Y LIMITACIONES	25
9. METODOLOGÍA	26
9.1. Selección zona de estudio	27
9.2. Descripción de la zona de estudio	27

9.2.1.	Geología	28
9.2.2.	Sedimentos	29
9.3.	Modelación en Iber	29
9.3.1.	Pre-proceso	29
9.3.2.	Cálculo	33
9.3.3.	Post – Proceso.....	33
9.4.	Análisis de escenarios	34
9.4.1.	Escenario 1 - Caso base	34
9.4.2.	Escenario 2 - Método de sustracción para las diferentes formas de pilas. 34	
9.4.3.	Escenario 3 - Método de elevación de la malla para las diferentes formas de pilas.	34
10.	RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	36
10.1.	Comparación caso base Vs pilar circular, rectangular y cuadrado método de sustracción.....	36
10.1.1.	Parámetro de velocidad.....	36
10.1.2.	Parámetro de caudal	37
10.1.3.	Transporte de sedimentos	38
10.2.	Comparación caso base Vs pilar circular y rectangular método de elevación de la malla.....	39
10.2.1.	Parámetro de velocidad.....	39
10.2.2.	Parámetro de caudal	40
10.2.3.	Transporte de sedimentos	41
10.3.	Comparación método de sustracción Vs método de elevación de la malla	42
10.3.1.	Parámetro de velocidad.....	42
10.3.2.	Parámetros de caudal	43
10.3.3.	Transporte de sedimentos	43
11.	CONCLUSIONES	45
12.	RECOMENDACIONES	47
13.	BIBLIOGRAFÍA	48

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Trampa de transporte de sedimentos de fondo.....	19
Figura 2. Tipos de transporte de sedimentos en corrientes naturales	22
Figura 3. Formas de lecho idealizadas en canales aluviales.....	22
Figura 4. Esquema típico de erosión en un pilar de un puente.....	23
Figura 5. Formación de estelas y vórtices alrededor de un pilar: Vista transversal.	24
Figura 6. Formación de estelas y vórtices alrededor de un pilar: Vista en planta.	24
Figura 7. Marco conceptual	1
Figura 8. Metodología de la investigación.....	26
Figura 9. Zona de estudio – Tramo río Magdalena - Magangué.....	28
Figura 10. Imagen de fondo y geometría del terreno - Río Ranchería.....	30
Figura 11. Curva duración de caudales	31
Figura 12. Generación de la malla - pilas circulares.....	32
Figura 13. Generación de la malla - pilas elevadas.....	32
Figura 14. Caso base Vs Pilar circular, rectangular y cuadrado - Velocidad (m/s) (Método de sustracción)	36
Figura 15. Caso base Vs Pilar circular, rectangular y cuadrado – Vectores de velocidad (m/s) (Método de sustracción)	37
Figura 16. Caso base Vs Pilar circular, rectangular y cuadrado - Caudal (m ² /s) (Método de sustracción)	37
Figura 17. Caso base Vs Pilar circular, rectangular y cuadrado – Erosión (m) (Método de sustracción)	38
Figura 18. Caso base Vs Pilar circular, rectangular y cuadrado – Sedimentación (m) (Método de sustracción)	39
Figura 19. Representación por el método de elevación de la malla	39
Figura 20. Caso base Vs Pilar circular, rectangular - Velocidad (m/s) (Método de elevación de la malla).....	40
Figura 21. Caso base Vs Pilar circular, rectangular - Caudal (m ² /s) (Método de elevación de la malla).....	40
Figura 22. Caso base Vs Pilar circular, rectangular – Erosión (m) (Método de elevación de la malla).....	41
Figura 23. Caso base Vs Pilar circular, rectangular – Sedimentación (m) (Método de elevación de la malla)	41
Figura 24. Pilar circular, rectangular - Velocidad (m/s) (Método de sustracción) Vs (Método de elevación de la malla)	42
Figura 25. Pilar circular, rectangular - Caudal (m ² /s) (Método de sustracción) Vs (Método de elevación)	43
Figura 26. Pilar circular, rectangular – Erosión (m) (Método de sustracción) Vs (Método de elevación)	44
Figura 27. Pilar circular, rectangular – Sedimentación (m) (Método de sustracción) Vs (Método de elevación)	44

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Velocidad de sedimentación – Partículas de peso específico 2,65 Kg. /dm.3	20
Tabla 2. Valores de E dependiendo de las características del flujo.....	28
Tabla 3. Dimensionamiento de pilas	30
Tabla 4. Porcentaje de excedencia.....	31

1. INTRODUCCIÓN

Durante mucho tiempo se han presentado problemas en las estructuras de los puentes y una de las principales afectaciones ocurre en sus cimentaciones, esta se da debido al arrastre de sedimentos en el fondo de un río cuando se presentan avenidas causando que el caudal y la velocidad de la fuente hídrica aumenten, por ello, las partículas que componen la superficie se desprenden provocando en algunos casos, cambios en las profundidades de las cimentaciones. Según “las estadísticas mundiales de fallas de puentes sobre cursos de aguas, demuestran que la mayoría de puentes fallan por razones hidráulicas, generalmente erosión en pilares o estribos. Las fallas de puentes por razones meramente estructurales son raras en comparación con las fallas por erosión hidráulica” [1].

El presente estudio tiene como propósito analizar el efecto que tienen las distintas formas de las pilas que pueden presentar los puentes, como, circulares, cuadradas y rectangulares en el software Iber, por medio de una modelación bidimensional que cuenta con dos métodos para simular las pilas de los puentes, el método de sustracción o elevación de la malla, asimismo, en el comportamiento hidrodinámico y en el transporte de sedimentos de fondo, ya que este software es de acceso libre y cuenta con una malla no estructurada que permite el refinamiento logrando mejores resultados, y más cercanos a la realidad en cuanto a la modelación.

En este trabajo se desarrollan los siguientes ítems:

En el capítulo cinco se hace un recuento de las investigaciones previas a nivel local y global, que son relevantes para el comportamiento hidrodinámico y el transporte de sedimentos de fondo mediante la modelación en Iber e investigaciones más cercanas a esta. En el capítulo seis, se describe de una forma más general el estudio sobre sedimentos de fondo y la modelación en software como Iber 2.6. Por otra parte, en el capítulo siete se especifica la importancia de la realización del estudio, igualmente, en el capítulo ocho se plantea la formulación de la pregunta a la que se le dará solución en el transcurso del trabajo.

Además, en el capítulo nueve se presenta el marco de referencia compuesto por el marco teórico y conceptual en donde primeramente hace referencia a las categorías enunciadas en el planteamiento y su relación teórica entre ellas, seguido de esto se especifica y explica la parte conceptual del transporte de sedimentos y el comportamiento hidrodinámico por medio del modelo.

Finalmente se enuncia los objetivos del trabajo, alcances y limitaciones para el desarrollo de estos, además la metodología con su planeación respectiva, concluyendo con los resultados y el análisis de estos, para llegar a las conclusiones finales dependientes de los objetivos enunciados más adelante.

2. ANTECEDENTES

En el siguiente trabajo se exponen documentos, los cuales son una compilación de una serie de investigaciones en cuanto a la problemática que tiene que ver con la forma de la cimentación de las pilas del puente y el efecto que produce el diseño de la estructura para el estudio de la modelación de sedimentos en el software Iber. De esta forma se encontró un estudio del efecto de las pilas de los puentes sobre desbordamientos peligrosos, estudiado en un río de China, donde encuentran que “las pilas de los puentes en los canales de los ríos pueden causar obstáculos para el flujo de las inundaciones al reducir el área de sección transversal e induciendo corrientes de Foucault locales y altas velocidades de flujo, que pueden destruir estructuras hidráulicas” proyecto por el cual fue revisado en el año 2019 [2].

En el caso anteriormente nombrado, se utilizó un modelo numérico bidimensional para investigar los efectos de las pilas del puente sobre los riesgos de inundación en el río Jialing, China. Para el modelado, Mike 21 FM fue utilizado, que es una malla no estructurada y un modelo de volumen finito que resuelve las ecuaciones de aguas poco profundas. El modelo numérico se validó con datos históricos de inundaciones recopiladas y análisis de sensibilidad, identificó los efectos del coeficiente de Manning y la dependencia del tamaño de la cuadrícula. La influencia de los efectos de remanso en el campo de flujo se analizó comparando resultados numéricos con y sin pilas. Los resultados mostraron que los impactos más significativos fueron causados por el Puente Fengxian. “El aumento máximo del nivel del agua fue de aproximadamente 1 m, la velocidad máxima cerca de este puente disminuyó en un 22.77% para una inundación de 10 años. Descubrimos que las elevaciones superiores de los diques planeados cerca de los puentes deben incrementarse en 0.15–0.36 m” [2].

Adicionalmente, en el año 2018, siendo uno de las investigaciones más actualizadas y afines al tema de investigación en Colombia, aproximadamente en la Guajira se realizó un estudio donde se hace participe la modelación hidráulica 2D de inundaciones en una región en la cual se presenta escasez de datos, investigación en la cual se elaboró una estrategia metodológica que soluciona la escasez de datos de entrada para la modelación en Iber de inundaciones en un delta. Se digitalizó la elevación disponible en Google Earth, tomadas manualmente e integrado con secciones levantadas en el río y datos topográficos, además, se obtuvo una nube de puntos topográfica. Esta fue posteriormente interpolada a una malla de triángulos irregular, y finalmente, la generación de un Modelo Digital del Terreno.

En la investigación realizaron una simulación bidimensional en Iber, un modelo de inundación y una medida estructural (dique) para proteger una comunidad vulnerable. La inundación se presentó únicamente en el tramo final del río Ranchería, por tanto, no influyó sobre el área urbana de la ciudad de Riohacha. “La estructura lograría impedir artificialmente las inundaciones en la zona protegida, pero aumentando el riesgo por inundación ante posibles fallas debido a las avenidas

de mayor volumen” [3]. De acuerdo a los resultados, la metodología planteada es útil para el cálculo de áreas susceptibles a inundación en zonas deltaicas y apoyo a la toma de decisiones en regiones con escasez de datos como se presentó en el río Ranchería [3].

De acuerdo con el antecedente mencionado anteriormente, la modelación en 2D de los ríos en Colombia cuentan con muy poca información de entrada como los MDE (modelo digital de elevación) que son datos de elevación tipo ráster y los MDT (modelo digital del terreno) que son los datos topográficos o modelos del terreno, es por ello que se hace referencia a este proyecto en el río Ranchería en la Guajira, ya que el fin de este es evaluar el tramo de inundación y a partir de este modelar una estructura para proteger una comunidad vulnerable, dado que, en Colombia existe una escasez de datos topográficos de acceso libre.

En el mismo año 2018, se realizó un estudio sobre “modelación numérica y de transporte de sedimentos caso de estudio El Banco Magdalena (Colombia)” [4]. En esta investigación se llevó a cabo un modelo hidrodinámico y de transporte de sedimentos con un previo proceso de datos hidrológicos para establecer el comportamiento hidrodinámico, configurando tres casos los cuales se trabajaron con un caudal bajo, medio y alto que fueron obtenidos de la curva de duración de caudales, además, la modelación numérica y de transporte de sedimentos se llevó a cabo en el programa computacional DELFT 3D que soluciona las ecuaciones de aguas superficiales y para el transporte de sedimento se usó tres ecuaciones entre las que está Van Rijn, Engelund - Hansen y Meyer - Peter – Müller, dado el modelo en el estudio, tuvieron en cuenta los datos de campo para la calibración de dicho modelo que dio diagnóstico para la identificación de las causas de los problemas [4].

Por otra parte, se presenta un estudio en el año 2012, de un nuevo puente de 6,2 km de largo, diseñado para una descarga de 148.000 m³/s, que se ha propuesto sobre el río Padma en Bangladesh. Las profundidades de limpieza de diseño son de aproximadamente 62 m en las obras de formación del río y de aproximadamente 77 m en los pilares del puente. Estos valores de diseño se estimaron con base en un enfoque híbrido que combinó varios tipos de modelos hidráulicos, como modelos numéricos hidrodinámicos, modelos numéricos morfodinámicos y modelos físicos de lecho móvil. [5] Los modelos hidrodinámicos de lecho fijo, que cubrieron una gran extensión del río Padma y las llanuras de inundación adyacentes, se utilizaron para calcular la hidráulica de flujo general en el cruce del puente para el flujo de diseño bajo diversas morfologías del río (actual e histórica). Estimar las tensiones cortantes en el revestimiento del banco [5].

De forma similar, en cuanto a la colocación de pilas circulares se encontró un estudio experimental donde se analiza “el efecto que tiene la colocación de un aro alrededor de una pila circular como estructura de contención para controlar la profundidad de socavación” [6]. En esta investigación se llevó a cabo varios experimentos utilizando

una pila de forma circular de 7.3 cm de diámetro y dos aros de diferente tamaño, en donde se evalúa la profundidad máxima de socavación y la influencia del tamaño del aro. Se analizó un aro alrededor de la pila en dos fases, la primera con un diámetro de 14.6 cm y la segunda con un diámetro de 21.9 cm, en esta investigación el aro se analizó en diferentes posiciones con respecto a la cota de fondo [6].

En cada una de estas fases se midió el perfil del fondo erosionado, aguas arriba y aguas debajo de las secciones de los pilares. Esto permitió establecer la profundidad de socavación máxima, asimismo, analizar la influencia del tamaño del aro y de su ubicación sobre el tamaño y la forma del depósito de socavación. Con respecto a los análisis realizados se evidencia que los perfiles del depósito socavado son de origen similar, independientemente del tamaño del aro y de su ubicación. Además, se determinó que cuando el aro se coloca en el fondo este provoca una menor profundidad de socavación. Finalmente, se logra evidenciar que al aumentar el diámetro del aro la profundidad de socavación se reduce. Los resultados difieren con la poca información disponible en estudios previos, investigación revisada en el año 2005 [6].

En el año 2013 se realizó un estudio de investigación sobre la socavación local relacionada con diversas formas de pilares de los puentes, este estudio hace referencia a la utilización de diferentes formas de pilares de puentes para reducir los efectos de la socavación local aguas arriba y aguas debajo de las estructuras (pilares rectangular, triangular, oblonga, trapezoidal y aerodinámica) junto con el aspecto temporal del desarrollo de la socavación. La forma del pilar se elige como factor de control de la socavación ya que otros factores como la profundidad del flujo, la velocidad de aproximación, el material del lecho del río, etc. son difíciles de controlar durante la crecida. El estudio se llevó a cabo utilizando dos modelos físicos hidráulicos, operados bajo condiciones de agua clara en arena de baja cohesión como material del lecho [7].

El objetivo principal del estudio de la “simulación física y numérica de la socavación local para el diseño de la forma óptima del pilar de los puentes” [7] es a partir de la experimentación con diversas formas de pilares de puente, en un canal pequeño y grande, ilustrar el mecanismo de socavación. Las pruebas se llevaron a cabo utilizando cinco formas diferentes de pilares, rectangulares, oblongas, triangulares, trapezoidales y aerodinámicas, para determinar el efecto de la forma de los pilares en el desarrollo temporal de la socavación. En torno a los diferentes modelos de pilares se comparó con intensidades de flujo similares en las pilas del puente [7].

Finalmente, en esta investigación se estudió la eficacia de los collarines, donde se mostró que la socavación se reduce drásticamente cuando el lado aguas arriba del pilar se modifica de rectangular a aerodinámico o aerodinámico con collar, asimismo, se identificó que la profundidad máxima de la socavación se observa en el pilar rectangular, mientras que la socavación mínima se observa en la línea de

corriente. Si se utilizan medidas de protección contra la socavación, como un collarín, la socavación se reduce aún más [7].

3. ESTADO DEL ARTE

3.1. Transporte de sedimentos de fondo en corrientes naturales

El transporte de sedimentos de fondo forma parte del proceso de investigación, para este caso se estima la descarga de sedimentos de fondo en corrientes naturales, de acuerdo a este se ha sugerido el uso de ecuaciones empíricas. En México se realizó un estudio de transporte de sedimentos, donde se analizaron cinco ecuaciones empíricas de predicción del transporte de fondo, como las propuestas por Meyer-Peter y Muller, Bagnold, Yalin, Parker et al. Y Schoklitsch, las cuales se seleccionaron considerando su fundamento teórico y frecuencia de uso. En el presente artículo se comparan y se analizan las cinco ecuaciones dependiendo el límite por disponibilidad de sedimento [8].

La siguiente investigación analizó siete ríos del caribe colombiano con el fin de detectar patrones de variabilidad y cambios recientes en el transporte de sedimentos en suspensión, con respecto a los análisis realizados se dice que en promedio estos ríos transportan un estimado de $146.3 \times 10^6 t^{-1}$ de sedimentos en suspensión con dirección a la costera Caribe colombiana, además estiman que la mayor parte de sedimentos proviene del Río Magdalena, que corresponde al 38% del total de estos sedimentos en suspensión, esta tasa aumento un 36% para los años entre el 2000 y 2010 [9].

Según análisis espectrales referentes a la transformada de ondícula (wavelet), mostraron una variabilidad entre los años de 1987-1990 y 1994-2002, donde los principales mecanismos oscilatorios se mostraron de manera simultánea, por otra parte, "las bandas anuales, semianual y 'cuasi-decadal' se evidenciaron en la inconsistencia del transporte de sedimento en suspensión, mientras que, las bandas 'cuasibienal' e interanual constituyeron una fuente de variabilidad de segundo orden", por último, se concluye que en el transporte de sedimentos en suspensión se define un marco de variabilidad de mediano a largo plazo para los mecanismos forzadores climáticos y oceanográficos asociados con las oscilaciones detectadas mediante el análisis espectral [9].

En cuanto al fenómeno de escorrentía esta es una compleja combinación de varios procesos, y puede definirse como "la excavación y extracción del material del lecho y los bancos de corriente como resultado de la acción erosiva del agua que fluye" [10]. Puede clasificarse en 3 tipos:

- La Limpieza General se denomina comúnmente transporte de sedimentos y ocurre a lo largo del lecho del río debido al cambio en las condiciones de flujo [11].
- El arrastre de contracción se debe a la reducción de la sección transversal del lecho del río, típicamente en la ubicación de un puente. En esta

configuración, la contracción de la sección aumenta la velocidad de flujo y consecuentemente el esfuerzo de corte del lecho [12].

- Limpieza local es también la consecuencia de la presencia de puentes, pero aquí, se produce alrededor de obstáculos como pilas. Las pilas crean estructuras de flujo coherentes, como herradura [13].

3.2. Modelación en Iber

Un estudio realizado en el río Garrapata, tuvo como objetivo desarrollar la modelación numérica bidimensional de dicho río, para el tránsito de caudales máximos asociados a diferentes periodos de retorno, mediante la aplicación del paquete computacional Iber, para generar los resultados, de manera que se pueda producir el mapa temático de variables hidráulicas y se pueda determinar el área de inundación. Además, para desarrollar el modelo numérico de Iber, consideraron lo siguiente; respecto a la sensibilidad del tamaño de la cuadrícula de la malla y la deformación del terreno dependiendo los resultados, mientras que para la calibración del modelo se realizó en función de los registros de campo y la variación del coeficiente de rugosidad de Manning determinado mediante la fórmula de Cowan en una estimación inicial [14].

“Como resultado del anterior estudio se obtuvo la modelación numérica de caudales crecida asociados a periodos de retorno de 5, 10, 25, 50 y 100 años en condiciones de flujo permanente y no permanente. Además, se presenta la comparación de resultados obtenidos con la modelación numérica unidimensional realizada en el mismo tramo. Con los valores obtenidos de cada simulación se generaron mapas temáticos correspondientes a los valores máximos de las variables: velocidad, calado y número de Froude, que permitan identificar áreas de riesgo” dicho estudio fue presentado en el año 2018 [14].

4. JUSTIFICACIÓN

La contribución del transporte de sedimentos a la morfología del río es muy importante, ya que es la causa que determina la estabilidad del canal natural, la forma del lecho de la corriente natural y, por lo tanto, responsable de las principales propiedades físicas y mecánicas del flujo [8], es por ello que al pasar de los años se han analizado distintos tramos de ríos en Colombia, que, a pesar de la escasez de datos en zonas de difícil acceso o zonas vulnerables se ha logrado analizar modelos en software libres, analizando en algunos casos el comportamiento hidrodinámico con respecto al tiempo y el transporte de sedimentos.

Está claro que, como en muchos otros campos de transporte de sedimentos, hasta ahora no se han obtenido resultados teóricos y experimentales completamente satisfactorios, “porque los procesos involucrados en el movimiento del agua y los sedimentos son demasiado complicados y los datos experimentales son incompletos y a veces conflictivos” [15]. Debido a ello se estudia el efecto de las formas de las pilas en temas como socavación, que son consecuencia del transporte de sedimentos, asimismo, se han diseñado los puentes teniendo en cuenta la resistencia de los materiales para la carga impuesta, no obstante, se debería tener en cuenta el comportamiento de la fuente hídrica a la que se le está interviniendo de acuerdo a la carga y la velocidad que tienen los sedimentos de fondo.

Generalmente, las corrientes naturales que poseen sedimento de fondo es pequeño en comparación con la descarga de sedimento suspendido que una corriente natural transporta [8]. “Aunque es incompleto el conocimiento que existe del tipo de fuerzas y sus magnitudes que se presentan sobre una partícula que reposa en el fondo de un canal o que se encuentra muy cerca de éste, en general se acepta que dicha partícula se encuentra bajo la acción de dos fuerzas opuestas. Una que tiende a mantener la partícula en reposo y la otra que trata de rodar o levantar esa misma partícula (Simons y Senturk, 1992; Hu y Hui, 1996)” [8].

Finalmente, se involucra la modelación del cauce del Río Magdalena, en el tramo que comprende el municipio de Magangué, departamento de Bolívar - Colombia, en el software Iber, desde el comportamiento hidrodinámico hasta la carga de sedimentos, para luego generar las distintas formas de pilas, donde se analiza el efecto que tienen cada una de estas en el transporte de sedimentos, en la que se beneficiara a la comunidad, ya que al saber la forma de pila ideal a diseñar donde se tiene en cuenta el flujo del río y la carga de sedimentos de fondo, se podrá evaluar un diseño más óptimo en cuanto a la hidrodinámica, que disminuirá problemas de socavación o aumento de sedimentos en puntos específicos, es así como se realizará un análisis más detallado.

5. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El río Magdalena es una de las fuentes hídricas más importantes de Colombia, ya que atraviesa el país de sur a norte a lo largo de 13 departamentos, su cuenca genera cerca de un 80 por ciento del PIB, además, “ocupa el 24 por ciento de la extensión continental del país. En ella habitan alrededor de 33,6 millones de personas, es decir, el 80% de la población total del país, y se asientan las grandes ciudades”, es por ello que la mayoría de las actividades económicas y sociales se desarrollan en esta cuenca. Por otra parte, en el río han evidenciado cambios geomorfológicos que conllevan a modificaciones de sus orillas generando erosión, inundación, sedimentación y otras variaciones morfodinámicas en el corredor del río [16][17][18].

“El río Magdalena nace cerca de la laguna de La Magdalena a 3,685 m (1°55´40’’ N – 76° 35´8’’ W)” en la cordillera de los Andes, en el extremo suroccidental de una corta planicie del páramo de Las Papas (departamento del Huila), y desemboca en el mar Caribe después de recorrer 1,540 km, atraviesa de sur a norte los departamentos de Huila y Tolima, el Magdalena medio inicia a partir de la ciudad de Honda. Su cuenca hidrográfica abarca una extensión de 257,000 km², que corresponde a cerca del 23% de Colombia, y se encuentra enmarcada entre el Macizo Colombiano, el costado oriental de la cordillera Central al occidente, el costado occidental de la cordillera Oriental al oriente y por la planicie costera del Caribe al norte [19].

En consecuencia, los datos anteriormente nombrados como base principal de esta investigación, se hace referencia al caudal medio diario del río Magdalena, extraídos del IDEAM y la carga de sedimentos que este transporta, para llevar una modelación hidrodinámica sin inundaciones en el software Iber, con el fin de, modelar diferentes formas de pilas, ya que, en los últimos años estas investigaciones han tomado cada vez más peso en cuanto a sus formas, bien sea, circulares y cuadradas, que son las más comunes, todo esto con respecto a una carga específica de sedimentos, dependiendo la ubicación del río, que como resultado de varias investigaciones presenta socavación.

En relación con este tema se tiene: “Las estructuras como, p.ej., pilares de puentes, pueden modificar a largo plazo el fondo del canal de aguas corrientes. Las condiciones de flujo modificadas por la estructura pueden provocar la formación de socavación en el fondo del canal en el entorno directo de la estructura” [20] y es allí donde se centra esta investigación, debido a la necesidad que se tiene de saber el tipo de pila más óptimo en cuanto a diseñar y como esta forma influye en el transporte de sedimentos y la hidrodinámica.

Para ello se plantea: ¿cuál es el efecto que tiene utilizar diferentes formas de pilas en los puentes con respecto al transporte de sedimentos?

6. MARCO DE REFERENCIA

6.1. MARCO TEÓRICO

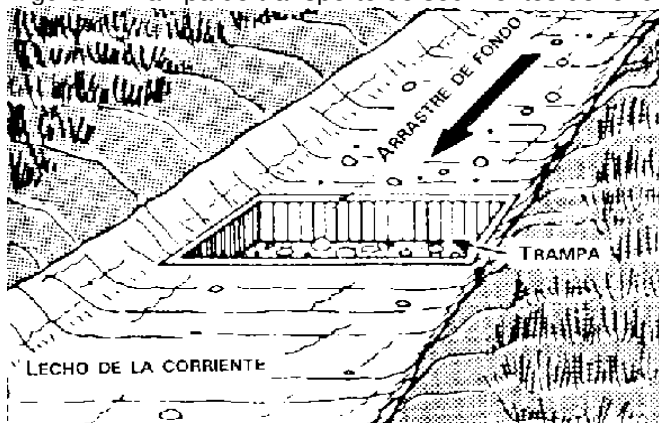
La información acerca de la erosión del suelo y los efectos en el agua, la calidad en las escalas de captación es cada vez más investigada por captadores y gestores. Esta información es necesaria a escalas temporales y espaciales que reflejan el tiempo y patrón de movimiento de sedimentos en respuesta a eventos de precipitación. La mayoría de los modelos que han sido desarrollados para proporcionar información sobre la erosión y los procesos de calidad del agua son inapropiados para proporcionar pronósticos basados en la escala de captación y basados en eventos de cargas de sedimentos. Pueden sufrir una serie de problemas, incluyendo un sobredimensionamiento, requisitos de insumos poco acertados, inadecuación de supuestos o parámetros del modelo a las condiciones locales, y documentación inadecuada de las pruebas de modelos y el resultado final [21].

6.1.1. Arrastre de sedimentos

Las partículas que son erosionadas en una cuenca, una porción es arrastrada por el flujo y la otra porción es atrapada por la cobertura vegetal y topografía de la cuenca. La porción que es arrastrada por la corriente se puede depositar en zonas que la misma corriente lo permite, en sitios donde el flujo no permite el arrastre o lo permite para otras condiciones que se necesitan para el mismo depósito. Cuando ocurre el arrastre, el suelo es erosionado y las partículas son transportadas hacia los depósitos, así hasta volverse a presentar las condiciones de arrastre [22].

En la figura 1, muestra la forma en la cual se puede tomar una muestra de arrastre de fondo, por un dispositivo que se encuentra situado por debajo del lecho del río durante un tiempo determinado que luego es extraída esta muestra para pesarla [23].

Figura 1. Trampa de transporte de sedimentos de fondo



Fuente: Medición sobre el terreno de la erosión del suelo y de la escorrentía [23]

El arrastre de sedimentos se divide en tres fases: erosión, transporte y depósito, aunque en el presente trabajo solo nos enfocamos en el transporte de sedimento el cual puede dividirse por:

- Tracción: Cuando la velocidad de las partículas erosionables es menor que la velocidad del agua [23].
- Suspensión: Ambas velocidades tanto la velocidad de las partículas como la del agua, son iguales [23].

Los estudios sobre el arrastre de sedimentos tienen diferentes propósitos, entre ellos:

- La calibración de coeficientes de “n de Manning” con datos de campo, que son tomados a partir de aforos y batimetrías [22].
- La evaluación de la capacidad de transporte líquido y sólido de los cauces, detallando características de las partículas erosionables [22].
- La calibración de modelos de transporte de sedimentos para definir zonas de agravación, degradación o equilibrio [22].
- Descripción de la dinámica fluvial de los cauces, caracterización de material sedimentable y de suspensión, perfiles de flujo para diferentes caudales, capacidad de transporte líquido y sólido [22].

En el siguiente cuadro se presenta valores de la "velocidad de sedimentación" correspondiente a partículas de peso específico 2,65 kg./dm.3 y a una temperatura del agua de 10° C, teniendo en cuenta distintos diámetros y los tiempos necesarios para sedimentar 0,3 m [23].

Tabla 1. Velocidad de sedimentación – Partículas de peso específico 2,65 Kg. /dm.3

D(mm)	Clasificación	Velocidad de sedimentación (mm/s)	Tiempo para sedimentar 0,3m
10.0	Grava	100.00	0.30
1.0	Grava	100.00	3.0
0.1	Arena gruesa	8.00	38.0
0.0	Arena fina	0.154	33.0
0.0	Bacterias	0.00154	35.0
0.0	Coloides	0.0000154	230.0
0.0	Coloides	0.000000154	63.0

Fuente: Teoría de la sedimentación – Instituto de Ingeniería Sanitaria y Ambiental [24]

6.1.2. Arrastre de sedimentos por escorrentía directa

Una gran parte del agua de los afluentes que llevan las corrientes se origina como escurrimiento directo y proviene de las laderas colindantes. Además, el agua que se mueve sobre estas superficies produce erosión de los materiales de las pendientes laterales del río, que dan origen a parte del material y este es transportado en el cauce [25].

“El escurrimiento o escorrentía superficial, que fluye como una lámina de agua, o en canales someros muy juntos entre sí, llamados arroyuelos o cárcavas, es algunas veces suficientemente poderoso para vencer la resistencia del suelo a la erosión y transportar una gran cantidad de material pendiente abajo hacia los cauces de los ríos. El agua lodosa que escurre de un campo arado o de una pendiente recién nivelada durante una lluvia abundante es un ejemplo familiar de la fuerza erosiva de la escorrentía” [25]

6.1.3. Transporte de sedimentos en corrientes naturales

El área total que es cubierta por las corrientes es solo una pequeña porción de la superficie total del terreno drenado por dichas corrientes que puede ser menores del 1%, sin embargo, los componentes de transporte de sedimentos en las corrientes naturales son los más relevantes en los estudios [25].

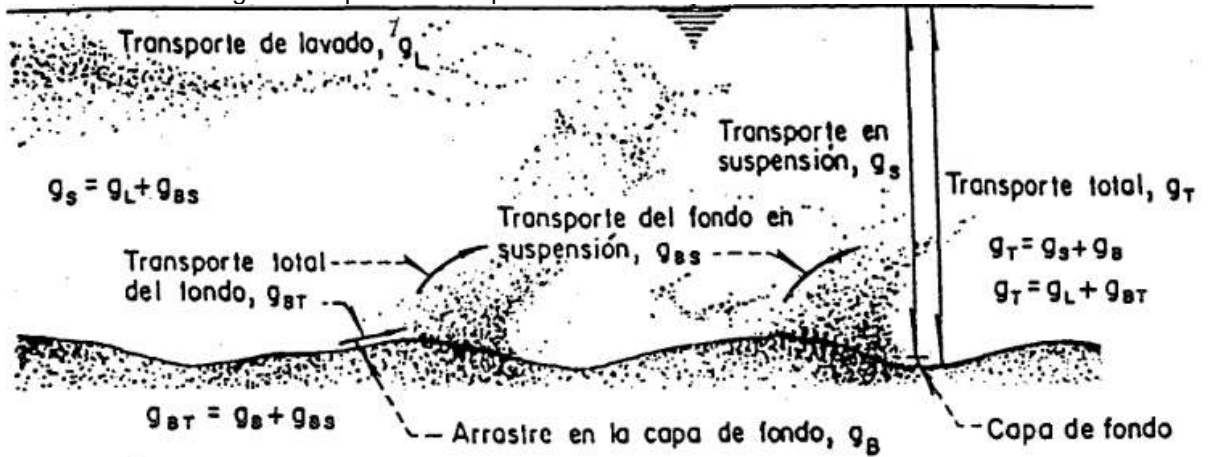
El agua que corre a lo largo de las corrientes de los ríos realiza varios trabajos:

- a) Erosiona el cauce del río profundizándolo y/o ampliándolo
- b) Transporta sedimentos
- c) Deposita sedimentos

6.1.4. Distribución de transporte de sedimentos

El transporte de sedimentos se distribuye en dos grandes grupos que son la carga de lecho y la carga lavada, que se diferencian principalmente por las características hidráulicas del flujo y las características físicas de cada material, asimismo la carga lavada depende de las condiciones propias de la cuenca hidrográfica y usualmente es por el material más fino como arcillas y limos que pueden surgir por la erosión del mismo río en sus laterales, mientras que, el material de lecho es transportado por el fondo del río o en suspensión en toda la columna de agua. Sin embargo, el material que es transportado en suspensión suele ser muy fino y por ello puede sedimentarse [25].

Figura 2. Tipos de transporte de sedimentos en corrientes naturales



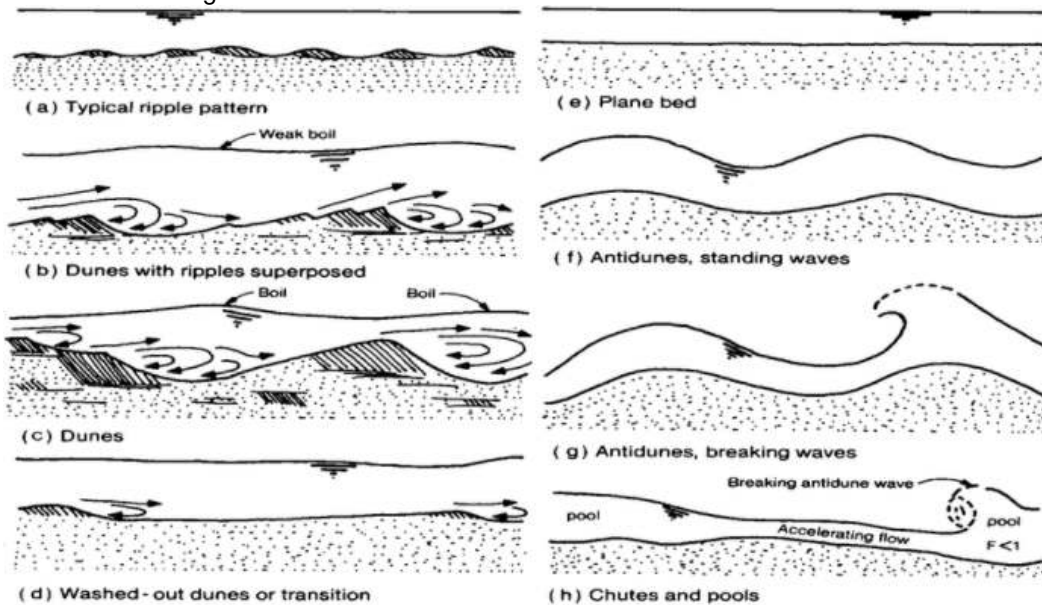
Fuente: Capítulo 10, transporte de sedimentos – Manual de Ingeniería de ríos [26].

6.1.5. Propiedades de los sedimentos

Los procesos de suspensión, transporte y posterior deposición del sedimento, dependen de los parámetros que los definen, pero no sólo de las condiciones del flujo sino también de las características de la partícula, se consideran características, tales como: el tamaño, la forma, la distribución granulométrica, densidad, peso específico y concentración [25].

6.1.6. Formas de lecho idealizadas en canales aluviales

Figura 3. Formas de lecho idealizadas en canales aluviales



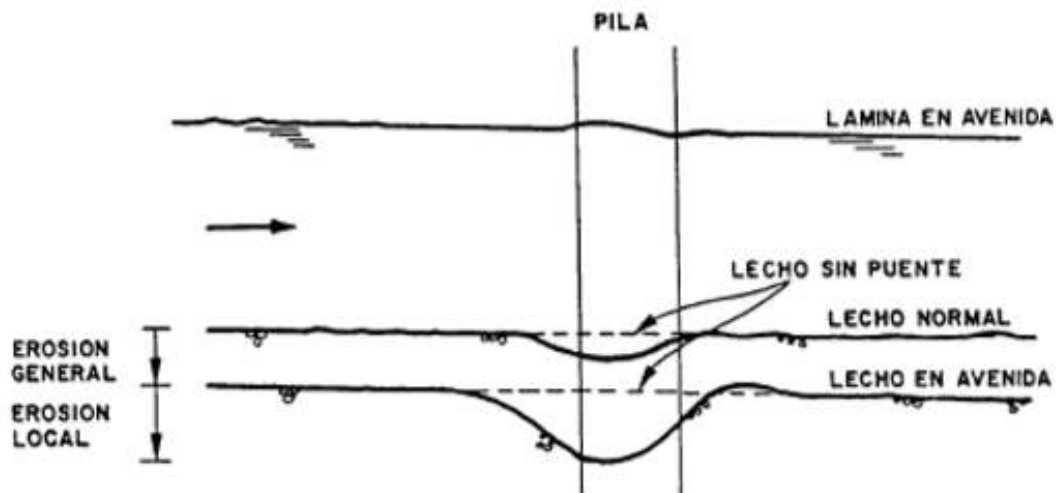
Fuente: "Summary of alluvial channel data from flume experiments-1956-61"[27]

6.1.7. Erosión en pilares de puentes

La erosión es “la capacidad de transporte es función de la velocidad del flujo, la introducción de estructuras que cambien la velocidad del flujo casi siempre está acompañadas de cambios en el fondo de ríos con fondo móvil” [1].

El total de erosión en el cauce de una corriente natural está compuesto por tres mecanismos que son complementarios: en primer lugar, la erosión general, que es a largo plazo, generada por la elevación del lecho del cauce (erosión general o sedimentación), la cual podrá ocurrir esté o no el puente. Por otro lado, la erosión por contracción, es el resultado de la restricción de la vía fluvial o canal ya sea natural o debido a una estructura y a sus aproximaciones, asimismo, la erosión local es consecuencia de la obstrucción del flujo estructuras como los cimiento del puente, las cuales aceleran el flujo, creando los vórtices, esto son los responsables de que se remueve el material alrededor de ellos [1].

Figura 4. Esquema típico de erosión en un pilar de un puente



Fuente: “Hidráulica de puentes” extractos de la tesis “dimensionamiento hidráulico optimizado de puentes con terraplenes” [1]

Los elementos de la erosión específica en el caso de un puente son dos:

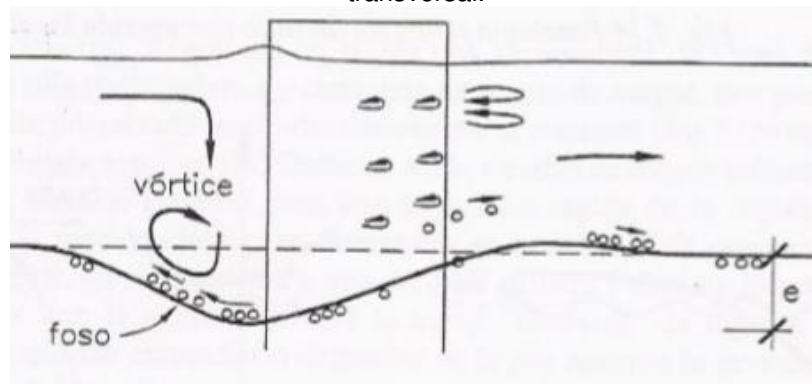
- La erosión en la sección del puente y sus inmediaciones, se debe al ancho ocupado por la inundación antes de la existencia de este, a lo anterior se le conoce como erosión localizada [1].
- La erosión local en pilares, estribos y otros elementos estructurales que son rodeados por las corrientes naturales [1].

6.1.8. Erosión local en pilares

La erosión local es causada por el flujo alrededor de los pilares de un puente, este fenómeno consiste en que alrededor del pilar las velocidades son mayores que las de las corrientes naturales, que son acompañadas de un “sistema de vórtices frontales, laterales y de estela detrás del pilar” [1].

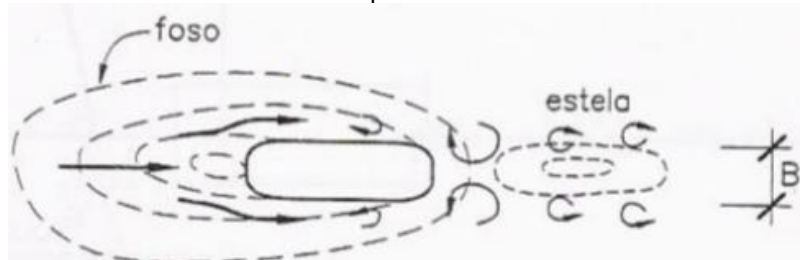
Este sistema de vórtices es el principal responsable de la socavación. “Los granos del lecho son aspirados por los vórtices y el fondo parece hervir por el movimiento de los granos” [1]. El depósito que forma rodea al pilar, con la mayor profundidad y extensión situada en la cara frontal como se muestra en las siguientes figuras:

Figura 5. Formación de estelas y vórtices alrededor de un pilar: Vista transversal.



Fuente: “Hidráulica de puentes” extractos de la tesis “dimensionamiento hidráulico optimizado de puentes con terraplenes” [1]

Figura 6. Formación de estelas y vórtices alrededor de un pilar: Vista en planta.



Fuente: “Hidráulica de puentes” extractos de la tesis “dimensionamiento hidráulico optimizado de puentes con terraplenes” [1]

6.1.9. Determinación de la Erosión Local en Pilares

La erosión que sucede en los pilares es debido a la aceleración de flujo alrededor del mismo y la formación de los vórtices del flujo (conocido como el vórtice de herradura). El vórtice remueve el material desde la base de la estructura, dando así el origen a un foso de erosión. Según la profundidad de erosión aumenta, la magnitud del vórtice de herradura se reduce, disminuyendo de este modo, la tasa a

la cual el material es removido del foso. Finalmente se alcanza un equilibrio entre el material del fondo entrando y saliendo del foso, y el foso de erosión deja de crecer [1].

Los factores que afectan la profundidad de la erosión local en un pilar son: la velocidad del flujo justo aguas arriba del pilar; la profundidad del flujo; el ancho del pilar; la longitud del pilar si es oblicuo al flujo; el tamaño y gradación del material del lecho; el ángulo de ataque del flujo; la forma del pilar; la configuración del lecho; y la formación de obstrucciones de hielo y material flotante (palizada). [1]

6.1.10. Teoría de arrastre de sedimentos

Método de Einstein: El autor Albert Einstein considera en su método “una fuerza crítica tractiva como particularidad del caudal y la probabilidad de movimiento o depósito de las partículas de sedimento” [23]. Por otra parte, se tiene en cuenta para evaluar el transporte de sedimentos el material que levantado del fondo se mueve en suspensión, asimismo, el que se mueve por el fondo del terreno, en función de la probabilidad de que el material sea o no removido del fondo por el flujo; utilizando una serie de gráficas y tablas que facilitan el cálculo. “Su rango de aplicación es para partículas no cohesivas y cuyos diámetros están comprendidos entre 1 y 10 mm”[23].

Método de Bagnold: Para la estimación del transporte de sedimentos Ralph Alger Bagnold, tiene en cuenta “el proceso natural de transporte desde una perspectiva de la física, considera al igual que Einstein, que el arrastre total es igual al arrastre de fondo más el arrastre en suspensión de las partículas provenientes de la capa fondo” [23]. Además, considera las velocidades del caudal en cada punto, el peso sumergido de las partículas, la fuerza necesaria que debe ejercer el fluido para desprenderse y ser movidas e introduce factores de corrección para tomar en cuenta las velocidades del caudal y que los esfuerzos no siguen la misma dirección. “Este método se limita ya que solo puede ser utilizado para materiales friccionantes y cuyos diámetros no sean menores de 0.015 mm”[23].

Método de Lischtvan – Lebediev: Este método permite establecer el valor de la erosión general en cualquier sección a lo largo de un río, en el cálculo de la erosión “se considera que al aumentar la velocidad del flujo se incrementa la capacidad de arrastre del caudal, resultando en consecuencia un cambio en la sección del fondo” [23]; al descender el fondo aumenta poco a poco el área hidráulica, reduciéndose gradualmente el valor medio de la velocidad del caudal y por lo tanto la velocidad de arrastre, hasta el instante en el que se alcanza el estado de equilibrio. “El equilibrio se produce cuando es igual la velocidad media del flujo y la velocidad media que se requiere para que las partículas características sean arrastradas”[23].

Método de Laursen Laursen (1958): Este método se desarrolló en función de las características hidráulicas del río así como de las granulometrías del material del fondo”[23] y basándose además en resultados obtenidos en laboratorio nos

presenta para la determinación del transporte de sedimentos, su método “basado en dos parámetros; uno es la relación de la velocidad al esfuerzo cortante y la velocidad de caída de las partículas sólidas, el cual expresa la efectividad de la acción de mezclado de la turbulencia, el segundo parámetro se ocupa del concepto del arrastre de UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO fondo, el rango de aplicación para este método es para materiales no cohesivos y cuyos diámetros están comprendidos entre 0.01 y 4.08 mm”[23].

6.1.11. Iber

El software utiliza tres módulos, un módulo hidrodinámico, un módulo de turbulencia y un módulo de transporte de sedimentos, y trabaja con el método de volúmenes finitos para solucionar las ecuaciones correspondientes. Al módulo de cálculo se le ha adaptado una interfaz que se basa en el software de preproceso y postproceso GiD, desarrollado por CIMNE. En consecuencia, es una herramienta de modelización numérica del flujo de agua y sedimentos en cauces y estuarios, que utiliza esquemas numéricos avanzados especialmente estables y robustos en cualquier situación, pero fundamentalmente adecuados para flujos discontinuos y, en concreto, para cauces caudalosos y regímenes irregulares[28].

Según la modelación matemática en el software Iber, predice valores que toman variables hidráulicas como; calado que es la profundidad, velocidades, caudal, etc., a partir, de la simulación de diferentes necesidades a la hora de estudiar fenómenos que día a día son más complejos, donde se puede suponer un flujo bidimensional, esto quiere decir que, las dimensiones horizontales predominan en las verticales y al lado de la capacidad de cada uno de los ordenadores se puede obtener datos más específicos correspondientes a ecuaciones de aguas superficiales y esquemas representados bidimensionalmente [29].

En el módulo de arrastre de sedimentos se solucionan las ecuaciones de transporte por carga de fondo y en suspensión. Teniendo en cuenta ambos modos de transporte se calcula el cambio de la cota del fondo debido a procesos de sedimentación y erosión mediante la ecuación de Exner. En la totalidad de los casos se utilizan granulometrías uniformes [28].

El transporte en suspensión se calcula resolviendo la ecuación de convección-difusión mediada en profundidad para la concentración de sedimento, incluyendo la deposición suspensión que “modela el intercambio de sedimento entre el lecho y la carga en suspensión” [28].

6.1.12. Modelo numérico Iber

“El módulo hidrodinámico de Iber resuelve las ecuaciones de St. Venant bidimensionales, incorporando los efectos de la turbulencia y rozamiento superficial por viento” [28]

$$\begin{aligned}
\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hU_x}{\partial x} + \frac{\partial hU_y}{\partial y} &= 0 \\
\frac{\partial}{\partial t}(hU_x) + \frac{\partial}{\partial x}\left(hU_x^2 + g\frac{h^2}{2}\right) + \frac{\partial}{\partial y}(hU_xU_y) \\
&= -gh\frac{\partial Z_b}{\partial x} + \frac{\tau_{s,x}}{\rho} - \frac{\tau_{b,x}}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x}\left(v_t h \frac{\partial U_x}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(v_t h \frac{\partial U_x}{\partial y}\right) \\
\frac{\partial}{\partial t}(hU_y) + \frac{\partial}{\partial x}(hU_xU_y) + \frac{\partial}{\partial x}\left(hU_x^2 + g\frac{h^2}{2}\right) \\
&= -gh\frac{\partial Z_b}{\partial y} + \frac{\tau_{s,y}}{\rho} - \frac{\tau_{b,y}}{\rho} + \frac{\partial}{\partial y}\left(v_t h \frac{\partial U_y}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial x}\left(v_t h \frac{\partial U_y}{\partial x}\right)
\end{aligned}$$

En donde “h es el calado, U_x , U_y son las velocidades horizontales promediadas en profundidad, g es la aceleración de la gravedad, ρ es la densidad del agua, Z_b es la cota del fondo, s es la fricción en la superficie libre debida al rozamiento producido por el viento, b es la fricción debida al rozamiento del fondo y t es la viscosidad turbulenta. La fricción de fondo se evalúa mediante la fórmula de Manning como”[28]

$$t_{b,x} = \rho gh \frac{n^2 U_x |U|^2}{h^{4/3}} \quad t_{b,y} = \rho gh \frac{n^2 U_y |U|^2}{h^{4/3}}$$

La ecuación para calcular la velocidad del viento a 10m de altura, por medio de Van Dorn [28].

$$t_{s,x} = \rho C_{VD} |V_{10}| V_{x,10} \quad t_{s,y} = \rho C_{VD} |V_{10}| V_{y,10}$$

Donde, “ $V_x, 10, V_y, 10$ son las 2 componentes de la velocidad del viento a 10 m de altura, $|V_{10}|$ es el módulo de la velocidad del viento a 10 m de altura y C_{VD} es un coeficiente de arrastre superficial” que se calcula en función de la velocidad del viento a partir de la siguiente expresión: [28]

$$\begin{aligned}
|V_{10}| < 5,6 \text{ m/s} &\rightarrow C_{VD} = 1,2 \cdot 10^{-6} \\
|V_{10}| \geq 5,6 \text{ m/s} &\rightarrow C_{VD} = 1,2 \cdot 10^{-6} + 2,25 \cdot 10^{-6} \left(1 - \frac{5,6}{|V_{10}|}\right)^2
\end{aligned}$$

Los parámetros en Iber pueden son basados en las ecuaciones hidrodinámicas, donde se incluye el coeficiente de rugosidad y la velocidad del viento. “Iber incluye tres modelos de turbulencia promediados en profundidad: el modelo parabólico, un modelo de longitud de mezcla y el modelo k-ε de Rastogi y Rodi. En el modelo parabólico se calcula la viscosidad turbulenta” [28] como:

$$v_t = 0,068 u_f h \quad u_f = \sqrt{tb/\rho}$$

Siendo u_f la velocidad de fricción de fondo. Teniendo en cuenta la fórmula de Manning para calcular la fricción de fondo se obtiene la siguiente expresión para la viscosidad turbulenta: [28]

$$v_t = 0,068\sqrt{gn}|U|H^{5/6}$$

En el modelo de longitud de mezcla para aguas someras, la viscosidad turbulenta se calcula mediante la siguiente expresión:

$$v_t = [\min(0,267kh, kd_{wall})]^2 \sqrt{2S_{ij}S_{ij} + (2,34\frac{u_f}{kh})^2} \quad S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial X_j} + \frac{\partial U_j}{\partial X_i} \right)$$

Tabla 2. Valores de E dependiendo de las características del flujo

Tipo de régimen	$K_S^+ = K_S U_* / V$	$ U = \frac{U_*}{K} \ln(E * d^+)$
Turbulento liso	$K_S^+ < 5$	$E = 9,0$
Transición liso - rugoso	$5 < K_S^+ < 70$	$E = (0,11 + 0,33 * K_S^+)$
Turbulento rugoso	$K_S^+ > 70$	$E = 30/K_S^+$

Fuente: Herramientas de simulación numérica del flujo en ríos [28]

En donde “0,41 es la constante de Von Karman y Dwall es la distancia desde el punto considerado a la pared más cercana” [28]. “El modelo k-ε de Rastogi y Rodi resuelve una ecuación de transporte para la energía cinética turbulenta k y para la tasa de disipación de energía turbulenta ε” [28], de la siguiente forma:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial U_x k}{\partial x} + \frac{\partial U_y k}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(v + \frac{v_y k}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + 2U_t S_{ij} S_{ij} + U_k \frac{u_f^3}{h} - \varepsilon$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial U_x \varepsilon}{\partial x} + \frac{\partial U_y \varepsilon}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(v + \frac{v_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + c_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} 2v_t S_{ij} S_{ij} + c_\varepsilon \frac{u_f^4}{h^2} - c_\varepsilon 2 \frac{\varepsilon^2}{k}$$

$$v_t = c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad c_k = c^{-\frac{1}{2}f} \quad c_\varepsilon = 3,6c_{\varepsilon 2}^{\frac{3}{2}} c_{\varepsilon 1}^{\frac{3}{2}} \quad c_f = \frac{\tau b}{\rho} \frac{1}{|u|^2}$$

$$c_\mu = 0,09 \quad c_{\varepsilon 1} = 1,44 \quad c_{\varepsilon 2} = 1,92 \quad \sigma_k = 1,0 \quad \sigma_\varepsilon = 1,31$$

“Ecuaciones tomadas de la Revista Internacional de métodos numéricos para el cálculo y diseño en ingeniería – Iber: Herramienta de simulación numérica del flujo en ríos” [28].

6.1.13. Transporte de fondo (Manual referencia hidráulico de Iber)

Partición de tensiones en el transporte de sedimentos de fondo

La tracción de fondo total en el lecho de un río es proporcionada por la rugosidad del material, dependiendo del diámetro de la partícula de sedimento, como también por la forma del fondo (rizos, dunas o antidunas), esto favorece al movimiento de sedimentos por carga de fondo, es por ello que es necesario “estimar la tensión de fondo debida al material o partícula, implementada por la partición de tensiones de Einstein” [30], calculada a partir de la tensión total:

$$\tau_{bs}^* = \tau_b^* \cdot \left(\frac{n_s}{n}\right)^{1.5} \quad n_s \approx \frac{K_s^{\frac{1}{6}}(m)}{25} \quad K_s \approx 2 \div 3D_s$$

siendo n el coeficiente de Manning total, n_s el coeficiente de Manning equivalente debido a grano, D_s el diámetro del sedimento, k_s la altura de rugosidad de grano (calculada a partir del diámetro del sedimento), τ_b la tensión total de fondo, τ_{bs} la tensión de fondo debida a grano, τ_b^* , τ_{bs}^* las tensiones total y de grano adimensionales, calculadas como [30]:

$$\tau_b^* = \frac{\tau_b}{(\rho_s - \rho)gD_s} \quad \tau_{bs}^* = \frac{\tau_{bs}}{(\rho_s - \rho)gD_s}$$

Donde “ ρ_s es la densidad del sedimento y ρ es la densidad del agua. En Iber se ha utilizado $k_s = 2.5 D_s$ ” [30]

Caudal sólido de fondo – Ecuaciones para el transporte de sedimentos en Iber

En el software Iber se presentan las ecuaciones más utilizadas, como la de Meyer-Peter Müller y Van Rijn [30].

6.1.14. Ecuación de Meyer-Peter Müller (1948)

La ecuación original de Meyer-Peter y Müller, dada para “fondos de grava de hasta 30 mm de diámetro” [30], calcula el caudal sólido de fondo con la siguiente ecuación:

$$q_{sb}^* = 8 \cdot (\tau_{bs}^* - \tau_c^*)^{\frac{3}{2}} = 8 \cdot (\tau_{bs}^* - \tau_c^*)^{\frac{3}{2}}$$

Y el caudal sólido adimensional se calcula como:

$$q_{sb}^* = \frac{q_{sb}}{\sqrt{\left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1\right) g D_8^3}}$$

Si el fondo fuera plano “se considera una tensión crítica de fondo adimensional de $\tau_c^* = 0.047$ ” [30]. En caso contrario, es necesario realizar una corrección por pendiente de fondo. “Tras volver a analizar los datos utilizados para derivar la ecuación anterior, Wong (2003) y Wong y Parker (2006) sugieren la siguiente corrección” [30]:

$$q_{sb}^* = 3.97 \cdot (\tau_{bs}^* - \tau_c^*)^{\frac{3}{2}}$$

Corrección por pendiente de fondo según ecuación de Meyer-Peter Müller (1948)

Cuando el fondo es irregular, las ecuaciones anteriormente nombradas deben modificarse para tener en cuenta el efecto de la gravedad, de dos maneras, primero en el sentido de aumentar el transporte de fondo con pendiente positiva, y consecutivamente disminuirlo con pendiente adversa [30].

Teniendo en cuenta que “**b** es un vector unitario en la dirección de la línea de máxima pendiente, la tensión efectiva adimensional” [30] se define como:

$$\tau_{bs,eff}^* = \tau_{bs}^* + D_o \cdot \sin \beta \cdot b$$

donde “ β es el ángulo de la línea de máxima pendiente con la horizontal, y D_o un parámetro de forma de la partícula, para que en ausencia de flujo el movimiento empiece cuando β es igual al ángulo de rozamiento interno del material (ϕ), el parámetro D_o ” [30] se define como:

$$D_o = \frac{\tau_{c,0}^*}{\tan \phi}$$

en donde “ $\tau_{c,0}$ es la tensión crítica adimensional para fondo plano. Por otro lado, la tensión crítica efectiva se reduce proporcionalmente a la componente de la gravedad normal a la pendiente de fondo” [30]:

$$\tau_{eff,crit}^* = \tau_{c,0}^* \cdot \cos \beta$$

siendo $\tau_{c,0}$ la tensión crítica adimensional para fondo plano. A partir de aquí se utilizan las fórmulas de caudal sólido mostradas en el punto anterior, pero reemplazando las tensiones (de fondo y crítica) por tensiones efectivas, y obteniendo el caudal sólido [30].

Las ecuaciones anteriormente enunciadas son las que toma en cuenta el programa de Iber 2.5.2, se extrajeron de Iberaula [30].

6.1.15. Ecuación de Engelund-Hansen, 1967

“La metodología de (Engelund & Hansen, 1967)” [31] es utilizada con frecuencia en ríos y estuarios, y está basada en una consideración energética, la cual establece una relación entre los parámetros de transporte y movilidad. A continuación, se presentan las ecuaciones:

$$S = s_b + s_{s.eq} = \frac{0.05\alpha q^5}{\sqrt{g}c^3\Delta^2D_{50}}$$

Donde “ q es la magnitud de velocidad de flujo, Δ representa la densidad relativa ($\rho_s - \rho_w / \rho_w$), C es el coeficiente de fricción de Chézy, y α es el coeficiente de calibración” [31].

6.2. MARCO CONCEPTUAL

Para el desarrollo de esta investigación fue necesario tener en cuenta términos básicos como: sedimentos, transporte de sedimentos, modelación numérica en Iber y formas de pilas en los puentes.

Se entiende por sedimento a todas las partículas de suelo y roca de una cuenca que es arrastrado y transportado por una corriente de agua. En corrientes aluviales, las fuerzas hidrodinámicas se ejercen sobre las partículas de sedimento en la superficie del lecho. Un aumento en la velocidad del flujo induce una mayor magnitud de las fuerzas hidrodinámicas.

El movimiento inicial de las partículas de sedimento es comúnmente llamado movimiento incipiente. La condición que es adecuada para iniciar el movimiento del sedimento se denomina umbral o condición crítica. El umbral del movimiento del sedimento en la geomorfología fluvial o la hidráulica de lecho móvil es un módulo importante de la gestión de los sistemas fluviales y constituye el mecanismo fundamental de La teoría del transporte de sedimentos.

El transporte de sedimentos latentes y el nivel de lecho asociado cambian bajo condiciones de corrientes cuasi-estables combinadas e inducidas por el viento olas sobre un lecho de sedimentos. El modelo resuelve lo general, ecuaciones de advección-difusión incorporando un coeficiente de retraso para cuenta para la sedimentación de sedimentos [32].

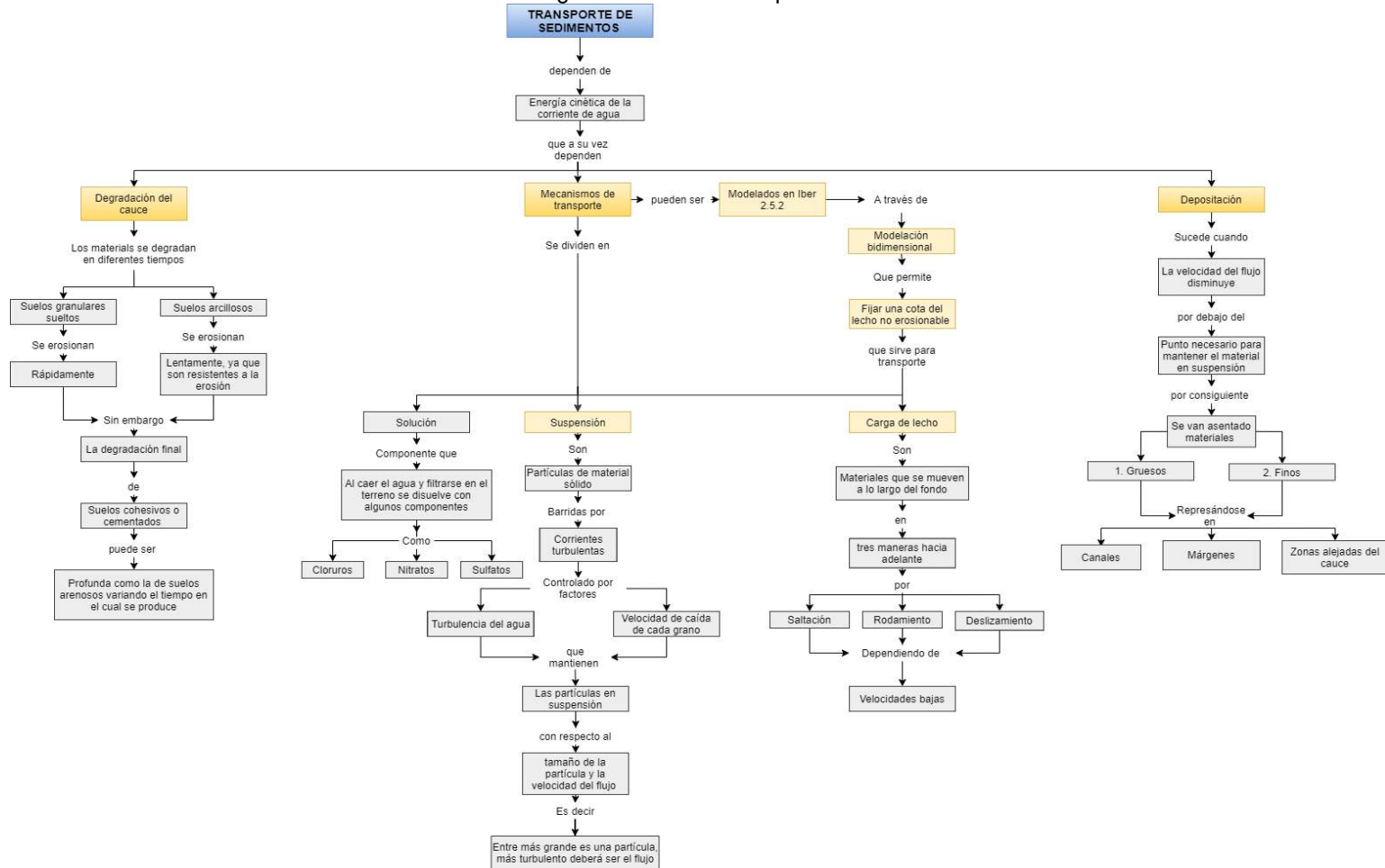
Por consiguiente, cuando existe flujo de agua con una velocidad que supere el umbral del movimiento, se presentará el transporte de sedimentos o “arrastre de fondo que es aquella partícula de sedimento total que una corriente natural transporta, sobre o muy cerca del fondo del cauce, la cual se mueve por saltos, arrastre o rodando [33].

La capacidad computacional permitió el acoplamiento de modelos de calidad del agua con cuencas hidrográficas y modelos hidrodinámicos, como resultado, se han dado a disposición variedades de modelos, y la elección del modelo correcto se convirtió en un desafío. [34]

Para este proyecto es fundamental tener suficiente conocimiento en el software Iber, Iber es un modelo hidráulico bidimensional para la simulación del flujo de superficie libre en ríos y estuarios, Iber resuelve hidrodinámica, turbulencia, transporte de sedimentos, procesos de calidad del agua y hábitat, es decir, donde se realiza la modelación en el que se ve el transporte de sedimentos con respecto a la cimentación de un puente según las formas de las pilas y el efecto que cada una de ellas produce.

En la siguiente ilustración se muestra detalladamente la esquematización de los conceptos:

Figura 7. Marco conceptual



Fuente: Autores

7. OBJETIVOS

7.1. OBJETIVO GENERAL

Analizar el efecto que tiene las formas de las pilas en el comportamiento hidrodinámico y en el transporte de sedimentos de fondo para un tramo de un río, mediante la modelación en Iber.

7.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar un análisis bibliográfico de la información existente relacionada con la modelación de pilas en puentes.
- Definir un tramo de estudio que cuente con la información necesaria para realizar el análisis del comportamiento hidrodinámico y el transporte de sedimentos de fondo en dicho tramo.
- Modelar el tramo de estudio configurando las diferentes formas de pilas que se presentan en los puentes.
- Comparar el efecto que tiene las diferentes formas de pilas, en el comportamiento hidrodinámico en el transporte de sedimentos.

8. ALCANCES Y LIMITACIONES

Esta investigación busca analizar el efecto que tienen las diferentes formas de pilas en los puentes, con respecto al transporte de sedimentos, teniendo en cuenta un modelo base establecido, que bajo las condiciones básicas de un flujo crítico/subcrítico este modelo sea calibrado, por otra parte, observar y notificar el comportamiento hidrodinámico, así como, el análisis de las distintas configuraciones de forma de pilas en los puentes, ubicado en un tramo del extenso río Magdalena que transita a orillas del municipio de Magangué ubicado en el departamento de Bolívar.

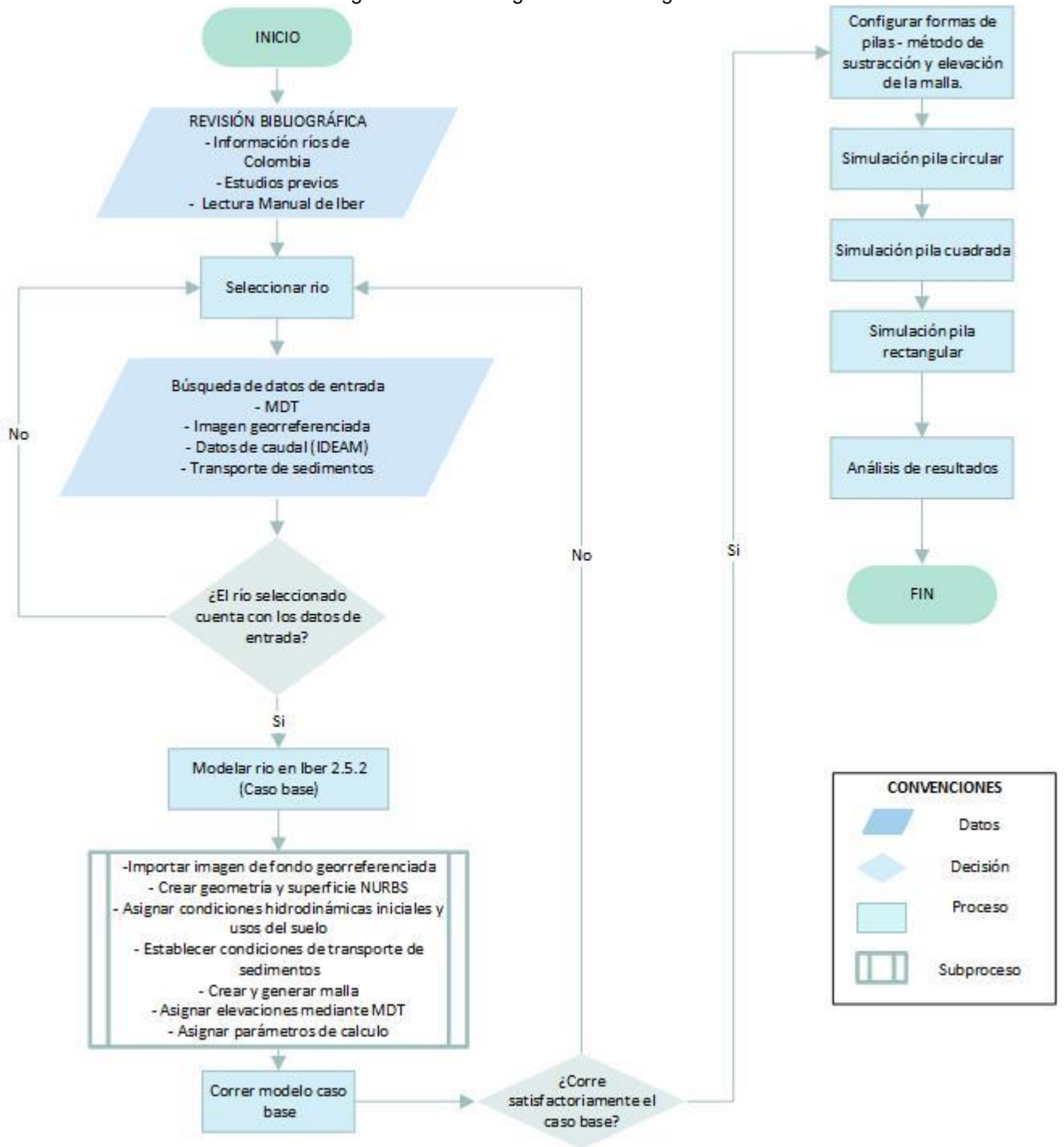
Limitaciones:

- Acceso a la información de entrada, ya que al momento de calibrar el modelo se debe tener en cuenta un MDE (modelo digital de elevación) y un MDT (modelo digital del terreno) como base en la modelación de un tramo de río, este último siendo el más importante para la generación del modelo.
- Errores en el MDT (modelo digital del terreno) con respecto al tramo escogido, debido a la poca información topográfica que se encuentra de la zona de estudio, ya que, por la emergencia sanitaria a nivel mundial no se es posible realizar levantamientos topográficos.
- Existencia de datos específicos sobre el transporte de sedimentos en el tramo del río Magdalena.

Para mitigar las limitaciones anteriormente nombradas, existen documentos, artículos y libros de investigaciones sobre modelación hidrodinámica y transporte de sedimentos, por otra parte, Iberaulla brinda manuales en su página web, donde, presenta ejemplos básicos para la modelación, totalmente gratuitos.

9. METODOLOGÍA

Figura 8. Metodología de la investigación



Fuente: Autores

9.1. Selección zona de estudio

Para la selección de la zona de estudio se tuvo en cuenta, que el río contara con los siguientes parámetros: levantamiento topográfico, batimetría, una imagen georreferenciada de la zona de estudio, lo anterior, para la realización del MDT (modelo digital de terreno) y el MDE (modelo digital de elevación), los cuales fueron tomados del “Fondo de Adaptación – La Mojana, para el proyecto en fase I de las obras de protección de San Marcos (Sucre) y Magangué (Bolívar)”[35], ya que este proyecto implicó la elaboración de un modelo digital de terreno para 1.100.000 hectáreas sin antecedentes en Colombia, las cuales incluyeron el tramo en estudio.

Adicionalmente se tomaron datos de caudales históricos en el IDEAM para la realización de la duración de caudales, por otra parte, que presentara estudios de campo hallando el respectivo “n” de Manning para la calibración del modelo, asimismo, que este tramo registrara un d50 de sus sedimentos y existiera un transporte de sedimentos en dicho río. Por lo tanto, se escogió un tramo en la zona baja del río Magdalena – Bolívar en Colombia, ya que contaba con los parámetros especificados.

9.2. Descripción de la zona de estudio

La cuenca del Río Magdalena se encuentra limitada al Norte por el mar caribe y al sur por la estrella fluvial del macizo colombiano, “la cuenca es una región interandina en la mayor parte de su extensión y caribeña en su parte baja. La cuenca Magdalena- Cauca abarca una extensión de 256.000 km²”[16], además, posee ecosistemas como; bosque basal, bosque subandino, bosque andino y altoandino, páramo, secos, xerofíticos y subxerofíticos, humedales y transformados.

En la actualidad la cuenca del Magdalena está conformada por 3 macro unidades bien definidas de acuerdo con sus características geológicas, geomorfológicas y estructurales. Estas unidades corresponden a las depresiones interandinas de las cuencas de los ríos Magdalena y Cauca y a la cuenca baja del río Magdalena que representa la depresión del Caribe Colombiano [36], igualmente, la cuenca baja del Magdalena es una zona de subsidencia diferencial, producida por una tectónica de bloques que permite el depósito de sedimentos. Esta zona también se forma un valle aluvial extenso con llanuras de inundación, terrazas fluviales, complejos deltaicos y llanuras litorales. [36]

El tramo de estudio de 8 km, inicia en las coordenadas 9°12'11.69"N; 74°44'28.67"O, colindando con el corregimiento de Madrid – Bolívar, este perteneciente al municipio de Magangué y finaliza en las coordenadas 9°14'59.62"N; 74°44'10.88"O, colindando con el corregimiento de Belisario – Bolívar, este tramo pasa a orillas del municipio de Magangué Bolívar, conocido como la capital de los Ríos ya que desembocan los ríos de Cauca, San Jorge en el Magdalena. En la zona de estudio prevalecen los humedales, estos son zonas altamente dinámicas cuyos atributos hidrográficos, topográficos y edáficos, son

producto de procesos endógenos y exógenos como la sedimentación, desecación y deslizamientos entre otros [36]

Figura 9. Zona de estudio – Tramo río Magdalena - Magangué



Fuente: Google Earth Pro

9.2.1. Geología

El bajo Magdalena inundable, en los departamentos de Bolívar y Magdalena, entre los municipios de San Pablo y Magangué, es una región de clima cálido seco y sutilmente húmedo hacia el Sur, con déficit hídrico en los suelos que no se ven sometidos a inundación. Tiene una dinámica fluvial significativa que produce continuos cambios en el cauce del río Magdalena. “Sus suelos, anegados por largos períodos de tiempo, conforman la planicie de inundación, es decir, pertenecen al sistema de ciénagas. Contienen finos minerales y elementos orgánicos producto de la sedimentación, que los dotan de alta fertilidad” [36].

En segundo lugar, los suelos del Magdalena cálido seco, ubicados en la región comprendida entre Magangué y la desembocadura del río Magdalena. “Dependiendo de si las rocas sedimentarias originarias de los suelos son de partículas finas o gruesas, presentan alta o baja fertilidad” [36]. Por otra parte, están los suelos sobre arcillolitas en clima seco, que se encuentran sobre todo en climas cálidos secos, como en la cuenca baja del río Magdalena, y se forman a partir de la sedimentación de materiales transportados. También se los encuentra en áreas muy secas, donde “la precipitación está por debajo de los 500 mm al año, condición que genera desertización en las zonas no inundables”[36].

9.2.2. Sedimentos

El río Magdalena se caracteriza por transportar altas cantidades de sedimentos, fenómeno que experimenta un incremento gradual a lo largo del año. “Se estima un aporte de sedimentos a la depresión Momposina de 60 millones de metros cúbicos al año, de los cuales 34% provienen de la cuenca del Cauca y 66% de la del Magdalena. En esta zona inundable queda retenido el 14% de estos materiales” [36].

9.3. Modelación en Iber

Para llevar a cabo la modelación del caso de estudio, se dividió en tres procesos (Pre-proceso, Cálculo y Postproceso), los cuales se llevaron a cabo para el cumplimiento de los objetivos que se propusieron anteriormente, en primer lugar se encuentra el proceso llamado “Pre-proceso” el cual reúne una serie de trabajos para generar un modelo adecuado, en este modelo se introducen datos de entrada, tales como, creación o importación de la geometría, asignación de las condiciones de contorno, asignación de parámetros (rugosidad de fondo o “n” de Manning), generación de la malla de cálculo, asignación de las opciones generales de cálculo (tiempo de cálculo, parámetros del esquema numérico, activación de módulos adicionales, es decir, sedimentos), en segundo lugar se encuentra el proceso llamado “Cálculo” donde, se configuran los parámetros de cálculo y los módulos que se ejecutarán. Finalmente se analizó el proceso llamado “Post-proceso” en este se podrá analizar y visualizar los resultados, una vez terminado el proceso del “cálculo”.

Los casos que se ejecutaron en los siguientes procesos son: un caso base, donde se evaluó el comportamiento del río en estado natural, el siguiente caso es la creación de los pilares por el método de sustracción, es decir, que en la creación o importación de la geometría se realiza una sustracción de la superficie la cual el software toma esta condición como una obstrucción en el cauce. Finalmente, se lleva a cabo la creación de los pilares por el método de elevación de la malla, donde, se les asigna la elevación a las diferentes formas de pilares, luego de haber importado el MDE (modelo digital de elevación), se establece una elevación constante a los pilares.

9.3.1. Pre-proceso

- **Creación o importación de la geometría**

Inicialmente se importó una imagen de fondo georreferenciada del tramo del Río Magdalena con una longitud de 8 Km, esta imagen de fondo se descargó de Sasplanet, que fue tomada de la fuente de Google Earth, esto con el fin de crear o importar la geometría que es el punto de partida para la generación del modelo, esta geometría se puede generar a partir de líneas y puntos o a través de formatos estándar (dxf, shapefile, etc.), en este caso, se importó la geometría de civil 3d, junto

con las diferentes formas de pilas, luego, una vez establecida la geometría, se creó la superficie del modelo a la cual se le asignaron las condiciones de contorno.

Figura 10. Imagen de fondo y geometría del terreno - Río Ranchería



Fuente: Autores – Google Earth & Sasplanet

Nota: Se tomó la imagen georreferenciada de Google Earth, pero, únicamente un tramo de 8km de esta imagen, como se menciona en el apartado 12.1.1, en la creación o importación de la geometría, esta mostrada en la figura 10.

Para el dimensionamiento de las pilas se tuvieron en cuenta tres formas de pilas, las cuales fueron diseñadas a criterio propio, de acuerdo al ancho de la sección del río en el cual se realizó el estudio. A continuación, se muestra la tabla con las dimensiones de cada forma, ocupando la misma área en las secciones transversales de estas.

Tabla 3. Dimensionamiento de pilas

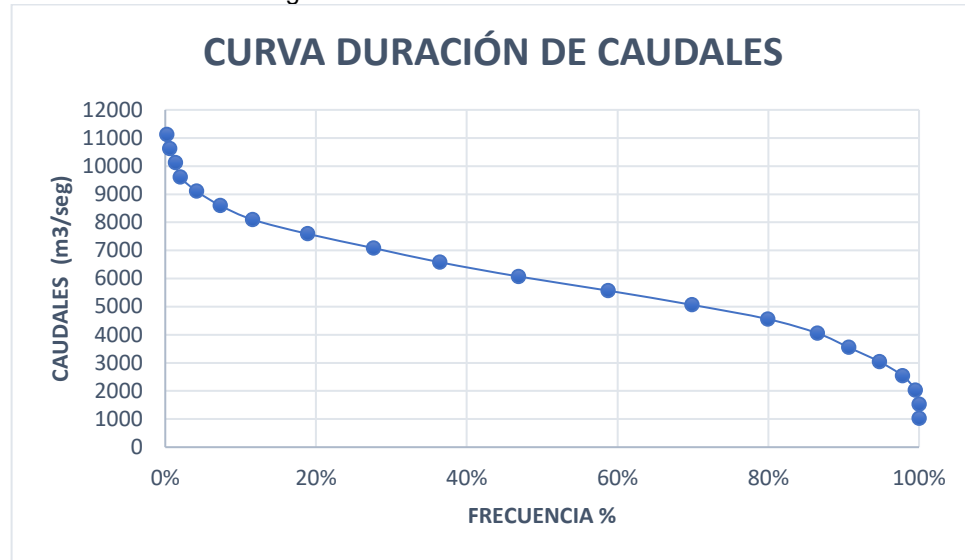
DIMENSIONES - PILAS					
Cuadradas		Circulares		Rectangulares	
				B(m)	12.5
B(m)	15	d (m)	17	H(m)	18
Área (m ²)	225	Área (m ²)	226.98	Área (m ²)	225

Fuente: Autores

- **Condiciones de contorno**

En esta etapa se asignan las condiciones iniciales, para ello se tomaron datos de caudales medios diarios del IDEAM, de la estación de MAGANGUÉ, cuyo código es 25027680, estos caudales se tomaron para realizar una curva de duración de caudales, la cual permitió encontrar el Q50 con el que se trabajó en el modelo, ya que ha sido el histórico de los caudales en la estación del IDEAM, desde 1973, bajo la condición de flujo permanente.

Figura 11. Curva duración de caudales



Fuente. Autores

Tabla 4. Porcentaje de excedencia.

Q1	9723.691	m3/seg
Q5	9421.255	m3/seg
Q10	9043.21	m3/seg
Q50	6018.85	m3/seg
Q75	4128.625	m3/seg
Q95	2616.445	m3/seg

Fuente: Autores

La figura 11, que muestra la gráfica de la curva de duración de caudales fue extraída de los datos del IDEAM, donde se consideraron desde 1 de marzo 1973 hasta el 29 de abril 2021, además, se realizó un porcentaje de excedencia donde se obtuvo un solo caudal (Q50) para lograr un flujo permanente, es decir, que en las secciones del río los elementos principales permanecieran constantes con respecto al pasar el tiempo.

- **Asignación de parámetros**

Ahora bien, se tienen en cuenta aspectos como el coeficiente de rugosidad “n de Manning” el cual, es el dato para la calibración del modelo, este dato fue tomado de la investigación de “modelación numérica y de transporte de sedimentos caso de estudio el banco magdalena (Colombia)” [4] ya que en este estudio se determinó el “n” de Manning por medio de corridas del modelo, comparando resultados con datos obtenidos en campo hasta llegar al valor más cercano a cero, donde finalmente se determinó el coeficiente de rugosidad como 0.04, asimismo este valor fue tomado para la calibración de cada uno de los modelos en el instante cero.

También se le adicionó el transporte de sedimentos como, capacidad de arrastre, ya que no se contó con una carga de sedimentos, sin embargo, se tuvo en cuenta información sobre el 50% de las partículas que pasan en el tamizado d(50), tomado de estudios realizados en el río Magdalena, por la investigación sobre “modelación numérica y de transporte de sedimentos caso de estudio el banco Magdalena (Colombia)”[4] y corroborado por el estudio sedimentológico del río Magdalena [37] dado como 0.00025m.

- **Generación o importación de la malla de cálculo**

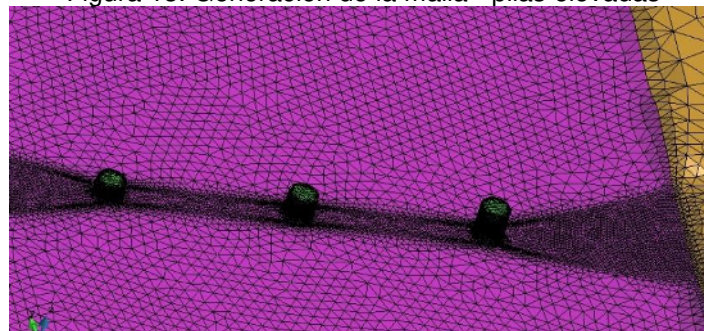
La malla de cálculo es un elemento indispensable para poder realizar la simulación en Iber. Si no existe una malla de cálculo no se puede simular, es por ello que, se generó una malla no estructurada, ya que el proceso en general, es automático, además, esta malla está formada por triángulos, debido a la modelación bidimensional básica que presenta Iber 2.6, por otra parte, al tener una buena discretización del dominio es un paso esencial para lograr una mejor aproximación al fenómeno físico del flujo[38], en el tramo de estudio se discretizó en el cauce un tamaño de malla de 8m y en la simulación de las diferentes formas de pilas (cuadrada, circular, rectangular, y un modelo de cada uno elevando su terreno), un tamaño de malla de 2m y el restante llamado pradera, un tamaño de 25m, ya que esta zona no es de estudio.

Figura 12. Generación de la malla - pilas circulares



Fuente: Autores - Iber

Figura 13. Generación de la malla - pilas elevadas



Fuente: Autores - Iber

En la figura. 12, se presenta la generación de la malla de pilas circulares, por el método de sustracción y en la fig. 13, elevando la malla en pilas circulares, a una

altura de 18.5m, que es la misma altura en la cual se encuentra la cota máxima en el terreno.

Nota: Los parámetros anteriormente nombrados se desarrollan con cada una de las diferentes formas de pilas y su respectiva elevación de la malla para que puedan ser analizadas en la fase de Postproceso.

9.3.2. Cálculo

Una vez generada la malla de cálculo para cada uno de los modelos (e introducidas las condiciones de contorno, iniciales e internas, y el resto de parámetros, es necesario configurar los parámetros de cálculo y activar los módulos que se ejecutarán [39]. En cada uno de los modelos se configuraron parámetros como, parámetros de tiempo, donde se le asignó un tiempo máximo de 10.000 segundos, con el fin de cumplir la ley de continuidad de un flujo, es decir, que el caudal que ingresa es el mismo que sale, con un intervalo de resultados cada 180 segundos, para obtener una mejor calidad de resultados.

Por otra parte, se configuraron los parámetros de resultados que se analizarán en el apartado de “resultados y análisis de resultados” finalmente, los parámetros de sedimentos de fondo, en el que se utilizó la ecuación de Meyer-Petter&Müller, dado que esta ecuación es utilizada para gravas de 0.002 mm – 0.65 mm, por consiguiente fue la más adecuada para este caso, asimismo, se dio el valor del d50 que anteriormente se mencionó en la asignación de parámetros del Pre-proceso.

9.3.3. Post – Proceso

En esta etapa final, después de realizar la corrida del modelo en condiciones óptimas tanto para hidrodinámica como para transporte de sedimentos se mostrarán los resultados analizando inicialmente el modelo hidrodinámico, seguido del transporte de sedimentos para notificar el comportamiento en el caso base.

Después de haber generado los anteriores pasos y de haber configurado cada uno de los modelos con las distintas formas de pilas (método de sustracción, elevación de la malla) y el transporte de sedimentos, se dispuso a correr cada uno de los modelos tanto para hidrodinámica como para transporte de sedimentos en sus tres condiciones. En primer lugar, se realizaron los análisis para las condiciones hidrodinámicas, en los modelos de caso base y las tres formas de las pilas (circular, cuadrada y rectangular) por el método de sustracción, asimismo, con el transporte de sedimentos en sus fases de erosión y sedimentación. En segundo lugar, se comparó el caso base con las tres formas de las pilas con el método de elevación de la malla, tal como se hizo en la primera parte.

Finalmente se hace una comparación de los métodos de sustracción y elevación de la malla, con el fin de analizar la metodología más óptima para la realización de futuros estudios en cuanto a condiciones hidrodinámicas y de transporte de sedimentos cuando se presenten puentes en la zona de estudio y el pilar más óptimo.

9.4. Análisis de escenarios

9.4.1. Escenario 1 - Caso base

En este escenario se evaluó la hidrodinámica y el transporte de sedimentos de modo natural, es decir, que no se tuvieron en cuenta las diferentes formas de las pilas, este escenario se modeló con un caudal Q_{50} de 6018.85 m³/s para lograr un flujo permanente y una partícula cuyo d_{50} corresponde a 0.00025m. Para esta simulación se utilizó el coeficiente de rugosidad de Manning de 0.04, que se obtuvo de la investigación “modelación numérica y de transporte de sedimentos caso de estudio del Banco-Magdalena (Colombia)” [4] que permitió calibrar el modelo para obtener resultados ajustados a la realidad, mediante un estudio de campo para un tramo del río Magdalena – Colombia.

Luego de la simulación del caso base, se evaluó el parámetro de velocidad, comparándolos con la investigación “modelación numérica y de transporte de sedimentos caso de estudio del Banco-Magdalena (Colombia)” [4], el cual se encontraba en rangos [1 – 1.6]m/s, mientras que en este caso base, se tiene velocidades de [1 – 1.55]m/s, obteniendo resultados que garantizan la calibración de los modelos.

Posteriormente se analizan parámetros de caudal y transporte de sedimentos en cuanto a erosión y sedimentación.

9.4.2. Escenario 2 - Método de sustracción para las diferentes formas de pilas.

En este escenario se tuvieron en cuenta los parámetros del caso base, como el coeficiente de rugosidad de Manning, el diámetro de las partículas y el caudal a utilizar. En primer lugar, en esta metodología se crearon las diferentes formas de las pilas (circular, rectangular y cuadrada) mediante el software civil 3d con cada una de sus dimensiones, posteriormente se ingresó esta geometría en Iber para la creación de la superficie una vez creada esta superficie, Iber cuenta con una opción de editar geometría y con esta sustraer la forma del pilar a analizar.

Por consiguiente, se analizan en cada uno de los pilares (circular, rectangular y cuadrado), parámetros de caudal, velocidad y transporte de sedimentos.

9.4.3. Escenario 3 - Método de elevación de la malla para las diferentes formas de pilas.

En este escenario se tiene en cuenta los parámetros del caso base, como el coeficiente de rugosidad de Manning, el diámetro de las partículas y el caudal a utilizar. En este método se modelan las pilas (circular y rectangular) una vez cargado el MDT, dándole una elevación constante al pilar que se va a analizar, Iber posee una opción que permite darle una elevación constante a cualquier malla que se escoja, en este caso se le asigna una elevación solo a la malla del pilar, apagando la capa del río y mediante la opción asignar elevación constante, se asignó elevación de acuerdo a la elevación máxima que corresponde en el terreno.

Asimismo, se analizan en cada uno de los pilares parámetros de caudal, velocidad y transporte de sedimentos.

10. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

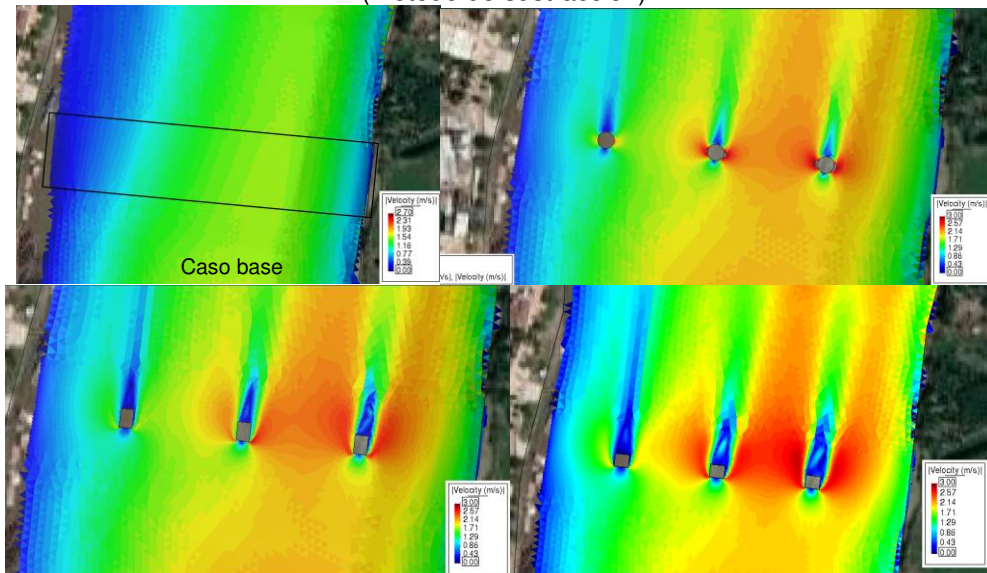
10.1. Comparación caso base Vs pilar circular, rectangular y cuadrado método de sustracción.

10.1.1. Parámetro de velocidad

Después de la realización de cada uno de los escenarios, en el tramo de 8km del río Magdalena, se observó en el caso base los resultados para hidrodinámica, donde su velocidad máxima estaba aproximadamente en 1,54 m/s al costado derecho del cauce y su velocidad mínima en 0,39 m/s al costado izquierdo del cauce, en comparación con el pilar circular por el método de sustracción, el cual mostró velocidades máximas de 3m/s en sus zonas laterales, en el pilar de la derecha y asimismo el pilar del centro, además, se evidencian velocidades de 2,14 m/s, entre ellas.

Por otra parte, en los pilares rectangulares sus velocidades máximas de 2,60 m/s, se presentan en sus esquinas aguas arriba del río, del mismo modo, en medio de su pilar central y lateral derecho se observan velocidades de 2,30 m/s, de forma similar, en el caso de los pilares cuadrados, donde sus velocidades máximas de 2,8 m/s se evidencian a lo largo del flujo de manera prolongada en medio del pilar lateral derecho y central, según la figura 14.

Figura 14. Caso base Vs Pilar circular, rectangular y cuadrado - Velocidad (m/s)
(Método de sustracción)

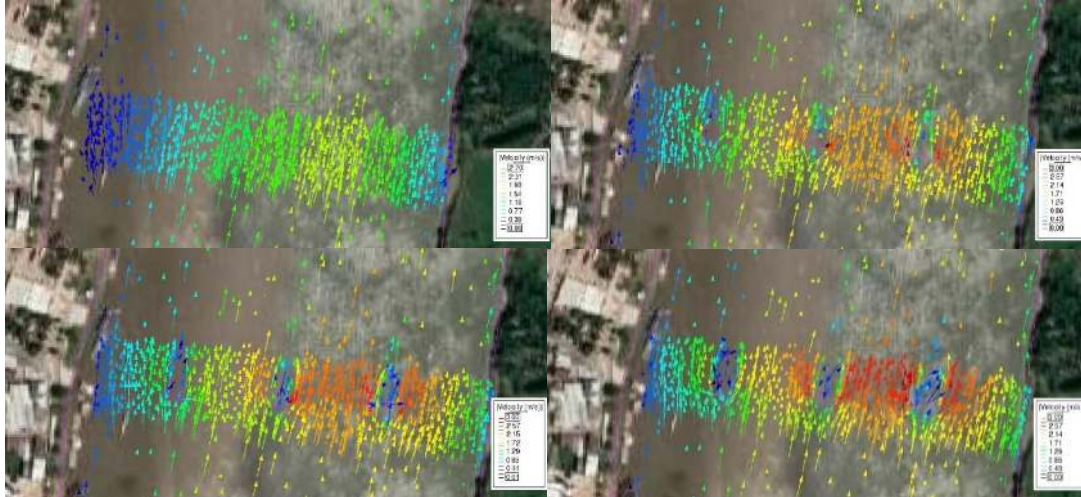


Fuente: Autores – Iber 2.6

En la figura 15, se analizaron los vectores de velocidad, donde se evidencio la dirección del flujo con las diferentes formas de pilas y los cambios que se presentan debido a las formas y la sección transversal de estas. En estos vectores se evidencia

el vórtice que presenta al llegar al pilar, siendo los pilares rectangulares y cuadrados los más notorios, asimismo, la estela aguas abajo de los pilares.

Figura 15. Caso base Vs Pilar circular, rectangular y cuadrado – Vectores de velocidad (m/s) (Método de sustracción)

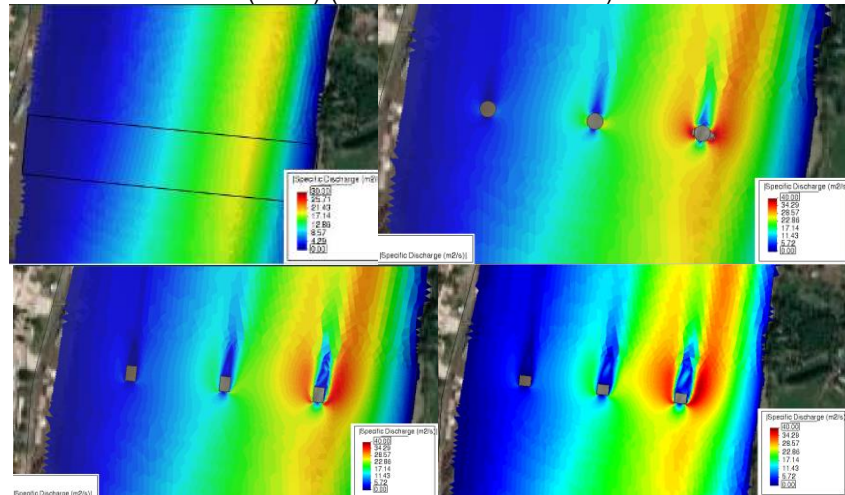


Fuente: Autores – Iber 2.6

10.1.2. Parámetro de caudal

Para el escenario de caudal del caso base, se evidencio que sus caudales máximos se encontraron en la margen derecha de lecho del rio, que oscilan en un rango de $[15 - 20] m^3/s$, asimismo en los pilares circulares con un rango de $[20 - 35] m^3/s$, del mismo modo, en los pilares rectangulares con un caudal entre $[20 - 38] m^3/s$ y finalmente en los pilares rectangulares con un rango de $[20 - 40] m^3/s$. Por otra parte, se evidencia que aguas debajo de las formas de las pilas los caudales disminuyen dependiendo de la sección transversal.

Figura 16. Caso base Vs Pilar circular, rectangular y cuadrado - Caudal (m2/s) (Método de sustracción)

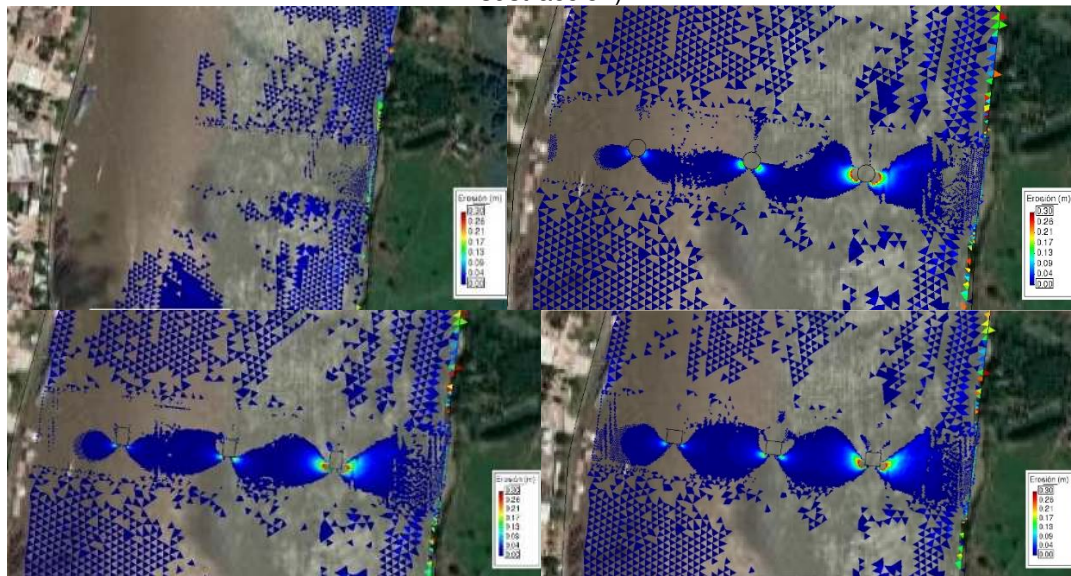


Fuente: Autores – Iber 2.6

10.1.3. Transporte de sedimentos

La erosión presentada en el caso base es una erosión general ya que se debe a un cambio en el lecho del río, mientras que, en las diferentes formas de los pilares se presenta erosiones locales y en la sección del puente, según la figura 17. Por otra parte, se evidenció el contraste entre el caso base sin pilas, donde la erosión no es suficientemente notoria como en el caso de los pilares circulares, rectangulares y cuadrados en la margen derecha del río. Por el contrario, en la margen izquierda en el caso base se presenta una erosión nula, en cambio donde existen pilares se presenta dicha erosión a menores rasgos.

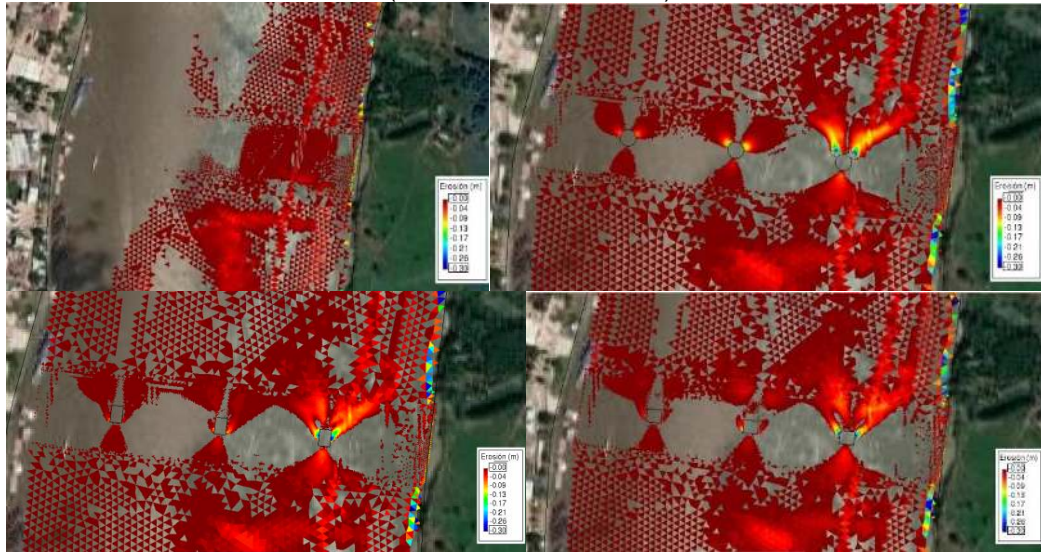
Figura 17. Caso base Vs Pilar circular, rectangular y cuadrado – Erosión (m) (Método de sustracción)



Fuente: Autores – Iber 2.6

Por otra parte, se evidencio en la figura 18 que la sedimentación en el caso base se presenta en la margen derecha, mientras que en los escenarios que tienen diferentes formas de pilas, se presenta aguas abajo de donde se encuentra la pila, esto como complemento de la erosión presentada en la figura 17. En cuanto a la comparación con el caso base presentado, allí se presenta sedimentación en la margen derecha, además, se muestra que existe mayor sedimentación en los pilares cuadrados, seguido del rectangular y circular, en contraste con la erosión.

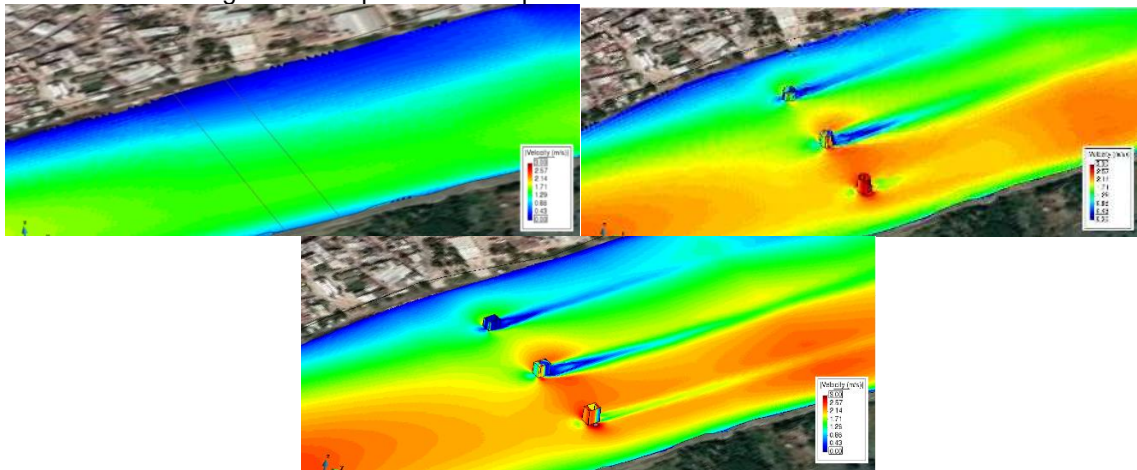
Figura 18. Caso base Vs Pilar circular, rectangular y cuadrado – Sedimentación (m)
(Método de sustracción)



Fuente: Autores – Iber 2.6

10.2. Comparación caso base Vs pilar circular y rectangular método de elevación de la malla

Figura 19. Representación por el método de elevación de la malla



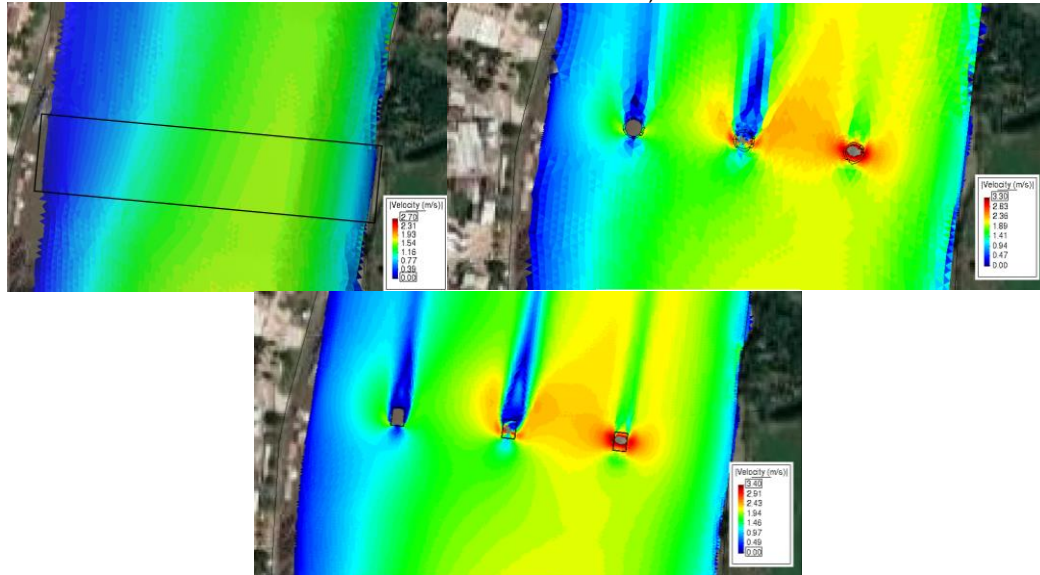
Fuente: Autores – Iber 2.6

10.2.1. Parámetro de velocidad

En el método de la elevación de la malla, siendo el escenario que más se asemeja a la realidad, se observó que las velocidades aumentaron con respecto al caso base obteniendo velocidades máximas en el pilar circular de 2,90 m/s que se evidencio en zonas laterales de la pila, en medio del pilar central y lateral derecho se presentan velocidades de 2,36 m/s. Asimismo, en el pilar rectangular se observaron

velocidades de 3 m/s en donde se encuentra su mayor área transversal, entre las pilas centrales y laterales, mostraron velocidades de 2,40, según la figura 20.

Figura 20. Caso base Vs Pilar circular, rectangular - Velocidad (m/s) (Método de elevación de la malla)

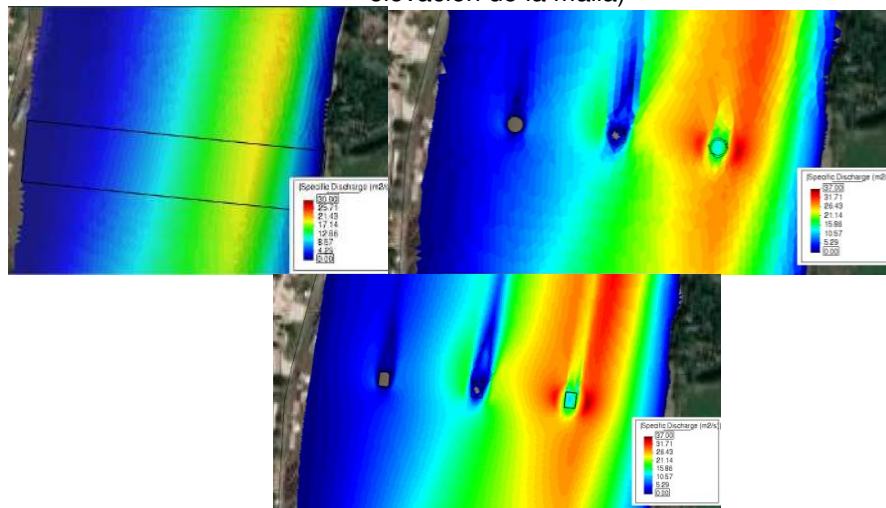


Fuente: Autores – Iber 2.6

10.2.2. Parámetro de caudal

En el parámetro de caudal, bajo este método se evidencio que el flujo se eleva a través de la pila, además los caudales de los pilares circulares elevados presentan valores entre $[21,4-31,71] m^3/s$, mientras que en los pilares rectangulares elevados un rango de $[21 - 35] m^3/s$. En ambos casos se presenta un aumento de caudal en la margen derecha del lecho a través del cauce.

Figura 21. Caso base Vs Pilar circular, rectangular - Caudal (m2/s) (Método de elevación de la malla)

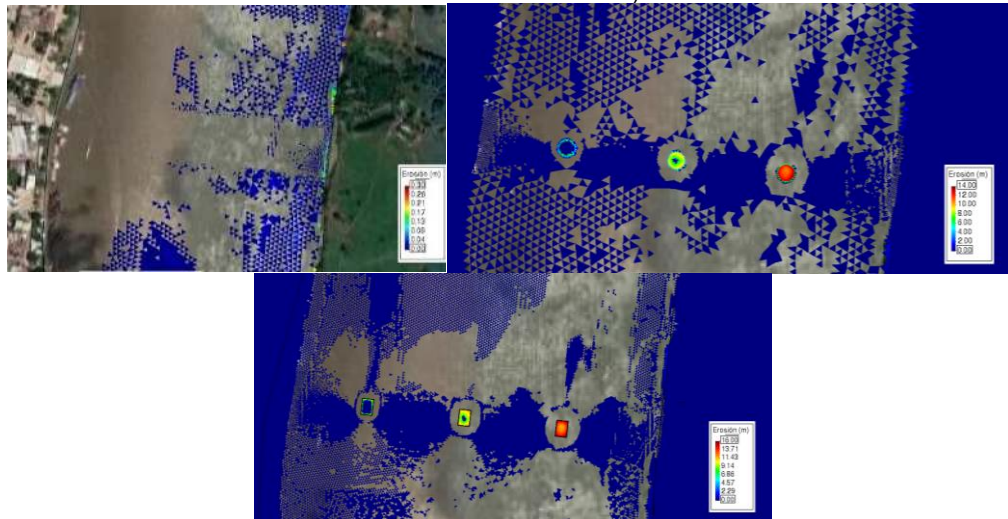


Fuente: Autores – Iber 2.6

10.2.3. Transporte de sedimentos

En el transporte de sedimentos con respecto al método de elevación de la malla, se tuvo en cuenta el material de las pilas, además se evidencia que, por esta razón se dan mejores resultados con respecto a la erosión, donde, en ambos casos se observan que la sección del río que más se erosiona, se encuentra en medio de los pilares centrales y laterales derechos. Por otro lado, el pilar rectangular es el que presenta mayores erosiones, como máximo erosiones de 16m.

Figura 22. Caso base Vs Pilar circular, rectangular – Erosión (m) (Método de elevación de la malla)



Fuente: Autores – Iber 2.6

Figura 23. Caso base Vs Pilar circular, rectangular – Sedimentación (m) (Método de elevación de la malla)



Fuente: Autores – Iber 2.6

Del mismo modo que en la sedimentación por el método de sustracción se contrasta con la erosión, pero en esta metodología se evidencian mayores sedimentaciones, ya que en este caso se eleva el terreno y se tiene en cuenta las propiedades del material de las pilas, presentándose mayor sedimentación en el pilar rectangular. De igual manera aguas arriba y aguas debajo de los pilares, siendo aguas abajo la zona más crítica, que depende de las condiciones del flujo subcrítico, del material y de la forma de la pila, como se muestra en el pilar rectangular de la figura 23.

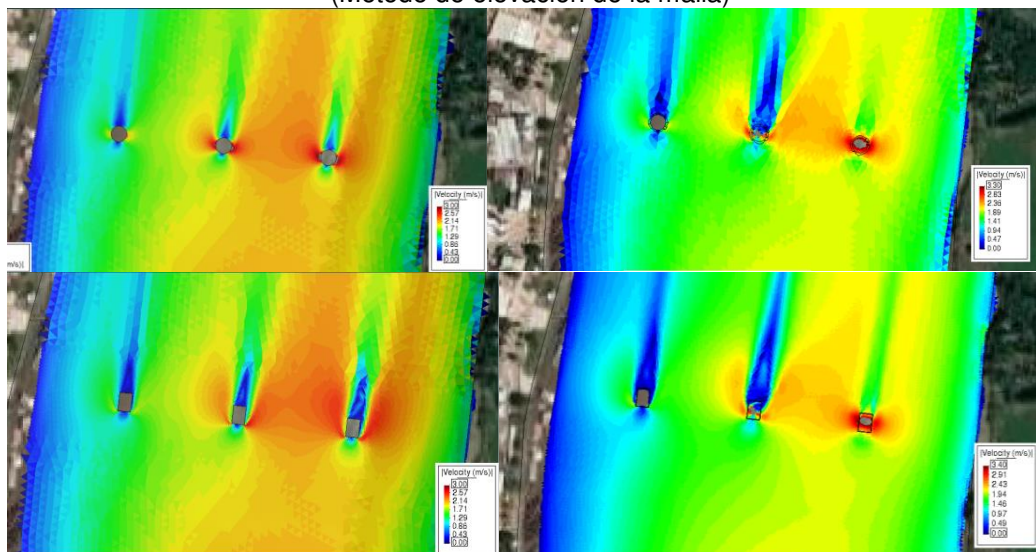
10.3. Comparación método de sustracción Vs método de elevación de la malla

10.3.1. Parámetro de velocidad

Para los estudios de transporte de sedimentos, el factor de velocidad es un determinante, asimismo para el dimensionamiento del pilar, según la figura 24, se puede observar que en la metodología de sustracción de las pilas se tienen unas velocidades menores a las de la elevación de la malla, puesto que, al representar el pilar por sustracción, el flujo no representa la velocidad real ya que este toma la forma como un elemento no existente, mientras que en la metodología de elevación de la pila, encuentra un elemento tridimensional con velocidades verticales y horizontales.

Como resultado, se muestran velocidades máximas de 3,30 m/s y 3,40m/s en los pilares circulares y rectangulares respectivamente, bajo la metodología de elevación de la malla.

Figura 24. Pilar circular, rectangular - Velocidad (m/s) (Método de sustracción) Vs (Método de elevación de la malla)

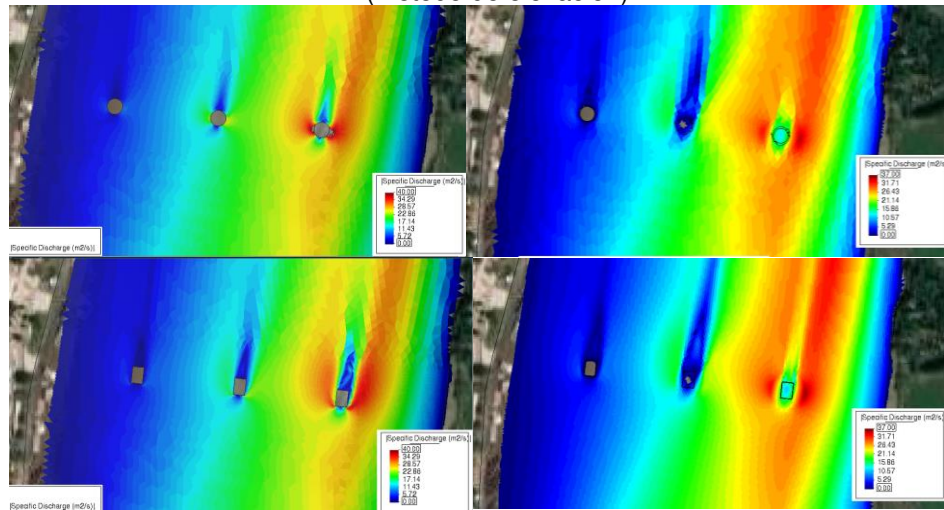


Fuente: Autores – Iber 2.6

10.3.2. Parámetros de caudal

Los caudales por el método de sustracción presentan menores demandas con respecto al método de elevación de la malla, puesto que, el flujo busca la salida y sigue el cauce, mientras que, en la elevación de la malla, el flujo encuentra el pilar como un elemento estructural y se comporta de manera más cercana a la realidad, ya que en este método el caudal sube por medio de la estructura, como se representa en la figura 25.

Figura 25. Pilar circular, rectangular - Caudal (m²/s) (Método de sustracción) Vs (Método de elevación)

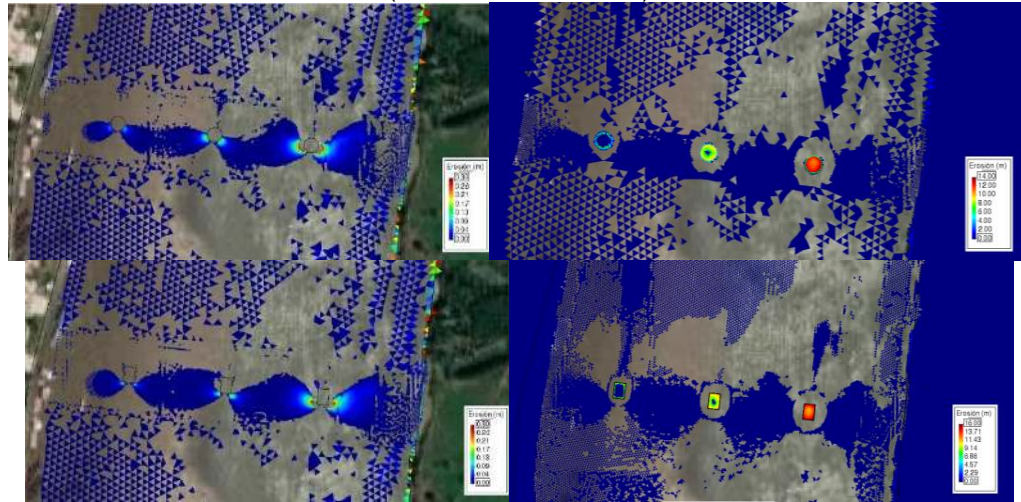


Fuente: Autores – Iber 2.6

10.3.3. Transporte de sedimentos

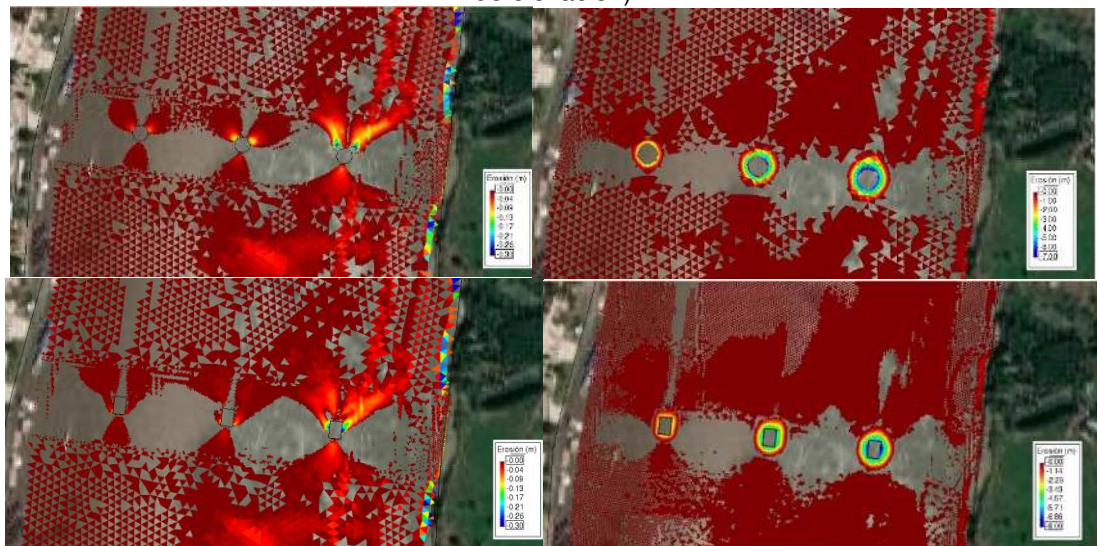
Para analizar la erosión y la sedimentación en los pilares de un puente se analizó cada modelo tanto por el método de sustracción como por el método de la elevación de la malla, encontrando así mejores resultados elevando la malla ya que alrededor del pilar se encuentran mayores velocidades, lo que quiere decir que se presenta erosión local causada por el flujo que, al elevar la malla, el flujo encuentra como obstáculo al pilar, como se muestra en la figura 26, además, se evidenció erosión general debido al lecho del río. Por otra parte, ocurre la sedimentación alrededor del pilar circular y con mayor intensidad en el pilar rectangular, en las zonas donde no se presentó erosión local ni general.

Figura 26. Pilar circular, rectangular – Erosión (m) (Método de sustracción) Vs (Método de elevación)



Fuente: Autores – Iber 2.6

Figura 27. Pilar circular, rectangular – Sedimentación (m) (Método de sustracción) Vs (Método de elevación)



Fuente: Autores – Iber 2.6

11. CONCLUSIONES

- Luego de realizar el análisis bibliográfico de la información existente relacionada con la modelación de las pilas, finalmente, se logró concluir que la información que se encuentra en la web es muy reducida, además, que para poder realizar una modelación en el software Iber, se necesita una calibración, para lo que es necesario una toma de datos de campo y así obtener valores cercanos a la realidad.
- Como resultado, con respecto a la simulación del caso base y las diferentes formas de pilas por el método de sustracción, en el parámetro de velocidad, es claro que, al presentarse estructuras como un puente en una sección del río sus velocidades aumenten, además, la forma que produce mayores velocidades en medio de los pilares es la cuadrada, siendo este parámetro uno de los responsables en el transporte de sedimentos de fondo.
- En el análisis del caso base vs metodología de sustracción, evidenció una disminución notoria del caudal aguas abajo de la sección de los pilares, es por ello que en el pilar cuadrado es donde más se destaca dicho fenómeno con un caudal de $5.6 \text{ m}^3/\text{s}$, esto debido a que su cara frontal ocupa un área mayor con respecto a las otras formas de las pilas.
- De acuerdo con la erosión, la velocidad es un factor importante, debido a que la aceleración del flujo aumenta, creando vórtices los cuales son los responsables de desprender las partículas de fondo, convirtiéndolas en sedimentos y a su vez transportándolos a través del tramo del río Magdalena, es por ello que el pilar cuadrado presenta mayor sedimentación debido a que tiene mayor velocidad, en comparación con el pilar circular, siendo hasta ahora el más óptimo.
- Para el método de elevación de la malla las velocidades aumentaron significativamente con respecto al método de sustracción, de modo que, el método que se acerca más a la realidad es el método de elevación de la malla, ya que el software tiene en cuenta la pila con sus parámetros, asimismo, se comporta de manera que el flujo se eleva a través del pilar y tiene en cuenta el transporte de sedimentos de las partículas que el material de la pila pueda generar.
- En los pilares circulares se presentan velocidades más bajas con respecto a las otras formas, asimismo, se presentan erosiones mínimas, es por ello, que el pilar circular es el más adecuado, ya que al no presentar una gran área en su cara aguas arriba del flujo disminuyen los vórtices frontales y laterales como también la estela detrás del pilar, dando como resultado menor erosión local.

- En conclusión, la metodología más adecuada para representar la forma de un pilar es por el método de elevación de la malla, debido a que se puede asignar los diferentes parámetros como la rugosidad del material que está compuesto el pilar, estos se verán reflejados en las condiciones hidrodinámicas y en el transporte de sedimentos.

12. RECOMENDACIONES

- Se recomienda hacer un estudio basado en una estructura existente, con datos de campo en el sitio que permita hacer una comparación entre los modelos numéricos que utiliza Iber para representar los efectos de condiciones hidrodinámicas como para transporte de sedimentos, asimismo comparar con las ecuaciones empíricas existentes.
- Comparar con fotografías de la zona de estudio o en su defecto una batimetría para ver si el software Iber representa adecuadamente la erosión, la sedimentación, o simplemente la sobreestima o subestima.
- Para la simulación de cualquier modelo es de gran importancia realizar una calibración en la zona de estudio, ya que de esto dependerán que los resultados sean satisfactorios.
- Para estudios futuros sobre el transporte de sedimentos, se recomienda analizar las diferentes formas de pilas, pero cambiando el dimensionamiento de cada una de ellas, además el efecto que esta produce si existe una contracción en el cauce, ya que la forma de la pila puede generar un remanso y una socavación.
- Por otra parte, analizar el diseño óptimo de las estructuras pluviales en base a redes neuronales, con respecto al criterio que se tiene a la hora de la escogencia del número de pilas al momento de diseñar.
- Finalmente se recomienda analizar el efecto que tienen las diferentes formas de pilas en cuanto al transporte de sedimentos, pero en distintos softwares como HEC-RAS y software de modelación tridimensional.

13. BIBLIOGRAFÍA

- [1] A. Seaurz, «Hidraulica De Puentes», *Univ. Piura*, n.º April, p. 41, 2006.
- [2] W. Wang, K. Zhou, H. Jing, J. Zuo, P. Li, y Z. Li, «Effects of bridge piers on flood hazards: A case study on the Jialing River in China», *Water (Switzerland)*, vol. 11, n.º 6, pp. 1-14, 2019, doi: 10.3390/w11061181.
- [3] J. I. Pérez, J. R. Escobar, y J. M. Fragozo, «2D hydraulic flood modeling in data-Scarce regions the case of ranchería river delta, riohacha-Colombia», *Inf. Tecnol.*, vol. 29, n.º 4, pp. 143-157, ago. 2018, doi: 10.4067/s0718-07642018000400143.
- [4] L. M. Abella Castaño y G. P. Vergara Barrero, «Modelación numérica y de transporte de sedimentos caso de estudio el Banco, Magdalena (Colombia)», 2018, [En línea]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/11634/11891>.
- [5] J. A. Vasquez, D. G. McLean, V. F. O'Connor, y A. Zimmermann, «Hydraulic modeling for the Padma river bridge», *River Flow 2012 - Proc. Int. Conf. Fluv. Hydraul.*, vol. 2, n.º September, pp. 1227-1233, 2012.
- [6] J. Flores, «Efecto de un aro sobre la socavación en pilas circulares», *Cienc. e Ing.*, vol. 28, n.º 3, pp. 165-174, 2007.
- [7] B. Pier, «PHYSICAL AND NUMERICAL SIMULATION OF LOCAL SCOUR TO DESIGN PHYSICAL AND NUMERICAL SIMULATION OF LOCAL SCOUR TO DESIGN OPTIMAL SHAPE OF Submitted in partial fulfilment of the requirements for the degree of Master of Technology (Water Resources Engineering», n.º June, 2013.
- [8] M. Bravo-espinosa y W. R. Osterkamp, «Transporte de sedimentos en corrientes naturales: Revisión técnica de ecuaciones empíricas de predicción del arrastre de sedimentos de fondo», *Terra Latinoam.*, vol. 22, n.º 3, pp. 377-386, 2004.
- [9] J. C. Restrepo-López, J. C. Ortiz -Royero, L. Otero-Díaz, y S. R. Ospino-Ortiz, «Transporte de sedimentos en suspensión en los principales ríos del Caribe colombiano: magnitud, tendencias y variabilidad», *Rev. la Acad. Colomb. Ciencias Exactas, Físicas y Nat.*, vol. 39, n.º 153, p. 527, 2015, doi: 10.18257/raccefyn.209.
- [10] L. J. Prendergast y K. Gavin, «A review of bridge scour monitoring techniques», *J. Rock Mech. Geotech. Eng.*, vol. 6, n.º 2, pp. 138-149, 2014, doi: 10.1016/j.jrmge.2014.01.007.

- [11] «Scour and Erosion IX: Proceedings of the 9th International Conference on ... - Google Libros». [https://books.google.com.co/books?id=E_OJDwAAQBAJ&pg=PT483&lpg=PT483&dq=M.C.+Forde,+D.M.+McCann,+M.R.+Clark,+K.J.+Broughton,+P.J.+Fenning,+A.+Brown,+NDT%26E+International,+32\(8\),+481+\(1999\)&source=bl&ots=Dyfdm-LAOu&sig=ACfU3U0Cb6aJ8VhThzjnv44W0-6UwS1qSQ&hl=es&sa=X&ved=2ahUKEwiwqMrsh8PoAhVHh-AKHfF1BJ8Q6AEwAHoECAoQAQ#v=onepage&q=M.C. Forde%2C D.M. McCann%2C M.R. Clark%2C K.J. Broughton%2C P.J. Fenning%2C A. Brown%2C NDT%26E International%2C 32\(8\)%2C 481 \(1999\)&f=false](https://books.google.com.co/books?id=E_OJDwAAQBAJ&pg=PT483&lpg=PT483&dq=M.C.+Forde,+D.M.+McCann,+M.R.+Clark,+K.J.+Broughton,+P.J.+Fenning,+A.+Brown,+NDT%26E+International,+32(8),+481+(1999)&source=bl&ots=Dyfdm-LAOu&sig=ACfU3U0Cb6aJ8VhThzjnv44W0-6UwS1qSQ&hl=es&sa=X&ved=2ahUKEwiwqMrsh8PoAhVHh-AKHfF1BJ8Q6AEwAHoECAoQAQ#v=onepage&q=M.C. Forde%2C D.M. McCann%2C M.R. Clark%2C K.J. Broughton%2C P.J. Fenning%2C A. Brown%2C NDT%26E International%2C 32(8)%2C 481 (1999)&f=false) (accedido mar. 30, 2020).
- [12] K. S. Kwak y J. L. Briaud, «Case study: An analysis of pier scour using the SRICOS method», *KSCE J. Civ. Eng.*, vol. 6, n.º 3, pp. 243-253, 2002, doi: 10.1007/bf02829148.
- [13] E. Florens *et al.*, «Scour monitoring on bridge pier - methodology and implementation To cite this version : HAL Id : hal-01871178 and implementation», 2018.
- [14] C. I. Guaya y E. A. Montalván, «Modelación numérica bidimensional del río Garrapata en la provincia de Manabí aplicando el programa Iber», *Tesis*, 2018, [En línea]. Disponible en: <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/19326>.
- [15] H. N. C. Breusers, G. Nicollet, y H. W. Shen, «Erosion locale autour des piles cylindriques», *J. Hydraul. Res.*, vol. 15, n.º 3, pp. 211-252, 1977, doi: 10.1080/00221687709499645.
- [16] CORMAGDALENA, «Altas Cuenca del río grande de la Magdalena», p. 278, 2009.
- [17] E. L. Puente, B. Yondo, S. El, y R. I. O. Magdalena, «Escuela colombiana de ingeniería iv encuentro de ingenieros de suelos y estructuras», n.º 2, pp. 1-20, 2001.
- [18] «La economía y el desarrollo se mueven por el Río Magdalena - Ministerio de Transporte». <https://mintransporte.gov.co/micrositios/cci/la-economia-y-el-desarrollo-se-mueven-por-el-rio-magdalena.html> (accedido abr. 30, 2021).
- [19] F. Villa, P. Zuñiga, D. Castro, J. Garcia, L. Garcia, y M. HERRADA, «Peces Del Alto Magdalena», *BIOTA Colomb.*, vol. 7, pp. 3-21, 2008.
- [20] Gunt Hamburg, «Fundamentos del transporte de sedimentos», *Ing. Hidráulica*, 2018, [En línea]. Disponible en: <https://www.gunt.de/es/>.

- [21] W. S. Merritt, R. A. Letcher, y A. J. Jakeman, «A review of erosion and sediment transport models», *Environ. Model. Softw.*, vol. 18, n.º 8-9, pp. 761-799, 2003, doi: 10.1016/S1364-8152(03)00078-1.
- [22] G. Del y A. D. E. Sedimentos, «Universidad nacional autónoma de méxico 4.», pp. 63-86.
- [23] «Medicion sobre el terreno de la erosion del suelo y de la escorrentia - N. W. Hudson - Google Libros». https://books.google.com.co/books?id=m1DFcx3B0dYC&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false (accedido may 21, 2021).
- [24] L. E. Pérez Farrás, «Teoría de la sedimentación», p. 23, 2005.
- [25] «i PARTE II. TRANSPORTE DE SEDIMENTOS - Universidad del Cauca». <https://www.yumpu.com/es/document/read/15872283/i-parte-ii-transporte-de-sedimentos-universidad-del-cauca> (accedido mar. 28, 2020).
- [26] J. Aguirre-Pe, A. T. Moncada, M. L. Olivero, y M. A. Ochoa, «Transporte de sedimentos no uniformes», *Informacion Tecnologica*, vol. 13, n.º 6. pp. 137-142, 2002.
- [27] «Summary of Alluvial Channel Data from Flume Experiments, 1956-61 - Harold P. Guy, Daryl B. Simons, Everett V. Richardson - Google Libros». [https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=3swyVPwkYFAC&oi=fnd&pg=PR1&dq=Simons+and+Richardson+1966\)&ots=N09-5DFC-V&sig=78AcstWa6KQFBWFcO_ybs9-7gJU#v=onepage&q=Simons and Richardson 1966\)&f=false](https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=3swyVPwkYFAC&oi=fnd&pg=PR1&dq=Simons+and+Richardson+1966)&ots=N09-5DFC-V&sig=78AcstWa6KQFBWFcO_ybs9-7gJU#v=onepage&q=Simons and Richardson 1966)&f=false) (accedido abr. 14, 2021).
- [28] E. Bladé *et al.*, «Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos», *Rev. Int. Metod. Numer. para Calc. y Disen. en Ing.*, vol. 30, n.º 1, pp. 1-10, 2014, doi: 10.1016/j.rimni.2012.07.004.
- [29] Flumen, «Modelización bidimensional del flujo en lámina libre en aguas poco profundas», p. 24, 2013.
- [30] Iber, «Manual de referencia hidráulico», pp. 1-17, 2014, [En línea]. Disponible en: <http://www.jorgesanchez.net/web/css1.pdf>.
- [31] F. Engelund y E. Hansen, «Irank engelund and eggert hansen teknisk lorlag-copenhagen 19&7», TEKNISKFORLAG Skelbreggade 4 Copenhagen V, Denmark., 1967. Accedido: may 09, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%3A81101b08-04b5-4082-9121-861949c336c9>.

- [32] A. (Thanos) N. Papanicolaou, M. Elhakeem, G. Krallis, S. Prakash, y J. Edinger, «Sediment Transport Modeling Review—Current and Future Developments», *J. Hydraul. Eng.*, vol. 134, n.º 1, pp. 1-14, ene. 2008, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9429(2008)134:1(1).
- [33] «Report of the Workshop on Understanding Sedimentation Processes and Model ... - Google Libros».
[https://books.google.com.co/books?id=dhXr38rPqTYC&pg=PA10&lpg=PA10&dq=\(Garde+y+Ranga+Raju,+1985;+Chang,+1988\).&source=bl&ots=C0h8JvWdL3&sig=ACfU3U2QGjMil_dr0Ka_eBL-15cXV31GQQ&hl=es&sa=X&ved=2ahUKEwjPyOGXhbzoAhUHneAKHbhYC-AQ6AEwAHoECAoQAQ#v=onepage&q=\(Gard](https://books.google.com.co/books?id=dhXr38rPqTYC&pg=PA10&lpg=PA10&dq=(Garde+y+Ranga+Raju,+1985;+Chang,+1988).&source=bl&ots=C0h8JvWdL3&sig=ACfU3U2QGjMil_dr0Ka_eBL-15cXV31GQQ&hl=es&sa=X&ved=2ahUKEwjPyOGXhbzoAhUHneAKHbhYC-AQ6AEwAHoECAoQAQ#v=onepage&q=(Gard) (accedido mar. 29, 2020).
- [34] L. Kalin y M. M. Hantush, «Comparison of many models», n.º September, 2003.
- [35] «Fondo Adaptacion - La Mojana».
<https://www.fondoadaptacion.gov.co/index.php/macroproyectos/la-mojana> (accedido may 21, 2021).
- [36] «Los sedimentos del río Magdalena: reflejo de la crisis ambiental - Juan Darío Restrepo Ángel - Google Libros».
<https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=HKV1j3wKT2wC&oi=fnd&pg=P A79&dq=parte+baja+cuenca+rio+magdalena&ots=Hd-FO4wNwl&sig=qNiiqi3JMF-c7CVYzRBdDOEbcZc#v=onepage&q&f=false> (accedido may 02, 2021).
- [37] R. Pacheco Ceballos, *Estudio sedimentológico del Río Magdalena*. HIMAT, , 1984.
- [38] F. GARCÍA, C. PALACIO, y U. GARCÍA, «GENERACIÓN DE MALLAS NO ESTRUCTURADAS PARA LA IMPLEMENTACION DE MODELOS NUMÉRICOS», *DYNA*, vol. 76, n.º 157, pp. 17-25, ene. 2009, Accedido: may 07, 2021. [En línea]. Disponible en:
<https://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/9549>.
- [39] «Manual Iber.pdf». .

Fernanda Sierra

Firma de los estudiantes 1

Yuri Fernanda Sierra Salinas

Código: 507402



Originalmente con CamScanner

Firma de los estudiantes 2

John Sebastián Fajardo Becerra

Código: 507434

Firma del asesor del trabajo de grado
Ing. Diego Alejandro Pulgarín Montoya