

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA

Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales

Doctorado en Ciencias de la Ingeniería

Tesis Doctoral



Simulación Hidrodinámica Tridimensional con Procesos de
Transporte de Sedimentos en un Cauce Natural

Autor: MSc. Ing. Santiago Aurelio OCHOA GARCÍA

Director: Dra. Ing. Teresa REYNA

Junio de 2018

Simulación Hidrodinámica Tridimensional con Procesos de Transporte de Sedimentos en un Cauce Natural

por

MSc. Ing. Santiago Aurelio OCHOA GARCÍA

Dra. Ing. Teresa REYNA

Director

COMISIÓN ASESORA:

Dra. Ing. Teresa REYNA

FCEFYN - UNC

Dr. Ing. Marcelo GARCÍA

FCEFYN - UNC

Dr. Ing. Horacio HERRERO

FCEFYN – UNC

Esta Tesis fue enviada a la Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba para cumplimentar los requerimientos de obtención del grado académico de Doctor en Ciencias de la Ingeniería.

Córdoba, Argentina

Junio de 2018



UNC

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CORDOBA
Facultad de Cs. Exactas, Fisicas y Naturales

ACTA DE EXAMENES

Libro: 00001 Acta: 04324 Hoja 01/01
LLAMADO: 1 04/06/2018
CATEDRA - MESA:

DI002 TESIS DOCTORADO EN CIENCIAS DE LA INGENIERIA

NUMERO	APELLIDO Y NOMBRE	DOCUMENTO/INGRESO COND	NOTA	FIRMA
0104158142	OCHOA GARCIA, Santiago Aurelio	DNI: 94798400 2013	— <u>Aprobado</u>	

Mendoza

Menendez, Angel Nicolas - Nigro, Norberto Marcelo - GARCIA RODRIGUEZ, Carlos Marcelo - TARRAB, Leticia - S

Observaciones:

Dra. Graciela Correal Briones
Directora Alternativa
Doctorado en Ciencias
de la Ingeniería
F.C.E.F. y N. - U.N.C.

Córdoba, ____/____/____

Certifico que la/s firma/s que ha/n sido puesta/s en la presente Acta pertenece/n a GRACIELA CORREAL BRIONES

1	0	1	0	1
Inscritos	Ausentes	Examinados	Reprobados	Aprobados

23/05/2018 10:32:53

Agradecimientos:

“No cambiaría ni uno solo de los múltiples errores y aciertos que he cometido en mi vida para llegar a este punto, simplemente agradecido”

Dedicado a María Victoria y José Joaquín, por ustedes que llenan mi mundo de felicidad y esperanza.

Agradezco el apoyo incondicional de mi familia: Flor, Pepe, Yola, Marcela y Silvia; así como las inmensas muestras de cariño de mis sobrinos José, Dolores, Soledad, Paula e Isabela.

Los más sinceros agradecimientos a la directora de esta tesis, Dra. Teresa Reyna, por estar pendiente del avance de este trabajo; con sus oportunos consejos se alcanzaron las metas planteadas en esta investigación. También agradezco al Dr. Marcelo García y al Dr. Horacio Herrero por la ayuda, información y asesoramiento oportuno cada vez que lo necesité.

A Anita Heredia, José Manuel Díaz, Matías Ragessi, Antoine Patalano, Matias Eder, y a todos los que son, o fueron, personal del CETA y del Laboratorio de Hidráulica de la Universidad Nacional de Córdoba, que siempre me brindaron su ayuda en lo que necesite.

Al Dr. Santiago Reyna, Ing. María Lábaque, Ing. Fabián Fulginiti, Ing. Guillermo Fiat, y a todo el personal del estudio CEAS que me abrieron sus puertas y me hicieron sentir como en casa.

A la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba por el apoyo institucional brindado.

A Leopoldo Saavedra, Eliana Jorquera, Érica Díaz, Alejo Testa, Marcelo Baldissone, Nicolás Guillén y a todos los compañeros y amigos que de una u otra forma contribuyeron en mi formación.

A la querida ciudad de Córdoba, con su calidez fortaleció mi vínculo con sus habitantes, un vínculo con raíces fuertes que perdurará de por vida.

A todos los familiares y amigos de mi querida Cuenca que me alentaron, con su preocupación y aprecio hicieron que cada momento de sacrificio valiera la pena.

Agradezco el financiamiento para llevar a cabo esta investigación dado por la Secretaría de Ciencia y Tecnología de la Universidad Nacional de Córdoba (SECyT) y la Secretaría de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación de la República de Ecuador (SENESCYT).

SIMULACIÓN HIDRODINÁMICA TRIDIMENSIONAL CON PROCESOS DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EN UN CAUCE NATURAL

Resumen:

Los fenómenos en flujos con superficie libre que ocurren en la naturaleza son de una complejidad tal que difícilmente pueden ser resueltos con métodos analíticos exactos. Por este motivo se busca aplicar modelos y simulaciones con la utilización de técnicas experimentales y numéricas que permitan la determinación de las variables que caracterizan el flujo en ríos. Dentro del contexto de aplicar técnicas matemáticas y numéricas para describir y analizar el comportamiento hidráulico de cauces naturales, se planteó el desafío de la simulación de la hidrodinámica tridimensional con procesos de transporte de sedimentos en un tramo de río en la provincia de Córdoba, Argentina. El estudio se centra en el tramo medio del río Tercero o Ctalamochita ubicado en la localidad de Villa María al sur-este de la provincia.

El objetivo principal de esta investigación, es realizar un análisis estadístico de las dimensiones dominantes de las formas de fondo simuladas en un modelo hidrodinámico tridimensional acoplado con procesos de transporte de partículas; la simulación numérica de las variables será aplicada a un río de aguas poco profundas y con pendiente de fondo correspondiente a la de un cauce de planicie, como lo es el río Tercero en su paso por la ciudad de Villa María. El modelo SSIIM será aplicado para calcular las variables de flujo y transporte de sedimentos en el dominio seleccionado; SSIIM es una herramienta de mecánica de fluidos computacional para la simulación de variables de flujo tridimensional y transporte de sedimentos en flujos con superficie libre. El software es de libre distribución y tiene algunas librerías en código abierto para el desarrollo de metodologías de cálculo.

La densidad espacial y temporal de los resultados simulados de la morfología fluvial, permiten plantear como innovación de este trabajo el de emplear metodologías de análisis espectral en base a la transformada discreta de Fourier y curvas wavelets tipo Morlet para describir las escalas dominantes de las señales de formas de fondo estimadas. Identificar las escalas dominantes de formas de fondo mediante las técnicas de análisis espectral permitirá establecer la variabilidad en tiempo y espacio de la morfología fluvial y cuantificar la influencia de las distintas escalas de formas de fondo en el campo de flujo y en la resistencia que ejercen las fronteras sólidas sobre la corriente. Como hipótesis se plantea que en un cauce de aguas poco profundas, los procesos hidrodinámicos relacionados con las formas de fondo tendrían características tridimensionales, razón por la que también se justifica el uso de un modelo tridimensional para simular los procesos hidrodinámicos en el dominio seleccionado.

Palabras Clave: SSIIM, ADCP, WAVELETS.

TRIDIMENSIONAL HYDRODYNAMICS SIMULATION WITH PROCESSES OF TRANSPORTATION OF SEDIMENTS IN A NATURAL CHANNEL

Abstract:

The phenomena in free-surface flows occurring in nature are of such complexity that they can hardly be solved with exact analytical methods. For this reason it is sought to apply models and simulations with the use of experimental and numerical techniques that allow the determination of the variables that characterize the flow in rivers. Within the context of applying mathematical and numerical techniques to describe and analyze the hydraulic behavior of natural channels, the challenge of the simulation of three-dimensional hydrodynamics with sediment transport processes was proposed in a stretch of river in the province of Córdoba, Argentina. The study focuses on the middle stretch of the river Tercero or Ctalamochita located in the town of Villa Maria south-east of the province.

The main objective of this research is to perform a statistical analysis analysis of the dominant dimensions of the simulated bed forms in a three-dimensional hydrodynamic model coupled with particle transport processes; the numerical simulation of the variables will be applied to a shallow water river with a bed slope corresponding to that of a flat bed, such as the River Tercero as it passes through the city of Villa María. The SSIIM model will be applied to calculate flow and sediment transport variables in the selected domain; SSIIM is a computational fluid dynamics tool for the simulation of three-dimensional flow and sediment transport variables in flows with free surface. The software is freely distributed and has some open source libraries for the development of calculation methodologies.

The spatial and temporal density of the simulated results of fluvial morphology make it possible to propose as an innovation of this work the use of spectral analysis methodologies based on the discrete Fourier transform and Morlet wavelet curves to describe the dominant scales of the bed forms signals. Identifying the dominant scales of bed forms by means of spectral analysis techniques will allow to establish the variability in time and space of fluvial morphology and to quantify the influence of the different scales of bed forms in the field of flow and in the resistance exerted by the solid boundaries on the flow. As a hypothesis, it is proposed that in a shallow water channel, the hydrodynamic processes related to the bed forms would have three-dimensional characteristics, reason also the use of a three-dimensional model is justified to simulate hydrodynamic processes in the selected domain.

Keywords: SSIIM, ADCP, WAVELETS.

SIMULAÇÃO HIDRODINÂMICA TRIDIMENSIONAL COM PROCESSOS DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS NUM CAUCE NATURAL

Resumo:

Os fenômenos nos fluxos com superfície livre que ocorrem na natureza são de tal complexidade que dificilmente podem ser resolvidos com métodos analíticos precisos. Por esta razão, procura-se a aplicação de modelos e simulações com o uso de técnicas experimentais e numéricas que permitam determinar as variáveis que caracterizam o fluxo nos rios. No contexto da aplicação de técnicas matemáticas e numéricas para descrever e analisar o comportamento hidráulico dos canais naturais, o desafio da simulação de hidrodinâmica tridimensional com processos de transporte de sedimentos foi proposto em um trecho de rio na província de Córdoba, Argentina. O estudo centra-se no trecho médio do rio Terceiro ou Ctalamochita localizado na localidade de Villa María, no sudeste da província.

O objetivo principal desta pesquisa é realizar uma análise estatística das dimensões dominantes das formas de fundo simuladas em um modelo hidrodinâmico tridimensional acoplado aos processos de transporte de partículas; a simulação numérica das variáveis será aplicada a um rio de águas rasas com uma inclinação inferior correspondente à de um leito plano, como o rio Tercero à medida que passa pela cidade de Villa María. O modelo SSIIM será aplicado para calcular o fluxo e as variáveis de transporte de sedimento no domínio selecionado; o SSIIM é uma ferramenta computacional de mecânica de fluidos para a simulação de variáveis de fluxo tridimensional e transporte de sedimentos em fluxos com superfície livre. O software é distribuído gratuitamente e tem algumas bibliotecas de código aberto para o desenvolvimento de metodologias de cálculo.

A densidade espacial e temporal dos resultados simulados da morfologia fluvial possibilita propor como inovação deste trabalho o uso de metodologias de análise espectral baseadas na curva de Fourier discreta e nas curvas wavelet de Morlet para descrever as escalas dominantes dos sinais formas de fundo. Identificar escalas principais formas de fundo por meio de técnicas de análise espectral vai estabelecer a variabilidade no tempo e no espaço de morfologia rio e quantificar a influência de diferentes escalas formas de fundo no campo de fluxo e a resistência exercida pela fronteiras sólidas sobre a corrente. Como hipótese, propõe-se que, em um canal de águas rasas, os processos hidrodinâmicos relacionados às formas de fundo tenham características tridimensionais, razão pela qual o uso de um modelo tridimensional para simular os processos hidrodinâmicos no domínio selecionado também é justificado.

Palavras chave: SSIIM, ADCP, WAVELETS.

Índice

1. Introducción.....	2
1.1. Presentación de Antecedentes.....	3
1.2. Objetivos y Metodología	6
1.3. Aspectos Innovadores	7
1.4. Estructura del Informe de Tesis Doctoral	8
2. Dominio y Caracterización Experimental.....	11
2.1. Descripción de la Zona de Estudio	11
2.2. Presentación de Datos Experimentales	13
2.3. Discretización del Dominio Espacial.....	23
2.3.1. Método de Discretización del Dominio Espacial por Volúmenes Finitos	23
2.3.2. Discretización Espacial en el Tramo del río Tercero Aguas Abajo del Puente Juan Bautista Alberdi.	26
3. Solución del Flujo Tridimensional con Transporte de Sedimentos. Aplicación al Río Tercero, Provincia de Córdoba	32
3.1. Discretización de la Ecuaciones Diferenciales	35
3.1.1. Esquema de Primer Orden con Ley Potencial	35
3.1.2. Esquema de Segundo Orden Contra el Viento	36
3.1.3. Esquema de Diferencias Centrales	37
3.1.4. Interpolación Cuadrática Aguas Arriba para la Cinética Convectiva.....	38
3.1.5. Discretización de los Términos Temporales	38
3.1.6. Condiciones de Contorno	39
3.2. Solución de las Ecuaciones de Navier Stokes	40
3.3. Solución de la Evolución Espacial y Temporal de las Formas de Fondo.....	44
3.4. Validación de la Simulación Hidrodinámica Tridimensional con Transporte de Sedimentos en el Tramo Medio del río Tercero	48
3.5. Resultados de la Simulación Hidrodinámica Tridimensional con Transporte de Sedimentos en el Tramo Medio del Río Tercero.....	56
3.6. Análisis de Sensibilidad.....	72
4. Discretización de las Formas de Fondo Mediante la Identificación de Frecuencias Dominantes.....	85
4.1. Metodología.....	85
4.1.1. Discretización con la Transformada Discreta de Fourier	85

4.1.2.	Discretización con Curvas Wavelets	86
4.1.3.	Diagramas de Hovmöller.....	91
4.1.4.	Correlación Cruzada de Señales Unidimensionales	91
4.2.	Análisis de Resultados	92
5.	Conclusiones, Recomendaciones y Aspectos Innovadores	101
5.1.	Conclusiones	101
5.2.	Recomendaciones	103
5.3.	Aspectos Innovadores Alcanzados	105
6.	Referencias.....	107

Índice de Figuras

Figura 2. 1. Esquema de la ubicación geográfica del río Tercero o Ctlamochita.	13
Figura 2. 2. Esquema del funcionamiento del perfilador de corriente acústico doppler (Díaz Lozada, 2014).	14
Figura 2. 3. Sección de aforo en el río Tercero, aguas abajo del puente Juan Bautista Alberdi de la ciudad de Villa María.....	14
Figura 2. 4. Número de Froude y número de Reynolds en la sección de aforo del río Tercero.	16
Figura 2. 5. Resultados de la velocidad promediada en la sección de aforo medidas con un instrumento ADCP.	16
Figura 2. 6. Señales de la morfología fluvial medidas con ADCP sobre la sección longitudinal media del río Tercero, $Q=113.85 \text{ m}^3/\text{s}$	18
Figura 2. 7. Señales de la morfología fluvial medidas con ADCP sobre la sección longitudinal media del río Tercero, $Q=24.90 \text{ m}^3/\text{s}$	19
Figura 2. 8. Señales de la morfología fluvial medidas con ADCP sobre la sección longitudinal media del río Tercero, $Q=18.89 \text{ m}^3/\text{s}$	20
Figura 2. 9. Curva granulométrica del material del lecho obtenido en el tramo del río Tercero aguas abajo del puente Juan Bautista Alberdi.....	22
Figura 2. 10. Volumen de Control en forma de hexaedro de una malla estructurada.	24
Figura 2. 11. Modelo digital del terreno en el tramo del río Tercero aguas abajo del puente Juan Bautista Alberdi.	27
Figura 2. 12. Superficie sólida del tramo del río Tercero aguas abajo del puente Juan Bautista Alberdi.....	28
Figura 2. 13. Condiciones de contorno aguas abajo del tramo del río Tercero aguas abajo del puente Juan Bautista Alberdi.....	28
Figura 2. 14. Discretización del dominio espacial del tramo del río Tercero aguas abajo del puente Juan Bautista Alberdi, $Q=113.85 \text{ m}^3/\text{s}$	29
Figura 2. 15. Discretización del dominio espacial del tramo del río Tercero aguas abajo del puente Juan Bautista Alberdi, $Q=65.84 \text{ m}^3/\text{s}$	30
Figura 2. 16. Discretización del dominio espacial del tramo del río Tercero aguas abajo del puente Juan Bautista Alberdi, $Q=18.89 \text{ m}^3/\text{s}$	30
Figura 3. 1. Moléculas de cálculo de esquemas contra el viento.....	37
Figura 3. 2. Diagrama de Shields para el transporte de sedimentos (García, 1999).....	45
Figura 3. 3. Resultados de la velocidad media observada y simulada en el flujo del río Tercero.....	48
Figura 3. 4. Correlación de los resultados de la profundidad media observada y simulada en el flujo del río Tercero.....	50
Figura 3. 5. Correlación de los resultados observados y simulados del ancho de la sección de control aguas abajo del puente Juan Bautista Alberdi.....	51

Figura 3. 6. Curva H-Q de los resultados observados y simulados en el flujo del río Tercero.	52
Figura 3. 7. Transporte de carga de fondo simulado en SSIIM y observado con ADCP en el flujo del río Tercero aguas abajo del puente Juan Bautista Alberdi.	53
Figura 3. 8. Señales de la morfología fluvial proyectada de la sección longitudinal media del río Tercero, $Q=113.85 \text{ m}^3/\text{s}$	54
Figura 3. 9. Señales de la morfología fluvial proyectada de la sección longitudinal media del río Tercero, $Q= 24.90 \text{ m}^3/\text{s}$	54
Figura 3. 10. Señales de la morfología fluvial proyectada de la sección longitudinal media del río Tercero, $Q=18.89 \text{ m}^3/\text{s}$	55
Figura 3. 11. Esquema de áreas coloreadas que representan la velocidad media superficial del flujo del río Tercero aguas abajo del puente Juan Bautista Alberdi.	57
Figura 3. 12. Vectores que representan la velocidad media superficial del flujo del río Tercero aguas abajo del puente Juan Bautista Alberdi.	58
Figura 3. 13. Esquema de áreas coloreadas que representan la variable y^+ de la simulación del flujo del río Tercero aguas abajo del puente Juan Bautista Alberdi.	60
Figura 3. 14. Perfiles de la viscosidad cinemática turbulenta adimensional promediada en distintos planos de discretización.	61
Figura 3. 15. Esquema de áreas coloreadas que representan la velocidad media en la sección de control del flujo del río Tercero aguas abajo del puente Juan Bautista Alberdi.	62
Figura 3. 16. Esquema de áreas coloreadas que representan la velocidad media en un corte longitudinal del río Tercero aguas abajo del puente Juan Bautista Alberdi.	63
Figura 3. 17. Superficies sólidas que representan la morfología del tramo del río Tercero aguas abajo del puente Juan Bautista Alberdi para un evento de $Q = 113.85 \text{ m}^3/\text{s}$	64
Figura 3. 18. Superficies sólidas que representan la morfología del tramo del río Tercero aguas abajo del puente Juan Bautista Alberdi para un evento de $Q = 65.84 \text{ m}^3/\text{s}$	64
Figura 3. 19. Superficies sólidas que representan la morfología del tramo del río Tercero aguas abajo del puente Juan Bautista Alberdi para un evento de $Q = 24.90 \text{ m}^3/\text{s}$	65
Figura 3. 20. Superficies sólidas que representan la morfología del tramo del río Tercero aguas abajo del puente Juan Bautista Alberdi para un evento de $Q = 18.89 \text{ m}^3/\text{s}$	65
Figura 3. 21. Proyección de un corte longitudinal de la morfología fluvial del río Tercero aguas abajo del puente Juan Bautista Alberdi en medio del cauce, $Q= 113.85 \text{ m}^3/\text{s}$	66
Figura 3. 22. Proyección de un corte longitudinal de la morfología fluvial del río Tercero aguas abajo del puente Juan Bautista Alberdi en medio del cauce, $Q= 65.84 \text{ m}^3/\text{s}$	66
Figura 3. 23. Proyección de un corte longitudinal de la morfología fluvial del río Tercero aguas abajo del puente Juan Bautista Alberdi en medio del cauce, $Q= 24.90 \text{ m}^3/\text{s}$	67
Figura 3. 24. Proyección de un corte longitudinal de la morfología fluvial del río Tercero aguas abajo del puente Juan Bautista Alberdi en medio del cauce, $Q=18.89 \text{ m}^3/\text{s}$	67
Figura 3. 25. Coeficiente de auto correlación de las señales de morfología fluvial simuladas en el río Tercero para los eventos de $113.85 \text{ m}^3/\text{s}$, $65.84 \text{ m}^3/\text{s}$, $24.90 \text{ m}^3/\text{s}$ y $18.89 \text{ m}^3/\text{s}$	68
Figura 3. 26. Distribución de la carga de sedimentos en la sección de control del río Tercero, $Q=113.85 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q=65.84 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q=24.9 \text{ m}^3/\text{s}$ y $Q=18.89 \text{ m}^3/\text{s}$	69

Figura 3. 27. Resultados del perfil de transporte de sedimentos del río Tercero simulado en SSIIM, $Q=113.85 \text{ m}^3/\text{s}$.	70
Figura 3. 28. Resultados del perfil de transporte de sedimentos del río Tercero simulado en SSIIM, $Q=65.84 \text{ m}^3/\text{s}$.	70
Figura 3. 29. Resultados del perfil de transporte de sedimentos del río Tercero simulado en SSIIM, $Q=24.90 \text{ m}^3/\text{s}$.	71
Figura 3. 30. Resultados del perfil de transporte de sedimentos del río Tercero simulado en SSIIM, $Q=18.89 \text{ m}^3/\text{s}$.	71
Figura 3. 31. Resultados de los modos de transporte de sedimentos en el tramo del río Tercero aguas abajo del puente Juan Bautista Alberdi.	72
Figura 3. 32. Malla y esquema de áreas coloreadas que representan la velocidad media en la sección de control del flujo del río Tercero, $Q = 113.85 \text{ m}^3/\text{s}$.	73
Figura 3. 33. Malla y esquema de áreas coloreadas que representan la velocidad media superficial en el tramo simulado del río Tercero, $Q = 113.85 \text{ m}^3/\text{s}$.	75
Figura 3. 34. Proyección de un corte longitudinal de la morfología fluvial del río Tercero para justificar el régimen de las formas de fondo, $Q=113.85 \text{ m}^3/\text{s}$.	78
Figura 3. 35. Proyección de un corte longitudinal de la morfología fluvial del río Tercero para justificar el régimen de las formas de fondo, $Q=65.84 \text{ m}^3/\text{s}$.	78
Figura 3. 36. Proyección de un corte longitudinal de la morfología fluvial del río Tercero para justificar el régimen de las formas de fondo, $Q=24.90 \text{ m}^3/\text{s}$.	78
Figura 3. 37. Proyección de un corte longitudinal de la morfología fluvial del río Tercero para justificar el régimen de las formas de fondo, $Q=18.89 \text{ m}^3/\text{s}$.	79
Figura 3. 38. Evolución de la altura de las formas de fondo en función del tiempo para los eventos de $113.85 \text{ m}^3/\text{s}$, $65.84 \text{ m}^3/\text{s}$, $24.90 \text{ m}^3/\text{s}$ y $18.89 \text{ m}^3/\text{s}$.	81
Figura 3. 39. Evolución de la longitud de las formas de fondo en función del tiempo para los eventos de $113.85 \text{ m}^3/\text{s}$, $65.84 \text{ m}^3/\text{s}$, $24.90 \text{ m}^3/\text{s}$ y $18.89 \text{ m}^3/\text{s}$.	81
Figura 3. 40. Perfiles de velocidad en el medio de la sección de control simulados para el evento de $113.85 \text{ m}^3/\text{s}$.	82

Figura 4. 1. Funciones base de wavelets tipo Morlet y Sombrero Mexicano (Torrence y Compo, 1998).	87
Figura 4. 2. Ejemplo del análisis espectral de una señal sinodal.	90
Figura 4. 3. Esquema de la señales unidimensionales de formas de fondo analizadas.	92
Figura 4. 4. Señales unidimensionales de formas de fondo simuladas en SSIIM, $Q = 113.85 \text{ m}^3/\text{s}$.	93
Figura 4. 5. Análisis de frecuencias con la transformada de Fourier y curvas wavelets tipo Morlet, Señal "0" $Q = 113.85 \text{ m}^3/\text{s}$.	94
Figura 4. 6. Relación de la geometría de señales de formas de fondo tipo dunas, $Q = 113.85 \text{ m}^3/\text{s}$.	96
Figura 4. 7. Diagrama de Hovmöller de formas de fondo tipo dunas, $Q = 113.85 \text{ m}^3/\text{s}$.	97
Figura 4. 8. Duna perteneciente a la proyección de un corte longitudinal de la morfología fluvial del río Tercero, $Q = 113.85 \text{ m}^3/\text{s}$.	99

Índice de Tablas

Tabla 2. 1. Características de los embalses construidos en la cuenca alta del río Tercero. (Empresa Provincial de Energía de Córdoba, 2015).	12
Tabla 2. 2. Resumen de resultados de las campañas de aforo con el instrumento ADCP....	15
Tabla 2. 3. Resultados del transporte de carga de fondo en el tramo del río Tercero aguas abajo del puente Juan Bautista Alberdi.	17
Tabla 2. 4. Estadística descriptiva de las señales de la morfología fluvial observadas con ADCP sobre la sección longitudinal media del río Tercero, $Q=113.85 \text{ m}^3/\text{s}$	18
Tabla 2. 5. Estadística descriptiva de las señales de la morfología fluvial observadas con ADCP sobre la sección longitudinal media del río Tercero, $Q=24.90 \text{ m}^3/\text{s}$	19
Tabla 2. 6. Estadística descriptiva de las señales de la morfología fluvial observadas con ADCP sobre la sección longitudinal media del río Tercero, $Q=18.89 \text{ m}^3/\text{s}$	20
Tabla 2. 7. Media de los índices de la estadística descriptiva de las señales de morfología fluvial observadas con ADCP sobre la sección longitudinal media del río Tercero.	21
Tabla 2. 8. Granulometría del material del lecho obtenido en el tramo del río Tercero aguas abajo del puente Juan Bautista Alberdi (Días Lozada, 2014).	22
Tabla 2. 9. Detalles de la discretización del dominio vertical adoptada en el tramo del río Tercero aguas abajo del puente Juan Bautista Alberdi.	29
Tabla 3. 1. Resultados de la velocidad media observada y simulada en el flujo del río Tercero.	49
Tabla 3. 2. Resultados de la profundidad media observada y simulada en el flujo del río Tercero.....	50
Tabla 3. 3. Resultados observados y simulados del ancho de la sección de control aguas abajo del puente Juan Bautista Alberdi.	51
Tabla 3. 4. Estadística descriptiva de las señales de la morfología fluvial del río Tercero en el tramo aguas abajo del puente Juan Bautista Alberdi.	55
Tabla 3. 5. Altura media de rugosidad y formas de fondo del tramo simulado en el río Tercero aguas abajo del puente Juan Bautista Alberdi.	76
Tabla 3. 6. Estadística descriptiva de las señales de la morfología fluvial del río Tercero en el tramo aguas abajo del puente Juan Bautista Alberdi en función del tiempo, $Q = 113.85 \text{ m}^3/\text{s}$	79
Tabla 3. 7. Estadística descriptiva de las señales de la morfología fluvial del río Tercero en el tramo aguas abajo del puente Juan Bautista Alberdi en función del tiempo, $Q = 65.84 \text{ m}^3/\text{s}$	80
Tabla 3. 8. Estadística descriptiva de las señales de la morfología fluvial del río Tercero en el tramo aguas abajo del puente Juan Bautista Alberdi en función del tiempo, $Q = 24.90 \text{ m}^3/\text{s}$	80
Tabla 3. 9. Estadística descriptiva de las señales de la morfología fluvial del río Tercero en el tramo aguas abajo del puente Juan Bautista Alberdi en función del tiempo, $Q = 18.89 \text{ m}^3/\text{s}$	80

Tabla 4. 1. Resultados del análisis de frecuencias realizado en las señales unidimensionales de formas de fondo simuladas en SSIIM, $Q = 113.85 \text{ m}^3/\text{s}$	95
Tabla 4. 2. Desfasaje entre señales unidimensionales contiguas de formas de fondo simuladas en SSIIM, $Q = 113.85 \text{ m}^3/\text{s}$	98
Tabla 4. 3. Estimación de la celeridad en base al análisis de correlación cruzada en señales con pasos de tiempo de 18000 y 20000 segundos.	99

Símbolos

Δ → Altura de las Formas de Fondo.

α → Función de Fracción Volumétrica.

B → Ancho del Flujo.

b → Índice que Representa un Nivel Cercano al Fondo del Flujo.

c → Concentración de Sedimento en Suspensión.

c_b → Concentración de Sedimento en suspensión cerca del Fondo.

C_D → Coeficiente de Dragado de las Partículas en el Flujo.

C_{fs} → Coeficiente de Resistencia a la Fricción sin Considerar Formas de Fondo.

C_f → Coeficiente de Fricción de Darcy-Weisbach.

C_u → Número de Courant.

\bar{c} → Concentración Volumétrica de Sedimento en Suspensión Promediada sobre la Turbulencia del Flujo.

\dot{c} → Fluctuación Instantánea de la Concentración de Sedimentos en Suspensión debida a la Turbulencia del Flujo.

\bar{c}_b → Concentración Volumétrica de Sedimentos Cerca del Fondo Promediada sobre la Turbulencia del Flujo.

D → Diámetro de las Partículas de Sedimentos.

D_d → Difusión Cinemática de Remolinos en el Flujo Turbulento.

D_r → Tasa del Volumen de Deposición del Material por Unidad de Área.

D_{50} → Diámetro Medio del Sedimento.

D_{90} → Diámetro Característico por el que Pasa el 90% de Sedimentos de una Muestra.

D^* → Diámetro Adimensional de la Partícula.

δ_b → Espesor de la Capa de Transporte de Carga de Fondo.

δ_{ij} → Función Delta de Kronecker.

E → Término que representa la Energía.

E_r → Tasa del Volumen de Erosión del Material por Unidad de Área.

E_s → Tasa que Representa la Interacción entre Sedimento de Carga de Fondo y los Sedimentos en la Columna de Agua.

E_S^* → Tasa Adimensional que Representa la Interacción entre Sedimento de Carga de Fondo y los Sedimentos en la Columna de Agua.

E_T → Tasa de Producción de Energía Cinética Turbulenta desde el Flujo debido a su Interacción con los Esfuerzos de Reynolds.

ϵ_{ij} → Tensor de la Tasa de Deformación de una Partícula.

$\dot{\epsilon}_{ij}$ → Tensor de la Tasa de Deformación de una Partícula Asociado a las Fluctuaciones de Velocidad.

ϵ → Tasa de Disipación de la Energía Cinética Turbulenta.

F → Vector de Fuerzas Externas.

F_f → Flujo de masa sobre una cara f .

F_i → Vector del Flujo de Volumen de Sedimento en Suspensión Promediado sobre la Turbulencia.

F_r → Número de Froude.

\bar{F}_{xz} → Flujo Neto Vertical de Sedimentos en Suspensión.

Γ → Coeficiente de Difusión.

G → Gravedad Específica del Sedimento Sumergido.

g → Aceleración de la Fuerza de Gravedad de la Tierra.

σ_K → Coeficiente de Schmidt.

H → Profundidad del Flujo.

h → Distancia Vertical desde el Fondo a un Punto de Referencia del Flujo.

i, j, k → Índices que representan los 3 ejes cartesianos de forma Local.

J → Término que representa el Calor.

K → Energía Cinética Turbulenta del Flujo.

k → Índice de Frecuencia de una Señal.

k_S → Rugosidad de Nikuradse.

κ → Constante de von Karman.

L → Término que representa la escala de Longitud.

L_S → Longitud Recorrida por la Partícula en la Interacción entre Carga de Fondo y en Suspensión hasta su Deposición en el Fondo.

L_s^* → Variable Adimensional que Representa la Longitud Recorrida por la Partícula en la Interacción entre Carga de Fondo y en Suspensión hasta su Deposición en el Fondo.

λ → Longitud de las Formas de Fondo.

λ_b → Longitud de Saltación de una Partícula.

λ_p → Porosidad del Sedimento.

m → Término que representa la masa de una Partícula.

N → Periodo de una Señal.

n → Coeficiente de Rugosidad de Manning.

N_b → Número de Partículas de Carga de Fondo en Movimiento por Unidad de Área.

\aleph → Parámetro del Nivel de Transporte de Sedimentos.

$\hat{\theta}^*$ → Función base de una curva del tipo wavelets.

p → Término que representa la presión hidrostática.

\hat{p} → Término que representa la presión piezométrica.

P_e → Número de Peclet del Flujo.

ρ → Densidad del Fluido.

ρ_s → Densidad del Sedimento.

q_b → Volumen de Carga de Sedimentos de Fondo Transportada por Unidad de Ancho.

q_s → Volumen de Sedimentos en Suspensión Transportado por Unidad de Ancho.

q^* → Tasa Adimensional de Transporte de Carga de Fondo.

r → Vector de Posición.

R_e → Número de Reynolds del Flujo.

R_{ep} → Número de Reynolds de la Partículas de Sedimento.

S → Término que representa la Entropía en un Sistema.

s → Pendiente de Fondo.

S_e → Pendiente de la Línea de Energía del Flujo.

S_f → Vector de Área de un Plano de un Volumen de Control.

T → Torque Generado por las Fuerzas Dinámicas de un Flujo.

T^{abs} → Término que representa la Temperatura Absoluta de un Sistema.

T° → Temperatura del Agua en Grados Centígrados.
 T_b → Periodo de la Longitud de Saltación de una Partícula.
 t → Escala Temporal.
 τ^* → Esfuerzo Cortante Adimensional.
 τ_b → Esfuerzo Cortante en el Fondo.
 τ_c → Esfuerzo de Corte Crítico para el Inicio del Movimiento.
 τ_c^* → Esfuerzo de Corte Crítico Adimensional.
 τ_{ij} → Tensor de Esfuerzos Aplicados a una Partícula.
 τ_{tij} → Tensor de Esfuerzos Turbulentos o Esfuerzos de Reynolds.
 τ_{vij} → Tensor de Esfuerzos Viscosos.
 τ_s^* → Esfuerzo Cortante Superficial de las Partículas.
 U → Término que representa una escala de Velocidad.
 $(u, v, w) = (u_1, u_2, u_3)$ → Las tres componentes del vector de velocidad V .
 u_b → Velocidad de Partículas de Carga de Fondo.
 u_s → Velocidad de Partículas de Carga en Suspensión.
 $\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}$ → Velocidad Media del Flujo en un Punto.
 $\dot{u}, \dot{v}, \dot{w}$ → Fluctuaciones de Velocidad del Flujo Turbulento.
 μ → Viscosidad Dinámica del Fluido.
 μ_d → Coeficiente de Fricción Dinámico.
 μ_t → Viscosidad Dinámica de los Vórtices.
 μ_* → Velocidad de Corte del Flujo.
 μ_{*c} → Velocidad de Corte Crítico del Flujo.
 V → Vector de Velocidad de un Flujo.
 ν → Viscosidad Cinemática del Fluido.
 ν_t → Viscosidad Cinemática de los Vórtices.
 ν_s → Velocidad de Caída de las Partículas de Sedimento.
 \forall_b → Volumen de las Partículas del Transporte de Carga de Fondo.
 \forall_P → Volumen de Control de un Elemento con Centroides P .

W → Trabajo realizado por las Fuerzas Externas.

$WT_{n(a)}$ → Transformada discreta con curva tipo wavelets.

ω_p → Factor de Peso de un Elemento con Centroide P .

$(x, y, z) = (x_1, x_2, x_3)$ → Índices que representan los 3 ejes cartesianos en forma Global.

\hat{x}_k → Transformada de Fourier discreta de una secuencia x_n .

Capítulo 1:

Introducción

1. Introducción

La solución numérica de las variables de flujo y transporte de sedimentos en canales, ríos y áreas costeras son todavía un desafío para las ramas de investigación relacionadas a la ingeniería hidráulica; esto debido a la importancia física de los procesos de erosión y deposición de partículas en un flujo natural. Por ejemplo, la erosión de las riberas de inundación y la deposición de sedimentos en el fondo de un cauce, pueden llevar al desarrollo de zonas de desborde, y por lo tanto, a problemas de inundación en zonas vulnerables. Así mismo, la construcción de obras y operaciones hidráulicas pueden cambiar el régimen y equilibrio en ríos, procesos que si no son cuidadosamente analizados, pueden resultar en problemas de erosión o deposición a lo largo del cauce que afectarán a las zonas pobladas cerca de las riberas.

Según Vanoni (1975), los principales agentes naturales causantes del movimiento de sedimentos son las variables relacionadas con el movimiento del agua, el viento, la acción de las fuerzas gravitatorias y el cambio de estado de las masas de agua (deshielo y precipitación). La dinámica de sedimentos debido a la acción del flujo de agua a través de canales se puede definir como sedimentación fluvial; y se puede dividir en procesos de erosión, arrastre, transporte y sedimentación de las partículas. Cada uno de estos procesos de gran complejidad han sido estudiados por innumerables grupos de investigación, estos esfuerzos conjuntos se han realizado en las últimas décadas para comprender la mecánica del movimiento de sedimentos en el agua corriente y los intentos de aplicar este conocimiento para resolver problemas relacionados, tales como inundaciones, meandros, colmatación de embalses, la erosión, la deposición, la socavación local, diseño de canales estables y la navegación. A pesar de estos esfuerzos, la determinación precisa del criterio que identifica las condiciones de flujo responsables del movimiento de sedimentos sigue siendo difícil de alcanzar (Dwivedi et al, 2010).

En la erosión, el desprendimiento de partículas puede ser atribuida a la energía cinética producida por el impacto de la lluvia, o por las fuerzas generadas por la escorrentía superficial del agua. Ocurrida la erosión, los procesos de arrastre y transporte dependen de la forma, tamaño y peso de las partículas, así como; de la magnitud de las fuerzas aplicadas sobre las partículas por el flujo. Cuando la magnitud de estas fuerzas disminuye por cambios en las variables del flujo a lo largo del cauce, la tasa de transporte se reduce o suprime; produciéndose la deposición (Vanoni, 1975).

La solución de un flujo con superficie libre y transporte de sedimentos puede ser definida con un esquema de flujo multifásico: la fase líquida representada por el agua, la fase gaseosa por el aire y la fase sólida por las partículas del sedimento transportado. Por la alta complejidad de estos esquemas, la simulación numérica computacional es una herramienta que se presenta para una mejor comprensión de estos fenómenos físicos. La solución de estas variables se alcanza con el uso de las leyes físicas de transporte de masa, momento y energía. Gracias a los rápidos avances de la tecnología en la ingeniería computacional, es posible la predicción de resultados precisos respecto a las variables observadas; para lo cual, se ha

desarrollado herramientas de vanguardia en la solución de fenómenos de flujos complejos, herramientas relacionadas con el nombre de mecánica de fluidos computacional (Ishii y Hibiki, 2006).

Por lo tanto, los problemas prácticos y teóricos de la mecánica de fluidos pueden ser abordados a través de esquemas de mecánica de fluidos computacional; concretamente en la rama de la hidráulica fluvial estos esquemas pueden ser tomados para la solución de flujos turbulentos con transporte de sedimentos y cambios morfológicos en el fondo del cauce. Los métodos que permiten una solución parcial de las variables de la hidrodinámica del flujo, con valores de turbulencia realistas respecto a la naturaleza y en geometrías complejas, son las metodologías dadas por las ecuaciones de Navier Stokes promediadas por Reynolds (Reynolds Average Navier Stokes – RANS) y la simulación de grandes vórtices (Large Eddy Simulation – LES). Sin embargo, cuando la predicción del sedimento es parte de la solución, existe incertidumbre en los resultados; esto debido a los complejos procesos de la interacción del flujo con el sedimento y con las fronteras sólidas del modelo. Los procesos que están totalmente acoplados con los cambios en la batimetría debido al componente de la carga de fondo y arrastre, induciendo deposición/erosión del sedimento, afectan el flujo hidrodinámico que a su vez influencia la advección del sedimento en suspensión por la redistribución de los esfuerzos de fondo y que también afectará el componente de carga de fondo, para que en forma compleja e iterativa, se afecte la batimetría del fondo del cauce (Zeng et al, 2005).

Una breve introducción cuenta la complejidad de la disciplina de la hidráulica fluvial con transporte de sedimentos, por lo que antes de abordar la solución del problema es necesario describir la metodología para alcanzar resultados satisfactorios en el estudio de la simulación numérica de las variables hidrodinámicas y de transporte de partículas de un cauce natural. A continuación en la sección 1.1 se presenta la revisión de estudios previos, en la sección 1.2 se presentan los objetivos y la metodología de trabajo, en la sección 1.3 los aspectos innovadores que se plantean alcanzar al final de la investigación, y finalmente, en la sección 1.4 se describe la estructura del documento de tesis doctoral.

1.1. Presentación de Antecedentes

Los modelos numéricos para la solución de procesos acoplados de flujo con transporte de sedimentos en cauces naturales pueden ser identificados por las dimensiones del cálculo de las variables del flujo, el rango de aplicación y los procesos que se plantea simular. Según la dimensión del problema existen enfoques unidimensionales, bidimensionales y tridimensionales para el cálculo del movimiento del flujo y sedimento. Según el rango de aplicación, se pueden validar las simulaciones de flujos con superficie libre en base a datos medidos en dominios experimentales o en dominios de prototipo. Según los procesos, se pueden simular flujos en cauces naturales con lechos no erosionables, o incluir la erosión y deposición en los algoritmos de cálculo para estimar formas de fondo. Los procesos físicos simulados, también están relacionados con la forma del cauce, profundidad del flujo, características de los sedimentos, tipo de vegetación y otras propiedades del río, que

determinarán el esquema de cálculo conveniente respecto a las variables que serán analizadas (Ruther, 2006).

Los esquemas unidimensionales han sido utilizados por la versatilidad y velocidad con la que se realizan los cálculos de las variables del flujo en ríos, resultados de utilidad para aproximaciones con fines de diseño en la rama de la ingeniería hidráulica; sin embargo, estos esquemas tienen limitaciones para problemas de flujo con transporte de sedimentos al considerar valores medios de la dinámica del flujo en el dominio de cálculo, lo que restringe integrar los procesos de transporte de partículas en el tramo de un cauce natural (Guo y Jin, 1999) (Neary et al, 2001).

Una alternativa ampliamente empleada para el cálculo de variables de flujo con transporte de sedimentos son los esquemas bidimensionales. Los modelos de flujo bidimensional pueden estimar con precisión cambios en la morfología por el transporte de sedimentos, siempre que los procesos tridimensionales en el flujo sean de magnitud despreciable. Mendoza et al (2016), presentaron los resultados de la simulación numérica bidimensional del flujo de un canal experimental con características de meandro, donde consideraron la evolución de la morfología fluvial, resolviendo las ecuaciones de Saint Venant bidimensionales para representar la hidrodinámica del flujo y la ecuación de balance de masa para estimar la evolución de la morfología en base a la formulación empírica para estimar la carga de transporte de sedimentos de fondo dada por Meyer-Peter y Müller (1948) modificada por Wong y Parker (2006).

En los últimos años, modelos numéricos tridimensionales han sido desarrollados para el cálculo de variables de flujo y transporte de sedimentos. Un modelo de flujo con superficie libre puede ser resuelto con las ecuaciones tridimensionales de Navier Stokes promediadas por Reynolds con modelos de cierre de la turbulencia de dos ecuaciones ($K - \epsilon$). Los módulos de transporte de sedimentos están compuestos por modelos cuasi-empíricos de carga en suspensión y carga de fondo. El transporte de las partículas de sedimentos en suspensión puede ser simulado a través de la ecuación general de advección-difusión con expresiones empíricas que representan la velocidad vertical de caída de las partículas. La evolución de la morfología del cauce puede ser simulada a partir de la ecuación general del balance de masa. Metodologías empíricas para el cálculo de la carga de sedimento de fondo y la interacción con la carga en suspensión han sido implementadas en base a estudios realizados por Meyer-Peter y Müller (1948), Einstein (1950), Engelund y Fredsøe (1976), van Rijn (1984^a) o Wong y Parker (2006); por nombrar algunas metodologías. Esquemas tridimensionales similares al descrito han sido validados para simular dominios experimentales, calculando las variables hidrodinámicas, de transporte de sedimentos y evolución de la morfología para diferentes condiciones en canales de laboratorio de flujo con superficie libre (Odgaard y Bergs, 1988) (Wu et al, 2000) (Zeng et al, 2005) (Liu y García, 2008) (Esmaili et al, 2013) (Ota et al, 2016) (Torok et al, 2017). También, se reseña investigaciones de simulación hidrodinámica tridimensional con procesos de transporte de partículas y evolución de la morfología en dominios de prototipo, como lo son tramos de

cauces naturales y estructuras hidráulicas (Olesen, 1987) (Nagata et al, 2005) (Haun et al, 2015) (Hillebrand et al, 2017).

Entre los esquemas de cálculo tridimensionales que han sido desarrollados con una metodología similar a la descrita en el párrafo anterior, se destaca el modelo hidrodinámico SSIIM, que será aplicado en este trabajo. El modelo SSIIM ha sido implementado para llevar a cabo simulación hidrodinámica tridimensional con transporte de partículas y estimación de la morfología fluvial en dominios de cauces naturales con características de aguas poco profundas y con pendiente de ríos de llanura (Ruther, 2006) (Fischer-Antze et al, 2008) (Khassaf y Hassan, 2014) (Esmaeili, 2015).

En base a lo expuesto, se concluye que hay un extenso número de estudios de simulación numérica tridimensional con transporte de partículas y evolución de la morfología de flujos con superficie libre. Sin embargo, se plantea que mediante el análisis estadístico de los resultados de la evolución temporal y espacial de la morfología fluvial simulada, se podría alcanzar la originalidad en esta tesis. La predicción y cuantificación de la geometría de las formas de fondo de un cauce natural es esencial para contar con una descripción de la interacción del flujo con las fronteras sólidas. Para este propósito, llevar a cabo un adecuado análisis estadístico de la evolución temporal y espacial de la morfología fluvial será fundamental para caracterizar las dimensiones dominantes de las formas de fondo en un cauce natural. Técnicas de análisis espectral, como lo son la transformada discreta de Fourier y las transformaciones con curvas wavelets, son herramientas de vanguardia para describir con detalle las características morfológicas de flujos con transporte de partículas (Catano-Lopera et al, 2009).

En los últimos años se ha llevado a cabo investigaciones de las variables morfológicas de flujos con superficie libre mediante el uso de metodologías de análisis espectral. En este sentido, Gutierrez et al (2014), realizaron la cuantificación de la variabilidad de la geometría en planta de ríos con características de meandros, basado en análisis espectral con las transformaciones con curvas wavelets tipo Morlet, donde se analizaron las señales de la geometría en planta de dieciséis ríos con diferentes características de meandros ajustándolos a señales unidimensionales en base a expresiones teóricas, que permitieron plantear la distribución espacial promedio de la variabilidad de la geometría en planta de los dominios analizados.

Concretamente, en el análisis de las características geométricas de las formas de fondo de un flujo con superficie libre; en base al análisis espectral con la transformada discreta de Fourier y curvas wavelets tipo Morlet, Catano-Lopera et al (2009) analizaron las señales de morfología fluvial de rizados y dunas generadas en canales de laboratorio de distinta configuración (en el flujo de un canal de ondas unidimensional y un canal con características de meandro), en los dos casos experimentaron con partículas de fondo con diámetro medio de 0.25 milímetros; y se concluyó que el análisis de las señales de morfología realizados con la curva wavelet tipo Morlet, resultó ser un complemento estadístico excelente en convenio con la transformada discreta de Fourier, esto para obtener una mayor resolución de

dimensiones con alta variabilidad de frecuencias cuando se plantea analizar patrones morfológicos de flujos con superficie libre.

Un estudio similar al realizado por Catano-Lopera et al (2009) fue abordado por Singh et al (2011), que describieron la geometría dominante de las señales de morfología fluvial medidas en un canal de fondo móvil unidimensional mediante técnicas de análisis espectral, basado en curvas wavelets tipo Sombrero Mexicano. En este estudio experimentaron con tamaños de partículas en el fondo que están en el rango de arenas y pequeñas gravas, con diámetros medios de 1 milímetro y 11.3 milímetros, respectivamente. Singh et al (2011), determinaron a partir de los resultados de dimensiones dominantes de la morfología fluvial, que las formas de fondo de menores dimensiones tendrían un patrón de mayor celeridad respecto a las formas de fondo de mayor dimensión, consecuencias que se evidenciaron de manera más explícita al analizar los resultados de la experimentación con partículas de mayor diámetro.

Aplicado a señales de formas de fondo medidas en prototipo, Gutierrez et al (2013), emplearon la metodología de análisis espectral en base a la transformada discreta de Fourier y curvas wavelets tipo Morlet a señales tridimensionales de morfología fluvial del río Paraná, donde pudieron discriminar diferentes escalas de formas de fondo que van desde grandes dunas hasta pequeños rizos superpuestos en el fondo de este cauce de grandes dimensiones; dejando en evidencia la importancia de estudiar la variabilidad de la morfología y cuantificar la influencia de las distintas escalas de formas de fondo en el campo de flujo y en la resistencia que ejercen las fronteras sólidas sobre la corriente. El desarrollo de técnicas experimentales de vanguardia, como lo son los sensores de tipo acústico, ha sido de vital importancia para alcanzar resultados innovadores en investigaciones de la morfología fluvial en flujos con superficie libre.

En este punto de la revisión de antecedentes, se destaca la importancia de analizar en detalle la geometría de formas de fondo simuladas. La investigación se direccionará a un río con características de aguas poco profundas y con pendiente de fondo correspondiente a la de un cauce de planicie, donde se plantea la hipótesis de que las características físicas y de interacción con el flujo de las formas de fondo en este tipo de ríos tendrían características marcadamente tridimensionales, esto en contraste con las formas de fondo con características bidimensionales que se observan en flujos de grandes ríos como lo es el Paraná (Latosinski, 2014). En la sección 1.3 de Aspectos Innovadores, se describirá con mayor detalle la contribución original que se desea alcanzar con el desarrollo de esta tesis doctoral.

1.2. Objetivos y Metodología

En base a la revisión de investigaciones previas en torno a la simulación numérica de la hidrodinámica fluvial con transporte de sedimentos, se plantea como objetivo principal realizar un análisis estadístico de las dimensiones dominantes de las formas de fondo simuladas en un modelo hidrodinámico tridimensional acoplado con procesos de transporte de partículas; la simulación numérica de las variables será aplicada a un río de aguas poco profundas y con pendiente de fondo correspondiente a la de un cauce de planicie. A partir de

este objetivo se describen en forma de pasos metodológicos los resultados que se desean alcanzar en este trabajo:

- Definir el dominio de un cauce natural para el cálculo de las variables de flujo tridimensional con transporte de sedimentos. El tramo seleccionado tendrá características de flujo medio, con profundidades de pequeña magnitud respecto al ancho del cauce. En el dominio seleccionado, será de importancia contar con información detallada de la batimetría del río para una discretización adecuada del dominio espacial. También, se deberá contar con información de las variables caracterizadas del flujo y transporte de sedimentos, información fundamental para validar los resultados de las simulaciones.
- Discretizar el dominio espacial seleccionado para el cálculo de las variables de flujo tridimensional con transporte de sedimentos. El método de discretización debe reproducir con precisión el dominio espacial en mallas, para implementar el esquema numérico; que en base a las ecuaciones de estado, deberá reproducir el comportamiento hidrodinámico y de transporte de sedimentos del dominio estudiado.
- Validar los resultados de la simulación numérica de las variables hidrodinámicas tridimensionales acopladas con procesos de transporte de sedimentos en el tramo seleccionado. Para validar los resultados será fundamental contar con los datos procesados de la experimentación en prototipo.
- Realizar un análisis de sensibilidad de las variables de la hidrodinámica tridimensional con procesos de transporte de sedimentos simuladas en el tramo de estudio.
- Cuantificar y discretizar las formas de fondo mediante análisis espectral con series de Fourier y curvas tipo wavelets, el análisis de frecuencias dominantes será aplicado a los resultados de formas de fondo estimados en la simulación numérica y que fueron validados con las señales de morfología fluvial obtenidas en la experimentación del tramo seleccionado.
- Analizar las escalas dominantes de las formas de fondo simuladas, se plantea un análisis para diferentes eventos y pasos temporales en busca de patrones que caractericen el comportamiento hidráulico y de transporte de partículas respecto a la morfología de fondo en el dominio seleccionado.

1.3. Aspectos Innovadores

Los resultados de la experimentación en flujos con superficie libre son indispensables para caracterizar y estudiar los procesos hidrodinámicos con transporte de partículas de un cauce natural; sin embargo, se destaca la ventaja de contar con resultados validados de simulación numérica del flujo, que tendrán una resolución espacial y temporal con mayor detalle respecto a los datos medidos con técnicas experimentales.

La densidad espacial y temporal de los resultados simulados de la morfología fluvial, permiten plantear como innovación de este trabajo el de emplear metodologías de análisis espectral en base a la transformada discreta de Fourier y curvas wavelets tipo Morlet para describir las escalas dominantes de las señales de formas de fondo estimadas. El tramo analizado tendrá características de aguas poco profundas y con pendiente de fondo

correspondiente a la de un cauce de planicie. Identificar las escalas dominantes de formas de fondo mediante las técnicas de análisis espectral permitirá establecer la variabilidad en tiempo y espacio de la morfología fluvial y cuantificar la influencia de las distintas escalas de formas de fondo en el campo de flujo y en la resistencia que ejercen las fronteras sólidas sobre la corriente. Como hipótesis se plantea que en un cauce de aguas poco profundas, los procesos hidrodinámicos relacionados con las formas de fondo tendrían características tridimensionales, razón por la que también se justifica el uso de un modelo tridimensional para simular los procesos hidrodinámicos de un flujo con estas características.

Otro aspecto destacado, es que en base a los resultados alcanzados del análisis espectral de las dimensiones dominantes de las formas de fondo simuladas, se podría recomendar una densidad de muestreo adecuada de la morfología del fondo en cauces naturales con características de aguas poco profundas, esto podría ser fundamental para alcanzar una caracterización de las variables de transporte de partículas cercanas al fondo con menor incertidumbre.

1.4. Estructura del Informe de Tesis Doctoral

El informe de tesis doctoral inicia con el capítulo introductorio, en donde se presentan antecedentes entorno a la simulación numérica de cauces naturales. También, se exponen los objetivos y aspectos innovadores que se desean alcanzar al finalizar la investigación.

En el capítulo 2 se presenta la descripción del dominio seleccionado para la implementación de los esquemas de cálculo de flujo tridimensional y transporte de sedimentos. Seguido de esto se presentan los datos experimentales para la validación de los resultados. Finalmente se describirá el método de discretización del dominio espacial con la presentación de los modelos digitales y mallas de cálculo resultantes.

En el inicio del capítulo 3 se realizará la descripción de la herramienta numérica para la simulación de las variables de flujo con transporte de sedimentos del dominio del río seleccionado, seguido se describirá la discretización de las ecuaciones diferenciales de estado que representan los procesos físicos de transporte y la solución de las ecuaciones de Navier Stokes. También en el capítulo 3, se describe la metodología de la simulación de transporte de sedimentos y de la morfología fluvial. Seguido de esto, se presentarán los resultados de la simulación de la hidrodinámica tridimensional, transporte de sedimentos y formas de fondo en el dominio de aplicación del cauce natural seleccionado. A continuación, se realizará un análisis de sensibilidad de las variables simuladas respecto a la convergencia, estabilidad y precisión de los resultados obtenidos.

En el Capítulo 4 se examinarán las dimensiones dominantes de las señales de morfología fluvial simuladas, el análisis se basará en los espectros de energía obtenidos por la transformada discreta de Fourier y con transformaciones con curvas wavelets tipo Morlet.

En el Capítulo 5 se presentan las conclusiones e innovaciones alcanzadas en esta investigación en torno a la simulación numérica de variables de la hidrodinámica

tridimensional con procesos de transporte de sedimentos. También, se detallan algunas recomendaciones para abordar estudios futuros de flujos en cauces naturales.

En el Capítulo 6 se presentan las referencias de los trabajos previos citados en este trabajo.

Capítulo 2:

Dominio y Caracterización Experimental

2. Dominio y Caracterización Experimental

Cuando se plantea un estudio con la aplicación de modelos numéricos para la simulación del flujo tridimensional con procesos de sedimentación en cauces naturales, es fundamental contar con la caracterización detallada de las variables de flujo y transporte de partículas en prototipo; datos necesarios para la validación de los modelos implementados. Las inundaciones ocurridas en los ríos de la provincia de Córdoba en el primer trimestre de los años 2014 y 2015 motivaron al estudio del comportamiento de sus principales cauces naturales; en este contexto, el río Tercero o Ctalamochita fue uno de los cauces monitoreados.

Se ha seleccionado el tramo del río Tercero en su paso por la ciudad de Villa María para el estudio de la solución numérica de la hidrodinámica tridimensional y transporte de sedimentos; el tramo tiene características de aguas poco profundas con relación de profundidad pequeña respecto al ancho de la sección del flujo, con pendiente de fondo correspondiente a la de un cauce de planicie (0.03%) y con el material del lecho de tipo arenoso, con tamaño medio de partículas de 0.55 milímetros (Díaz Lozada, 2014).

Para implementar el dominio del flujo al modelo hidrodinámico tridimensional, es necesario contar con la batimetría detallada de la zona, la misma que fue obtenida de estudios previos (Díaz Lozada, 2014) y afinada en campañas de recolección de puntos topográficos para mejorar la resolución espacial de las secciones en el dominio de interés. Además de la información para construir un modelo digital de terreno, se procedió a procesar los datos de las condiciones hidráulicas y de transporte de sedimentos en el tramo seleccionado, estos datos están basados en las mediciones en campo realizadas gracias a los esfuerzos conjuntos de las instituciones CETA (Centro de Estudios y Tecnología del Agua) de la Universidad Nacional de Córdoba, CIFASIS (Centro Internacional Franco Argentino de Ciencias de la Información y de Sistemas) del Centro Científico Tecnológico de Rosario y la Secretaría de Recursos Hídricos del Gobierno de la Provincia de Córdoba (Díaz Lozada et al, 2015).

A continuación se presenta una descripción del dominio seleccionado para la implementación de los esquemas de cálculo de flujo tridimensional y transporte de sedimentos. También, se presentan los datos disponibles para la validación de los resultados. Finalmente, se describirá el método de discretización del dominio espacial con la presentación de los modelos digitales y mallas de cálculo resultantes.

2.1. Descripción de la Zona de Estudio

La cuenca del río Tercero abarca un área aproximada de 9500 km² que nace en la zona montañosa conocida como las Sierras Grandes de la Provincia de Córdoba, los principales tributarios del río Tercero en la cuenca alta son los ríos Santa Rosa, Grande y Quillinzo en el sector que contempla los cerros Champaquí y Comechingones (Martínez, 2010). La cuenca alta está regulada por una serie de embalses antes de formarse el río Tercero que pertenecen al sistema de generación eléctrica de la Provincia; desde aguas arriba se menciona el embalse Cerro Pelado, Arroyo Corto, Río Tercero, Ingeniero Cassaffousth, Ing. Benjamín Reolín y

Piedras Moras. A continuación en la Tabla 2. 1 se presentan algunas características de los embalses de la cuenca alta del río Tercero:

TABLA 2. 1. CARACTERÍSTICAS DE LOS EMBALSES CONSTRUIDOS EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO TERCERO.
(EMPRESA PROVINCIAL DE ENERGÍA DE CÓRDOBA, 2015).

Embalse	Altura (m)	Espejo de Agua (ha)	Volumen (hm³)	Potencia Hidroeléctrica Instalada (MW)
Cerro Pelado	104	1240	370	750*
Arroyo Corto	44	357	35	
Río Tercero	50	4600	560	10.5
Ing. Cassaffousth	35	86	10	17.28
Ing. Benjamín Reolín	47	160	13	33
Piedras Moras	57	589	47	6

*POTENCIA INSTALADA EN EL COMPLEJO RÍO GRANDE

El cauce del río Tercero tiene su nacimiento en el embalse de Piedras Moras y recorre la cuenca que lleva su nombre hasta que vierte sus aguas en el río Carcarañá recorriendo una longitud aproximada de 300 kilómetros desde el oeste en sentido al este. Con un ancho promedio de 35 metros, en las márgenes del río Tercero se localizan importantes centros poblados como Almafuerte, Río Tercero, Villa Ascasubi, Pampayasta, Villa María y Bell Ville, entre otras (Cossavella et al, 2013).

El tramo de estudio se encuentra ubicado aguas abajo del puente Juan Bautista Alberdi que pertenece a la ciudad de Villa María, el marcado desarrollo de esta urbe ha motivado diversas investigaciones sobre el comportamiento hidráulico del río Tercero en su paso por la ciudad. La ciudad de Villa María es la tercera en importancia en la provincia de Córdoba, luego de Córdoba Capital y Río Cuarto. Se encuentra en plena pampa húmeda a orillas del río Tercero a 146 km al sudeste de la ciudad de Córdoba Capital.

La economía de Villa María se basa principalmente en la agricultura y ganadería, también tiene una importante producción de cereales, frutales y oleaginosas (soja, trigo, maíz, girasol, avena, cebada, centeno), razones por las que ha devenido en un importante centro económico subregional en el cual se han desarrollado industrias y servicios relacionados con las actividades agropecuarias; de lo que se desprende que el desarrollo de la ciudad está estrechamente ligado al flujo del río Tercero. La población de Villa María es de 79.351 habitantes, y si se considera junto a la ciudad de Villa Nueva (que está del otro lado del río), la población total es de 98.169 habitantes (Instituto Nacional de Estadísticas y Censos, 2010). En la Figura 2. 1 se presenta la ubicación geográfica general del río Tercero:

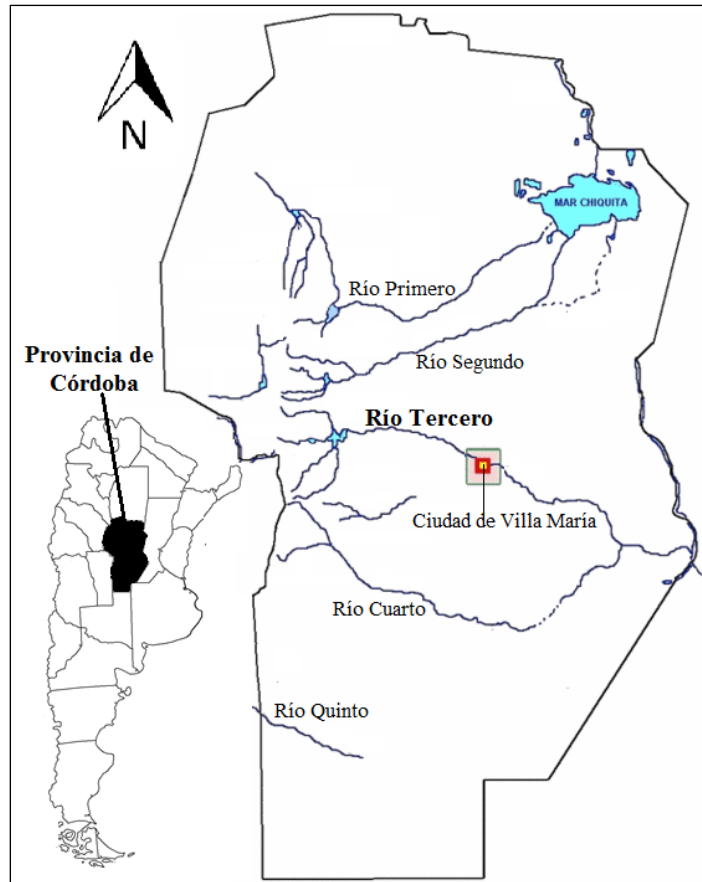


FIGURA 2. 1. ESQUEMA DE LA UBICACIÓN GEOGRÁFICA DEL RÍO TERCERO O CTALAMOCHITA.

2.2. Presentación de Datos Experimentales

Para este estudio se han procesado y analizado datos de las campañas de aforo realizadas por instituciones de las Provincias de Córdoba y Santa Fe (CETA de la Universidad Nacional de Córdoba, CIFASIS CCT Rosario y la Secretaría de Recursos Hídricos del Gobierno de la Provincia de Córdoba) para cuantificar y caracterizar experimentalmente los tributarios del río Tercero, el instrumento utilizado para llevar a cabo los aforos en esta zona es el perfilador de corriente acústico doppler (ADCP: Acoustic Doppler Current Profiler).

El ADCP determina la velocidad del flujo utilizando el principio Doppler. El instrumento emite una onda acústica a una determinada frecuencia (f_1), la cual es luego reflejada por las partículas en suspensión en el flujo (sedimentos, plancton, algas, etc.). La onda acústica reflejada es detectada por el instrumento y la misma posee una frecuencia (f_2) diferente con la que fue emitida. En la Figura 2. 2 se muestra el esquema de funcionamiento del ADCP (Díaz Lozada, 2014).

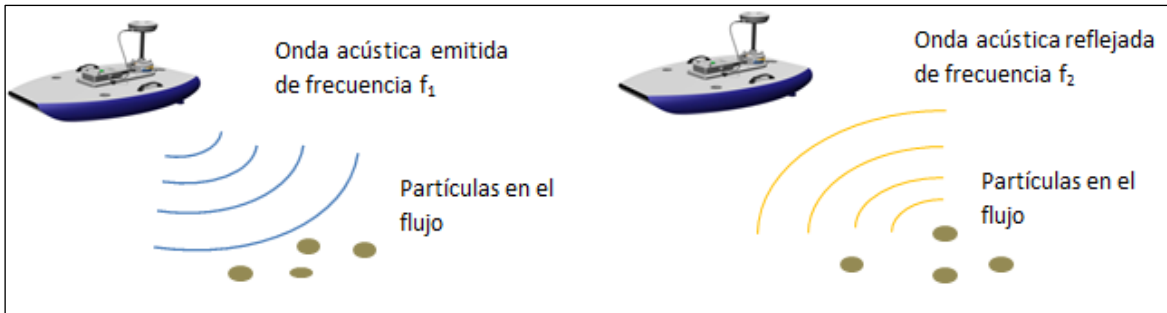


FIGURA 2. 2. ESQUEMA DEL FUNCIONAMIENTO DEL PERFILADOR DE CORRIENTE ACÚSTICO DOPPLER (DÍAZ LOZADA, 2014).

Los datos seleccionados para la validación, que fueron procesados a partir de los resultados de las campañas de aforo realizadas en campo, están en el rango de caudal del río Tercero de entre $9.64 \text{ m}^3/\text{s}$ hasta $121.22 \text{ m}^3/\text{s}$; y la sección de medición está a aproximadamente 10 metros aguas abajo del puente Juan Bautista Alberdi de la ciudad de Villa María (Coordenadas UTM: 476974 m. S, 6412773 m. E). A continuación en la Figura 2. 3 se presenta una imagen de la sección de aforo y en la Tabla 2. 2 un resumen de los datos hidráulicos obtenidos con el instrumento ADCP:



FIGURA 2. 3. SECCIÓN DE AFORO EN EL RÍO TERCERO, AGUAS ABAJO DEL PUENTE JUAN BAUTISTA ALBERDI DE LA CIUDAD DE VILLA MARÍA.

TABLA 2. 2. RESUMEN DE RESULTADOS DE LAS CAMPAÑAS DE AFORO CON EL INSTRUMENTO ADCP.

#	Fecha	Caudal (m ³ /s)	Ancho (m)	Profundidad (m)	Velocidad Media (m/s)	Froude	Reynolds
1	19-11-13	9.64	27.6	0.5	0.70	0.31	367726
2	08-09-15	12.86	37.8	0.5	0.68	0.30	345603
3	23-10-15	13.18	29.6	0.6	0.71	0.30	404011
4	18-11-14	17.22	34.9	0.6	0.84	0.35	574894
5	07-11-16	18.89	34.8	0.7	0.73	0.27	496725
6	09-09-14	22.81	34.8	0.7	0.88	0.33	691289
7	09-06-15	24.35	37.3	0.8	0.84	0.31	657220
8	05-09-16	24.90	35.2	0.8	0.80	0.29	637735
9	10-06-14	25.64	33.1	0.8	0.96	0.34	783424
10	28-04-15	29.20	33.6	0.9	0.97	0.32	864453
11	17-11-15	50.27	38.3	1.3	1.03	0.29	1260761
12	08-04-16	65.84	36.3	1.4	1.15	0.31	1564117
13	22-12-15	78.09	40.8	1.6	1.22	0.31	1809280
14	11-02-16	85.09	39.3	1.8	1.21	0.29	2236865
15	08-03-16	91.91	42.2	1.9	1.16	0.27	2052460
16	18-04-16	98.72	40.3	1.7	1.23	0.30	2330004
17	16-03-16	113.85	41.0	2.0	1.23	0.28	2474078
18	08-04-14	121.22	37.5	2.2	1.46	0.31	2823743

Los datos seleccionados para la validación de los modelos numéricos corresponden a aforos realizados entre el 19 de Noviembre de 2013 y el 7 de Noviembre de 2016; el mínimo caudal para la validación corresponde al 19 de Noviembre de 2013 y es de 9.64 m³/s, mientras que, el máximo caudal de la serie es de 121.22 m³/s y corresponde al 8 de Abril de 2014. La profundidad máxima medida con ADCP corresponde al caudal de 121.22 m³/s es de 3.088 metros y se determinó en estudios previos que no existen efectos de desborde para estos caudales (Ochoa et al, 2016); esta selección de eventos fue llevada a cabo con el criterio de que en este trabajo no se tiene como objetivo modelar efectos de mojado y secado en áreas fuera del cauce (riberas de inundación).

Se ha calculado el número adimensional de Reynolds, para la serie de caudales considerada utilizando las variables medidas en las campañas de aforo con ADCP, el rango de Reynolds va desde 370000 hasta 2800000 que pertenece a un flujo en régimen turbulento (Reynolds >> 100000). De manera similar, se ha calculado a partir de los datos experimentales, el número adimensional de Froude; el valor está alrededor de 0.3, razón por la que se determinó que el flujo es subcrítico (Froude < 1). Por lo tanto, se puede concluir que el flujo en el tramo estudiado del río Tercero se presenta en régimen turbulento-subcrítico para los eventos considerados (Julien, 2002). Para la solución de las ecuaciones de estado es importante conocer el régimen del flujo del río, esto ayudará a plantear de manera correcta las ecuaciones de cierre de la turbulencia y las condiciones de contorno del modelo numérico implementado. A continuación en la Figura 2. 4 se presenta a la izquierda los valores del número de Froude resultantes para la serie de caudales analizados y a la derecha los valores del número de Reynolds:

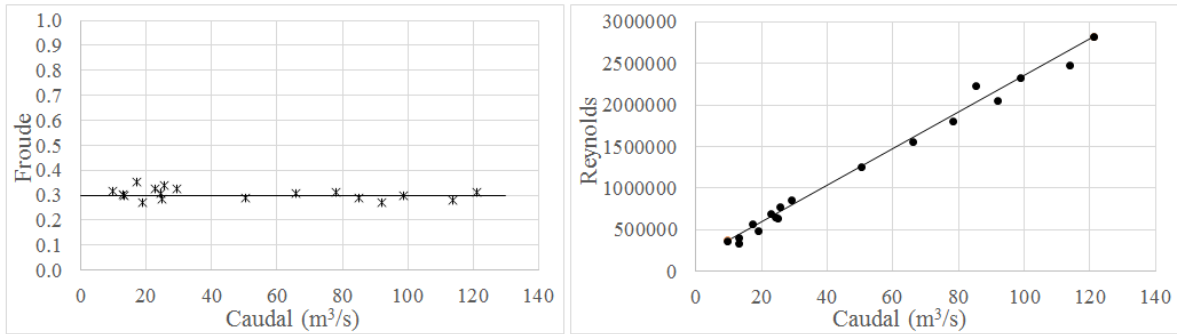


FIGURA 2. 4. NÚMERO DE FROUDE Y NÚMERO DE REYNOLDS EN LA SECCIÓN DE AFORO DEL RÍO TERCERO.

Como puede observarse en la Figura 2. 4, los números adimensionales de Froude y Reynolds que describen el régimen del flujo en base a datos de la caracterización experimental con ADCP, presentan tendencias lineales que verifican la consistencia de los datos obtenidos en las campañas de medición en la sección del río Tercero ubicada a aproximadamente 10 metros aguas abajo del puente Juan Bautista Alberdi de la ciudad de Villa María.

Para caracterizar las variables hidráulicas del río mediante el ADCP, se realizan una serie de transectas (mínimo 2), tratando que el instrumento tenga el mismo recorrido en la sección transversal en la que se realizarán las mediciones. Mediante el programa computacional “River Surveyor Live” se realiza la configuración del registro, la recepción y visualización (en tiempo real y diferido) de los datos medidos mediante ADCP. El “River Surveyor Live” cuenta con la posibilidad de exportar los datos a otros programas para un análisis más complejo y detallado (Díaz Lozada, 2014). A continuación, en la Figura 2. 5 se presenta el resultado de velocidades promediadas en la sección aguas abajo del puente Juan Bautista Alberdi del río tercero para los caudales analizados:

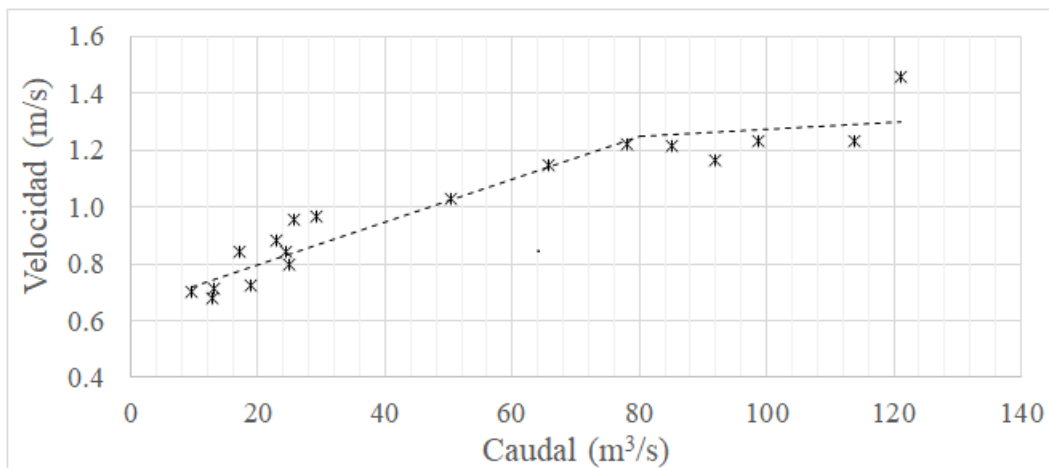


FIGURA 2. 5. RESULTADOS DE LA VELOCIDAD PROMEDIADA EN LA SECCIÓN DE AFORO MEDIDAS CON UN INSTRUMENTO ADCP.

En la Figura 2. 5 se puede observar inestabilidades en los valores de la velocidad promediada en la sección de medición para caudales menores a 25 m³/s, este comportamiento se puede explicar por las siguientes dos hipótesis: La variabilidad de la batimetría por el movimiento de partículas de sedimento de fondo y cambios en la sección por los desplazamientos

longitudinales en el proceso de medición; estas hipótesis que afectan a todos los eventos, se evidencian en mayor medida al analizar las variables de flujo para caudales inferiores a 25 m³/s. También en la Figura 2. 5 se puede observar, en línea entrecortada, que la tendencia de las velocidades promedio para caudales mayores a 80 m³/s es claramente de menor pendiente que la tendencia de la velocidad promedio medida en caudales inferiores a 80 m³/s, esto estaría ligado a la teoría del régimen (Raudkivi, 1990), que manifiesta la variabilidad en la resistencia al flujo que ejercen los contornos sólidos; variabilidad en función de la altura, longitud, tipo de formas de fondo e intensidad del flujo que afectará de manera directa a las variables de velocidad media.

A partir de la hipótesis de seguimiento de formas de fondo, se estimó el transporte de sedimentos en base a las señales obtenidas en mediciones estáticas del lecho del río con el instrumento ADCP, donde se evidenció que el tipo de formas de fondo que predomina en este tramo del río Tercero en la ciudad de Villa María son de pequeñas dunas para los eventos analizados. A continuación en la Tabla 2. 3 se presentan los resultados de la estimación del transporte de carga de fondo por el seguimiento de dunas (Heredia, 2017):

TABLA 2. 3. RESULTADOS DEL TRANSPORTE DE CARGA DE FONDO EN EL TRAMO DEL RÍO TERCERO AGUAS ABAJO DEL PUENTE JUAN BAUTISTA ALBERDI.

#	Fecha	Q (m ³ /s)	h _{duna} (m)	L _{duna} (m)	u _{duna} (m/s)	Q _b (kg/m.s)
17	16/03/2016	113.85	0.401	4.488	0.00119	0.487
12	08/04/2016	65.84	0.478	5.633	0.00093	0.332
8	05/09/2016	24.90	0.161	1.854	0.00033	0.045
5	07/11/2016	18.89	0.242	2.065	0.00042	0.121

Como puede observarse en la Tabla 2. 3, las mediciones para estimar el transporte de sedimento de fondo se realizaron en el año 2016 en 4 campañas y serán de utilidad para posteriormente validar los resultados del modelo de transporte de partículas implementado en la simulación numérica en el tramo del río Tercero estudiado.

También, a partir de mediciones longitudinales dinámicas en el medio de la corriente con el instrumento ADCP, se obtuvieron señales de la batimetría de fondo para caudales de 113.85 m³/s, 24.90 m³/s y 18.89 m³/s. Estas señales serán de utilidad para validar las formas de fondo simuladas, a continuación en las Figura 2. 6, Figura 2. 7 y Figura 2. 8 se presentan las señales de la batimetría longitudinal proyectada, a partir de los datos medidos con el ADCP. También, a continuación en las Tabla 2. 4, Tabla 2. 5 y Tabla 2. 6 se presenta la descripción estadística de las señales unidimensionales de morfología fluvial observadas:

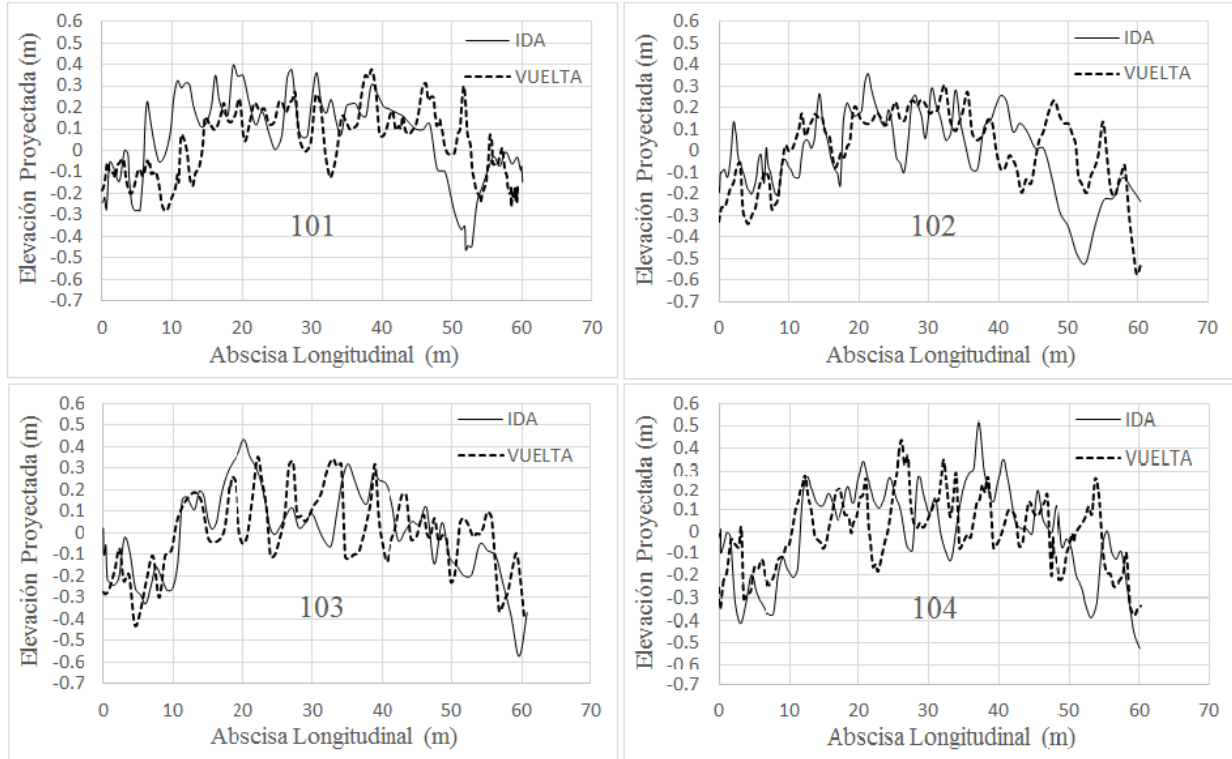


FIGURA 2. 6. SEÑALES DE LA MORFOLOGÍA FLUVIAL MEDIDAS CON ADCP SOBRE LA SECCIÓN LONGITUDINAL MEDIA DEL RÍO TERCERO, $Q=113.85 \text{ m}^3/\text{s}$.

TABLA 2. 4. ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA DE LAS SEÑALES DE LA MORFOLOGÍA FLUVIAL OBSERVADAS CON ADCP SOBRE LA SECCIÓN LONGITUDINAL MEDIA DEL RÍO TERCERO, $Q=113.85 \text{ m}^3/\text{s}$.

	101	101	102	102	103	103	104	104
	Ida	Vuelta	Ida	Vuelta	Ida	Vuelta	Ida	Vuelta
Elv. Máx. (m)	0.355	0.378	0.359	0.304	0.435	0.353	0.520	0.436
Elv. Mín. (m)	-0.536	-0.276	-0.521	-0.576	-0.574	-0.425	-0.525	-0.379
Desv. Est. (m)	0.213	0.163	0.170	0.184	0.201	0.184	0.216	0.174
Varianza (m^2)	0.045	0.027	0.029	0.034	0.040	0.034	0.047	0.030
Δ (m)	0.284	0.201	0.267	0.180	0.284	0.199	0.331	0.186
λ (m)	4.5	4.4	3.7	3.8	7.3	4.7	8.1	7.6

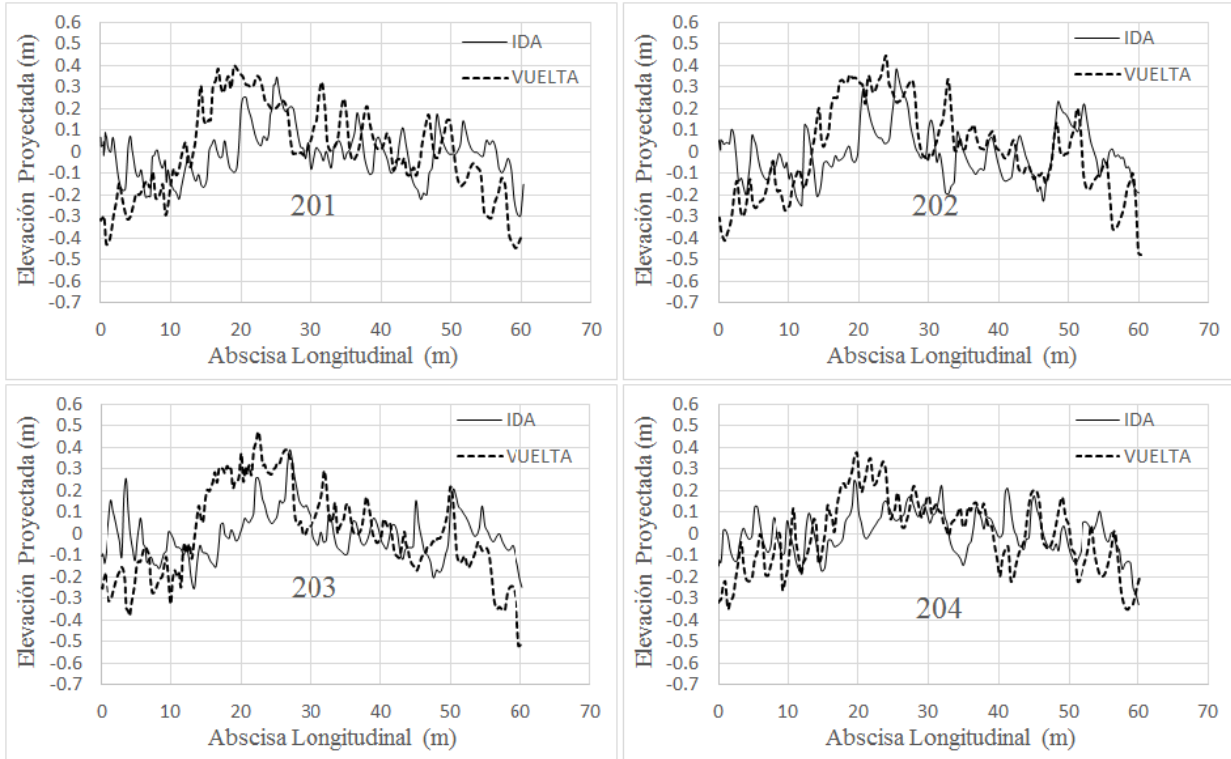


FIGURA 2. 7. SEÑALES DE LA MORFOLOGÍA FLUVIAL MEDIDAS CON ADCP SOBRE LA SECCIÓN LONGITUDINAL MEDIA DEL RÍO TERCERO, $Q=24.90 \text{ m}^3/\text{s}$.

TABLA 2. 5. ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA DE LAS SEÑALES DE LA MORFOLOGÍA FLUVIAL OBSERVADAS CON ADCP SOBRE LA SECCIÓN LONGITUDINAL MEDIA DEL RÍO TERCERO, $Q=24.90 \text{ m}^3/\text{s}$.

	201	201	202	202	203	203	204	204
	Ida	Vuelta	Ida	Vuelta	Ida	Vuelta	Ida	Vuelta
Elv. Máx. (m)	0.348	0.402	0.383	0.444	0.390	0.477	0.248	0.375
Elv. Mín. (m)	-0.297	-0.447	-0.249	-0.474	-0.253	-0.518	-0.328	-0.352
Desv. Est. (m)	0.120	0.210	0.122	0.212	0.114	0.213	0.102	0.175
Varianza (m^2)	0.014	0.044	0.015	0.045	0.013	0.045	0.010	0.031
Δ (m)	0.216	0.262	0.192	0.248	0.156	0.335	0.150	0.132
λ (m)	4.4	3.8	4.4	4.4	5.8	3.3	4.2	3.8

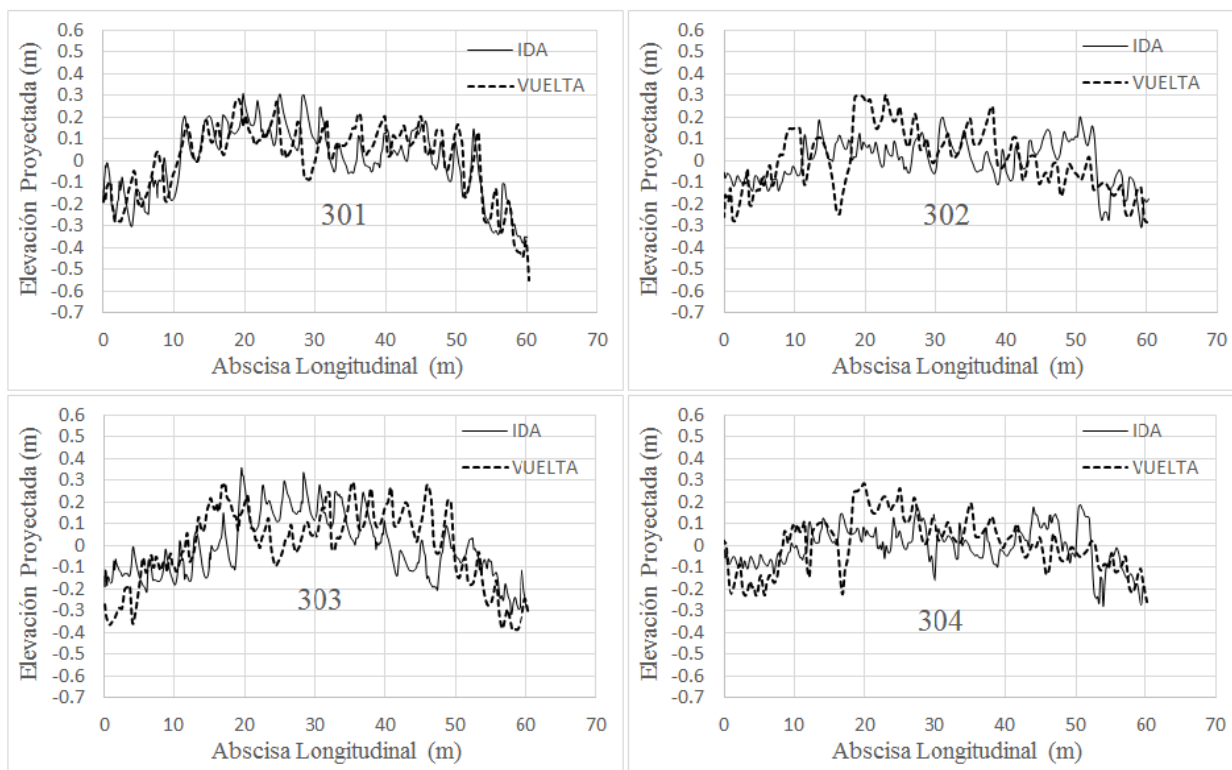


FIGURA 2. 8. SEÑALES DE LA MORFOLOGÍA FLUVIAL MEDIDAS CON ADCP SOBRE LA SECCIÓN LONGITUDINAL MEDIA DEL RÍO TERCERO, $Q=18.89 \text{ m}^3/\text{s}$.

TABLA 2. 6. ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA DE LAS SEÑALES DE LA MORFOLOGÍA FLUVIAL OBSERVADAS CON ADCP SOBRE LA SECCIÓN LONGITUDINAL MEDIA DEL RÍO TERCERO, $Q=18.89 \text{ m}^3/\text{s}$.

	301	301	302	302	303	303	304	304
	Ida	Vuelta	Ida	Vuelta	Ida	Vuelta	Ida	Vuelta
Elv. Máx. (m)	0.311	0.283	0.202	0.304	0.359	0.292	0.189	0.288
Elv. Mín. (m)	-0.379	-0.548	-0.306	-0.280	-0.318	-0.385	-0.280	-0.259
Desv. Est. (m)	0.157	0.163	0.098	0.149	0.146	0.179	0.089	0.129
Varianza (m^2)	0.025	0.026	0.010	0.022	0.021	0.032	0.008	0.017
Δ (m)	0.247	0.218	0.123	0.217	0.204	0.148	0.138	0.139
λ (m)	3.8	3.8	3.4	5.0	2.9	2.9	5.3	5.0

Como puede observarse en las Figura 2. 6, Figura 2. 7 y Figura 2. 8; se consideraron cuatro señales en dirección de Ida y Vuelta; que resultarían en ocho señales de formas de fondo en el tramo del río Tercero aguas abajo del puente Juan Bautista Alberdi para cada uno de los tres eventos analizados; las señales fueron proyectadas y tienen pendiente nula con valor de la media igual a cero. A partir de las Tabla 2. 4, Tabla 2. 5 y Tabla 2. 6; se puede desprender de la estadística descriptiva que, las tres señales tienen el mismo orden de magnitud y comportamientos consistentes según el evento al que pertenecen. A continuación en la Tabla 2.7 se presenta la media de los índices de la estadística descriptiva de las señales de elevación del fondo en el tramo del río Tercero caracterizado, para los eventos de $113.85 \text{ m}^3/\text{s}$, $24.90 \text{ m}^3/\text{s}$ y $18.89 \text{ m}^3/\text{s}$:

TABLA 2. 7. MEDIA DE LOS ÍNDICES DE LA ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA DE LAS SEÑALES DE MORFOLOGÍA FLUVIAL OBSERVADAS CON ADCP SOBRE LA SECCIÓN LONGITUDINAL MEDIA DEL RÍO TERCERO.

Caudal (m³/s)	113.85	24.90	18.89
Elv. Máx. (m)	0.392	0.383	0.279
Elv. Mín. (m)	-0.476	-0.365	-0.344
Desv. Est. (m)	0.188	0.159	0.139
Varianza (m ²)	0.036	0.027	0.020
Δ (m)	0.241	0.211	0.179
λ (m)	5.513	4.263	4.013

En base al análisis de la estadística descriptiva promedio de las señales morfológicas presentado en la Tabla 2. 7, se puede manifestar que las formas de fondo tienen una altura promedio (Δ) en el mismo orden de magnitud que es consistente al régimen de flujo subcrítico de los caudales analizados (Figura 2. 4); y en base a la teoría del régimen, se plantea la hipótesis de que para la serie de eventos considerados no existiría un cambio de régimen en las formas de fondo, y por lo tanto, en este tramo del río Tercero predominarían las formas de fondo del tipo dunas para todos los eventos simulados (Robert y Uhlman, 2001).

Latosinski et al (2017), analizaron la geometría de las formas de fondo de las señales morfológicas obtenidas con ADCP en el río Tercero que fueron presentadas en las Figura 2. 6, Figura 2. 7 y Figura 2. 8, concluyendo que el empinamiento (relación entre la altura y la longitud promedio de la duna) de estas pequeñas dunas es de mayor magnitud (aproximadamente un orden de magnitud mayor) al observado en dunas del río Paraná (un río de gran profundidad), con un valor de empinamiento medio para el río Tercero de 0.1 y del río Paraná de 0.04; lo que implicaría que los procesos tridimensionales en las formas de fondo del río Tercero son de gran importancia en contraste con los del río Paraná, donde se ha observado que las formas de fondo tienen una tendencia marcadamente bidimensional.

Para la simulación de procesos de transporte de sedimentos, es fundamental contar con la granulometría de las partículas que forman el lecho, la datos de la granulometría fueron obtenidos de estudios previos (Díaz Lozada, 2014) y se presentan en la Tabla 2. 8. En la Figura 2. 9 se presenta la curva granulométrica resultante del material del lecho del tramo del río Tercero aguas abajo del puente Juan Bautista Alberdi en la ciudad de Villa María.

TABLA 2. 8. GRANULOMETRÍA DEL MATERIAL DEL LECHO OBTENIDO EN EL TRAMO DEL RÍO TERCERO AGUAS ABAJO DEL PUENTE JUAN BAUTISTA ALBERDI (DÍAS LOZADA, 2014).

Abertura (mm)	# Tamiz	Peso Retenido (g)	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Pasante
4.75	4	0.00	0.00	0.00	100.00
2	10	30.70	23.26	23.26	76.74
1.18	16	10.90	8.26	31.52	68.48
0.6	30	18.80	14.24	45.76	54.24
0.425	40	22.90	17.35	63.11	36.89
0.15	100	45.10	34.17	97.27	2.73
0.075	200	1.20	0.91	98.18	1.82
Fondo		2.40	1.82	100.00	
Total:		132.00	100		

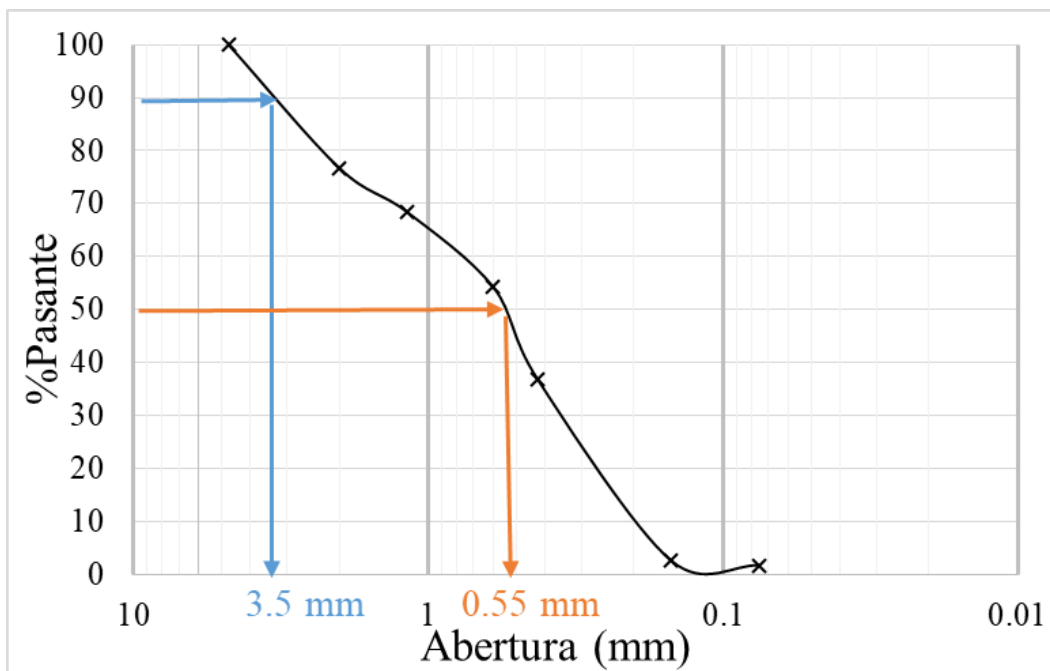


FIGURA 2. 9. CURVA GRANULOMÉTRICA DEL MATERIAL DEL LECHO OBTENIDO EN EL TRAMO DEL RÍO TERCERO AGUAS ABAJO DEL PUENTE JUAN BAUTISTA ALBERDI.

El ensayo de granulometría tiene como finalidad determinar cuantitativamente la distribución de tamaño de las partículas presentes en una muestra de suelo y clasificar cualitativamente el tipo de material según diferentes metodologías. La metodología utilizada es la del sistema de clasificación de suelos unificado (USCS por sus siglas en inglés), según la metodología USCS, el material considerado pertenece al tipo de arenas pobremente graduadas con poco o nada de finos. Del análisis granulométrico del material, es importante obtener diámetros característicos que serán de utilidad en la formulación del transporte de las partículas en el flujo; como puede observarse en la Figura 2. 9 para el material del lecho obtenido en el tramo del río Tercero aguas abajo del puente Juan Bautista Alberdi, el diámetro característico por el que pasa el 90% del material es $D_{90} = 3.5$ milímetros y el diámetro medio del material es $D_{50} = 0.55$ milímetros.

2.3. Discretización del Dominio Espacial

Un tratamiento básico en la Mecánica de Fluidos Computacional es dividir la geometría del flujo en celdas o mallas para resolver las ecuaciones de estado en cada uno de estos elementos. Las mallas pueden clasificarse en estructuradas o no estructuradas dependiendo de la forma de sus elementos, en las mallas estructuradas, normalmente, todos los elementos son rectangulares y en las mallas no estructuradas, comúnmente, se combina elementos rectangulares y triangulares. A menudo cuando se emplean mallas estructuradas la solución de las ecuaciones de estado se obtiene con Métodos de Volúmenes Finitos y cuando se realiza discretización del dominio con mallas no estructuradas se puede utilizar algoritmos de Métodos de Elementos Finitos (Olsen, 2012).

La precisión y convergencia de la solución implementada depende de la calidad de la malla, que puede ser evaluada por las características de ortogonalidad, relación de forma y relación de expansión. La malla presenta características correctas de ortogonalidad cuando los ángulos de las intersecciones de los lados de los elementos tienden a ángulos rectos (90°). La relación de forma se mide entre dos lados de un mismo elemento, y la malla presenta buena calidad cuando esta relación es lo más cercana a 1; mientras que, la relación de expansión se mide entre los lados semejantes de dos elementos contiguos y también un valor cercano a 1 representa una buena calidad de malla. En una malla estructurada se verifican con mayor facilidad estos requisitos de calidad entre sus elementos, por lo que se recomienda el uso de este tipo de mallas para que la solución de modelos numéricos tridimensionales de flujo tengan una precisión y convergencia aceptable (Olsen, 2012).

Por lo expuesto en el párrafo anterior, en este trabajo de investigación se ha elegido el método de discretización espacial con mallas estructuradas. A continuación se presenta una breve descripción del método de discretización espacial, seguido de los resultados de la representación del dominio espacial del tramo del río Tercero aguas abajo del puente Juan Bautista Alberdi.

2.3.1. Método de Discretización del Dominio Espacial por Volúmenes Finitos

La discretización del dominio espacial para la solución de las ecuaciones representa una descripción numérica del dominio de cálculo, la descripción espacial incluye la posición de los puntos dentro de la frontera física del fenómeno que se desea simular. El espacio es dividido en un número de regiones discretas que se representan por celdas o volúmenes de control. Las celdas o volúmenes de control no se superponen, ocupan por completo el dominio computacional y todas las variables de flujo son resueltas en cada volumen de control de la malla. Un ejemplo del volumen de control en forma de hexaedro (rectangular) de una malla estructurada se presenta a continuación en la Figura 2. 10:

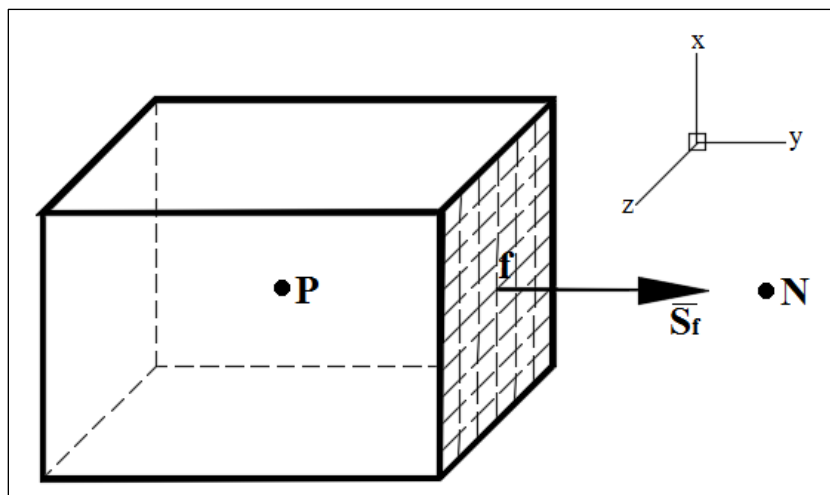


FIGURA 2. 10. VOLUMEN DE CONTROL EN FORMA DE HEXAEDRO DE UNA MALLA ESTRUCTURADA.

El punto P está ubicado en el centroide del volumen de control presentado en la Figura 2. 10, por lo que se cumple la siguiente relación:

$$\int_{\forall_p} (r - r_p) d\forall = 0 \quad [2.1]$$

Donde en la ecuación [2.1], \forall_p representa el volumen del elemento con centroide P , r vector de posición de un volumen infitecimal $d\forall$ desde los ejes cartesianos y r_p el vector de posición de un volumen infitecimal $d\forall$ desde el centroide P del elemento. El volumen de control está limitado por una serie de planos o caras, cada cara es compartida por un volumen de control contiguo. El volumen de control generalmente deberá ser un poliedro, en este caso de estudio se plantean elementos en forma de hexaedros; es decir, cada elemento tiene fronteras formadas por seis planos rectangulares.

Las caras o planos de las celdas en una malla pueden ser divididas en dos grupos: planos internos (planos compartidos por dos elementos) o planos de frontera (coinciden con las fronteras del dominio de cálculo y pertenecen a un solo elemento). El vector de área de un plano S_f se compone de tal forma que su dirección es siempre hacia el exterior del elemento en dirección normal y con magnitud igual al área de la cara plana a la que pertenece. Los vectores de área de las caras de contorno apuntan hacia el exterior del dominio computacional. En referencia a la cara sombreada entrelíneas de la Figura 2. 10, los centroides del volumen de control seleccionado y su vecino se representan por las letras P y N , el vector S_f se dirige hacia el exterior del elemento con centroide P en dirección del centroide del elemento N . El índice f representa el centroide del plano sombreado.

La precisión del método de discretización depende de la variación de una función cualesquiera $\phi = \phi(r)$ en el espacio alrededor del punto P en el volumen de control. A continuación se presenta una variación de la variable en forma lineal en el espacio (Jasak, 1996):

$$\phi_{(r)} = \phi_P + (r - r_P) \cdot (\nabla\phi)_P \quad [2.2]$$

Donde:

$$\phi_P = \phi_{(r_P)} \quad [2.3]$$

Tomando en cuenta la variación de ϕ sobre el volumen de control con centroide P , la ecuación [2.2] puede ser escrita como:

$$\int_{\forall_P} \phi_{(r)} d\forall = \int_{\forall_P} [\phi_P + (r - r_P) \cdot (\nabla\phi)_P] d\forall = \phi_P \int_{\forall_P} d\forall + \left[\int_{\forall_P} (r - r_P) d\forall \right] \cdot (\nabla\phi)_P = \phi_P \forall_P \quad [2.4]$$

De manera similar, para las caras o planos del volumen de control se tiene que:

$$\int_{\forall_P} \nabla d\forall = \oint_{\partial\forall_P} dS_f = \sum_f \left(\int_f dS_f \right) \quad [2.5]$$

La suposición de la variación lineal de ϕ , lleva a la siguiente expresión, para la integral de los planos de los elementos presentados en la ecuación [2.5]:

$$\int_f dS_f = \left(\int_f dS_f \right) + \left[\int_f dS_f (r - r_f) \right] : (\nabla)_f = S_f \quad [2.6]$$

Combinando las ecuaciones [2.4], [2.5] y [2.6], del teorema de Gauss se obtiene:

$$\nabla\forall_P = \sum_f S_f \quad [2.7]$$

En la ecuación [2.7], el subíndice f implica que la transferencia de la información en la solución va desde el centroide del plano S_f hacia el exterior en dirección al centroide del elemento contiguo con el cual comparten el plano S_f . La suma vectorial de las componentes de las variables en los dos elementos será el componente resultante de la discretización en ese plano en común entre un elemento y su vecino:

$$\sum_f S = \sum_{origen} S_f - \sum_{vecino} S_f \quad [2.8]$$

Con la información geográfica en forma de puntos coordenados y curvas de nivel se puede construir una malla tridimensional usando un método basado en ecuaciones matemáticas. El primer paso es la construcción de un modelo digital con la información de la batimetría del cauce; y a continuación, con la información de la profundidad de la discretización vertical se procede a interpolar la geometría del dominio seleccionado.

Los dos métodos comúnmente usados para la generación de mallas son el de interpolación transfinita y el método de interpolación con una ecuación diferencial parcial de segundo orden de tipo elíptica.

La interpolación transfinita es la aproximación más común para la generación algebraica de mallas. Puede producir excelentes resultados en la generación rápida de mallas donde otros métodos son difíciles de aplicar, y también permite el control directo de los nodos de malla.

Muchas regiones se pueden mallar fácilmente usando interpolación transfinita. Sin embargo, en geometrías complejas tales como la de un cauce natural con curvaturas y cambios en el lecho, la interpolación transfinita no provee una malla adecuada. Las principales desventajas son la carencia de suavidad en la generación de mallas, ya que los cambios en las curvaturas tienden a propagarse al interior y con una tendencia a doblarse cuando las geometrías son complejas.

Los sistemas elípticos de ecuaciones diferenciales parciales de segundo orden producen la mejor malla posible, en el sentido de suavidad y distribución de puntos de malla (Spekreijse, 1995). Los sistemas de generación de malla elípticos cuasi-lineales de segundo orden son llamados sistemas de Poisson con funciones de control a ser especificadas. Estas funciones de control sirven para el aglomeramiento de líneas de malla, tanto en las fronteras como en otras partes dentro del dominio donde se requiera. Por lo tanto, esta metodología suaviza con la ecuación de Laplace o Poisson la localización de las intersecciones o nodos de una malla construida en base al método de interpolación transfinita:

$$\nabla^2 \xi = P^i \quad [2.9]$$

Donde en la ecuación [2.9], la localización de los nodos de la malla es referenciado con ξ , P^i representan los términos fuente de la ecuación de Poisson con funciones de control a ser especificadas para agregar un factor de peso a una ubicación determinada. En este trabajo el método de interpolación toma en cuenta únicamente la ecuación de Laplace, es decir, la ecuación [2.9] con $P^i = 0$. El principio del máximo es satisfecho por la ecuación de Laplace involucrado en el método de coordenadas de cuerpo ajustado, esto es, que el máximo y el mínimo valor de la solución ocurren sobre las fronteras. Esto garantiza que el Jacobiano de la transformación no se anula en el dominio, lo que impide una indeterminación en el uso de las métricas. El principio del máximo también garantiza un mapeo uno a uno en el dominio computacional, en otras palabras, que las líneas coordenadas de la misma familia nunca se interceptaran entre sí (Strauss, 1992).

En el proceso de discretización espacial, es necesario tomar en cuenta que relajar el requisito de precisión (tamaño de elementos) puede ser necesario, ya sea para dar espacio a las irregularidades en la estructura de malla, preservar las restricciones de la solución respecto a los datos experimentales para la validación de la misma y para disminuir el tiempo de cálculo por la cantidad de elementos. Es así que, el tamaño de los elementos de una malla dependerá de los procesos físicos que se desean simular y de las herramientas de cálculo disponibles para resolver las ecuaciones de estado.

2.3.2. Discretización Espacial en el Tramo del río Tercero Aguas Abajo del Puente Juan Bautista Alberdi.

Para realizar la discretización espacial, se debe construir un modelo digital del terreno en el espacio que representa la batimetría del tramo modelado. El modelo digital del terreno fue construido en base a la batimetría detallada del tramo del río Tercero aguas abajo del puente Juan Bautista Alberdi en la ciudad de Villa María que fue obtenido de estudios previos (Díaz

Lozada, 2014) y afinado en campañas de recolección de puntos para mejorar su resolución. En total se tomó en cuenta 479 puntos de 30 secciones en un tramo de 270 metros de longitud del río y con la sección inicial a aproximadamente 6 metros de distancia aguas abajo del puente Juan Bautista Alberdi de la ciudad de Villa María.

El método de interpolación está basado en un algoritmo descrito en el manual de usuario del modelo SSIIM, recomendado cuando se tiene la información de puntos espaciales en forma de secciones transversales (Olsen, 2014). Para obtener la elevación en un punto P de la malla, primero se debe obtener dos vectores: a lo largo de la línea longitudinal de la malla en la dirección aguas abajo y en la dirección aguas arriba del punto P . El producto escalar entre estos vectores y el vector de la dirección de la malla en sentido longitudinal se calcula y se verifica que los vectores resultantes tiendan a ser paralelos. Seguido de esto, se seleccionan los dos puntos, en dirección aguas abajo, que forman el ángulo más pequeño a la izquierda y al lado derecho del vector de la línea longitudinal del mallado, y se realiza una interpolación lineal entre los puntos en función de los ángulos que forman con el vector. Esto proporciona una elevación vinculada a la dirección aguas abajo. Se procede de manera similar en la dirección aguas arriba. Finalmente, los dos valores se interpolan linealmente en función de la distancia entre los puntos espaciales seleccionados, para obtener la elevación del punto P . A continuación en la Figura 2. 11 se puede visualizar el modelo digital del terreno que representa la batimetría del tramo seleccionado:

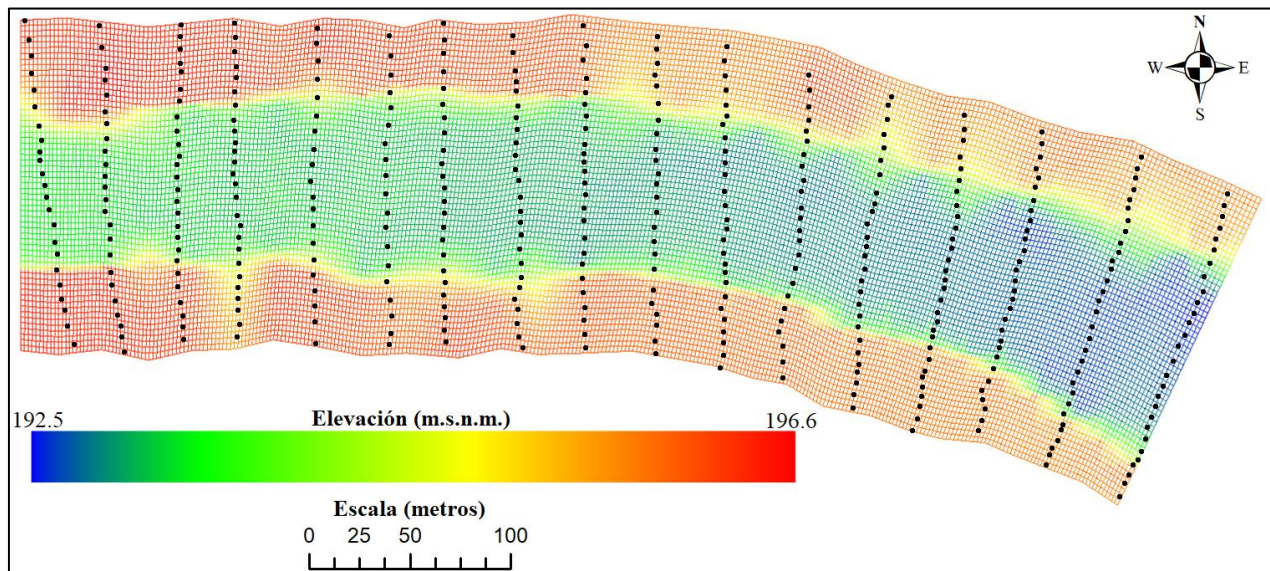


FIGURA 2. 11. MODELO DIGITAL DEL TERRENO EN EL TRAMO DEL RÍO TERCERO AGUAS ABAJO DEL PUENTE JUAN BAUTISTA ALBERDI.

La elevación del modelo digital del terreno del tramo del río Tercero analizado va desde los 192.5 hasta 196.6 metros sobre el nivel del mar y en la zona del cauce tiene una pendiente media de 30 centímetros por cada 100 metros de longitud (0.003 m/m). El tamaño de la discretización estará en función de las dimensiones del dominio, en el caso del dominio implementado, en dirección transversal y longitudinal se realizará una discretización uniforme con 80 elementos transversales y 600 elementos longitudinales con una media del

tamaño de los lados de los elementos hexaédricos de la malla de 0.3 metros y 0.4 metros en el plano, respectivamente.

A partir del modelo digital del terreno, se puede presentar una proyección de la superficie sólida de la batimetría, para representar sus dimensiones en forma continua. A continuación en la Figura 2. 12 se presenta la superficie sólida del tramo del río Tercero aguas abajo del puente Juan Bautista Alberdi:

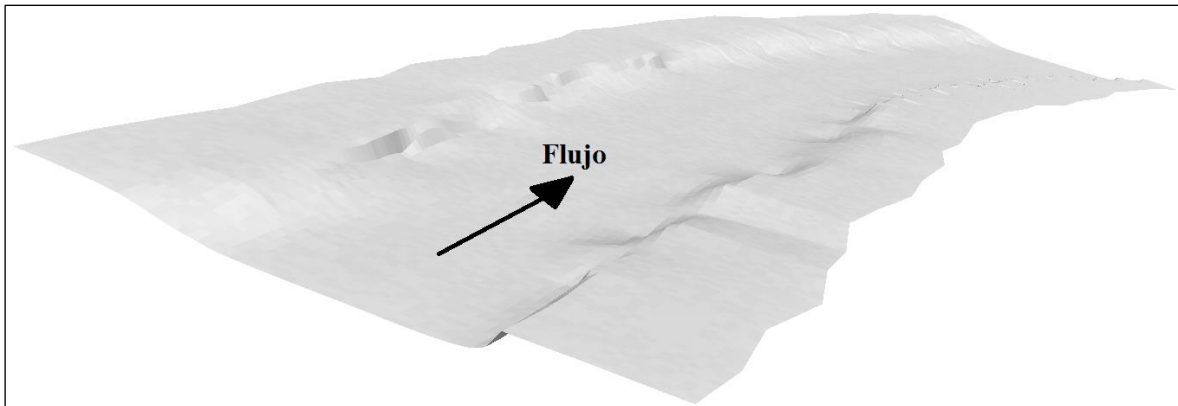


FIGURA 2. 12. SUPERFICIE SÓLIDA DEL TRAMO DEL RÍO TERCERO AGUAS ABAJO DEL PUENTE JUAN BAUTISTA ALBERDI.

Construida la superficie sólida que representa el fondo del dominio, se deberá definir las fronteras verticales de la discretización que definen las condiciones de contorno en la superficie libre. A continuación en la Figura 2. 13 se presentan las condiciones de contorno de profundidad en función del caudal del flujo correspondiente:

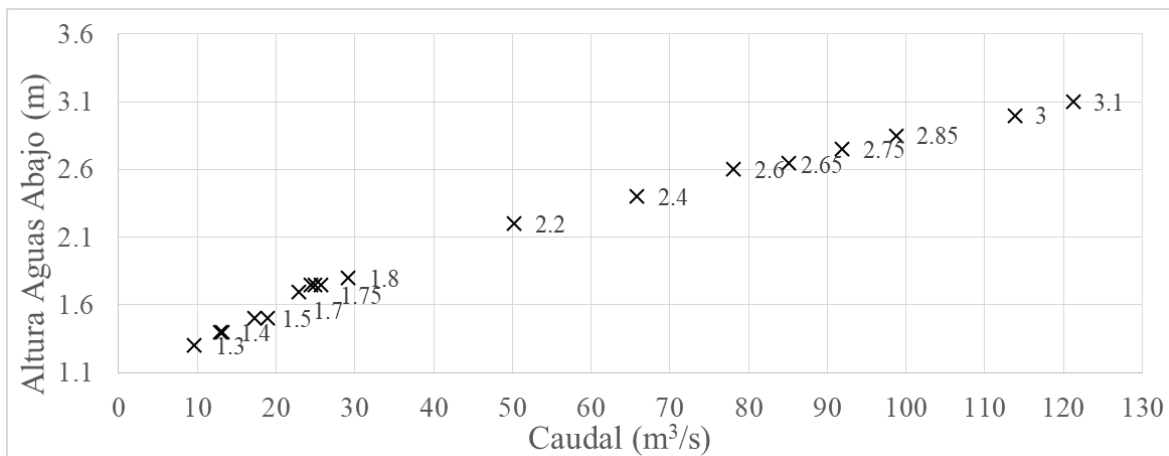


FIGURA 2. 13. CONDICIONES DE CONTORNO AGUAS ABAJO DEL TRAMO DEL RÍO TERCERO AGUAS ABAJO DEL PUENTE JUAN BAUTISTA ALBERDI.

Los resultados de la Figura 2. 13, que representan la aproximación de la profundidad de la tapa rígida del flujo aguas abajo del tramo analizado, fueron calculados en base a la ecuación de Bernoulli que se presenta a continuación:

$$z_2 + H_2 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} = z_1 + H_1 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} + h_e \quad [2.10]$$

Dónde en la ecuación [2.10], z_1 y z_2 es la elevación del fondo, H_1 y H_2 es la profundidad del flujo, α_1 y α_2 el coeficiente de carga de la velocidad, V_1 y V_2 es la velocidad media de la sección, g la aceleración de la gravedad y h_e la pérdida de carga por fricción-contracción del flujo (Us Army Corps of Engineers. Hydrologic Engineering Center, 2010). Para la solución de estas variables se utilizó el modelo unidimensional HEC-RAS, aproximando la altura de la superficie libre a lo largo del dominio simulado, resultados que fueron validados con los datos de la experimentación en prototipo para los eventos considerados.

Para la discretización del dominio vertical, se deberá tomar en cuenta la interacción de los procesos de transporte de partículas cerca las fronteras sólidas (Jasak y Tukovic, 2006). Se planteó el interés de simular procesos de transporte de sedimentos que ocurren en fondo del cauce y su relación con la variación de las formas en el lecho, por esta razón se realizó una discretización no uniforme del dominio vertical con mayor detalle en las cercanías al fondo. A continuación en la Tabla 2. 9 se presentan detalles de la discretización no uniforme del dominio vertical:

TABLA 2. 9. DETALLES DE LA DISCRETIZACIÓN DEL DOMINIO VERTICAL ADOPTADA EN EL TRAMO DEL RÍO TERCERO AGUAS ABAJO DEL PUENTE JUAN BAUTISTA ALBERDI.

Discretización (m)	# Elementos	Elevación (m)
0.025*H	8	0.2*H
0.05*H	6	0.5*H
0.1*H	6	H
Total:	20	

Como puede observarse en la Tabla 2. 9 en la discretización vertical se presentan 20 elementos: 8 elementos separados con altura vertical del 2.5% de la profundidad del flujo, 6 elementos separados con altura vertical del 5% de la profundidad del flujo y 6 elementos separados con altura vertical del 10% de la profundidad del flujo. A continuación en las Figura 2. 14, Figura 2. 15 y Figura 2. 16 se presentan las mallas resultantes correspondientes a eventos de flujo de 113.85 m³/s, 65.84 m³/s y 18.89 m³/s, respectivamente:

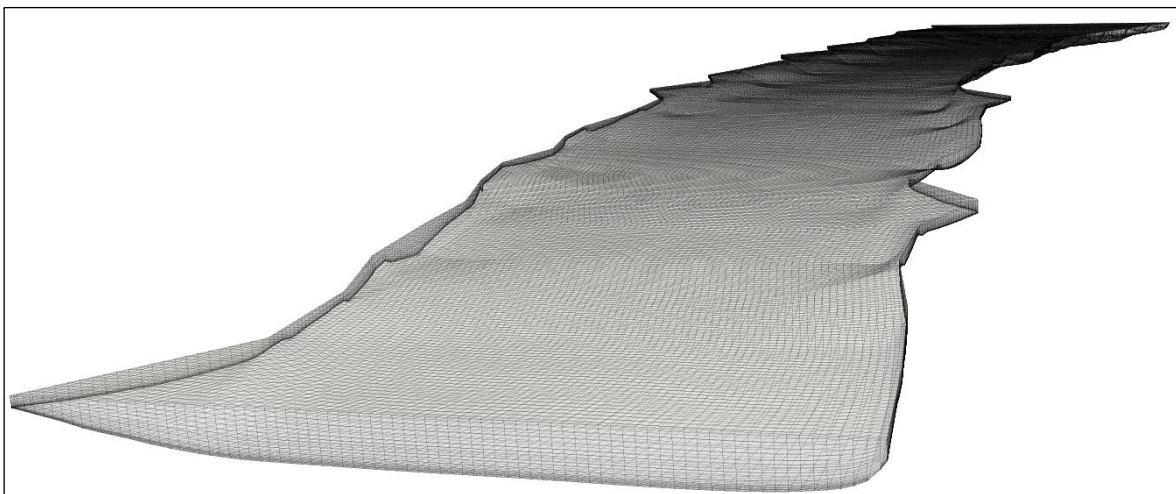


FIGURA 2. 14. DISCRETIZACIÓN DEL DOMINIO ESPACIAL DEL TRAMO DEL RÍO TERCERO AGUAS ABAJO DEL PUENTE JUAN BAUTISTA ALBERDI, Q=113.85 m³/s.

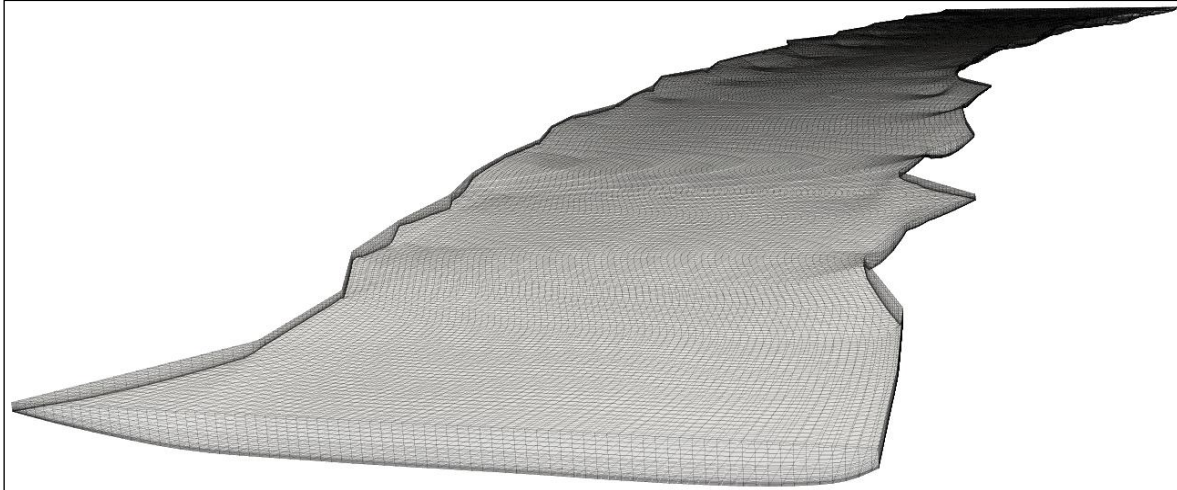


FIGURA 2. 15. DISCRETIZACIÓN DEL DOMINIO ESPACIAL DEL TRAMO DEL RÍO TERCERO AGUAS ABAJO DEL PUENTE JUAN BAUTISTA ALBERDI, $Q=65.84 \text{ m}^3/\text{s}$.

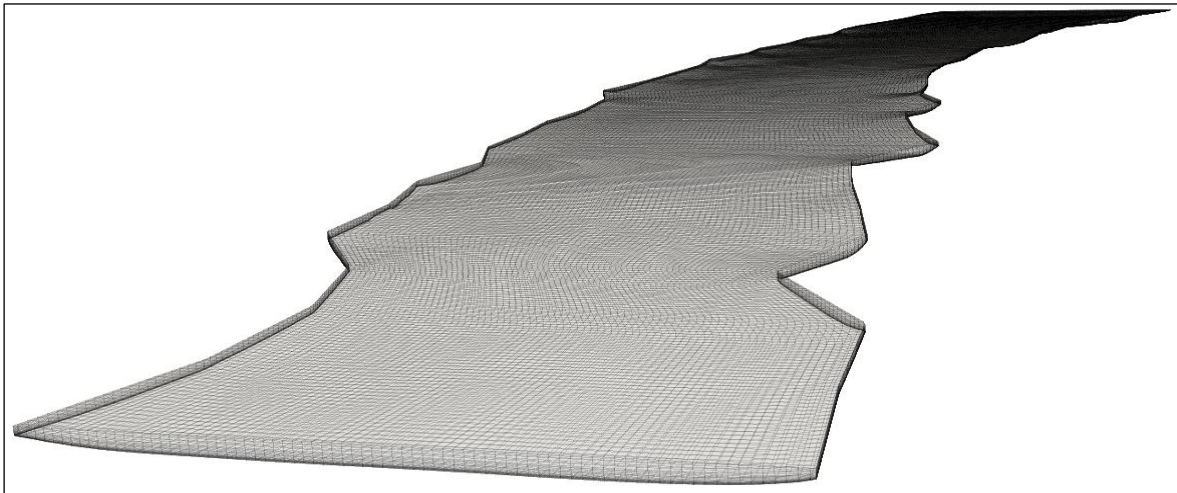


FIGURA 2. 16. DISCRETIZACIÓN DEL DOMINIO ESPACIAL DEL TRAMO DEL RÍO TERCERO AGUAS ABAJO DEL PUENTE JUAN BAUTISTA ALBERDI, $Q=18.89 \text{ m}^3/\text{s}$.

En las Figura 2. 14, Figura 2. 15 y Figura 2. 16; se pueden observar los cambios en la superficie de los contornos del modelo, esto según el evento para el que corresponde la malla, de lo cual se infiere que tienen mayor superficie (o perímetro mojado) las mallas construidas para simular eventos con mayor caudal. Se construyeron 18 mallas (entre las 3 presentadas en las Figura 2. 14, Figura 2. 15 y Figura 2. 16) para los eventos presentados en la Tabla 2. 2. Las mallas construidas tienen una media de 1248000 puntos, 3613346 superficies, 1183025 elementos hexaédricos y fueron examinadas, presentando calidad adecuada para el cálculo de las variables respecto a la ortogonalidad y forma de los elementos. El hecho de verificar la calidad de ortogonalidad y forma de los elementos en el dominio espacial, se verá reflejado en la precisión, convergencia y estabilidad de la simulación de las variables hidrodinámicas y de transporte de sedimentos (Olsen, 2012).

Capítulo 3:

Solución del Flujo
Tridimensional con
Transporte de Sedimentos.
Aplicación al Río Tercero,
Provincia de Córdoba

3. Solución del Flujo Tridimensional con Transporte de Sedimentos. Aplicación al Río Tercero, Provincia de Córdoba

La mecánica de fluidos computacional busca la solución de las variables de flujo con la ayuda de ordenadores y software de vanguardia, en donde los algoritmos numéricos son las principales herramientas para realizar aproximaciones a través de la simulación de las ecuaciones de estado que representan la física del problema. Por lo general, la estructura del flujo es dividida en un número de elementos que forman una malla y las ecuaciones de estado son resueltas en cada elemento, por lo que en la mayoría de casos, se requiere un esfuerzo computacional importante (Olsen, 1999).

El esquema de cálculo seleccionado para la investigación es el basado en el modelo SSIIM (Sediment Simulation In Intakes with Multiblock Option). SSIIM es una herramienta de mecánica de fluidos computacional para la simulación de variables de flujo tridimensional y transporte de sedimentos en flujos con superficie libre. El modelo SSIIM calcula las variables del flujo y transporte de sedimentos en ríos, canales y reservorios. El algoritmo de cálculo fue desarrollado por el equipo liderado por Dr. Nils Reider Olsen, profesor de la Universidad Noruega de Ciencia y Tecnología (NTNU: Norwegian University of Science and Technology). El software es de libre distribución y tiene algunas librerías en código abierto para el desarrollo de metodologías de cálculo (Olsen, 2014).

En el módulo hidrodinámico del modelo SSIIM se resuelven las ecuaciones tridimensionales de Navier Stokes promediadas por Reynolds:

$$\frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_j} = 0 \quad [3.1]$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{u}_j \bar{u}_i + \overline{\tilde{u}_j \tilde{u}_i})}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad [3.2]$$

Las ecuaciones [3.1] y [3.2] representan la conservación de la masa y momento del flujo, donde las tres coordenadas cartesianas son consideradas: $x_1 = x, x_2 = y, x_3 = z$; así también, las tres componentes de velocidad promediada sobre la turbulencia del flujo $\bar{u}_1 = u, \bar{u}_2 = v$ y $\bar{u}_3 = w$; ∂t es el diferencial del paso de tiempo, ρ la densidad del agua, \bar{p} representa la presión piezométrica, ν la viscosidad cinemática del fluido y el término $\overline{\tilde{u}_j \tilde{u}_i}$ representa la correlación de las fluctuaciones turbulentas de la velocidad.

Debido al término $\overline{\tilde{u}_j \tilde{u}_i}$, que representa la correlación de las fluctuaciones turbulentas de la velocidad, las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas sobre la turbulencia (RANS) no resuelven realmente el problema de un flujo turbulento, ya que, en la ecuación [3.2] todavía aparecen estos términos de fluctuaciones turbulentas de velocidad. El intento de obtener un conjunto de ecuaciones que describan el comportamiento sólo del flujo medio no ha dado resultado, ya que otras incógnitas aparecen, y por lo tanto se excede el número incógnitas sobre el de las ecuaciones promediadas por Reynolds. Esto es conocido como el problema de cierre de la turbulencia (García y Niño, 2003). Por lo tanto, el método RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes Equations) requiere introducir ecuaciones adicionales (externas)

para cerrar el problema. El modelo SSIIM resuelve las ecuaciones de Navier Stokes promediadas por Reynolds con un modelo de cierre de la turbulencia $K - \varepsilon$, de dos ecuaciones diferenciales, que se presenta a continuación:

$$\frac{\partial K}{\partial t} - \bar{u}_j \frac{\partial K}{\partial x_j} = - \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \frac{v_t}{\sigma_K} \frac{\partial K}{\partial x_j} \right\} + E_\Gamma - \varepsilon \quad [3.3]$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} - \bar{u}_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \frac{v_t}{\sigma_K} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right\} + C_1 \frac{\varepsilon}{K} E_\Gamma - C_2 \frac{\varepsilon^2}{K} \quad [3.4]$$

Donde en las ecuaciones [3.3] y [3.4], K representa la energía cinética turbulenta del flujo, v_t es la viscosidad cinemática de los vórtices o viscosidad turbulenta, σ_K es el coeficiente de Schmidt que relaciona la difusividad turbulenta de K con la viscosidad de los vórtices v_t , E_Γ representa la tasa de producción de energía cinética turbulenta desde el flujo debido a su interacción con los esfuerzos de Reynolds y ε la tasa de disipación de la energía cinética turbulenta (Juretic, 2004). La viscosidad cinemática de los vórtices se relaciona con las variables del modelo $K - \varepsilon$ de la siguiente manera:

$$v_t = C_\mu \frac{K^2}{\varepsilon} \quad [3.5]$$

La relación de la tasa de producción de energía cinética turbulenta desde el flujo debido a su interacción con los esfuerzos de Reynolds se puede estimar con la siguiente expresión:

$$E_\Gamma = v_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right)^2 \quad [3.6]$$

Los coeficientes del modelo de cierre $K - \varepsilon$ han sido aproximados y calibrados usando datos empíricos que se asume ser bastante universales (Pope, 2000):

$$\sigma_K = 1, C_\mu = 0.09, C_1 = 1.44, C_2 = 1.92$$

Por lo tanto, el modulo hidrodinámico de SSIIM resuelve 6 ecuaciones (la ecuación de balance de masa [3.1], las tres ecuaciones de momento [3.2] para el caso tridimensional y las dos ecuaciones de cierre de turbulencia [3.3] y [3.4]) con 6 incógnitas ($u, v, w, \hat{p}, K, \text{ y } \varepsilon$). Las velocidades de flujo resultantes pueden ser usadas para resolver la ecuación de advección-difusión de la concentración de sedimentos en suspensión en el flujo;

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} + \bar{u}_1 \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} + \bar{u}_2 \frac{\partial \bar{c}}{\partial y} + (\bar{u}_3 - v_s) \frac{\partial \bar{c}}{\partial z} = - \frac{\partial \bar{u}_1 \bar{c}}{\partial x} - \frac{\partial \bar{u}_2 \bar{c}}{\partial y} - \frac{\partial \bar{u}_3 \bar{c}}{\partial z} \quad [3.7]$$

En la ecuación [3.7], \bar{c} es la concentración volumétrica del sedimento en suspensión promediado sobre la turbulencia y v_s es la velocidad de caída del sedimento en suspensión que puede ser estimada con la ley de Stokes:

$$v_s = \frac{g G D^2}{18 \nu} \quad [3.8]$$

En la ecuación [3.8], G representa la gravedad específica del sedimento sumergido, D el diámetro de la partícula, g el valor de la aceleración de la gravedad de la Tierra y ν la viscosidad cinemática del agua.

En la ecuación [3.7], también aparece la correlación cruzada de la fluctuación de la velocidad y concentración del sedimento en suspensión, para lo cual es necesario un modelo de cierre para representar los flujos de sedimentos de Reynolds $\overline{u_i c}$, se plantea la suposición de que estos términos son proporcionales a los gradientes de la concentración del sedimento:

$$\overline{u_i c} = -D_d \frac{\partial \bar{c}}{\partial x_i} \quad [3.9]$$

En la ecuación [3.9], D_d representa la difusión cinemática de remolinos en el flujo turbulento, que en este caso se asume como una cantidad escalar que puede aproximarse a la viscosidad cinemática de los vórtices dada por la ecuación [3.5], tomando en cuenta que el coeficiente de Schmidt usado en el modelo de cierre de la turbulencia $K - \varepsilon$ se ha asumido como la unidad (Esmaeili, 2015). Los cambios morfológicos en el fondo del flujo y transporte de sedimentos de carga de fondo también son variables simuladas, la metodología de solución de estas variables será descrita más adelante en este capítulo.

El modelo SSIIM se divide en tres módulos para el cálculo: El de ingreso y visualización de datos de entrada (pre-processor), el de cálculo del flujo (solver) y el de visualización y análisis de resultados (post-processor). En el módulo de ingreso y visualización de datos de entrada se tiene una herramienta gráfica para la construcción y edición de la malla de cálculo, así como, una herramienta gráfica para el ingreso de las condiciones de contorno del flujo (caudal de entrada, alturas en los contornos, condiciones de pared y rugosidad) (Olsen, 2014).

El proceso de simulación de la hidrodinámica tridimensional se realiza en forma iterativa y basado en el método de solución SIMPLE, que a partir de una presión inicial, calcula el error en la ecuación de continuidad y obtiene una ecuación para la corrección del campo de presiones y posteriormente con la ecuación corregida se realiza el cálculo de las incógnitas del flujo hasta encontrar la convergencia de las variables de velocidad y campos de presión en las ecuaciones de Navier Stokes promediadas por Reynolds (Olsen, 1999).

Si se toma en cuenta las variables de transporte de sedimentos y variabilidad de formas de fondo en la hidrodinámica del flujo, el esquema SSIIM calcula las incógnitas de las ecuaciones de Navier Stokes (con el algoritmo SIMPLE) con una resistencia al flujo en función del diámetro de las partículas que conforman el lecho y con esta primera aproximación se calculan las incógnitas de transporte de sedimentos y cambios en la morfología del fondo en base a la ecuación de balance de masa. A partir de esto se ajustan nuevamente las variables hidrodinámicas con el método SIMPLE pero tomando en cuenta, la influencia de las formas de fondo en la resistencia al flujo al simular la morfología del cauce. Este proceso se repite hasta encontrar cierta estabilidad o régimen en las formas en el fondo simuladas (Olsen, 1999). En virtud de esto, aunque la hidrodinámica y el transporte de sedimentos son procesos dependientes en la simulación tridimensional de cauces naturales, para la descripción de los esquemas de cálculo, conviene tratarlos por separado y de esta

manera se busca la mejor comprensión de los algoritmos numéricos que se han tomado en cuenta.

A continuación, se presenta la discretización de las ecuaciones diferenciales de estado que representan los procesos físicos de convección-difusión en la ecuación de transporte y la solución de las ecuaciones de Navier Stokes tomando en cuenta el algoritmo SIMPLE. También, se presenta la metodología para simular las formas de fondo y las ecuaciones para determinar la magnitud del transporte de sedimentos de carga de fondo. Seguido de esto, se presentará la validación y resultados de la simulación de la hidrodinámica tridimensional, transporte de sedimentos y formas de fondo en el dominio de aplicación del tramo del río Tercero aguas abajo del puente Juan Bautista Alberdi en la ciudad de Villa María. Al final del capítulo, se presenta un análisis de sensibilidad de las variables destacadas.

3.1. Discretización de la Ecuaciones Diferenciales

Las ecuaciones diferenciales planteadas para resolver la hidrodinámica del flujo tridimensional ([3.1], [3.2], [3.3] y [3.4]) y la ecuación de advección-difusión de la concentración del sedimento en suspensión [3.7]; pueden ser relacionadas con los términos convectivos, difusivos y fuente de la ecuación general de transporte. Estos términos deben ser discretizados antes de proceder a la solución. Existen varios esquemas de discretización cuando se usa el método de diferencias finitas para la solución, de entre los cuales, a continuación se presentan los esquemas de discretización de los términos convectivos-difusivos de la ecuación de transporte que se encuentran disponibles en el modelo SSIIM para la solución en mallas estructuradas con elementos hexaédricos.

3.1.1. Esquema de Primer Orden con Ley Potencial

Para describir un esquema de primer orden con ley potencial (POW por sus siglas en inglés), primero se presentará el esquema de diferencias finitas de primer orden contra el viento (FOU por sus siglas en inglés). El esquema FOU utiliza un patrón de diferencias finitas adaptable o sensible a la solución para resolver numéricamente el campo de flujo tomando en cuenta la dirección de propagación de la información. Por lo tanto se asume que la variable en la superficie de la celda de cálculo se asocia con la del centro de la variable vecina en dirección aguas abajo de la corriente del flujo. Un ejemplo de una diferencia finita contra el viento de primer orden se presenta a continuación (Afzal, 2013):

$$\frac{\partial \phi_i}{\partial x_j} = \frac{(\phi_i - \phi_{i-1})}{\Delta x_j} \quad [3.10]$$

En la ecuación [3.10], $\phi_i > 0$ es la variable en la celda de cálculo y Δx_j es el tamaño de la discretización espacial. El esquema FOU es altamente difusivo, especialmente cuando la dirección del flujo está sesgada en relación con las líneas de la de la malla.

En la simulación de flujos con superficie libre, en donde el peso dado por los términos convectivos en la ecuación de transporte es dominante, el esquema de diferencias finitas de primer orden contra el viento suele producir valores de difusión falsa que implican

imprecisión y divergencia en la solución de un sistema. Para corregir este problema, los términos difusivos son multiplicados por un factor de reducción γ y de esta manera se evita el peso de los términos difusivos falsos en la solución del sistema. Este esquema de discretización se denomina como de ley potencial, ya que el factor de reducción γ de los términos difusivos es obtenido de la siguiente función potencial:

$$\gamma = F_{[0,(1-0.1|P_e|)^5]} \quad [3.11]$$

Donde en la ecuación 3.11, P_e es el número de Peclet:

$$P_e = \frac{|V|L}{\nu} \quad [3.12]$$

En la ecuación [3.12], $|V|$ es la magnitud de velocidad en un elemento, L la distancia del lado mayor y ν la viscosidad cinemática del flujo. En flujos donde el número de Peclet es menor a 2 se garantiza la estabilidad del esquema FOU, caso contrario se recomienda tomar en cuenta un esquema con reducción de los términos difusivos, que podría mejorar la estabilidad y precisión en los resultados que llevarían a evitar inestabilidades en la solución. Patankar (1980) presentó la función dada por la ecuación [3.11] de la siguiente forma:

$$\gamma = \begin{cases} -P_e & \xrightarrow{\text{sí}} & P_e < -10 \\ (1 + 0.1|P_e|)^5 - P_e & \xrightarrow{\text{sí}} & -10 \leq P_e < 0 \\ (1 - 0.1|P_e|)^5 & \xrightarrow{\text{sí}} & 0 \leq P_e \leq 10 \\ 0 & \xrightarrow{\text{sí}} & P_e > 10 \end{cases} \quad [3.13]$$

Como puede verse en la ecuación [3.13], en los casos en que el número de Peclet es mayor a diez, se consideran nulos los efectos difusivos en la solución del sistema. En flujos de cauces naturales, comúnmente, una buena aproximación de la solución del sistema viene dado por los términos convectivos; sin embargo, cerca de las fronteras sólidas del flujo donde las velocidades tienden a cero los términos difusivos toman importancia en la solución del sistema.

3.1.2. Esquema de Segundo Orden Contra el Viento

Se puede plantear una solución con un esquema de segundo orden contra el viento (SOU por sus siglas en inglés), como alternativa al esquema de primer orden para suprimir las oscilaciones falsas de los términos difusivos. La diferencia entre un esquema contra el viento de primer y segundo orden radica principalmente en la molécula de cálculo, como se puede observar a continuación en la Figura 3. 1:

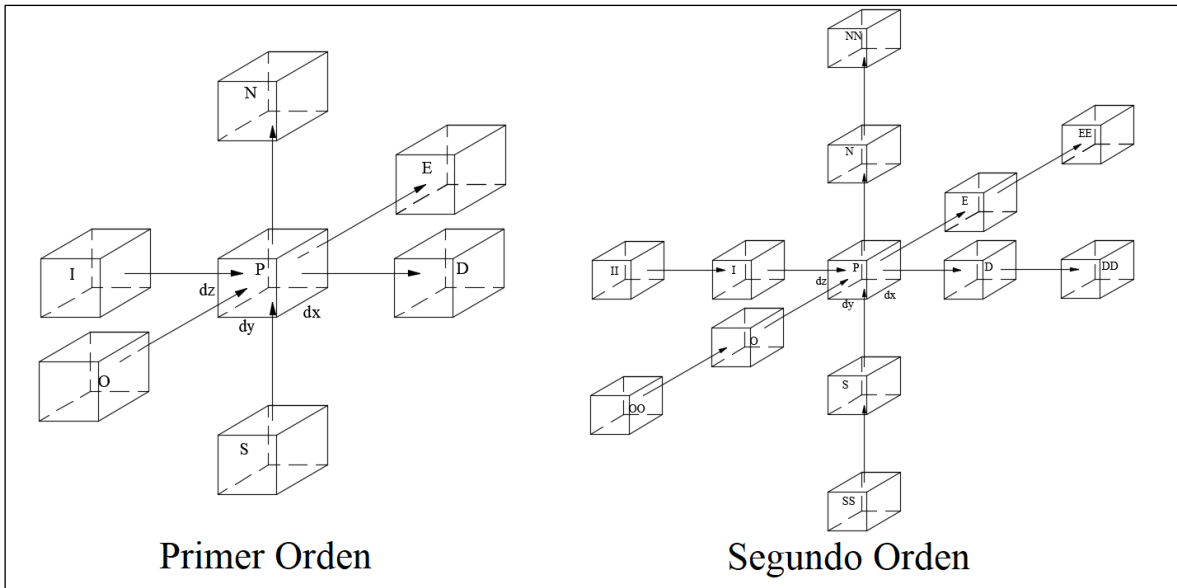


FIGURA 3. 1. MOLÉCULAS DE CÁLCULO DE ESQUEMAS CONTRA EL VIENTO.

Por lo tanto, tomando en cuenta la molécula de cálculo de la Figura 3. 1, a continuación se presenta un ejemplo de una diferencia finita contra el viento de segundo orden con una estructura similar a la presentada en la ecuación [3.10].

$$\frac{\partial \phi_i}{\partial x_j} = \frac{(3\phi_i - 4\phi_{i-1} + \phi_{i-2})}{2\Delta x_j} \quad [3.14]$$

Aunque el esquema SOU disminuye los efectos negativos en la estabilidad de la solución que ocurren por la difusión falsa, esto respecto al esquema de primer orden; se menciona que podrían persistir estos efectos numéricos en la solución de flujos con el número de Peclet superior a 2 (Charlesworth, 2003).

En la mayoría de casos de aplicación de simulación numérica de flujos con superficie libre, el número de Peclet es muy superior a dos, por lo que se recomienda un esquema de diferencias contra el viento con una función de tipo potencial que depende del número de Peclet para reducir el peso de los términos difusivos, con el objetivo de alcanzar estabilidad y precisión en la solución del sistema de ecuaciones diferenciales planteado.

3.1.3. Esquema de Diferencias Centrales

El esquema de diferencias centrales (CD por sus siglas en inglés) es de segundo orden y se plantea con una molécula de cálculo similar a la de un esquema de primer orden contra el viento. Por lo tanto, este esquema toma en cuenta las celdas vecinas alrededor del volumen de control, un ejemplo de la discretización de una variable con diferencias centrales se presenta a continuación:

$$\frac{\partial \phi_i}{\partial x_j} = \frac{(\phi_{i+1} - \phi_{i-1})}{2\Delta x_j} \quad [3.15]$$

En la solución dada por el esquema CD, la contribución de los términos convectivos de los nodos aguas abajo es siempre negativa, lo que puede dar lugar a oscilaciones físicas que violan las condiciones de contorno y degradan la calidad de los resultados. En los problemas asociados con la ecuación de transporte, este comportamiento no deseado puede ocurrir si el valor del número de Peclet es mayor a 2, como en la mayoría de flujos con superficie libre. Este comportamiento indeseable en la solución con un esquema CD, puede no ser importante si los gradientes en la solución son de pequeña magnitud, pero si la acotación de la solución es esencial (como cuando se toma en cuenta un modelo de cierre de la turbulencia K-ε), se recomienda utilizar otro esquema de cálculo (Juretic, 2004).

3.1.4. Interpolación Cuadrática Aguas Arriba para la Cinética Convectiva

Comúnmente denominado esquema QUICK por sus siglas en inglés, es un esquema de diferenciación de orden superior que considera una interpolación cuadrática ponderada aguas arriba de tres puntos para los valores de la variable en el volumen de control (Leonard, 1979). Contrariamente a los esquemas CD y SOU, donde se considera la derivada de primer orden y se ignora la derivada de segundo orden, QUICK toma en cuenta la derivada de segundo orden, pero ignora la derivada de tercer orden, por lo tanto, el esquema es de tercer orden de precisión.

QUICK es un esquema adecuado para flujos elípticos altamente convectivos y permanentes; las soluciones que usan QUICK podrían tener mayor precisión que los esquemas de primer orden y los falsos errores de difusión también se minimizan respecto al esquema de segundo orden. Sin embargo, el esquema sufre un alto grado de incertidumbre en las fronteras del modelo por los posibles altos niveles de gradientes en la solución; de lo que resultaría en un esquema muy robusto, difícil de acoplar, con un gran esfuerzo computacional y con problemas de inestabilidad en los contornos de la solución (Charlesworth, 2003).

Por lo expuesto en los párrafos previos y en base a la recomendación dada por el manual de usuario del modelo SSIIM (Olsen, 2014), para las simulaciones realizadas en este trabajo se seleccionó el esquema de volúmenes finitos de primer orden con ley potencial (POW).

3.1.5. Discretización de los Términos Temporales

Teniendo en cuenta la variación del término dependiente ϕ en el tiempo t , la derivada temporal e integral respecto al tiempo pueden ser expresadas como (de Villiers, 2006):

$$\left(\frac{\partial \phi}{\partial t}\right)_P = \frac{(\phi_P^n - \phi_P^{n-1})}{\Delta t} \quad [3.16]$$

$$\int_t^{t+\Delta t} \phi_{(t)} dt = \frac{(\phi_P^n + \phi_P^{n-1})\Delta t}{2} \quad [3.17]$$

En las ecuaciones [3.16] y [3.17], $\phi_P^n = \phi_{(t+\Delta t)}$ y $\phi_P^{n-1} = \phi_{(t)}$ representan los valores de la variable dependiente en el paso de tiempo nuevo y previo, respectivamente. Para la solución de los esquemas presentados en las ecuaciones [3.16] y [3.17] se ha considerado un método implícito de primer orden, en el que se toma en cuenta la información en la celda del cálculo

del paso de tiempo anterior; adicionalmente, en el tiempo nuevo también se considera el valor de las variables en las celdas vecinas, que también se convierten en incógnitas del sistema. Por lo tanto, es necesario resolver un sistema de ecuaciones lineales para la solución del esquema implícito. Un ejemplo del método de solución implícito, tomando en cuenta solamente una dirección de discretización (unidimensional), es (Hoffmann y Chiang, 2000):

$$\phi_i^n + \frac{1}{2}C_u\phi_{i+1}^n - \frac{1}{2}C_u\phi_{i-1}^n = \phi_i^{n-1} \quad [3.18]$$

Donde en la ecuación [3.18], C_u representa el número de Courant en el volumen de control que viene dado por:

$$C_u = \frac{|V|\Delta t}{L} \quad [3.19]$$

En la ecuación [3.19], V representa la velocidad media del flujo en el volumen de control, Δt el paso de tiempo y L el tamaño de la discretización espacial. El método de discretización temporal es de primer orden y es incondicionalmente estable; sin embargo se recomienda trabajar con números de Courant menores a uno para evitar errores debidos a los efectos de las no linealidades en la solución (Jasak, 1996).

3.1.6. Condiciones de Contorno

Se ha planteado la discretización del dominio espacial por volúmenes finitos, con esto se resolverán las ecuaciones de estado a partir de las relaciones entre celdas contiguas para obtener la solución del comportamiento del flujo sobre un cauce natural. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que existen elementos que en alguno de sus lados no tienen elementos vecinos y su relación debe basarse en valores de condiciones de contorno. Los valores de condiciones de contorno en un flujo con superficie libre se definen según su ubicación (Ruther, 2006):

- En la entrada del flujo,
- En la salida del flujo,
- En la superficie libre,
- En el contorno sólido del flujo.

En el módulo hidrodinámico, las variables de flujo que pueden ser definidas como condiciones de contorno son (Ruther, 2006):

- Las tres componentes de velocidad $(u, v, w) = (u_1, u_2, u_3)$,
- Las variables de la turbulencia del flujo K y ε ,
- El valor dado por la componente de presión en el flujo p .

Las variables en la condición de contorno de entrada del flujo son definidas por la condición del tipo Dirichlet, es decir, de un valor definido de la variable de velocidad dada por el caudal volumétrico y condiciones físicas del tramo. Para la salida del flujo, la condición de contorno es de tipo Neumann, con valor de cero; es decir, una condición de contorno de gradiente cero (Ruther, 2006).

Las condiciones de contorno en la superficie libre son mixtas: de tipo Dirichlet para la componente de velocidad en la vertical w y con un valor de cero para la energía cinética turbulenta del flujo K ; y de cero gradiente para la presión p , así como para la tasa de disipación de la energía turbulenta ε y para las variables horizontales del flujo u y v (Ruther, 2006).

Para la definición de las condiciones en el contorno sólido del flujo se tomará en cuenta la función de la ley de pared que introduce la resistencia de los contornos sólidos sobre el flujo, definido como una altura de rugosidad (Schlichting, 1979):

$$\frac{|V|}{\mu_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{3 \cdot z}{k_s} \right) \quad [3.20]$$

En la ecuación [3.20], V se define por el vector de velocidad media, μ_* es la velocidad de corte en el fondo del flujo, κ es la constante de von Karman, z es la distancia vertical del flujo y k_s define la altura de rugosidad. La relación de rugosidad en función de la dinámica de transporte de sedimentos en el fondo cuando se simula de manera explícita la geometría de las formas de fono, se relaciona con el diámetro del material que conforma el lecho (Olsen, 2000):

$$k_s = 3 * D_{90} \quad [3.21]$$

En la ecuación [3.21], D_{90} es el diámetro característico de sedimentos por el que pasa el 90% de la muestra. La altura de rugosidad dada por la ecuación [3.20] no toma en cuenta la resistencia que podría ejercer la geometría de las formas de fondo; la razón de usar esta expresión se justifica, debido a que en las simulaciones numéricas que se llevan a cabo en este trabajo, se tiene como objetivo una simulación explícita de la morfología del lecho fluvial.

Es importante destacar, que si en la modelación numérica de un cauce natural no se considera la deformación del fondo por transporte de sedimentos de manera explícita, se debería considerar la resistencia por la rugosidad de la geometría de las formas de fondo en forma implícita en una expresión de la altura de resistencia de las fronteras solidas sobre el flujo; siempre y cuando estas variables tengan una influencia importante en los resultados de la hidrodinámica, algo que comúnmente ocurre en flujos de cauces con aguas poco profundas y lechos arenosos (van Rijn, 1984^a, 1984^b, 1984^c) (García, 2008).

3.2. Solución de las Ecuaciones de Navier Stokes

El modulo hidrodinámico del modelo SSIIM resuelve las ecuaciones de Navier Stokes promediadas por Reynolds con un modelo de cierre de la turbulencia $K - \varepsilon$ usando el método de volúmenes finitos con un esquema de cálculo SIMPLE. Las siglas SIMPLE vienen de la abreviación en idioma ingles de método semi-implícito para ecuaciones vinculadas a la presión (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations). El propósito del método es encontrar un campo de presiones desconocido.

El planteamiento principal del método SIMPLE es calcular un valor de presión inicial y con el error en la continuidad obtener una ecuación para la corrección del campo de presiones, con las variables corregidas se procederá al cálculo de las otras incógnitas del sistema. Cuando esta corrección vinculada al campo de presión del flujo es adherida, la ecuación de continuidad es satisfecha (Olsen, 2012).

Para derivar las ecuaciones de corrección vinculadas a la presión se usará una notación especial. Las variables calculadas inicialmente y que no satisfacen la continuidad del flujo son escritas con el superíndice *, las variables de corrección son escritas con el superíndice ' y las variables después de la corrección no tendrán ningún superíndice:

$$p = p^* + p' \quad [3.22]$$

$$u_j = u_j^* + u_j' \quad [3.23]$$

El subíndice j de la velocidad, en la ecuación [3.23], representa la dirección con respecto a los ejes cartesianos; siendo $j = 1 = x, j = 2 = y, j = 3 = z$. Tomando en cuenta los valores supuestos del campo de presión, la versión en forma discreta de la ecuación de momento de Navier Stokes es:

$$\omega_P u_j^* = \sum_{nb} \omega_{nb} u_{j,nb}^* + B_{u_j} - \left(A_j^i \frac{\partial p^*}{\partial \xi} \right) \quad [3.24]$$

En la ecuación [3.24], u_j^* representa la velocidad supuesta asociada al campo de presiones que se desea resolver, ω_P es el factor de peso de los términos difusivos-convectivos de la ecuación de Navier Stokes en la celda de cálculo P , $\sum_{nb} \omega_{nb} u_{j,nb}^*$ representa la sumatoria del factor de peso asociado a la influencia de los términos difusivos-convectivos de las celdas vecinas, en el término B_{u_j} se encuentran los términos que no pertenecen a los procesos convectivos-difusivos en la ecuación de transporte, A_j^i representa el área de la superficie de una cara de la celda asociada a los índices " j i " y ξ es el índice que representa el sistema de discretización espacial. De forma similar, la versión en forma discreta de la ecuación de momento de Navier Stokes para las variables corregidas es:

$$\omega_P u_j = \sum_{nb} \omega_{nb} u_{j,nb} + B_{u_j} - \left(A_j^i \frac{\partial p}{\partial \xi} \right) \quad [3.25]$$

Al restar la ecuación [3.25] con la ecuación [3.24], y tomando en cuenta la ecuación [3.22]; se obtiene la ecuación para la corrección de la velocidad asociada al campo de presiones supuesto:

$$u_j' = \left(\frac{A_j^i}{(\omega_P - \omega_{nb})} \frac{\partial p'}{\partial \xi} \right) \quad [3.26]$$

En la ecuación [3.26], el término de la corrección de la presión p' es desconocido, por lo que se usa la ecuación de continuidad en forma discreta para obtener la corrección de velocidad en cada elemento de la malla:

$$\sum_{nb} A_j^i u_j' = 0 \quad [3.27]$$

Si se resuelve la ecuación [3.26] con la ecuación [3.27], se obtiene la ecuación en forma discreta para la corrección de la presión:

$$\omega_p p' = \sum_{nb} \omega_{nb} p'_{nb} + b \quad [3.28]$$

En la ecuación [3.28], b representa el término fuente por el diferencial de la velocidad para satisfacer la continuidad en el flujo en la celda de cálculo y $\sum_{nb} \omega_{nb} p'_{nb}$ la influencia del término de la corrección de la presión de las celdas vecinas. La ecuación se resuelve con los términos de velocidad hasta que sea satisfecha la continuidad en la celda, es decir, cuando el término b tienda a cero (Patankar, 1980). El procedimiento de cálculo del método SIMPLE es el siguiente:

1. Suponer un campo de presiones p^* .
2. Calcular la velocidad u_j^* de la ecuación [3.24], asociada a la discretización espacial y temporal de las ecuaciones de transporte.
3. Resolver la ecuación [3.25] y obtener la corrección del término de presión p' .
4. Corregir el campo de presiones sumando p^* y p' .
5. Corregir el campo de velocidades u_j^* con u_j' calculada de la ecuación [3.26] y obtener el campo de velocidades u_j con la ecuación [3.23].
6. Realizar los pasos (2) al (5) hasta que la diferencia entre las variables de velocidad y presión calculadas entre una iteración y otra tiendan a cero; es decir, hasta que el término b de la ecuación [3.28] tienda a cero.

Se observa que el método SIMPLE no resuelve una ecuación de presión en forma directa, solamente resuelve una ecuación para la corrección de esta presión y la variable del campo de presiones se obtiene por acumulación iterativa de los términos de la corrección. A menudo, el método SIMPLE puede ser inestable al calcular el campo de presiones del flujo, razón por la cual, el término de la corrección de la presión suele ser multiplicado por un valor menor a la unidad que es conocido como un coeficiente de relajación del método. El coeficiente de relajación óptimo depende del patrón del flujo considerado y puede ser calibrado para mejorar las tasas de convergencia en la solución de las ecuaciones diferenciales del flujo (Patankar, 1980).

La superficie libre se calcula con una aproximación de tapa rígida, basado en las condiciones de contorno presentadas en la Figura 2. 13, la ubicación de esta tapa rígida y su movimiento es función del paso del tiempo y del campo de flujo (Olsen, 2014).

Cuando se utiliza las ecuaciones de Navier Stokes promediadas por Reynolds con un modelo de cierre de la turbulencia $K - \epsilon$ para resolver la turbulencia, el problema se puede abordar

como estacionario. Las ecuaciones de Navier Stokes promediadas por Reynolds y muchos otros métodos para problemas estacionarios en la dinámica de fluidos computacional pueden ser considerados como problemas no estacionarios hasta que se logra un estado de equilibrio. Si un método implícito se utiliza en el tiempo, las ecuaciones de cantidad de movimiento discretizadas para el nuevo paso de tiempo no son lineales. Debido a esto y a que las ecuaciones diferenciales subyacentes están acopladas, el sistema de ecuaciones resultante de la discretización no puede resolverse directamente, entonces los métodos iterativos de solución son la única opción (Ragessi, 2013).

Las ecuaciones de cantidad de movimiento se suelen resolver de forma secuencial para cada componente. La presión utilizada en cada iteración se obtiene del paso de cálculo anterior y por lo tanto las velocidades calculadas normalmente no satisfacen la ecuación de continuidad discretizada. A fin de que las velocidades cumplan con esta ecuación se debe modificar el campo de presión. Esto se puede hacer resolviendo la ecuación de Poisson discretizada para la presión (Patankar, 1980).

La ecuación de Poisson discretizada, se obtiene aplicando la divergencia a la ecuación de cantidad de movimiento de Navier Stokes:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} \right) \quad [3.29]$$

La ecuación [3.29], se puede escribir como:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\partial u_j u_i}{\partial x_j} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial^2 p}{\partial x_i \partial x_i} + \nu \frac{\partial^2}{\partial x_j \partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) \quad [3.30]$$

En la ecuación [3.30], el término $\frac{\partial u_i}{\partial x_i}$ es cero por considerarse un flujo incompresible, por lo tanto la ecuación de Poisson buscada es:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x_i \partial x_i} = -\rho \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\partial u_j u_i}{\partial x_j} \right) \quad [3.31]$$

Donde en la ecuación [3.31], el miembro derecho es una función de las derivadas parciales de las componentes de la velocidad y se obtienen a partir de los términos convectivos-difusivos de las ecuaciones de cantidad de movimiento.

Después de resolver esta ecuación para la presión se calcula nuevamente el campo de velocidades. Este nuevo campo de velocidades satisface la ecuación de continuidad, pero los nuevos campos de velocidad y presión no satisfacen las ecuaciones de cantidad de movimiento. Por lo tanto, el procedimiento descrito anteriormente se repite hasta que se obtiene un campo de velocidad que satisfaga tanto las ecuaciones de movimiento y continuidad. Estas iteraciones, realizadas para obtener una solución que satisfaga todas las ecuaciones, se llaman iteraciones exteriores (Patankar, 1980).

3.3. Solución de la Evolución Espacial y Temporal de las Formas de Fondo

El movimiento de una partícula de sedimento es función de las condiciones instantáneas del flujo y de su resistencia a moverse. El inicio del movimiento de las partículas se da cuando el flujo de agua está a punto de empezar a mover las partículas de sedimento y depende del esfuerzo cortante que una corriente produce sobre el lecho. Para la condición de flujo uniforme y estacionario, el esfuerzo cortante de fondo responde a la siguiente expresión (García, 2008):

$$\tau_b = \rho g H s \quad [3.32]$$

En la ecuación [3.32], H es la profundidad media del flujo y s representa la pendiente de fondo del cauce. En estudios realizados por Albert F. Shields (García, 2000), se realizó una parametrización para el inicio del movimiento de partículas en ríos; se relacionó el parámetro de esfuerzo cortante adimensional τ^* con el número de Reynolds R_{ep} de las partículas de un flujo:

$$\tau^* = \frac{\tau_b}{\rho g G D_{50}} = \frac{H s}{G D_{50}} \quad [3.33]$$

$$R_{ep} = \frac{\sqrt{g G D_{50}} D_{50}}{\nu} \quad [3.34]$$

Como puede observarse en las ecuaciones [3.33] y [3.34], el inicio del movimiento de las partículas está en función de las variables hidrodinámicas del flujo: profundidad H , viscosidad cinemática ν y pendiente s del cauce; así como, en función de las características de las partículas: gravedad específica del sedimento sumergido $G = \left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1\right)$ y diámetro medio D_{50} .

El esfuerzo crítico adimensional, representado por τ_c^* , se presenta en el umbral de movimiento y para estas condiciones, las variables del flujo, tales como el esfuerzo cortante en el fondo, la velocidad media o la profundidad, adquieren ciertos valores llamados críticos. En condiciones críticas existe equilibrio entre las fuerzas de gravedad, el empuje de sustentación, la fuerza ascensional perpendicular al fondo producida por la acción hidrodinámica y la fuerza hidrodinámica paralela al fondo (Weber, 2003).

A continuación, en la Figura 3. 2 se presenta el Diagrama de Sedimentación de Shields, reconstruido en estudios posteriores por Parker (García, 1999), en el que se pueden emplear tres curvas para estimar el tamaño de partículas que inician el movimiento para distintos valores de esfuerzo cortante adimensional y número de Reynolds; y también, se puede estimar si el modo de transporte que prevalece es de transporte en suspensión o transporte de fondo. El diagrama de Shields-Parker también puede ser usado para estimar el tipo de formas de fondo que pueden esperarse dependiendo de las condiciones de flujo y características de las partículas de sedimento. Por ejemplo, los rizos pueden desarrollarse cuando en la subcapa

de flujo viscoso se distribuyen sedimentos de grano fino. Si en la subcapa viscosa se distribuyen partículas de sedimento de diámetro grueso se esperaría la formación de dunas en el fondo del cauce.

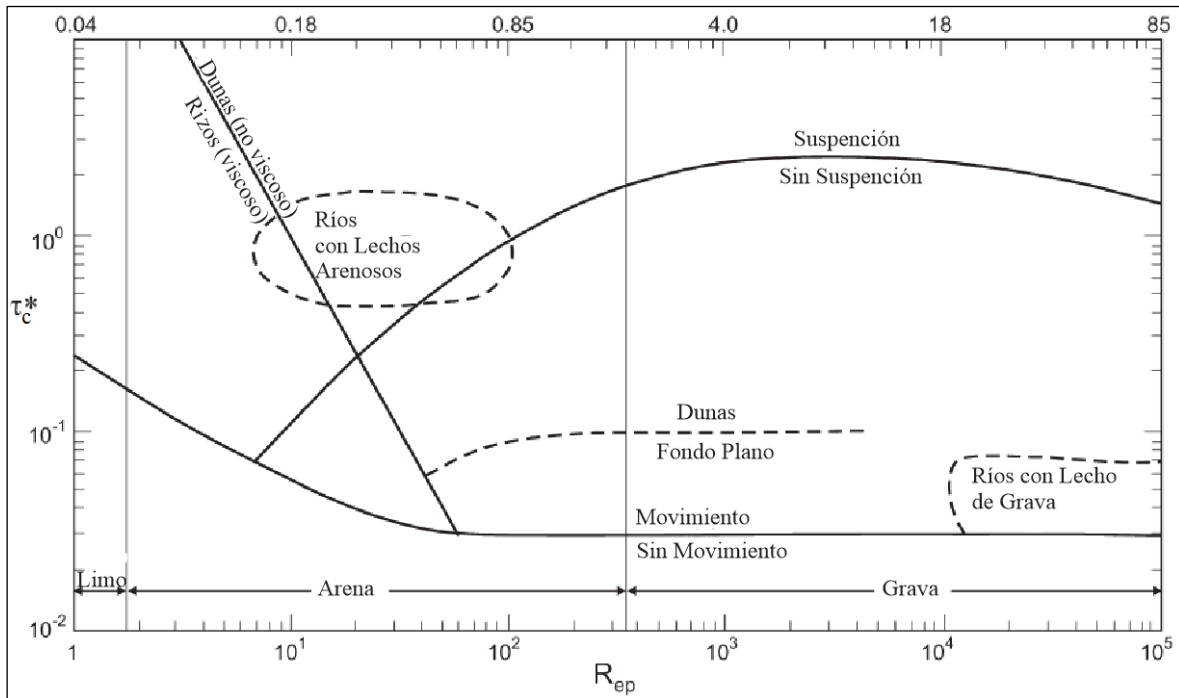


FIGURA 3. 2. DIAGRAMA DE SHIELDS PARA EL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS (GARCÍA, 1999).

El diagrama de Shields-Parker es de utilidad para estimar que modo de transporte es determinante en el flujo o la coexistencia de transporte de carga de fondo y carga en suspensión. Es importante hacer notar que si el lecho del cauce es de materiales cohesivos, no es apropiado hablar del inicio del movimiento de partículas; por lo que es mejor referirse a la condición bajo la cual se produce erosión del lecho o existe habilidad para transportar fragmentos del suelo. La parametrización realizada por Shields presenta muy buenos resultados para el análisis del transporte de sedimentos no cohesivos (García, 2008).

Por lo tanto, cuando la tensión de corte del fondo del flujo τ^* excede la tensión de corte crítico τ_c^* , se iniciará el proceso de erosión y se estima que se producirán cambios en el nivel del lecho. Estos cambios se pueden calcular en cada paso de tiempo, teniendo en cuenta la ecuación de balance de masa de los sedimentos en el elemento más cercano al fondo usando la siguiente ecuación (Haun et al, 2015):

$$\frac{\partial z_0}{\partial t} = \left(c_{\lambda_p} (S_i - S_o) \right) \frac{\partial z_b}{|S_{fv}|} \quad [3.35]$$

En la ecuación de balance de masa [3.35], ∂z_0 representa el cambio en la profundidad de la celda de cálculo, ∂t el paso temporal, ∂z_b el tamaño en la vertical de la celda de cálculo, $|S_{fv}|$ es el área del plano vertical de la celda de cálculo, c_{λ_p} representa un factor de conversión entre el flujo de sedimentos y el nivel del fondo, S_i y S_o son la entrada y salida de sedimentos

en la celda de control. El factor c_{λ_p} se puede estimar de la siguiente manera, en función a la porosidad del material de fondo (Mendoza et al, 2016):

$$c_{\lambda_p} = \frac{1}{1-\lambda_p} \quad [3.36]$$

En la ecuación [3.36], λ_p representa la porosidad del material de fondo, que para el caso de arenas se puede aproximar a $\lambda_p = 0.5$.

Para estimar el flujo de transporte de sedimentos de carga de fondo se ha tomado en cuenta la metodología dada por van Rijn (1984^a). Van Rijn derivó una relación para estimar la tasa de transporte de partículas con tamaño medio de entre 0.2 y 2 milímetros, se recomienda para flujos subcríticos con número de Froude menor a 0.5. La tasa adimensional de transporte de partículas de fondo según la metodología desarrollada por van Rijn está dada por la siguiente expresión:

$$q^* = 0.053 \frac{\aleph^{2.1}}{D^{*0.3}} \quad [3.37]$$

En la ecuación [3.37], q^* es la carga adimensional de sedimentos, D^* es el diámetro adimensional de la partícula y \aleph el parámetro del nivel de transporte de sedimentos:

$$D^* = D_{50} \left(\frac{g G}{\nu^2} \right)^{1/3} = R_{ep}^{2/3} \quad [3.38]$$

$$\aleph = \frac{\tau_s^* - \tau_c^*}{\tau_c^*} \quad [3.39]$$

En las ecuaciones [3.38] y [3.39], ν es la viscosidad cinemática del fluido, R_{ep} número de Reynolds de las partículas de sedimento, τ_s^* el valor del esfuerzo cortante superficial de las partículas y τ_c^* esfuerzo crítico para el inicio del movimiento. Se pueden obtener τ_c^* del diagrama de Shields (Figura 3. 2) y τ_s^* a partir de las siguientes relaciones (García, 2008):

$$\tau_s^* = \frac{C_{fs} U^2}{g G D_{50}} \quad [3.40]$$

$$C_{fs} = \frac{1}{\kappa} \ln \left(12 \frac{H}{k_s} \right)^{-2} \quad [3.41]$$

Donde en las ecuaciones [3.40] y [3.41], C_{fs} es el coeficiente de resistencia a la fricción sin considerar formas de fondo, $k_s = 3D_{90}$ es la rugosidad equivalente del fondo o rugosidad de Nikuradse, $\kappa = 0.41$ la constante de von Karman, D_{50} y D_{90} el diámetro medio y el diámetro por el que pasa el 90% del material.

La tasa volumétrica de carga de sedimentos de fondo transportada por unidad de ancho está dada por la siguiente expresión (García, 2008):

$$q_b = q^* D_{50} \sqrt{g G D_{50}} \quad [3.42]$$

Por lo tanto, en base a las ecuaciones [3.35] y [3.42], se pueden obtener expresiones que relacionan el flujo de sedimentos en la celda de cálculo con el flujo de transporte de fondo de las celdas vecinas:

$$S_i = \sum_n q_{b_n} \omega_n \quad [3.43]$$

$$S_o = q_b \sum_{nb} \omega_{nb} \quad [3.44]$$

La diferencia entre las expresiones de entrada y salida del flujo de transporte de sedimentos, [3.43] y [3.44] respectivamente, es que en la sumatoria de los términos de carga de sedimentos de fondo por el factor de peso $\sum_n q_{b_n} \omega_n$ de la ecuación [3.43], se toma en cuenta las celdas vecinas y se incluye la celda de cálculo (subíndice n); mientras que en la ecuación [3.44] para la salida de sedimentos, se toma en cuenta la carga de fondo de la celda de cálculo q_b , pero en la sumatoria del factor de peso no se considera el factor de peso de la celda de cálculo (subíndice nb).

De esta manera se calculan los cambios morfológicos en el fondo del cauce ∂z_0 en cada celda, es importante mencionar que las condiciones en el tiempo inicial del transporte de sedimentos de carga de fondo se obtuvieron en base a los datos de las mediciones con ADCP presentados en la Tabla 2. 3. Las condiciones de contorno en los tiempos diferentes al inicial, se definen como de recirculación del transporte de sedimentos, por lo que la carga que sale en las celdas aguas abajo es la condición de entrada para el siguiente paso de tiempo en las celdas donde inicia el flujo (Mendoza et al, 2016).

La simulación numérica de la evolución de la morfología fluvial en un cauce natural es un proceso muy complejo. Implica la predicción correcta de las condiciones de flujo junto con el modelado de transporte de sedimentos y la evolución del lecho. El movimiento, la erosión y la deposición de los sedimentos son extremadamente sensibles a ligeros cambios en las condiciones de flujo, por lo tanto, estos procesos son interdependientes, los modelos numéricos idealmente deberían usar el mismo paso de tiempo para la evolución de las formas de fondo y para la solución de los procesos hidrodinámicos. Este enfoque totalmente acoplado para la evolución de las formas de fondo es computacionalmente muy costoso (Zeng et al, 2005). Como resultado, la mayoría de los modelos numéricos existentes utilizan un enfoque semi-acoplado o completamente desacoplado.

Un enfoque semi-acoplado supone que el flujo y el transporte de sedimentos en suspensión tienen la misma escala de tiempo mientras que la evolución de la morfología fluvial y la redistribución de la rugosidad tienen pasos de tiempo, comúnmente, de mayor magnitud. Primero se resuelve el flujo y el transporte de sedimentos suspendidos en cada paso de tiempo de flujo y luego se usa los campos de flujo actualizados para calcular el transporte de carga de fondo y la evolución de la morfología utilizando un paso de tiempo más grande. Esto se basa en la suposición de que los sedimentos suspendidos tienen una influencia insignificante en la solución del flujo, como ocurre en los cauces con carga diluida de partículas en suspensión.

Un enfoque totalmente desacoplado se aborda en la simulación de la hidrodinámica tridimensional con la evolución de la morfología fluvial tomando en cuenta el modelo SSIIM, esto asume que no hay interacción del flujo con la carga en suspensión, con la carga de fondo o con el nivel del fondo. El paso de tiempo morfológico, se utiliza para el cálculo del transporte de sedimentos en suspensión, el transporte de carga de fondo y la evolución de la morfología. Esta suposición es válida en casos donde la concentración de sedimentos en suspensión es tan diluida que no podrá alterar las condiciones de flujo. Este enfoque para SSIIM se refuerza aún más por el hecho de que en el modelo numérico la evolución de la morfología y los procesos de transporte de carga de fondo se calculan en términos de una capa de carga de fondo y no de partículas de sedimento individuales.

3.4. Validación de la Simulación Hidrodinámica Tridimensional con Transporte de Sedimentos en el Tramo Medio del río Tercero

Se implementó, en el dominio del tramo del río Tercero aguas abajo del puente Juan Bautista Alberdi de la ciudad de Villa María, la modelación tridimensional con SSIIM para simular la hidrodinámica del flujo con procesos de transporte de sedimentos. Se simuló 18 eventos en base a los caudales caracterizados y presentados en la Tabla 2. 2, que están en el rango de $9.64 \text{ m}^3/\text{s}$ hasta $121.22 \text{ m}^3/\text{s}$; los eventos seleccionados no presentan desborde o flujo en las riberas de inundación del cauce, y por lo tanto, no es necesario tomar en cuenta efectos de secado-mojado en el tramo analizado.

Una de las suposiciones importantes que se realizaron en este trabajo, fue el de plantear la superficie libre como una tapa rígida en función de la profundidad del flujo (Figura 2. 13) para cada evento simulado y la condición de entrada con el caudal distribuido de manera uniforme en la sección. Las condiciones de resistencia al flujo fueron definidas como una altura equivalente de rugosidad (ecuación [3.21]) en función del diámetro característico que se basó en la granulometría de las partículas que se presentó en la Figura 2. 9. A continuación, en la Figura 3. 3 y en la Tabla 3. 1, se presentan resultados de la velocidad media del flujo obtenidos de la caracterización con el instrumento ADCP y de la simulación con la herramienta de cálculo SSIIM, en la sección de control ubicada a aproximadamente 10 metros aguas abajo del puente Juan Bautista Alberdi:

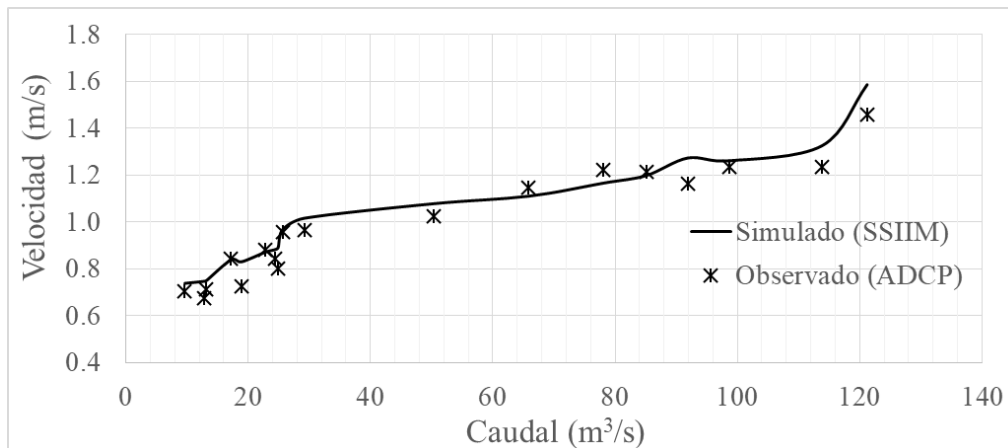


FIGURA 3. 3. RESULTADOS DE LA VELOCIDAD MEDIA OBSERVADA Y SIMULADA EN EL FLUJO DEL RÍO TERCERO.

TABLA 3. 1. RESULTADOS DE LA VELOCIDAD MEDIA OBSERVADA Y SIMULADA EN EL FLUJO DEL RÍO TERCERO.

#	Fecha	Caudal (m ³ /s)	Vel. Med. Observada (m/s)	Vel. Med. Simulada (m/s)	Error (%)
1	19-11-13	9.64	0.70	0.74	4.84%
2	08-09-15	12.86	0.68	0.75	10.50%
3	23-10-15	13.18	0.71	0.75	4.97%
4	18-11-14	17.22	0.84	0.84	0.47%
5	07-11-16	18.89	0.73	0.83	14.33%
6	09-09-14	22.81	0.88	0.87	0.98%
7	09-06-15	24.35	0.84	0.88	4.59%
8	05-09-16	24.90	0.80	0.89	11.55%
9	10-06-14	25.64	0.96	0.97	1.24%
10	28-04-15	29.20	0.97	1.02	5.28%
11	17-11-15	50.27	1.03	1.08	5.07%
12	08-04-16	65.84	1.15	1.11	3.14%
13	22-12-15	78.09	1.22	1.17	4.50%
14	11-02-16	85.09	1.21	1.20	1.13%
15	08-03-16	91.91	1.16	1.27	9.58%
16	18-04-16	98.72	1.23	1.26	2.22%
17	16-03-16	113.85	1.23	1.33	7.53%
18	08-04-14	121.22	1.46	1.59	8.94%
				Promedio:	5.60%

Los resultados presentados en la Figura 3. 3 y Tabla 3. 1 corresponden a la velocidad promediada en la sección de control localizada a 10 metros del puente Juan Bautista Alberdi y se puede observar una tendencia aceptable de los resultados de velocidad media simulada en SSIIM, en contraste, con los datos de la caracterización con un instrumento ADCP. El error máximo al comparar las series es menor al 15% que corresponde al evento con caudal de 18.89 m³/s y se tiene un error promedio cercano al 6% de los valores simulados frente a los observados en prototipo.

A continuación en la Tabla 3. 2 se presentan resultados de la profundidad media observada y simulada en la sección de control del río Tercero ubicada a aproximadamente 10 metros aguas abajo del puente Juan Bautista Alberdi; y a continuación, en la Figura 3. 4 se presenta la correlación entre los valores medidos y calculados presentados en la Tabla 3. 2 de la profundidad media del flujo:

TABLA 3. 2. RESULTADOS DE LA PROFUNDIDAD MEDIA OBSERVADA Y SIMULADA EN EL FLUJO DEL RÍO TERCERO.

#	Fecha	Caudal (m ³ /s)	Profund. Med. Observada (m)	Profund. Med. Simulada (m)
1	19-11-13	9.64	0.4	0.5
2	08-09-15	12.86	0.6	0.6
3	23-10-15	13.18	0.6	0.6
4	18-11-14	17.22	0.7	0.7
5	07-11-16	18.89	0.7	0.7
6	09-09-14	22.81	0.9	0.9
7	09-06-15	24.35	0.9	1.1
8	05-09-16	24.90	0.9	1.1
9	10-06-14	25.64	0.9	1.1
10	28-04-15	29.20	1.0	1.1
11	17-11-15	50.27	1.4	1.4
12	08-04-16	65.84	1.7	1.4
13	22-12-15	78.09	1.9	1.6
14	11-02-16	85.09	2.1	1.8
15	08-03-16	91.91	2.2	1.9
16	18-04-16	98.72	2.3	2.1
17	16-03-16	113.85	2.4	2.1
18	08-04-14	121.22	2.5	2.3

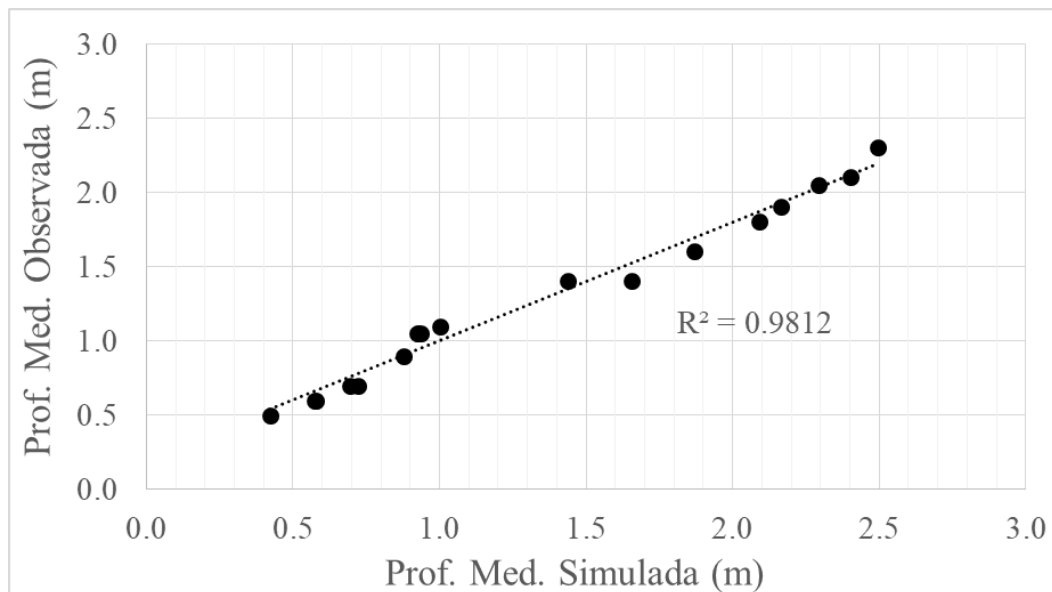


FIGURA 3. 4. CORRELACIÓN DE LOS RESULTADOS DE LA PROFUNDIDAD MEDIA OBSERVADA Y SIMULADA EN EL FLUJO DEL RÍO TERCERO.

El coeficiente de correlación de los resultados de profundidad media del flujo es cercano a la unidad, lo que refleja la tendencia lineal y satisfactoria de estas variables medidas con el instrumento ADCP y simuladas con la herramienta SSIIM. De manera similar, a continuación en la Tabla 3. 3 se presentan resultados del ancho del flujo en la sección de control del río Tercero, ubicada a aproximadamente 10 metros aguas abajo del puente Juan Bautista Alberdi; y en la Figura 3. 5, la correlación de los resultados presentados en la Tabla 3. 3:

TABLA 3. 3. RESULTADOS OBSERVADOS Y SIMULADOS DEL ANCHO DE LA SECCIÓN DE CONTROL AGUAS ABAJO DEL PUENTE JUAN BAUTISTA ALBERDI.

#	Fecha	Caudal (m ³ /s)	Ancho Observado (m)	Ancho Simulado (m)
1	19-11-13	9.64	27.6	29.2
2	08-09-15	12.86	37.8	31.7
3	23-10-15	13.18	29.6	31.7
4	18-11-14	17.22	34.9	31.2
5	07-11-16	18.89	34.8	31.2
6	09-09-14	22.81	34.8	32.7
7	09-06-15	24.35	37.3	32.9
8	05-09-16	24.90	35.2	33.1
9	10-06-14	25.64	33.1	32.3
10	28-04-15	29.20	33.6	33.0
11	17-11-15	50.27	38.3	33.7
12	08-04-16	65.84	36.3	35.7
13	22-12-15	78.09	40.8	36.6
14	11-02-16	85.09	39.3	36.6
15	08-03-16	91.91	42.2	37.2
16	18-04-16	98.72	40.3	37.6
17	16-03-16	113.85	41.0	38.1
18	08-04-14	121.22	37.5	36.8

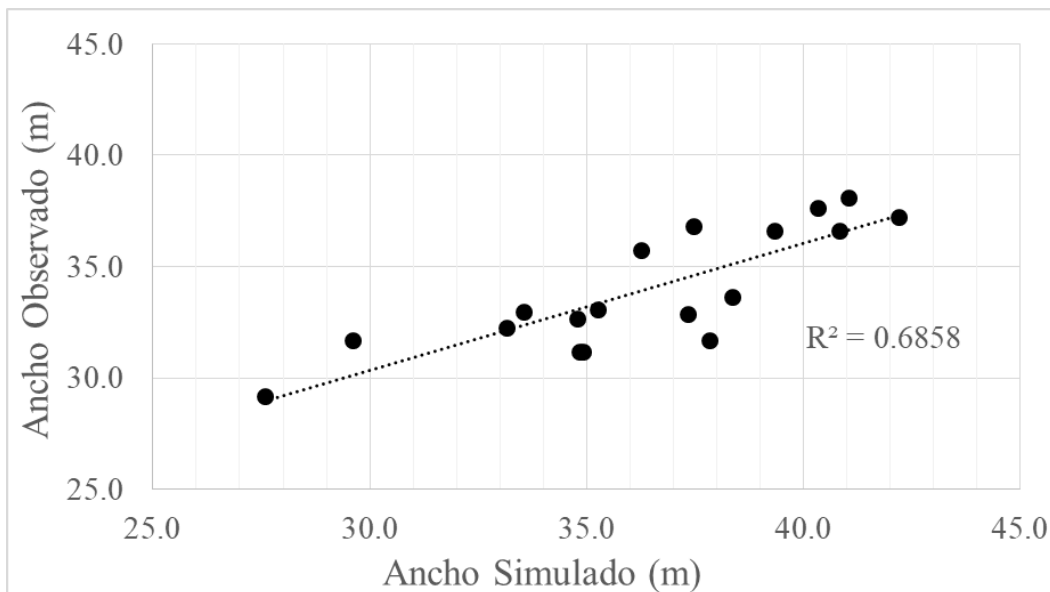


FIGURA 3. 5. CORRELACIÓN DE LOS RESULTADOS OBSERVADOS Y SIMULADOS DEL ANCHO DE LA SECCIÓN DE CONTROL AGUAS ABAJO DEL PUENTE JUAN BAUTISTA ALBERDI.

En la Figura 3. 5 de la correlación de las variables calculadas y observadas del ancho del flujo en la sección de control ubicada a aproximadamente 10 metros del puente Juan Bautista Alberdi, el coeficiente de correlación al cuadrado estimado es cercano a 0.7 que refleja un comportamiento aceptable de la geometría del flujo simulado. La dispersión de algunos puntos en la Figura 3. 5, puede ser relacionada a los desplazamientos longitudinales que ocurren en la caracterización de las variables de flujo con el instrumento ADCP y a la

vegetación o material existente en las márgenes de la sección de control que dificultan la estimación precisa del ancho efectivo en las campañas de medición.

Se puede relacionar la profundidad media de la sección con la magnitud del caudal de cada evento para tener una aproximación de la capacidad de flujo en una sección determinada, a continuación en la Figura 3. 6 se presenta las curvas Profundidad-Caudal ($H - Q$) en base a los datos medidos con ADCP y los resultados obtenidos con el modelo SSIIM en la sección de control del río Tercero aguas abajo del puente Juan Bautista Alberdi:

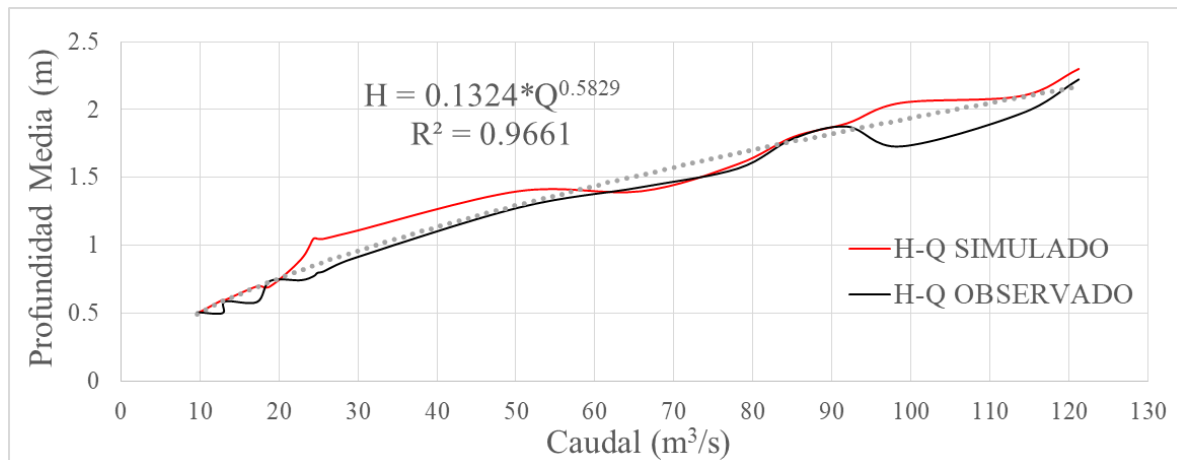


FIGURA 3. 6. CURVA H-Q DE LOS RESULTADOS OBSERVADOS Y SIMULADOS EN EL FLUJO DEL RÍO TERCERO.

En la Figura 3. 6 de las curvas $H - Q$ con los resultados de las variables de flujo simuladas en el modelo SSIIM y los datos medidos con el ADCP, se aprecia que la tendencia de tipo exponencial de estas variables tiene muy buen comportamiento con un coeficiente de correlación al cuadrado muy cercano a la unidad. En este punto se dan como validados los resultados hidrodinámicos simulados en el tramo del río Tercero aguas abajo del puente Juan Bautista Alberdi de la ciudad de Villa María, en base a los datos disponibles de la experimentación con ADCP en la sección de control determinada.

A continuación se analizan los resultados del transporte de partículas y morfología del fondo del cauce del tramo del río Tercero simulado. En la Figura 3. 7, se presentan los resultados de la carga de transporte de sedimentos de fondo simulados con el modelo SSIIM y los datos basados en observaciones en campo a partir de la metodología de seguimiento de dunas con el instrumento ADCP (Heredia et al, 2017), en el tramo del río Tercero aguas abajo del puente Juan Bautista Alberdi para los eventos de $113.85 \text{ m}^3/\text{s}$, $65.84 \text{ m}^3/\text{s}$, $24.90 \text{ m}^3/\text{s}$ y $18.89 \text{ m}^3/\text{s}$:

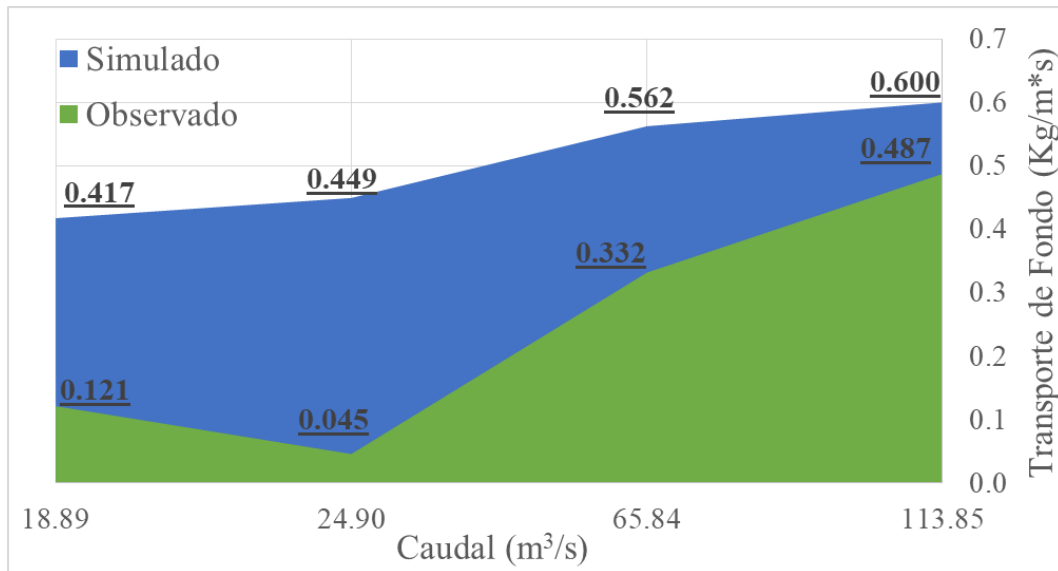


FIGURA 3. 7. TRANSPORTE DE CARGA DE FONDO SIMULADO EN SSIIM Y OBSERVADO CON ADCP EN EL FLUJO DEL RÍO TERCERO AGUAS ABAJO DEL PUENTE JUAN BAUTISTA ALBERDI.

Como puede observarse en la Figura 3. 7, el valor del transporte de carga de fondo promedio simulado en SSIIM se sobreestima si es contrastado con los datos de transporte de fondo estimados en base a mediciones con ADCP en el tramo del río Tercero analizado. En este punto es importante destacar, que la estimación del transporte de carga de fondo es una tarea con alto grado de incertidumbre debido a la naturaleza estocástica del movimiento del sedimento y a que el fenómeno se produce en forma de ondas de fondo, dunas y barras con una distribución variable en el tiempo y el espacio que genera aún más incertidumbre. También, es conocido que las diferentes expresiones para estimar el transporte de sedimentos de carga fondo en flujos con superficie libre tienen diferencias de varios ordenes de magnitud si son evaluadas con datos similares; inclusive, la variabilidad de la granulometría del material de lecho modifica en gran medida el valor estimado de transporte de carga de fondo tomando en cuenta una misma metodología de cálculo.

Por lo expuesto en el párrafo previo, se puede plantear que los resultados de transporte de carga de fondo del río Tercero, presentados en la Figura 3. 7, son una buena aproximación y con el mismo orden de magnitud que supone una validación satisfactoria de la metodología adoptada para su estimación. Las estimaciones del transporte de sedimentos se basaron en datos de la batimetría de fondo medida con ADCP (seguimiento de dunas) y en la simulación de la hidrodinámica tridimensional acoplada con procesos de transporte de sedimentos con el modelo SSIIM, donde se tomó en cuenta la formulación presentada por van Rijn (1984^a, 1984^b y 1984^c).

A continuación en la Figura 3. 8, Figura 3. 9 y Figura 3. 10 se presentan señales proyectadas de la morfología fluvial medidas con ADCP y simuladas en el dominio del río Tercero en dirección de la corriente aguas abajo del puente Juan Bautista Alberdi, para los eventos de 113.85 m³/s, 24.90 m³/s y 18.89 m³/s; respectivamente:

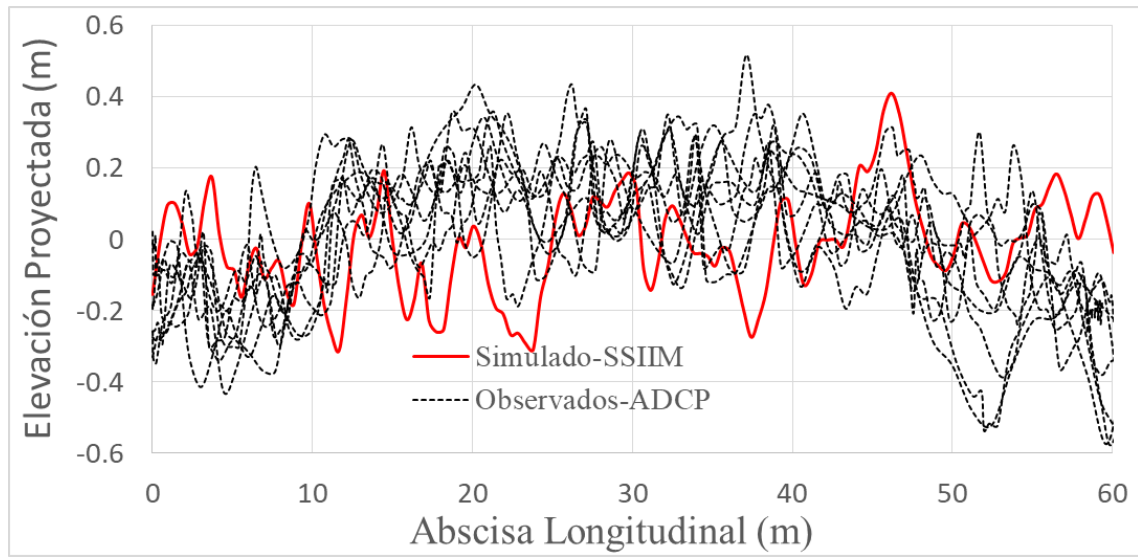


FIGURA 3. 8. SEÑALES DE LA MORFOLOGÍA FLUVIAL PROYECTADA DE LA SECCIÓN LONGITUDINAL MEDIA DEL RÍO TERCERO, $Q=113.85 \text{ m}^3/\text{s}$.

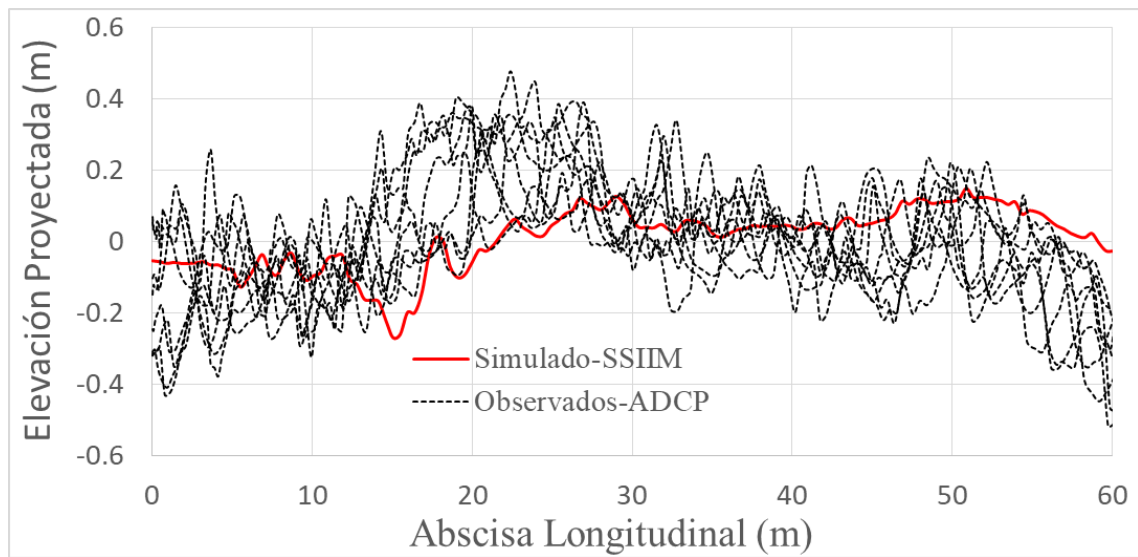


FIGURA 3. 9. SEÑALES DE LA MORFOLOGÍA FLUVIAL PROYECTADA DE LA SECCIÓN LONGITUDINAL MEDIA DEL RÍO TERCERO, $Q= 24.90 \text{ m}^3/\text{s}$.

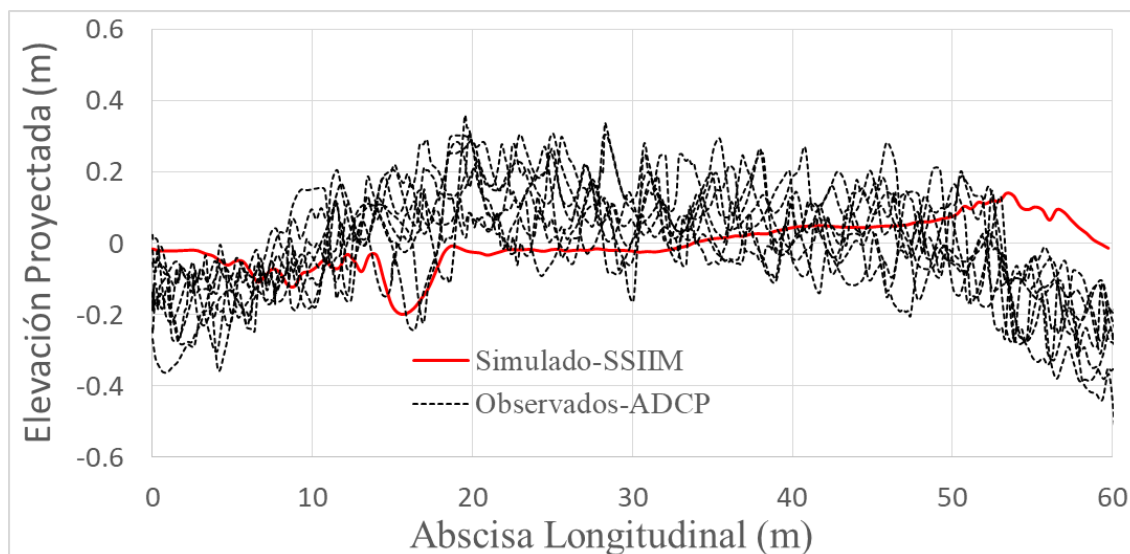


FIGURA 3. 10. SEÑALES DE LA MORFOLOGÍA FLUVIAL PROYECTADA DE LA SECCIÓN LONGITUDINAL MEDIA DEL RÍO TERCERO, $Q=18.89 \text{ m}^3/\text{s}$.

En base a la tendencia de las señales del lecho fluvial presentadas en las Figura 3. 8, Figura 3. 9 y Figura 3. 10; se observa que las señales de la elevación proyectada tendrían el mismo orden de magnitud para los eventos considerados. Las señales observadas de la morfología fluvial del río Tercero aguas abajo del puente Juan Bautista Alberdi, se basaron en los datos presentados en las Figura 2. 6, Figura 2. 7 y Figura 2. 8 de las mediciones de las formas de fondo realizadas con ADCP en la sección media a lo largo de la corriente del río Tercero; y en la morfología fluvial resultante de la simulación realizada en el modelo SSIIM, que corresponde a la sección media de la corriente, que inicia aproximadamente en la sección de control transversal y se extienden por 60 metros en dirección longitudinal del río. A continuación en la Tabla 3. 4 se presenta un resumen de la estadística descriptiva de las señales de la morfología fluvial simuladas y observadas presentadas en las Figura 3. 8, Figura 3. 9 y Figura 3. 10:

TABLA 3. 4. ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA DE LAS SEÑALES DE LA MORFOLOGÍA FLUVIAL DEL RÍO TERCERO EN EL TRAMO AGUAS ABAJO DEL PUENTE JUAN BAUTISTA ALBERDI.

Señal	SSIIM	ADCP	SSIIM	ADCP	SSIIM	ADCP
	$113.85 \text{ m}^3/\text{s}$	$113.85 \text{ m}^3/\text{s}$	$24.90 \text{ m}^3/\text{s}$	$24.90 \text{ m}^3/\text{s}$	$18.89 \text{ m}^3/\text{s}$	$18.89 \text{ m}^3/\text{s}$
Elv. Máx. (m)	0.411	0.392	0.148	0.383	0.141	0.279
Elv. Mín. (m)	-0.311	-0.476	-0.270	-0.365	-0.196	-0.344
Desv. Est. (m)	0.140	0.188	0.088	0.159	0.067	0.139
Varianza (m^2)	0.020	0.036	0.008	0.027	0.005	0.020
Δ (m)	0.312	0.241	0.151	0.211	0.098	0.179
λ (m)	5.800	5.513	5.000	4.263	2.600	4.013

Los índices de la estadística descriptiva de las señales de la morfología en el dominio del río Tercero estudiado, para los eventos de $113.85 \text{ m}^3/\text{s}$, $24.90 \text{ m}^3/\text{s}$ y $18.89 \text{ m}^3/\text{s}$, presentan resultados satisfactorios y en el mismo orden de aproximación para las variables de formas de fondo medidas y simuladas. Se destaca que para el evento de $113.85 \text{ m}^3/\text{s}$ los índices estadísticos de los resultados reflejan un excelente comportamiento en magnitud y forma de

las señales unidimensionales de la morfología; mientras que de los índices estadísticos que representan los resultados de las formas de fondo para los eventos de $24.9 \text{ m}^3/\text{s}$ y $18.89 \text{ m}^3/\text{s}$, reflejan que la morfología del lecho simulada en el modelo SSIIM para eventos de bajo caudal tiende a subestimar la magnitud de la geometría de formas de fondo en contraste con los datos observados con el instrumento ADCP. Esta subestimación en la magnitud de la geometría de las formas de fondo para los eventos simulados de bajo caudal, podría ser explicada por la magnitud de la geometría de las formas de fondo medidas que persiste en el tiempo y que pudieron originarse en eventos precedentes de mayor caudal.

Se han contrastado las variables de flujo y de transporte de sedimentos observadas y simuladas en el dominio del río Tercero aguas abajo del puente Juan Bautista Alberdi de la ciudad de Villa María, resultando en una validación satisfactoria de las variables calculadas con el modelo SSIIM respecto a los datos disponibles de mediciones realizadas con ADCP en prototipo. A continuación se presentarán resultados de la simulación realizada con SSIIM, seguido de un análisis de sensibilidad de las variables destacadas en la simulación de la hidrodinámica tridimensional con procesos de transporte de sedimentos en el dominio considerado.

3.5. Resultados de la Simulación Hidrodinámica Tridimensional con Transporte de Sedimentos en el Tramo Medio del Río Tercero

Después de la validación satisfactoria de la simulación hidrodinámica tridimensional con transporte de sedimentos en el tramo del río Tercero aguas abajo del puente Juan Bautista Alberdi de la ciudad de Villa María en la provincia de Córdoba, presentada en la sección previa; se realizará un análisis de los resultados obtenidos con el modelo numérico SSIIM. Se presentarán los resultados correspondientes a los eventos con caudales de $113.85 \text{ m}^3/\text{s}$, $65.84 \text{ m}^3/\text{s}$, $24.90 \text{ m}^3/\text{s}$ y $18.89 \text{ m}^3/\text{s}$; que representan las características hidráulicas y sedimentológicas de la serie de los 18 eventos simulados.

A continuación en la Figura 3. 11 se presenta un esquema de áreas coloreadas que representan la velocidad media simulada en la superficie del flujo del tramo del río Tercero para los caudales de $113.85 \text{ m}^3/\text{s}$, $65.84 \text{ m}^3/\text{s}$, $24.90 \text{ m}^3/\text{s}$ y $18.89 \text{ m}^3/\text{s}$:

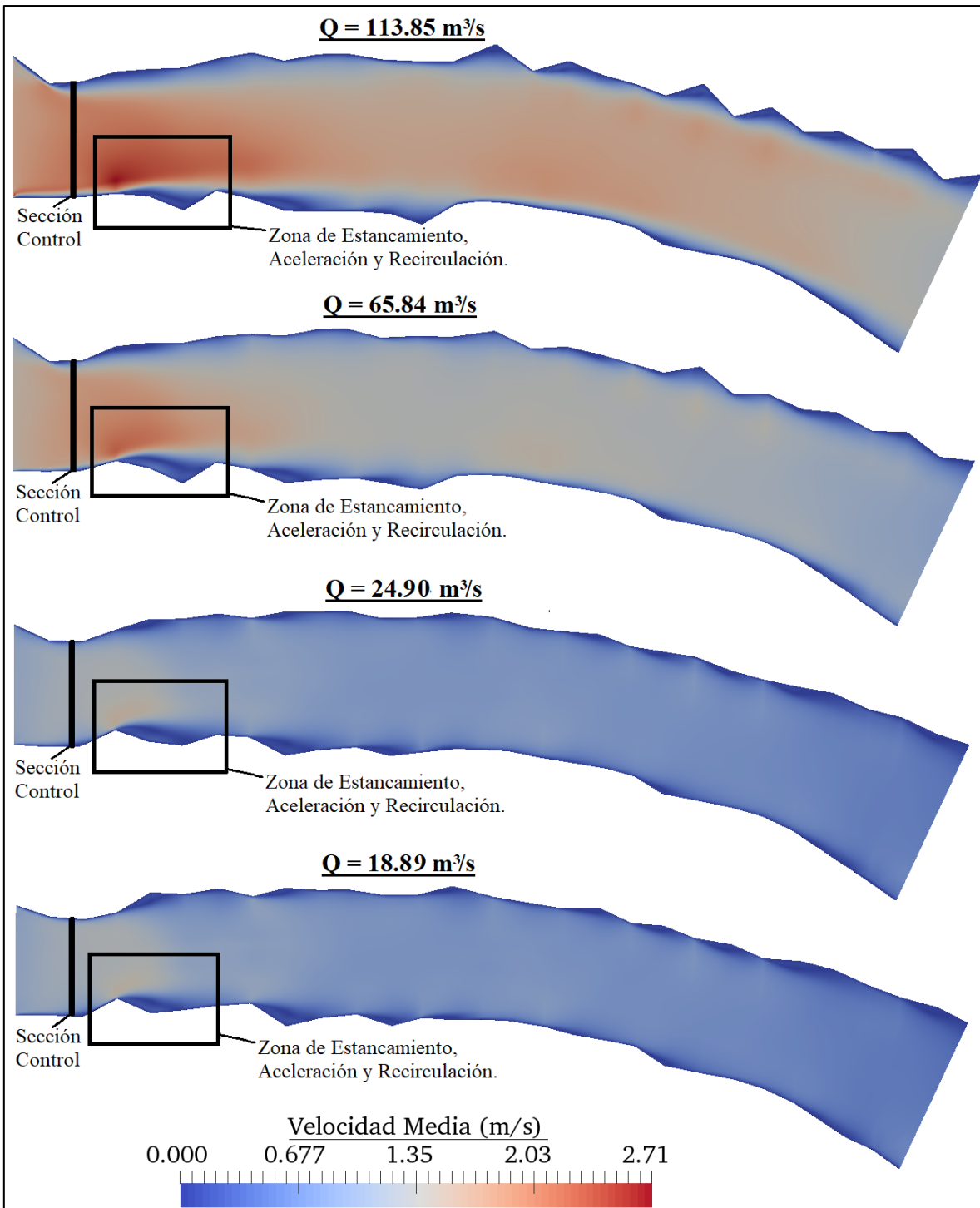


FIGURA 3. 11. ESQUEMA DE ÁREAS COLOREADAS QUE REPRESENTAN LA VELOCIDAD MEDIA SUPERFICIAL DEL FLUJO DEL RÍO TERCERO AGUAS ABAJO DEL PUENTE JUAN BAUTISTA ALBERDI.

En la Figura 3. 11 se observan zonas de estancamiento y aceleración en el flujo ubicadas en las cercanías de las márgenes de río Tercero simulado y estos fenómenos, son atribuidos principalmente a la interacción del flujo turbulento con las fronteras sólidas y a las irregularidades en la batimetría del cauce. En la Figura 3. 11 se ha encuadrado una de las

zonas representativas con fenómenos de estancamiento, aceleración y recirculación del flujo; que será analizada a continuación en la Figura 3. 12 mediante la magnitud de los vectores de velocidad media superficial para los caudales de $113.85 \text{ m}^3/\text{s}$, $65.84 \text{ m}^3/\text{s}$, $24.90 \text{ m}^3/\text{s}$ y $18.89 \text{ m}^3/\text{s}$:

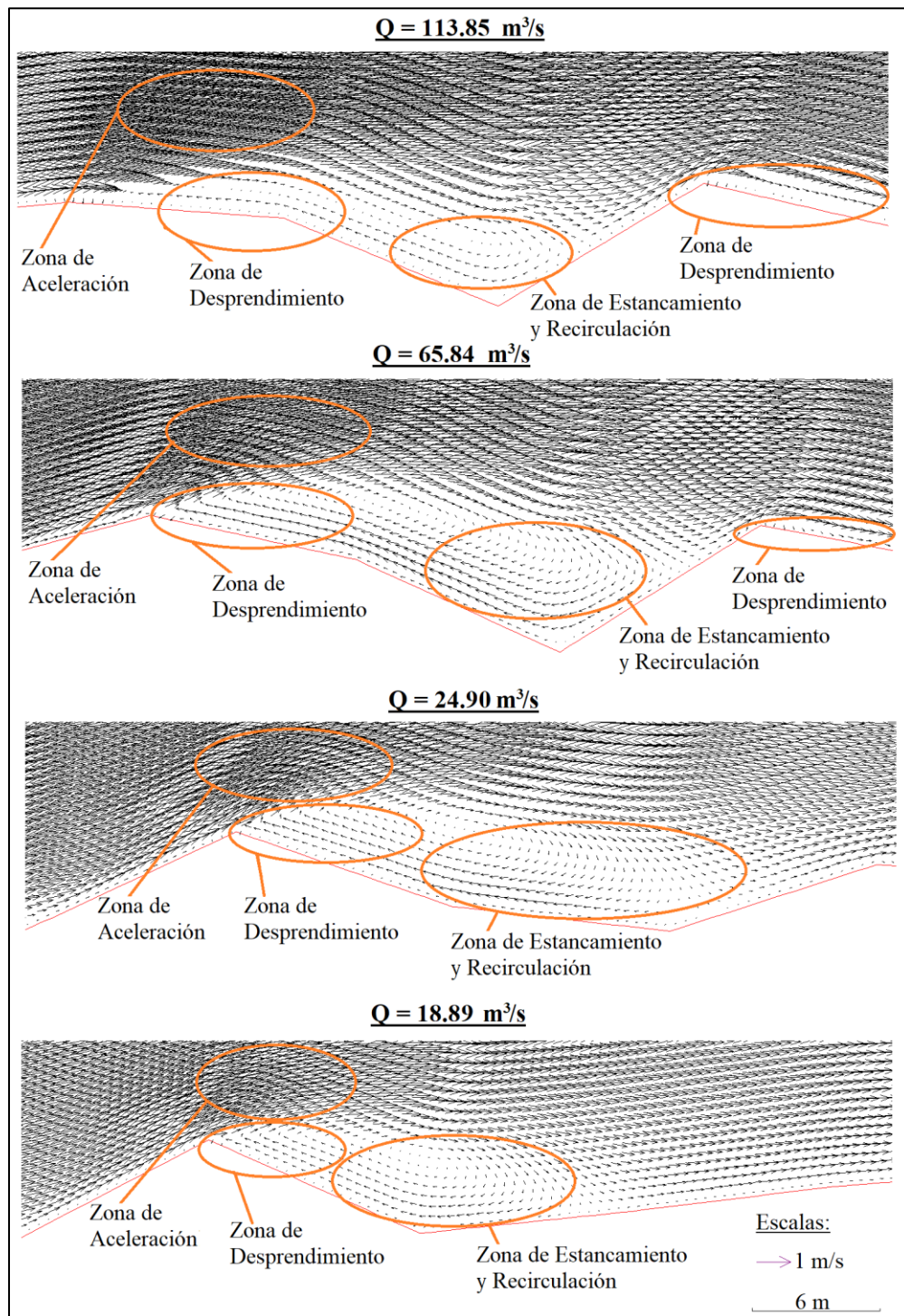


FIGURA 3. 12. VECTORES QUE REPRESENTAN LA VELOCIDAD MEDIA SUPERFICIAL DEL FLUJO DEL RÍO TERCERO AGUAS ABAJO DEL PUENTE JUAN BAUTISTA ALBERDI.

En la Figura 3. 12, mediante el análisis de la magnitud de vectores que representan la velocidad media superficial del flujo, se observan las zonas de estancamiento, recirculación, aceleración y desprendimiento del flujo de los sectores encuadrados en la Figura 3. 11 cerca de las márgenes del flujo del río Tercero. Es interesante prestar atención a los ligeros cambios en la batimetría de las márgenes de río según el evento analizado; así como, a la variabilidad en el comportamiento hidrodinámico en función de la intensidad del flujo de entrada. Como puede observarse en la Figura 3. 11, estos comportamientos de estancamiento, recirculación, aceleración y desprendimiento del flujo ocurren cerca de las márgenes del río a lo largo del tramo simulado y presentan características similares pero con mayor intensidad para eventos con mayor caudal.

Es importante realizar un análisis de la correcta representación de los procesos turbulentos en el flujo hidrodinámico, para lo cual una representación de la variable $y^+ = yu_*/\nu_t$ es una guía para ver si las hipótesis de ley de pared logarítmica están siendo bien empleada o no; donde para obtener y^+ : y es el tamaño de la discretización vertical cerca del fondo, u_* la velocidad de corte y ν_t la viscosidad cinemática turbulenta del fluido. A continuación en la Figura 3. 13 se presenta un esquema de áreas coloreadas que representa la variable y^+ en el fondo del flujo para los eventos con caudal de 113.85 m³/s, 65.84 m³/s, 24.90 m³/s y 18.89 m³/s:



FIGURA 3. 13. ESQUEMA DE ÁREAS COLOREADAS QUE REPRESENTAN LA VARIABLE y^+ DE LA SIMULACIÓN DEL FLUJO DEL RÍO TERCERO AGUAS ABAJO DEL PUENTE JUAN BAUTISTA ALBERDI.

Como puede observarse en la Figura 3. 13, se presenta en la mayoría del tramo valores de $30 < y^+ < 100$ para los eventos simulados, estos resultados están dentro del orden de magnitud de y^+ cuando se considera la ley de pared logarítmica para la solución de un flujo con superficie libre (Nezu y Nakagawa, 1993). También para observar la correcta distribución en sentido vertical de la viscosidad turbulenta, a continuación en la Figura 3. 14

se presentan perfiles del valor promedio de la viscosidad turbulenta adimensional en cada plano de discretización para los eventos simulados de 113.85 m³/s, 65.84 m³/s, 24.90 m³/s y 18.89 m³/s:

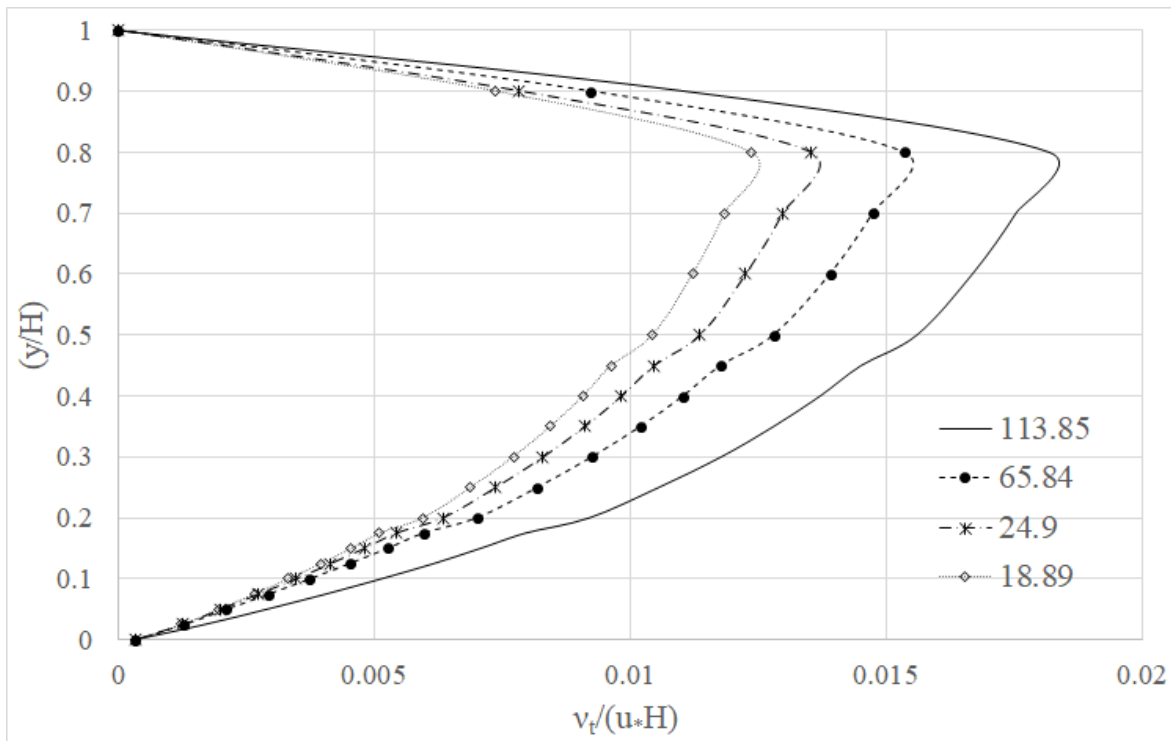


FIGURA 3. 14. PERFILES DE LA VISCOSIDAD CINEMÁTICA TURBULENTE ADIMENSIONAL PROMEDIADA EN DISTINTOS PLANOS DE DISCRETIZACIÓN.

Como puede observarse en la Figura 3. 14, la distribución en la vertical del promedio de la viscosidad turbulenta adimensional para todos los eventos es similar y concuerda con la suposición de un plano de tapa rígida en la superficie libre con valores de viscosidad turbulenta en el mismo orden que los encontrados en estudios previos sobre turbulencia en flujos con superficie libre (Nezu y Nakagawa, 1993). Por los resultados presentados en las Figura 3. 13 y Figura 3. 14, se concluye que los procesos turbulentos han sido simulados satisfactoriamente de acuerdo con las suposiciones impuestas para simplificar el problema.

A continuación en la Figura 3. 15 se representa, mediante esquemas de áreas coloreadas, la velocidad media del flujo en la sección de control ubicada a aproximadamente 10 metros aguas abajo del puente Juan Bautista Alberdi en el flujo del río Tercero para eventos de 113.85 m³/s, 65.84 m³/s, 24.90 m³/s y 18.89 m³/s:

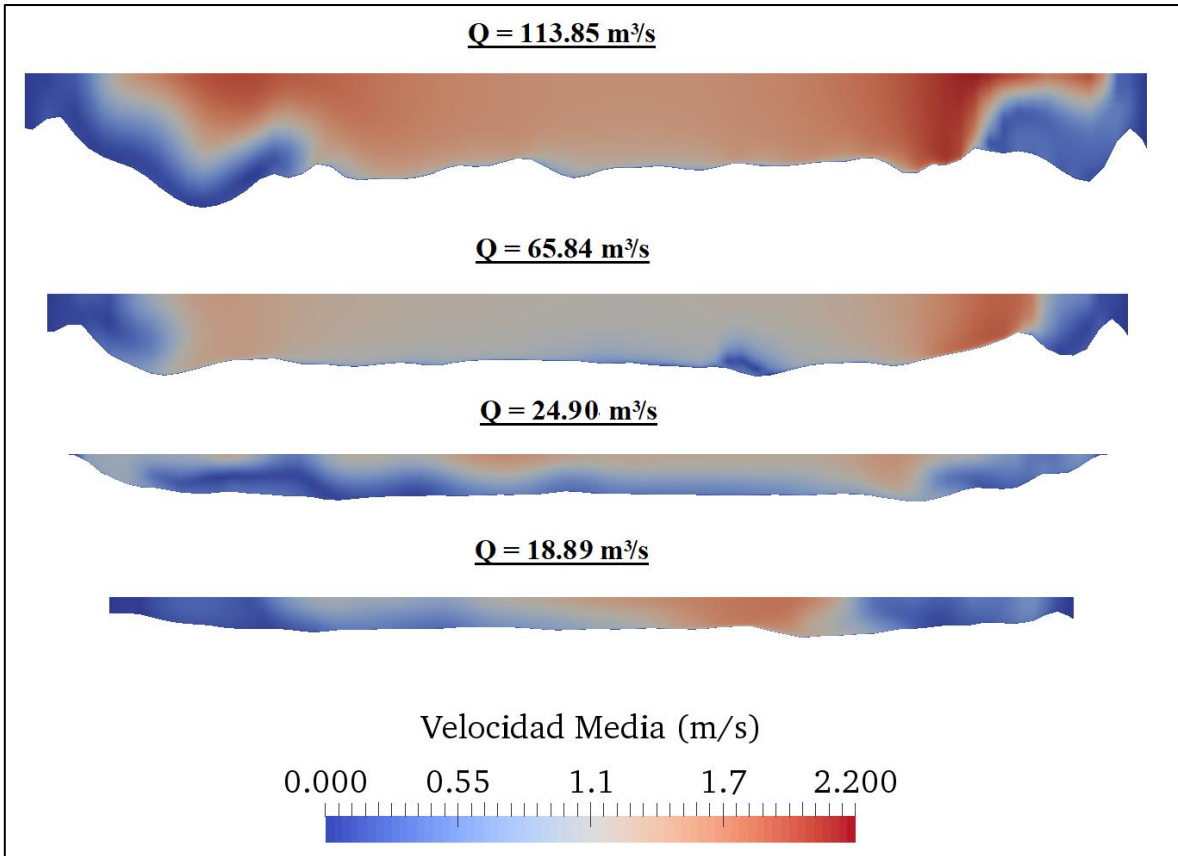


FIGURA 3. 15. ESQUEMA DE ÁREAS COLOREADAS QUE REPRESENTAN LA VELOCIDAD MEDIA EN LA SECCIÓN DE CONTROL DEL FLUJO DEL RÍO TERCERO AGUAS ABAJO DEL PUENTE JUAN BAUTISTA ALBERDI.

En la Figura 3. 15, en la que se presentan esquemas de áreas coloreadas con la magnitud de la velocidad media en la sección de control, puede observarse que en las zonas cercanas a los márgenes las velocidades son de magnitud inferior y se presentan zonas de aceleración ubicadas aproximadamente en el primer cuarto de la sección. También en la Figura 3. 15 se observa el cambio en la sección de flujo, teniendo mayor perímetro mojado los eventos con mayor caudal; además se aprecia que los cambios en la batimetría de fondo varían según el régimen de flujo. A continuación en la Figura 3. 16 se presenta un esquema de áreas coloreadas de un corte longitudinal del río de 20 metros en el medio del cauce; que representan las velocidades medias del flujo del río Tercero simuladas en SSIIM, el corte inicia a 10 metros del puente Juan Bautista Alberdi:

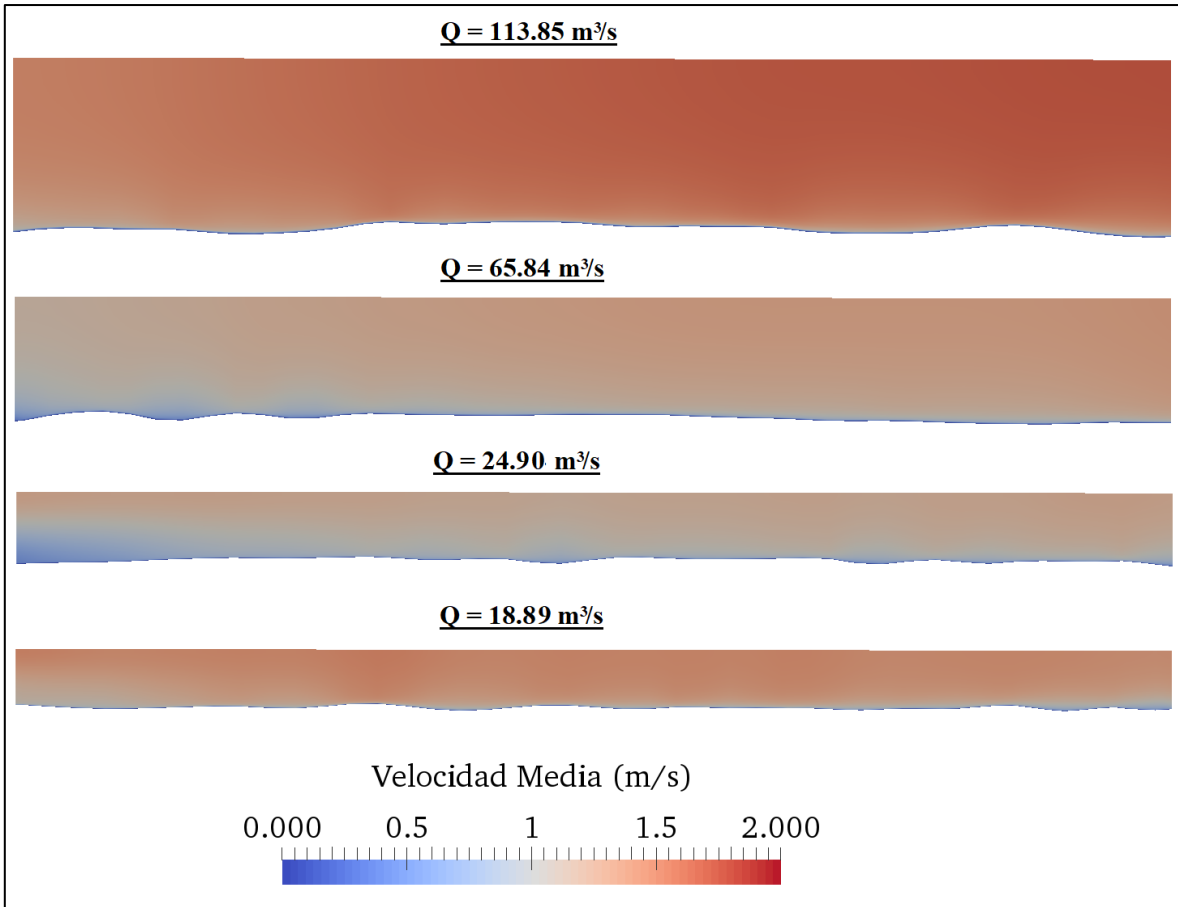


FIGURA 3. 16. ESQUEMA DE ÁREAS COLOREADAS QUE REPRESENTAN LA VELOCIDAD MEDIA EN UN CORTE LONGITUDINAL DEL RÍO TERCERO AGUAS ABAJO DEL PUENTE JUAN BAUTISTA ALBERDI.

En los esquemas de áreas coloreadas de la Figura 3. 16, que representan la velocidad media de un corte longitudinal del río Tercero analizado, se aprecian los cambios en la batimetría de fondo que varían según el régimen de flujo; también se destaca la variabilidad de la velocidad media según la ubicación, notándose mayores magnitudes en las crestas (o zonas elevadas de lecho fluvial) respecto a las zonas de valle donde se presentan bajas velocidades del flujo cercano al fondo del río. También en la Figura 3. 16, se observa que las velocidades medias calculadas para el caudal de 18.89 m³/s son ligeramente de mayor magnitud que las velocidades para el caudal de 24.90 m³/s en el mismo tramo, esto puede ser explicado por la variabilidad de la morfología fluvial que incide en la resistencia al flujo y que varía para cada evento simulado. Por lo expuesto, es importante analizar la variabilidad del lecho fluvial simulado en el tramo del río Tercero, por lo que a continuación en las Figura 3. 17, Figura 3. 18, Figura 3. 19 y Figura 3. 20 se presenta la morfología del tramo del río Tercero en forma de superficies sólidas para los eventos de 113.85 m³/s, 65.84 m³/s, 24.90 m³/s y 18.89 m³/s, respectivamente:

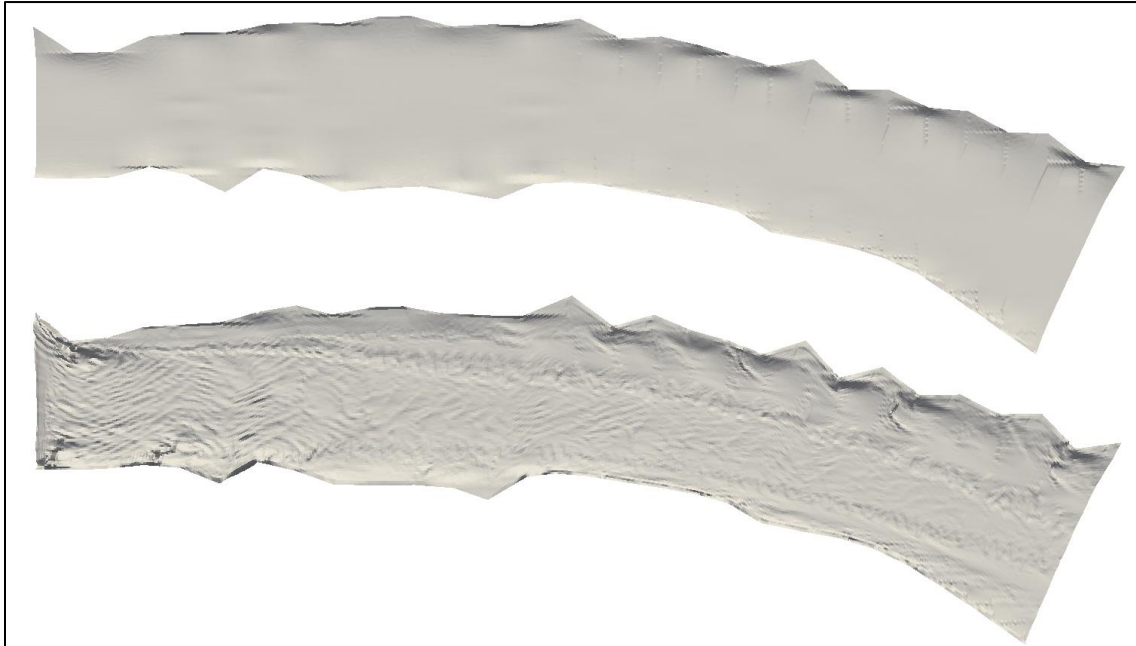


FIGURA 3. 17. SUPERFICIES SÓLIDAS QUE REPRESENTAN LA MORFOLOGÍA DEL TRAMO DEL RÍO TERCERO AGUAS ABAJO DEL PUENTE JUAN BAUTISTA ALBERDI PARA UN EVENTO DE $Q = 113.85 \text{ m}^3/\text{s}$.

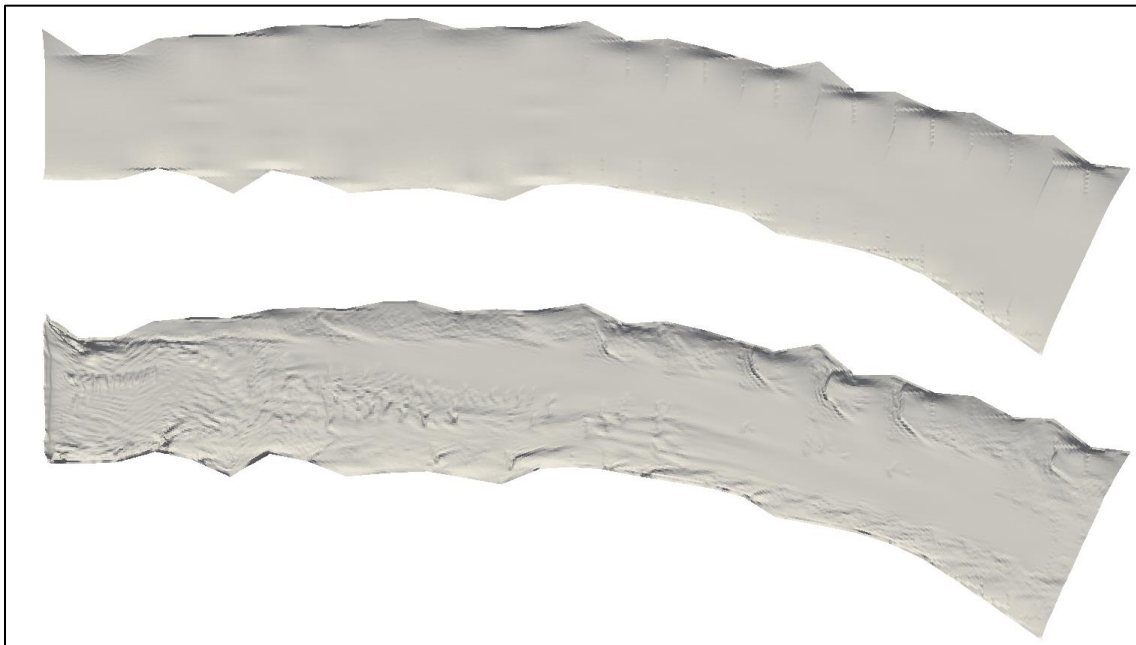


FIGURA 3. 18. SUPERFICIES SÓLIDAS QUE REPRESENTAN LA MORFOLOGÍA DEL TRAMO DEL RÍO TERCERO AGUAS ABAJO DEL PUENTE JUAN BAUTISTA ALBERDI PARA UN EVENTO DE $Q = 65.84 \text{ m}^3/\text{s}$.

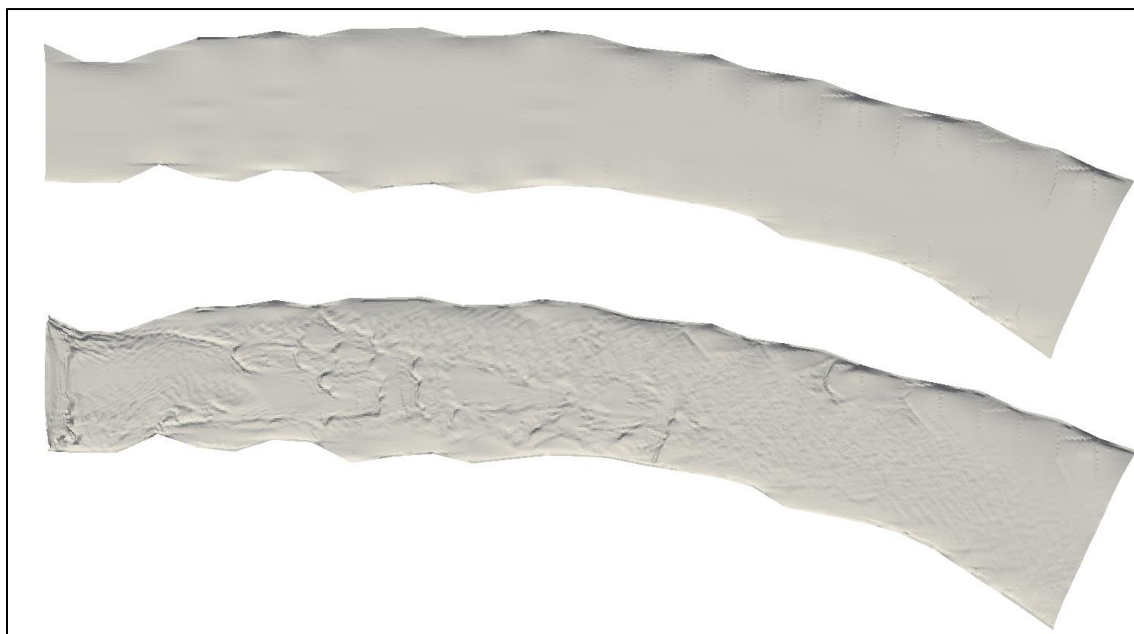


FIGURA 3. 19. SUPERFICIES SÓLIDAS QUE REPRESENTAN LA MORFOLOGÍA DEL TRAMO DEL RÍO TERCERO AGUAS ABAJO DEL PUENTE JUAN BAUTISTA ALBERDI PARA UN EVENTO DE $Q = 24.90 \text{ m}^3/\text{s}$.

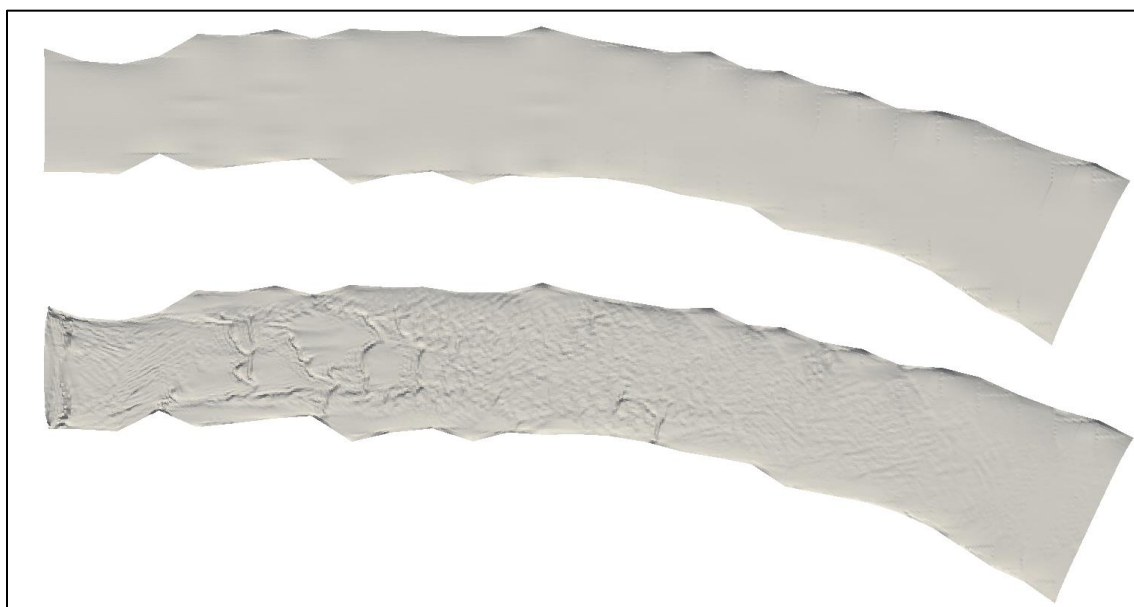


FIGURA 3. 20. SUPERFICIES SÓLIDAS QUE REPRESENTAN LA MORFOLOGÍA DEL TRAMO DEL RÍO TERCERO AGUAS ABAJO DEL PUENTE JUAN BAUTISTA ALBERDI PARA UN EVENTO DE $Q = 18.89 \text{ m}^3/\text{s}$.

En las Figura 3. 17, Figura 3. 18, Figura 3. 19 y Figura 3. 20; se presentó la morfología base y simulada del tramo del río Tercero aguas abajo del puente Juan Bautista Alberdi. La estimación de la morfología para los eventos simulados con el modelo SSIIM, depende principalmente de las características de las partículas, de la estimación del transporte sedimentos, de las variables modeladas de la hidrodinámica fluvial, del régimen de flujo en las celdas cercanas al fondo y del tiempo de simulación; que fue de 20000 segundos con un paso de 20 segundos y 100 iteraciones para cada paso de tiempo. En forma transitoria las

formas de fondo se desarrollan según la intensidad del flujo hasta alcanzar un estado de régimen que será justificado en la sección de análisis de sensibilidad de las variables del flujo.

A continuación en las Figura 3. 21, Figura 3. 22, Figura 3. 23 y Figura 3. 24 se presentan cortes longitudinales de la morfología fluvial en el medio de la sección a lo largo del tramo del río Tercero simulado, para los eventos de $113.85 \text{ m}^3/\text{s}$, $65.84 \text{ m}^3/\text{s}$, $24.90 \text{ m}^3/\text{s}$ y $18.89 \text{ m}^3/\text{s}$, respectivamente:

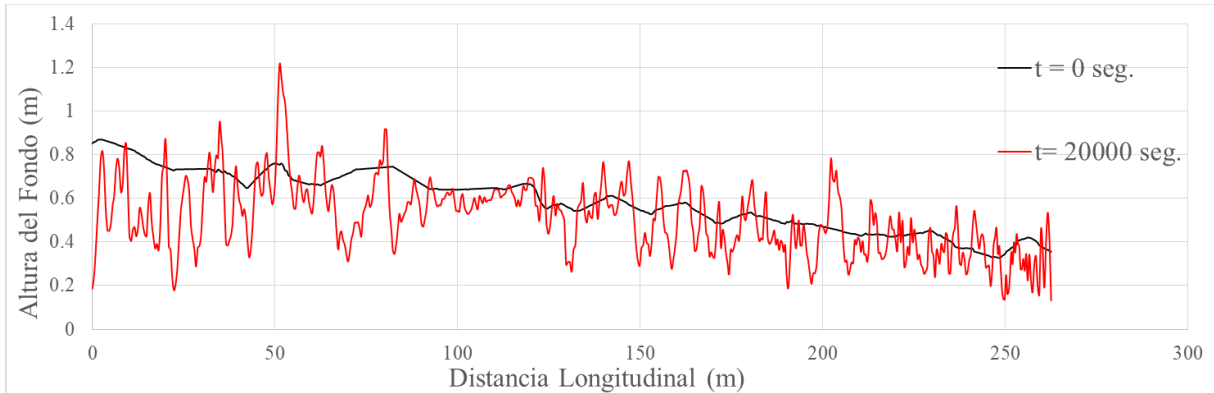


FIGURA 3. 21. PROYECCIÓN DE UN CORTE LONGITUDINAL DE LA MORFOLOGÍA FLUVIAL DEL RÍO TERCERO AGUAS ABAJO DEL PUENTE JUAN BAUTISTA ALBERDI EN MEDIO DEL CAUCE, $Q= 113.85 \text{ m}^3/\text{s}$.

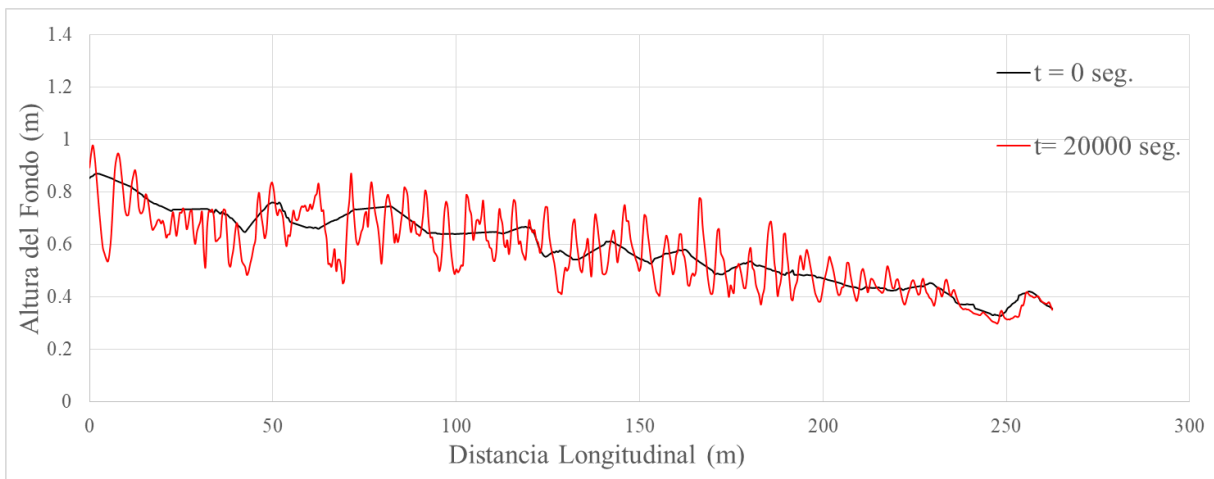


FIGURA 3. 22. PROYECCIÓN DE UN CORTE LONGITUDINAL DE LA MORFOLOGÍA FLUVIAL DEL RÍO TERCERO AGUAS ABAJO DEL PUENTE JUAN BAUTISTA ALBERDI EN MEDIO DEL CAUCE, $Q= 65.84 \text{ m}^3/\text{s}$.

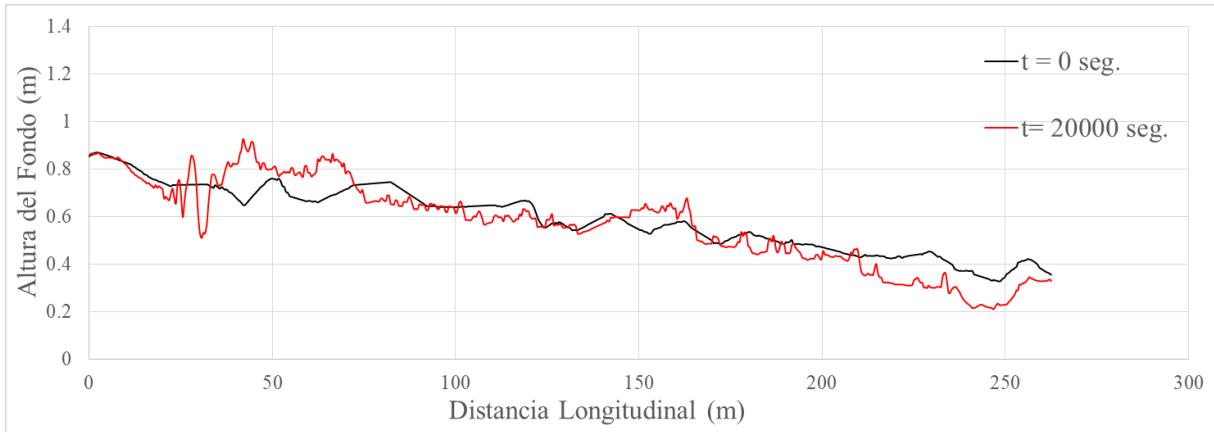


FIGURA 3. 23. PROYECCIÓN DE UN CORTE LONGITUDINAL DE LA MORFOLOGÍA FLUVIAL DEL RÍO TERCERO AGUAS ABAJO DEL PUENTE JUAN BAUTISTA ALBERDI EN MEDIO DEL CAUCE, $Q=24.90 \text{ m}^3/\text{s}$.

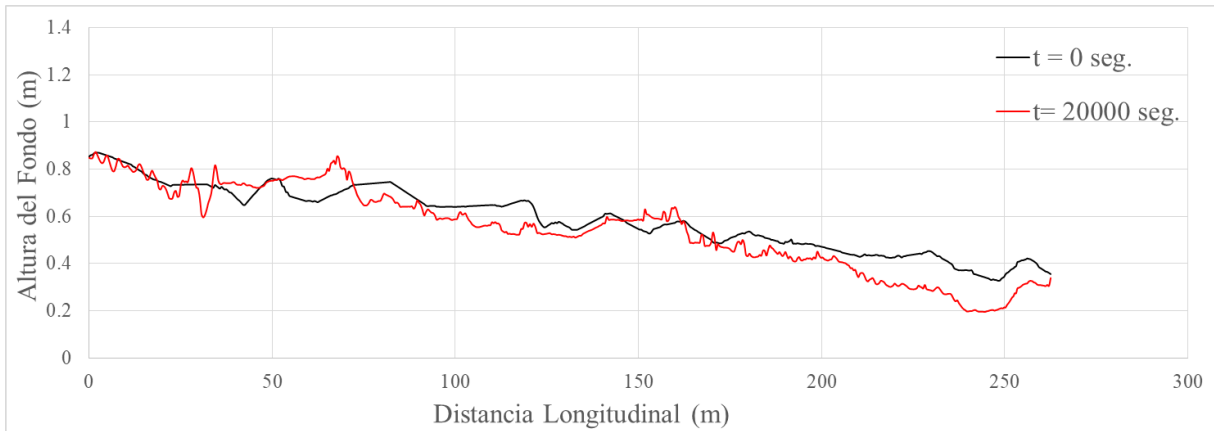


FIGURA 3. 24. PROYECCIÓN DE UN CORTE LONGITUDINAL DE LA MORFOLOGÍA FLUVIAL DEL RÍO TERCERO AGUAS ABAJO DEL PUENTE JUAN BAUTISTA ALBERDI EN MEDIO DEL CAUCE, $Q=18.89 \text{ m}^3/\text{s}$.

Como se puede observar en las Figura 3. 21, Figura 3. 22, Figura 3. 23 y Figura 3. 24; que representa un corte longitudinal de la morfología fluvial en el medio del tramo del río Tercero simulado, la variabilidad en las señales de la altura del fondo del cauce para los eventos de $24.90 \text{ m}^3/\text{s}$ y $18.89 \text{ m}^3/\text{s}$ evidencian características muy similares, para los eventos de $113.85 \text{ m}^3/\text{s}$ y $65.84 \text{ m}^3/\text{s}$ se observa mayor variabilidad de las formas de fondo con dimensiones de mayor magnitud en función del evento con mayor caudal. En este punto es importante justificar que el incremento en la variabilidad de las formas fondo se debe a los procesos físicos simulados y no a un ruido ocasionado por errores numéricos, para lo cual se plantea un análisis mediante auto correlación de las señales de formas de fondo presentadas en las Figura 3. 21, Figura 3. 22, Figura 3. 23 y Figura 3. 24; resultados que se presentan a continuación en la Figura 3. 25:

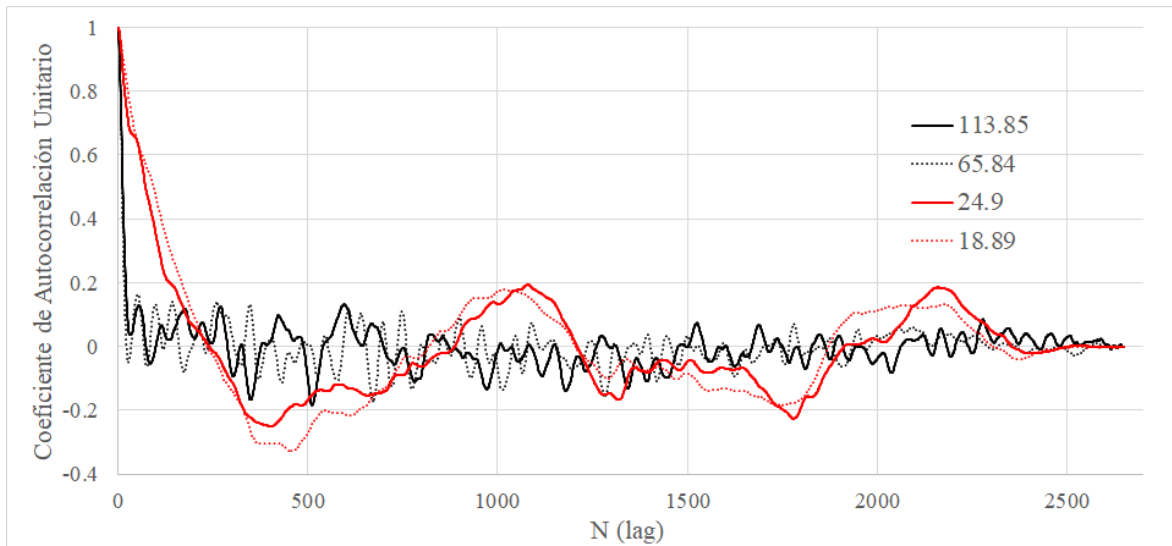


FIGURA 3. 25. COEFICIENTE DE AUTO CORRELACIÓN DE LAS SEÑALES DE MORFOLOGÍA FLUVIAL SIMULADAS EN EL RÍO TERCERO PARA LOS EVENTOS DE 113.85 m³/s, 65.84 m³/s, 24.90 m³/s Y 18.89 m³/s.

La forma de la distribución del coeficiente de auto correlación unitario de las señales simuladas de morfología fluvial presentado en la Figura 3. 25, es similar al que se puede obtener en una señal sinodal con procesos aleatorios. Como se planteó previamente, la geometría de las formas de fondo encontradas en el flujo del río Tercero aguas abajo del puente Juan Bautista Alberdi corresponde a ondas tipo dunas; que junto a los procesos estocásticos propios de la turbulencia del flujo darían una distribución de las formas de fondo similar a la de ondas sinodales con procesos aleatorios. Se observa que cuando crece el caudal, el ruido en la geometría de las formas de fondo crece, esto se atribuye a los procesos estocásticos propios de la turbulencia del flujo que son de mayor magnitud proporcionalmente a los números de Reynolds de mayor magnitud para eventos con mayor gasto. Por lo expuesto, se justifica que el incremento en el ruido de las señales de morfología fluvial, que se presenta en forma proporcional al caudal, se debe principalmente, a los procesos físicos de turbulencia que ocurren en el fondo del flujo simulado.

A continuación, se presentarán resultados de la carga de transporte de partículas modelados en el flujo del río Tercero; en la Figura 3. 26 se presenta un corte con la distribución de la carga de sedimentos en la sección de control para los eventos de 113.85 m³/s, 65.84 m³/s, 24.90 m³/s y 18.89 m³/s:

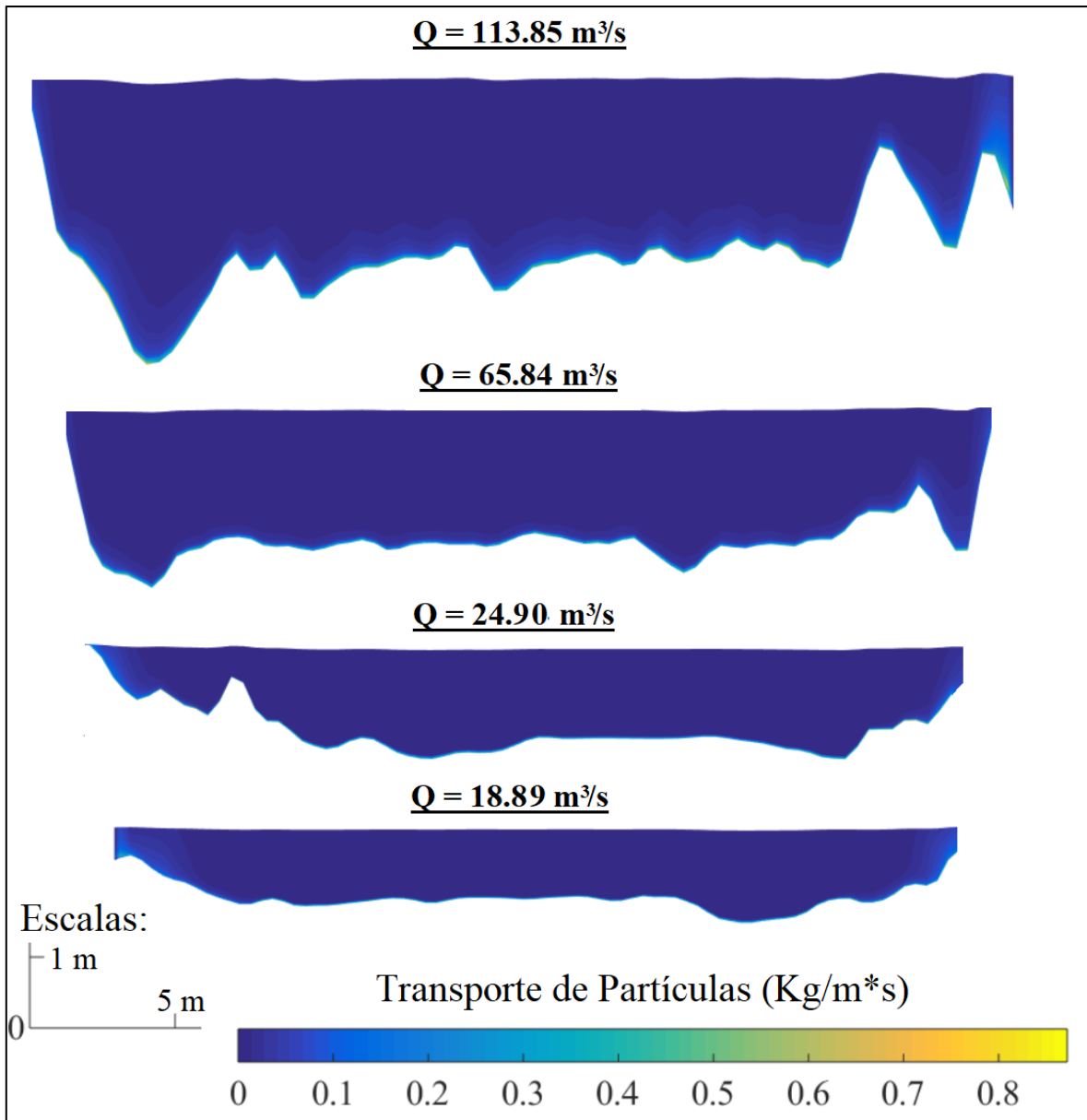


FIGURA 3. 26. DISTRIBUCIÓN DE LA CARGA DE SEDIMENTOS EN LA SECCIÓN DE CONTROL DEL RÍO TERCERO, $Q=113.85 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q=65.84 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q=24.9 \text{ m}^3/\text{s}$ Y $Q=18.89 \text{ m}^3/\text{s}$.

Como puede observarse en la Figura 3. 26, por la pequeña magnitud de la capa de transporte de fondo se dificulta ver con detalle la distribución de la carga de sedimentos en un corte de una sección determinada, por lo que es conveniente presentar esta información en perfiles de transporte de sedimentos. También se observa el estado diluido del transporte de partículas en suspensión, con valores inferiores a $0.1 \text{ Kg/m}^*\text{s}$. A continuación en las Figura 3. 27, Figura 3. 28, Figura 3. 29 y Figura 3. 30 se presentan los resultados del perfil del transporte de sedimentos en el medio de la sección de control en el tramo del río Tercero simulado en SSIIM para los eventos de $113.85 \text{ m}^3/\text{s}$, $65.84 \text{ m}^3/\text{s}$, $24.90 \text{ m}^3/\text{s}$ y $18.89 \text{ m}^3/\text{s}$, respectivamente:

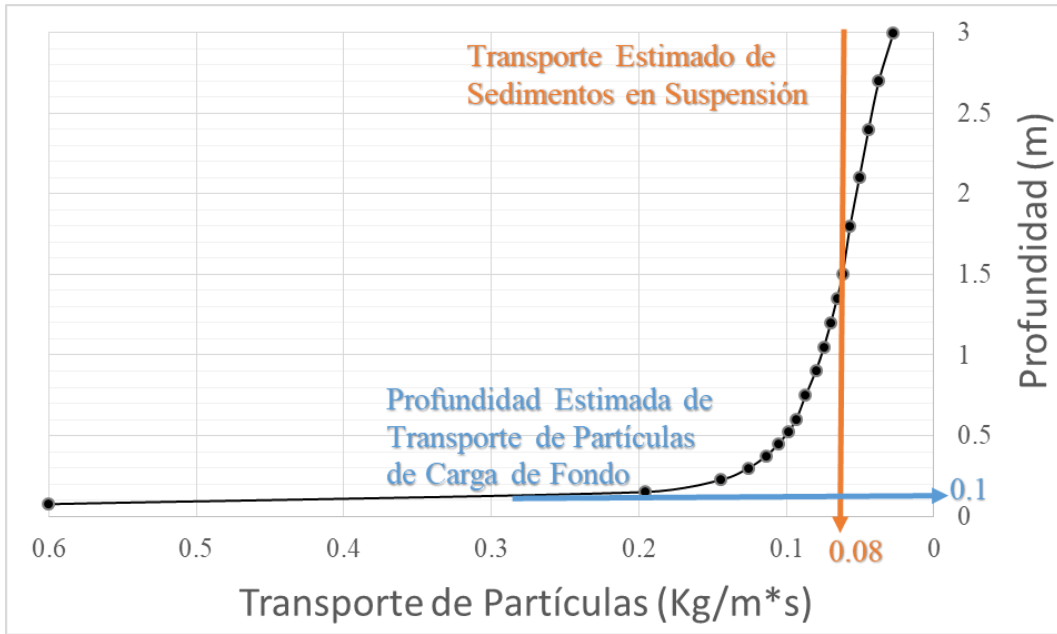


FIGURA 3. 27. RESULTADOS DEL PERFIL DE TRASPORTE DE SEDIMENTOS DEL RÍO TERCERO SIMULADO EN SSIIM, $Q=113.85 \text{ m}^3/\text{s}$.

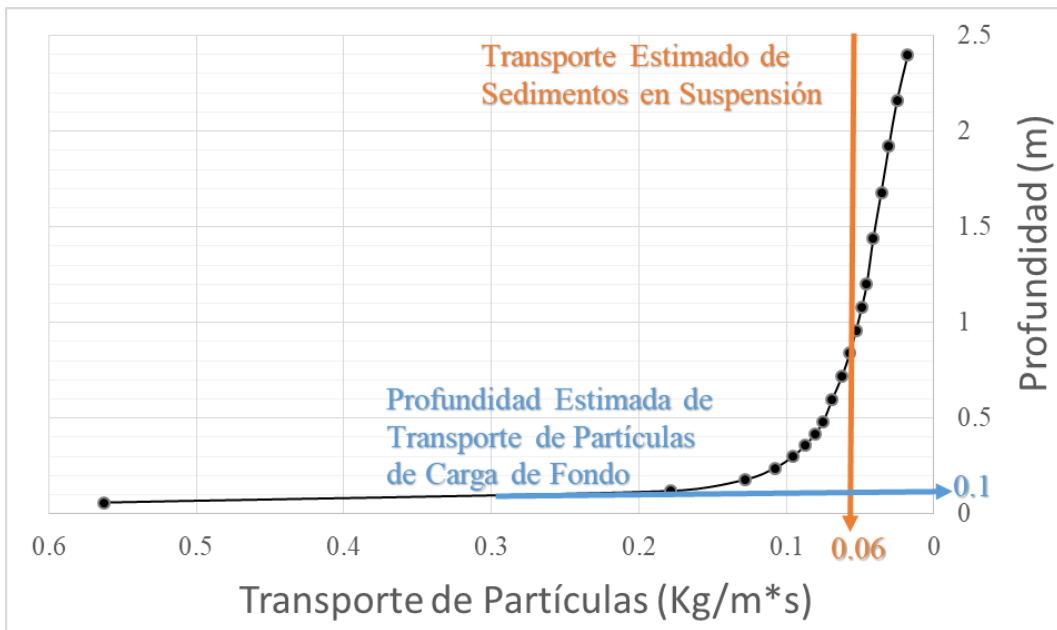


FIGURA 3. 28. RESULTADOS DEL PERFIL DE TRASPORTE DE SEDIMENTOS DEL RÍO TERCERO SIMULADO EN SSIIM, $Q=65.84 \text{ m}^3/\text{s}$.

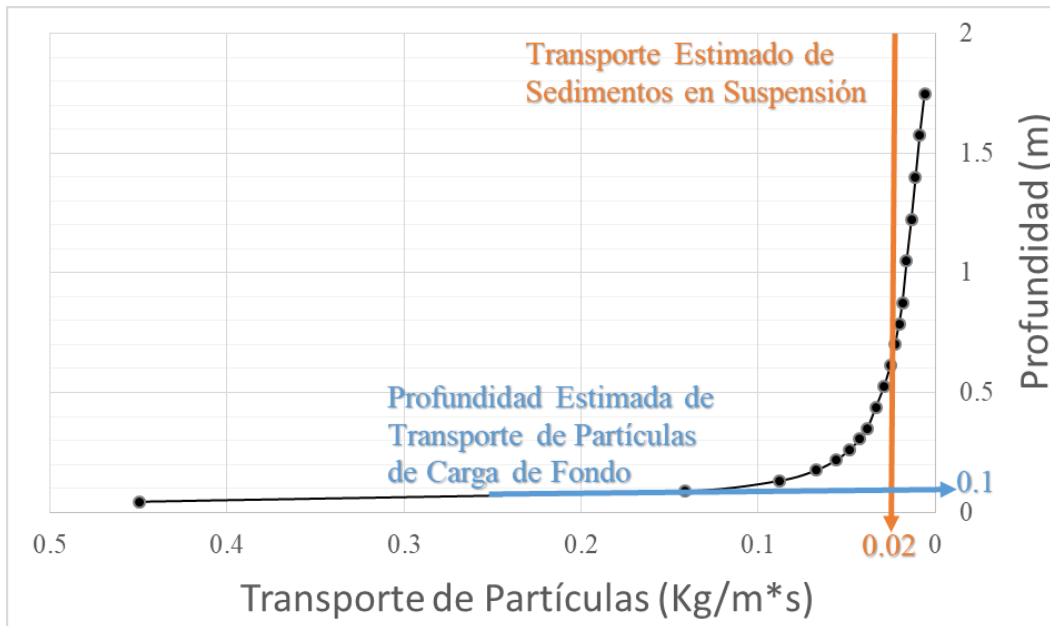


FIGURA 3. 29. RESULTADOS DEL PERFIL DE TRASPORTE DE SEDIMENTOS DEL RÍO TERCERO SIMULADO EN SSIIM, $Q=24.90 \text{ m}^3/\text{s}$.

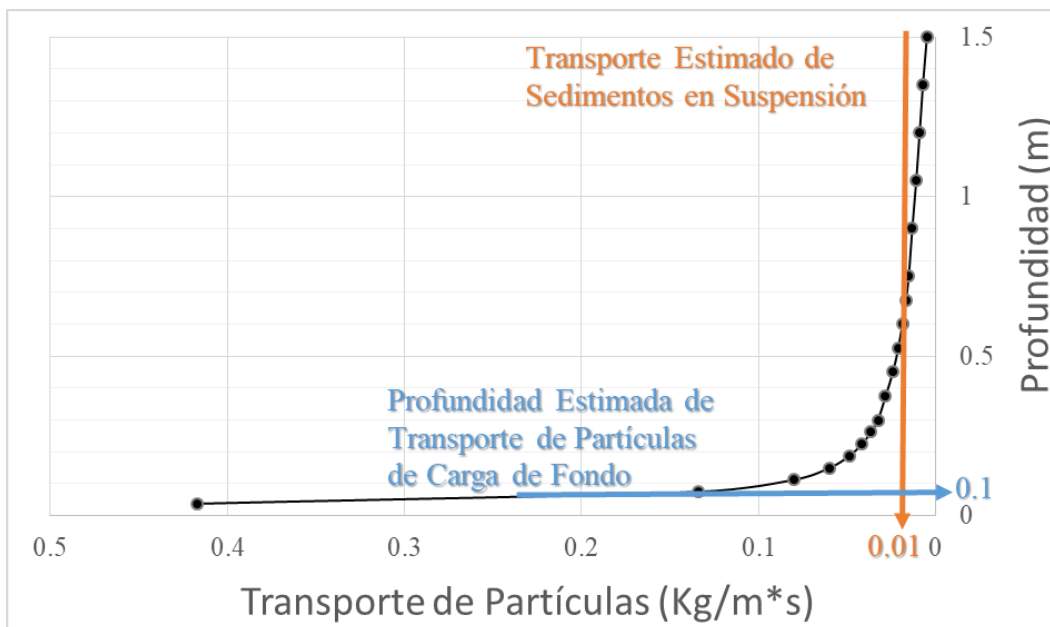


FIGURA 3. 30. RESULTADOS DEL PERFIL DE TRASPORTE DE SEDIMENTOS DEL RÍO TERCERO SIMULADO EN SSIIM, $Q=18.89 \text{ m}^3/\text{s}$.

En las Figura 3. 27, Figura 3. 28, Figura 3. 29 y Figura 3. 30 que representan el perfil vertical del transporte de sedimentos en el tramo del río Tercero simulado con el modelo SSIIM; se puede observar que la profundidad de la capa activa de transporte de sedimentos de fondo y su interacción con los sedimentos en suspensión es de aproximadamente 10 centímetros, valor que puede ser estimado en función de la altura de rugosidad atribuida a las partículas del lecho: $\delta_b = 10 * 3 * D_{90} = 10 * 3 * 3.5 = 10.5$ centímetros. También a partir del perfil vertical de transporte de partículas, se puede señalar que el cauce estudiado presenta

condiciones de flujo diluidas de transporte de sedimentos en suspensión, con valores cercanos al 5% del transporte total de sedimentos. En base al perfil vertical representativo del transporte de partículas en el tramo del río Tercero aguas abajo del puente Juan Bautista Alberdi, a continuación en la Figura 3. 31, se han discretizado los modos del transporte de partículas simulados:

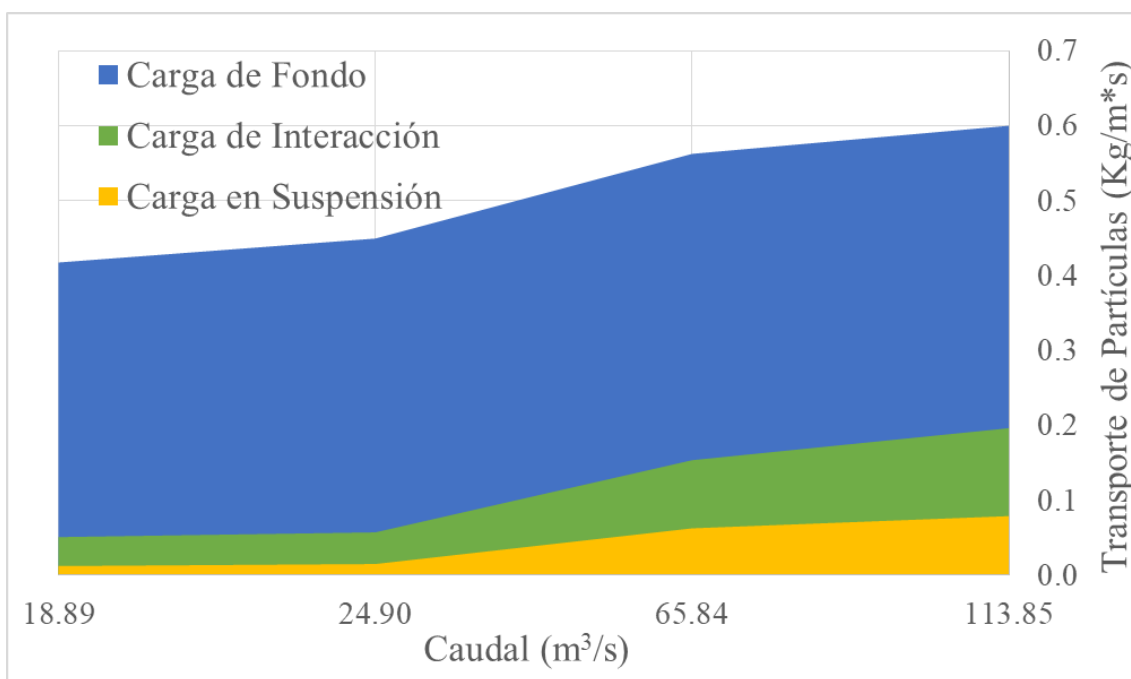


FIGURA 3. 31. RESULTADOS DE LOS MODOS DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EN EL TRAMO DEL RÍO TERCERO AGUAS ABAJO DEL PUENTE JUAN BAUTISTA ALBERDI.

Analizando la Figura 3. 31, en donde se presentan los resultados discretizados de los modos de transporte de partículas en el tramo del río Tercero, se puede manifestar que el modo de transporte dominante es el de carga de sedimentos de fondo para las características de flujo simuladas.

3.6. Análisis de Sensibilidad

En las secciones previas se han validado y presentado los resultados de la simulación con la herramienta SSIIM de la hidrodinámica tridimensional acoplada a procesos de transporte de sedimentos en el flujo del río Tercero aguas abajo del puente Juan Bautista Alberdi de la ciudad de Villa María. Se analizaron 18 eventos mostrando comportamientos satisfactorios en los resultados de flujo, transporte de partículas y estimación de las formas en el lecho del cauce, en contraste con las variables observadas con un instrumento ADCP.

En el análisis de la hidrodinámica fluvial con procesos de transporte de partículas están presentes una gran cantidad de variables, que al ser consideradas de una u otra forma en la solución de las ecuaciones de estado, describen el comportamiento del flujo. En este punto del trabajo, se analizarán las variables destacadas que se tomaron en cuenta para llegar a los resultados previamente presentados.

Una de las consideraciones de importancia para la simulación del flujo tridimensional, es como se realizará la discretización del dominio espacial y en este trabajo se usó la metodología de discretización espacial con mallas estructuradas que han mostrado calidad adecuada para el cálculo de las variables respecto a la ortogonalidad y forma de los elementos; reflejando precisión, convergencia y estabilidad adecuada en los resultados de las simulaciones del flujo acoplado con procesos de transporte de partículas. La siguiente consideración a tomar en cuenta sobre la malla será el tamaño de las celdas de cálculo, principalmente en las cercanías de las fronteras sólidas, donde las variables de transporte de sedimentos y de la morfología fluvial se verán influenciadas por las variables hidrodinámicas y los procesos de aceleración, recirculación y estancamiento que se generan por la interacción del flujo con las fronteras sólidas. Tomando en cuenta estas consideraciones, se construyó una malla estructurada no uniforme en sentido vertical y con mayor detalle en las cercanías de los contornos sólidos. A continuación, en la Figura 3. 32 se presenta la malla tomando en cuenta discretización no uniforme y uniforme en la vertical; de la sección de control ubicada a 10 metros del puente Juan Bautista Alberdi, seguido de un esquema de áreas coloreadas que representan la velocidad media para un evento de $113.85 \text{ m}^3/\text{s}$:

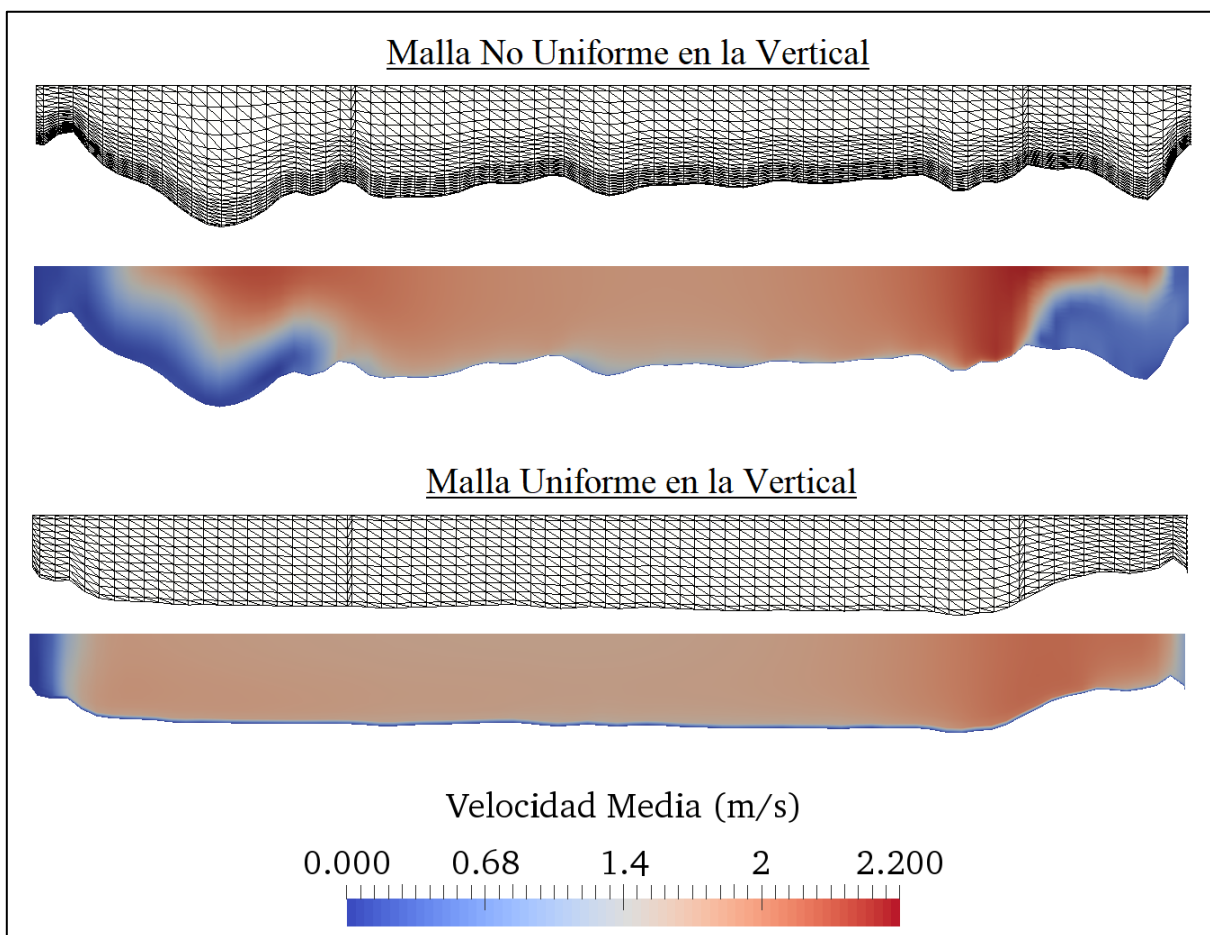


FIGURA 3. 32. MALLA Y ESQUEMA DE ÁREAS COLOREADAS QUE REPRESENTAN LA VELOCIDAD MEDIA EN LA SECCIÓN DE CONTROL DEL FLUJO DEL RÍO TERCERO, $Q = 113.85 \text{ m}^3/\text{s}$.

Como puede observarse en la Figura 3. 32, los resultados y el comportamiento de la velocidad media cambian notoriamente según el tipo de distribución de la discretización en la vertical. En la distribución no uniforme el menor tamaño de discretización vertical es del 2.5% de la profundidad y el mayor del 10% de la profundidad como se presentó previamente en la Tabla 2. 9; el tamaño de la discretización uniforme es del 10% de la profundidad del flujo en toda la vertical.

Si se contrastan los resultados de velocidad media, la diferencia entre de la hidrodinámica del flujo calculada con la discretización no uniforme y uniforme es de alrededor del 20%, esta diferencia se puede bajar a menos del 5% si en la metodología de cálculo de las variables de flujo con una malla uniforme se toma en cuenta una constante que represente los procesos de resistencia al flujo dada por la rugosidad de la superficie sólida y las formas de fondo que se presentarían en los eventos simulados, pero se destaca que morfología del lecho no podría ser reproducida en el caso de tomar una constante de la resistencia de las fronteras sólidas, al ser una variable intrínseca del coeficiente de rugosidad propuesto en todo el tramo simulado.

También, con el fin de justificar que el tamaño de mallado en dirección horizontal ha sido suficiente, en la Figura 3. 33 se presentan mallas tomando en cuenta discretización uniforme y no uniforme en planta, los elementos de longitud transversal de 30 centímetros en la malla uniforme y con una discretización cerca de los bordes de tamaño aproximado de 10 centímetros; con los respectivos resultados en forma de esquema de áreas coloreadas que representan la velocidad media superficial para un evento de $113.85 \text{ m}^3/\text{s}$ en el tramo simulado:

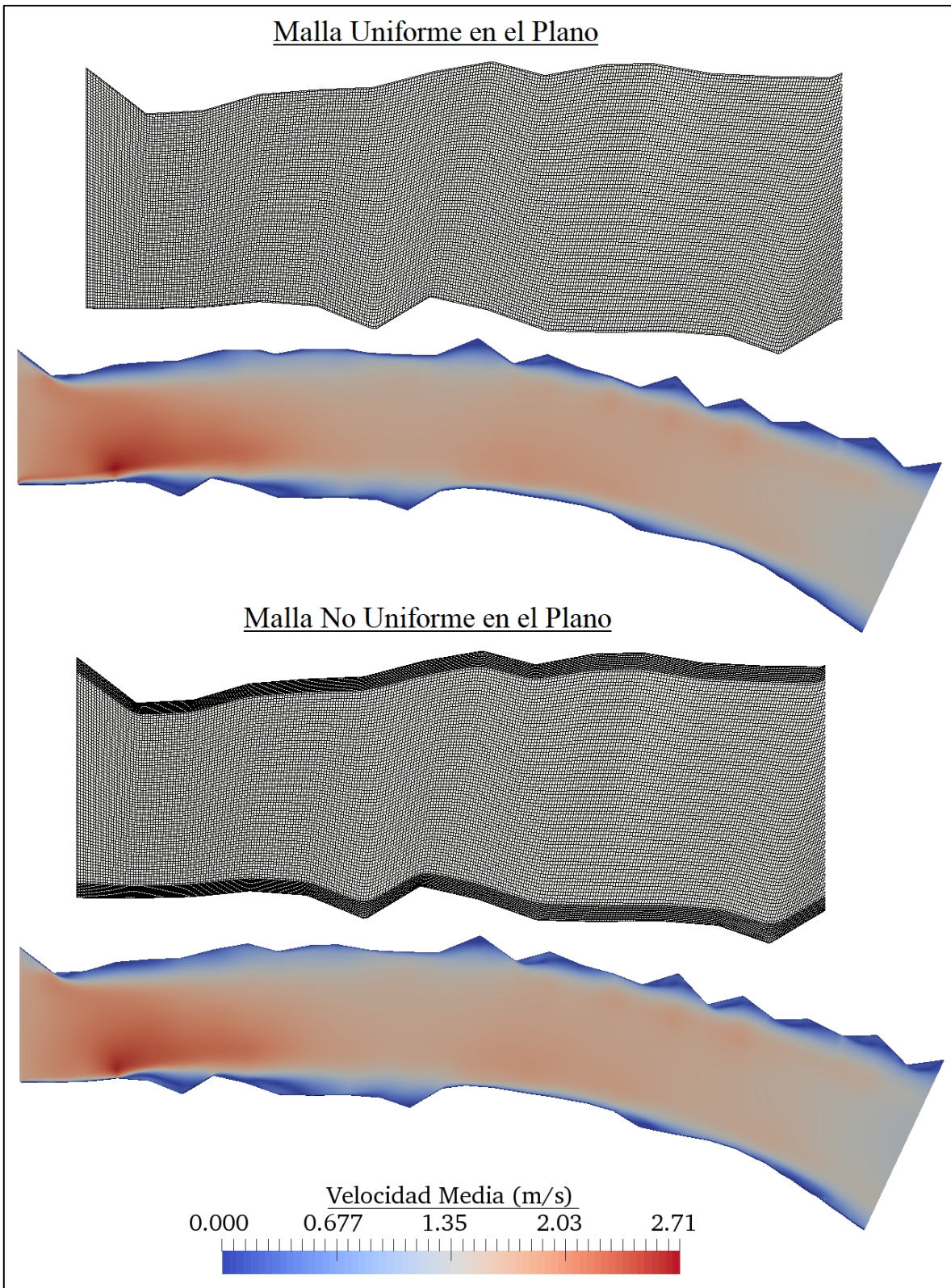


FIGURA 3. 33. MALLA Y ESQUEMA DE ÁREAS COLOREADAS QUE REPRESENTAN LA VELOCIDAD MEDIA SUPERFICIAL EN EL TRAMO SIMULADO DEL RÍO TERCERO, $Q = 113.85 \text{ m}^3/\text{s}$.

Los resultados de velocidad media superficial presentados en la Figura 3. 33 son muy similares; por lo tanto, se justifica que para este caso no es necesario una malla con mayor refinamiento en dirección horizontal.

Otra cuestión importante a considerar en la simulación numérica del flujo de un cauce natural, es el cálculo de la rugosidad en las fronteras sólidas en función de la variabilidad de la morfología del lecho fluvial; de manera explícita cuando se simulan las formas de fondo y de manera implícita cuando se toma en cuenta la resistencia de las formas de fondo en una ecuación de altura de rugosidad. Van Rijn (1984^c) agregó un término a la ecuación [3.21] para estimar la altura de rugosidad tomando en cuenta la geometría de las formas de fondo en flujos con superficie libre:

$$k_{s\Delta} = 3D_{90} + 1.1\Delta \left(1 - e^{\left(\frac{-25\Delta}{\lambda}\right)}\right) \quad [3.45]$$

En la ecuación [3.45], λ y Δ representan la longitud y la altura de las formas de fondo, respectivamente; λ y Δ pueden ser estimadas de manera explícita al simular la evolución temporal de la morfología del lecho (como se hace en esta investigación) o de manera implícita tomando en cuenta expresiones empíricas que permiten estimar la geometría de las formas de fondo (van Rijn, 1984^c) (García, 2008). A continuación en la Tabla 3. 5 se presentan los valores calculados de altura de rugosidad superficial k_s tomando en cuenta la geometría media de las formas de fondo en el tramo del río Tercero para los 18 eventos simulados:

TABLA 3. 5. ALTURA MEDIA DE RUGOSIDAD Y FORMAS DE FONDO DEL TRAMO SIMULADO EN EL RÍO TERCERO AGUAS ABAJO DEL PUENTE JUAN BAUTISTA ALBERDI.

#	Caudal (m ³ /s)	D ₉₀ (mm)	λ (m)	Δ (m)	Altura de Rugosidad k_s (m)	Altura de Rugosidad $k_{s\Delta}$ (m)	Δ/λ
1	9.64	3.50	7.6	0.09	0.011	0.036	0.01
2	12.86	3.50	7.4	0.10	0.011	0.042	0.01
3	13.18	3.50	5.8	0.10	0.011	0.050	0.02
4	17.22	3.50	7.9	0.10	0.011	0.042	0.01
5	18.89	3.50	4.6	0.10	0.011	0.060	0.02
6	22.81	3.50	7.3	0.11	0.011	0.050	0.02
7	24.35	3.50	8.0	0.11	0.011	0.048	0.01
8	24.90	3.50	6.2	0.12	0.011	0.058	0.02
9	25.64	3.50	7.8	0.12	0.011	0.055	0.02
10	29.20	3.50	6.2	0.13	0.011	0.066	0.02
11	50.27	3.50	4.2	0.17	0.011	0.133	0.04
12	65.84	3.50	4.6	0.19	0.011	0.148	0.04
13	78.09	3.50	4.4	0.24	0.011	0.202	0.05
14	85.09	3.50	4.4	0.24	0.011	0.208	0.05
15	91.91	3.50	4.7	0.27	0.011	0.236	0.06
16	98.72	3.50	5.1	0.27	0.011	0.234	0.05
17	113.85	3.50	4.9	0.33	0.011	0.301	0.07
18	121.22	3.50	5.0	0.33	0.011	0.300	0.07

La altura de rugosidad superficial presentada en la Tabla 3. 5 y estimada a partir del diámetro característico de las partículas está en el orden de 1 centímetro; también, se hace notar que la altura de rugosidad estimada con la ecuación [3.45], tomando en cuenta las dimensiones de las formas de fondo, varían según el evento en el tramo simulado, presentando una tendencia similar para eventos con caudal mayor a 50 m³/s con una altura de rugosidad media de aproximadamente 22 centímetros; así como, para los eventos con caudal menor a 50 m³/s se estimó una altura de rugosidad media de 5 centímetros, este comportamiento se presenta acorde al empinamiento Δ/λ de las formas de fondo como puede observarse en la Tabla 3. 5.

Se consideró una ecuación para relacionar la altura de rugosidad con el coeficiente de la famosa ecuación de Manning: $n = \frac{k_s^{1/6}}{26}$ (Olsen, 2014); de esta forma, el coeficiente de Manning para representar la rugosidad superficial de grano está en el orden de $n_{(1\text{ cm})} \approx 0.018$, y si se consideran las formas de fondo de manera implícita al representar la resistencia de las fronteras sobre el flujo, el coeficiente de rugosidad sugerido para eventos con caudal de entre 50 m³/s hasta 122 m³/s es de $n_{(22\text{ cm})} \approx 0.03$ y para los eventos con caudal menor a 50 m³/s se sugiere un coeficiente de rugosidad de Manning de $n_{(5\text{ cm})} \approx 0.023$.

En este punto del análisis de sensibilidad de las variables que intervienen en la simulación de la hidrodinámica con procesos de transporte de sedimentos del tramo del río Tercero, se considerará la elección de las variables temporales. Para justificar la elección del paso de tiempo, se ha realizado un análisis dimensional de la ecuación [3.35] de balance de masa del transporte de sedimentos, que puede ser escrita de la siguiente forma:

$$\frac{\partial z_0}{\partial t} = c_{\lambda_p} * \nabla \cdot u_{qb} \quad [3.46]$$

Donde en la ecuación [3.46], el cambio máximo de profundidad ∂z_0 se puede estimar en 10 centímetros que es la altura media máxima de la celda de cálculo cercana al fondo, $c_{\lambda_p} \approx 2$ es el valor de la porosidad relativa, $\nabla \cdot u_{qb}$ sería una velocidad del flujo de sedimentos en el fondo y se estima de la Tabla 2. 3: $\nabla \cdot u_{qb} \approx u_{\Delta} \approx 0.0012$ m/s; por lo tanto, el valor del paso de tiempo con estos valores se estima que tendría que ser menor a 40 segundos, el paso seleccionado para la simulación de las variables de transporte de sedimentos en el tramo del río Tercero se fijó en 20 segundos. También, las variables de transporte de sedimentos son resueltas en 100 iteraciones y las de corrección del flujo turbulento en 200 iteraciones para cada paso de tiempo.

Planteada una justificación de la elección del paso de tiempo y número de iteraciones, se procede a analizar el tiempo total de simulación para alcanzar resultados consistentes de los procesos de transporte de sedimentos. Al llevar al cabo la simulación de las formas de fondo con la ecuación de balance de masa que toma en cuenta la variabilidad de la morfología en el tiempo, los cambios en la morfología del lecho tendrán un comportamiento móvil y se espera que alcancen un estado de régimen después de un tiempo total de simulación. A continuación en las Figura 3. 34, Figura 3. 35, Figura 3. 36 y Figura 3. 37 se presentan las señales longitudinales correspondientes a los tiempos de 16000, 18000 y 20000 segundos de

la morfología fluvial en el medio de la sección a lo largo del tramo del río Tercero simulado, para los eventos de $113.85 \text{ m}^3/\text{s}$, $65.84 \text{ m}^3/\text{s}$, $24.90 \text{ m}^3/\text{s}$ y $18.89 \text{ m}^3/\text{s}$, respectivamente:

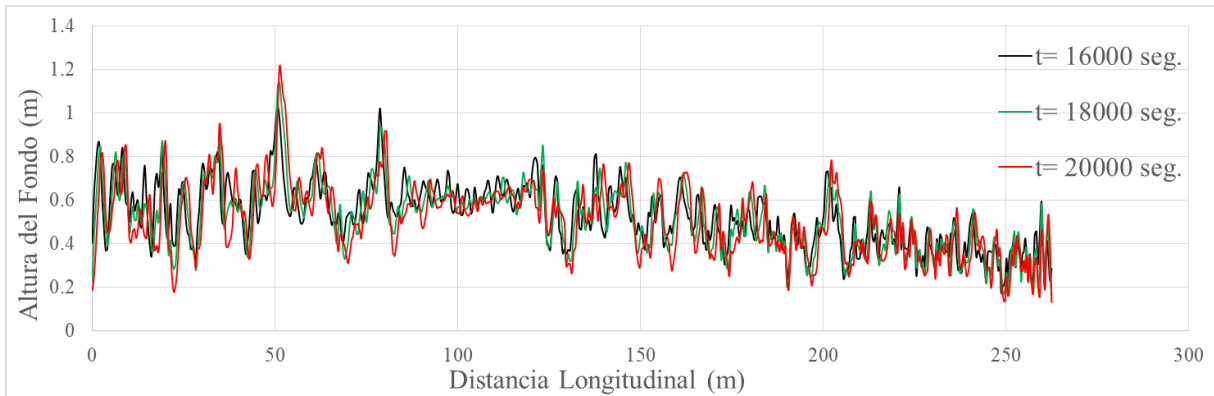


FIGURA 3. 34. PROYECCIÓN DE UN CORTE LONGITUDINAL DE LA MORFOLOGÍA FLUVIAL DEL RÍO TERCERO PARA JUSTIFICAR EL RÉGIMEN DE LAS FORMAS DE FONDO, $Q=113.85 \text{ m}^3/\text{s}$.

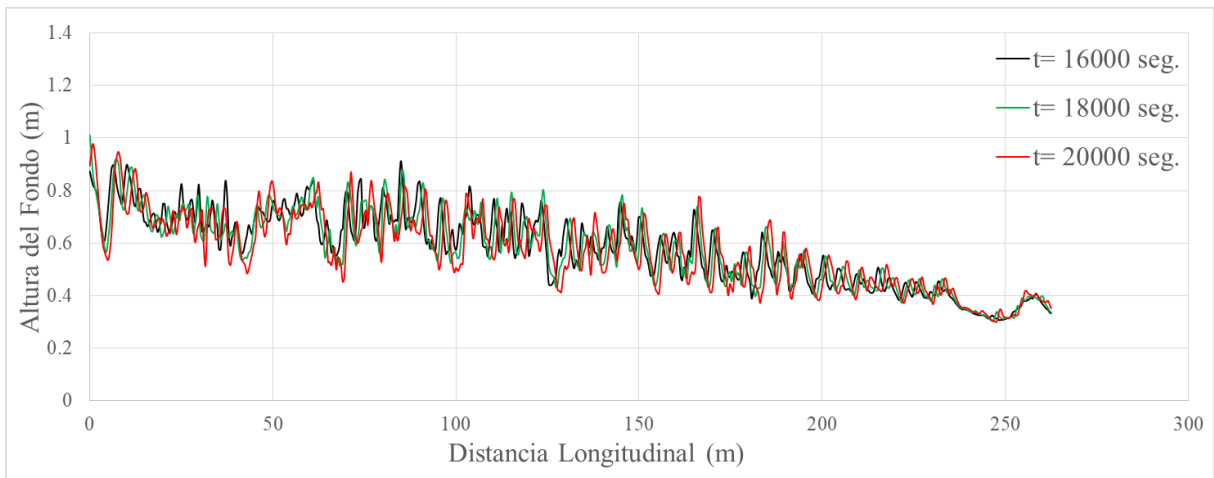


FIGURA 3. 35. PROYECCIÓN DE UN CORTE LONGITUDINAL DE LA MORFOLOGÍA FLUVIAL DEL RÍO TERCERO PARA JUSTIFICAR EL RÉGIMEN DE LAS FORMAS DE FONDO, $Q=65.84 \text{ m}^3/\text{s}$.

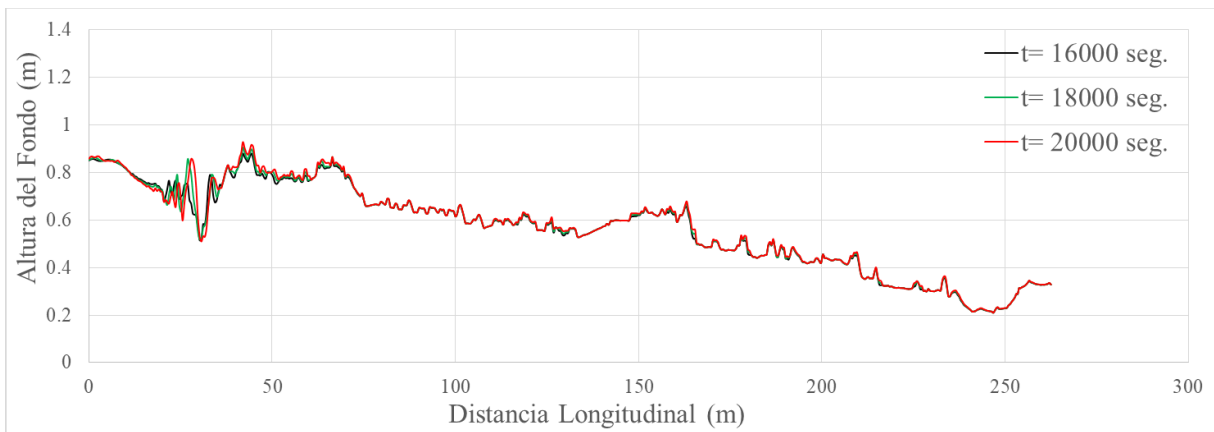


FIGURA 3. 36. PROYECCIÓN DE UN CORTE LONGITUDINAL DE LA MORFOLOGÍA FLUVIAL DEL RÍO TERCERO PARA JUSTIFICAR EL RÉGIMEN DE LAS FORMAS DE FONDO, $Q=24.90 \text{ m}^3/\text{s}$.



FIGURA 3. 37. PROYECCIÓN DE UN CORTE LONGITUDINAL DE LA MORFOLOGÍA FLUVIAL DEL RÍO TERCERO PARA JUSTIFICAR EL RÉGIMEN DE LAS FORMAS DE FONDO, $Q=18.89 \text{ m}^3/\text{s}$.

Se plantea que a partir del tiempo de 16000 segundos las señales de formas de fondo unidimensional del tramo del río Tercero empezarán a tener una tendencia de régimen con valores estadísticos de la geometría similares, para justificar esto, se presentan en las Tabla 3. 6, Tabla 3. 7, Tabla 3. 8 y Tabla 3. 9, las estadísticas de la geometría de las señales de las formas de fondo en los distintos pasos temporales para los eventos analizados:

TABLA 3. 6. ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA DE LAS SEÑALES DE LA MORFOLOGÍA FLUVIAL DEL RÍO TERCERO EN EL TRAMO AGUAS ABAJO DEL PUENTE JUAN BAUTISTA ALBERDI EN FUNCIÓN DEL TIEMPO, $Q = 113.85 \text{ m}^3/\text{s}$.

Tiempo (seg)	0	2000	4000	6000	8000	10000	12000	14000	16000	18000	20000
Promedio (m)	0.812	0.861	0.835	0.809	0.780	0.750	0.734	0.704	0.675	0.662	0.650
Desv. Est. (m)	0.032	0.051	0.061	0.073	0.082	0.089	0.099	0.106	0.115	0.126	0.141
Varianza (m^2)	0.001	0.003	0.004	0.005	0.007	0.008	0.010	0.011	0.013	0.016	0.020
Δ (m)	0.039	0.144	0.190	0.231	0.278	0.295	0.314	0.323	0.339	0.351	0.346
λ (m)	24.0	3.1	3.6	3.8	4.4	4.4	5.8	5.8	5.8	5.8	5.8
e%₀(ref. 20000 seg.)	e1%	e2%	e3%	e4%	e5%	e6%	e7%	e8%	e9%	e10%	
Promedio:	25	32	28	24	20	15	13	8	4	2	
Desv. Est.:	77	64	57	48	41	37	29	24	18	10	
Varianza:	95	87	81	73	66	60	50	43	34	19	
Δ :	89	58	45	33	19	15	9	7	2	1	
λ :	314	47	38	34	24	24	0	0	0	0	
e% Promedio	120	58	50	43	34	30	20	16	12	7	

TABLA 3.7. ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA DE LAS SEÑALES DE LA MORFOLOGÍA FLUVIAL DEL RÍO TERCERO EN EL TRAMO AGUAS ABAJO DEL PUENTE JUAN BAUTISTA ALBERDI EN FUNCIÓN DEL TIEMPO, $Q = 65.84 \text{ m}^3/\text{s}$.

Tiempo (seg)	0	2000	4000	6000	8000	10000	12000	14000	16000	18000	20000
Promedio (m)	0.812	0.889	0.872	0.869	0.852	0.848	0.830	0.811	0.792	0.786	0.780
Desv. Est. (m)	0.032	0.039	0.041	0.043	0.045	0.048	0.054	0.062	0.070	0.077	0.085
Varianza (m^2)	0.001	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.003	0.004	0.005	0.006	0.007
Δ (m)	0.039	0.084	0.099	0.125	0.132	0.158	0.161	0.180	0.181	0.194	0.192
λ (m)	24.0	2.6	3.8	3.8	4.4	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
e% _(ref. 20000 seg.)	e1%	e2%	e3%	e4%	e5%	e6%	e7%	e8%	e9%	e10%	
Promedio:	4	14	12	11	9	9	6	4	1	1	
Desv. Est.:	62	54	52	49	47	43	36	27	18	10	
Varianza:	86	79	77	74	72	68	59	47	32	18	
Δ :	80	56	48	35	31	18	16	6	6	1	
λ :	380	48	24	24	12	0	0	0	0	0	
e% Promedio	122	50	42	39	34	27	23	17	11	6	

TABLA 3.8. ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA DE LAS SEÑALES DE LA MORFOLOGÍA FLUVIAL DEL RÍO TERCERO EN EL TRAMO AGUAS ABAJO DEL PUENTE JUAN BAUTISTA ALBERDI EN FUNCIÓN DEL TIEMPO, $Q = 24.90 \text{ m}^3/\text{s}$.

Tiempo (seg)	0	2000	4000	6000	8000	10000	12000	14000	16000	18000	20000
Promedio (m)	0.812	0.859	0.846	0.847	0.849	0.851	0.852	0.854	0.856	0.858	0.861
Desv. Est. (m)	0.032	0.045	0.047	0.049	0.051	0.053	0.056	0.059	0.061	0.063	0.066
Varianza (m^2)	0.001	0.002	0.002	0.002	0.003	0.003	0.003	0.003	0.004	0.004	0.004
Δ (m)	0.039	0.052	0.064	0.067	0.072	0.077	0.085	0.091	0.093	0.096	0.097
λ (m)	24.0	22.0	5.9	4.6	4.4	4.6	4.9	5.0	4.8	4.8	4.8
e% _(ref. 20000 seg.)	e1%	e2%	e3%	e4%	e5%	e6%	e7%	e8%	e9%	e10%	
Promedio:	6	0	2	2	1	1	1	1	1	0	
Desv. Est.:	51	32	29	25	23	20	14	11	8	4	
Varianza:	76	53	49	44	40	35	27	20	15	8	
Δ :	60	47	34	32	26	21	13	7	4	1	
λ :	400	358	23	4	8	4	2	4	0	0	
e% Promedio	119	98	27	21	20	16	12	9	5	3	

TABLA 3.9. ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA DE LAS SEÑALES DE LA MORFOLOGÍA FLUVIAL DEL RÍO TERCERO EN EL TRAMO AGUAS ABAJO DEL PUENTE JUAN BAUTISTA ALBERDI EN FUNCIÓN DEL TIEMPO, $Q = 18.89 \text{ m}^3/\text{s}$.

Tiempo (seg)	0	2000	4000	6000	8000	10000	12000	14000	16000	18000	20000
Promedio (m)	0.812	0.842	0.842	0.842	0.843	0.844	0.845	0.846	0.847	0.848	0.849
Desv. Est. (m)	0.032	0.046	0.046	0.047	0.048	0.049	0.050	0.052	0.052	0.053	0.054
Varianza (m^2)	0.001	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003
Δ (m)	0.039	0.061	0.062	0.064	0.067	0.069	0.072	0.074	0.076	0.078	0.080
λ (m)	24.0	3.5	5.7	4.8	4.0	3.9	3.7	7.8	7.8	8.0	8.0
e% _(ref. 20000 seg.)	e1%	e2%	e3%	e4%	e5%	e6%	e7%	e8%	e9%	e10%	
Promedio:	4	1	1	1	1	1	1	0	0	0	
Desv. Est.:	40	16	14	13	11	9	7	4	3	2	
Varianza:	64	29	26	24	20	17	13	9	6	3	
Δ :	51	24	23	20	16	13	10	7	5	2	
λ :	200	56	29	40	50	51	54	3	3	0	
e% Promedio	72	25	19	19	19	18	17	5	3	1	

Se puede observar en las Tabla 3. 6, Tabla 3. 7, Tabla 3. 8 y Tabla 3. 9, que la geometría de las señales de formas de fondo en los distintos pasos temporales presentan una tendencia a un régimen estable con pequeños movimientos de la morfología en función del tiempo. También se hace notar que los valores de la altura Δ y la longitud λ de las formas de fondo presentan valores de convergencia muy satisfactoria en función al paso del tiempo. A continuación, en las Figura 3. 38 y Figura 3. 39 se presenta la evolución de las variables de la geometría Δ y λ de las formas de fondo en función del tiempo:

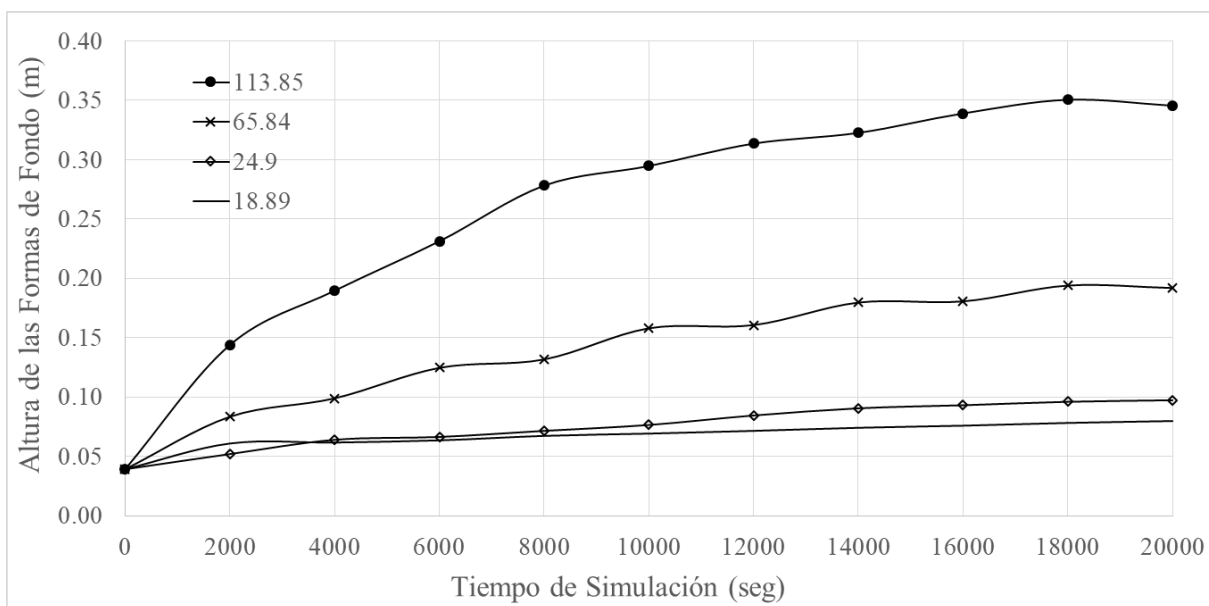


FIGURA 3. 38. EVOLUCIÓN DE LA ALTURA DE LAS FORMAS DE FONDO EN FUNCIÓN DEL TIEMPO PARA LOS EVENTOS DE 113.85 m³/s, 65.84 m³/s, 24.90 m³/s Y 18.89 m³/s.

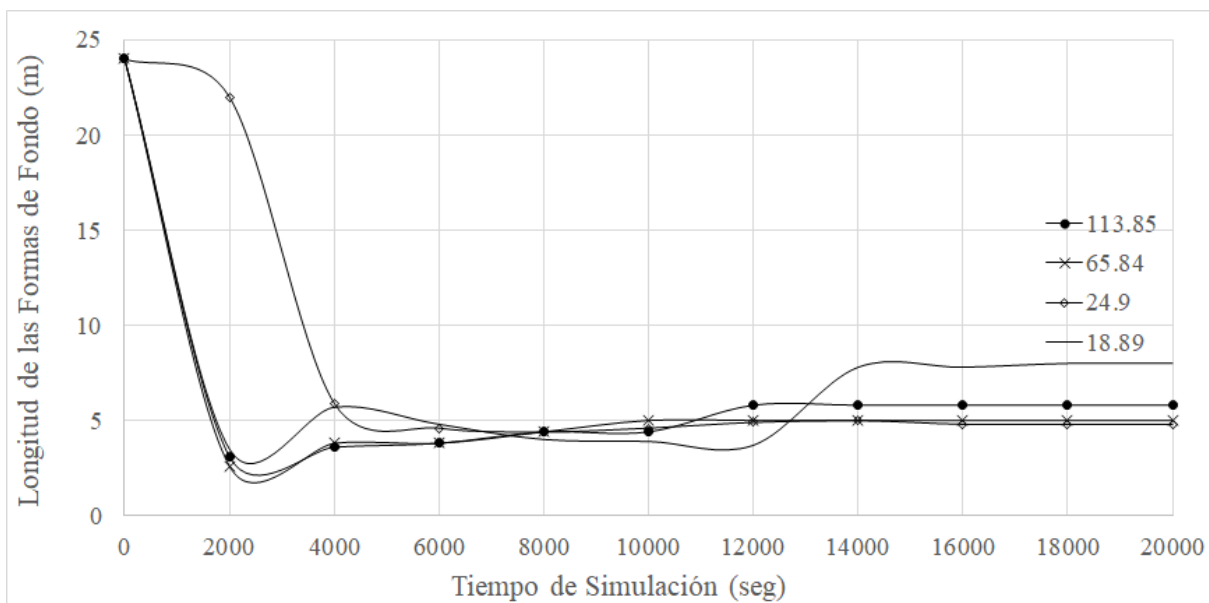


FIGURA 3. 39. EVOLUCIÓN DE LA LONGITUD DE LAS FORMAS DE FONDO EN FUNCIÓN DEL TIEMPO PARA LOS EVENTOS DE 113.85 m³/s, 65.84 m³/s, 24.90 m³/s Y 18.89 m³/s.

Como puede observarse en las Figura 3. 38 y Figura 3. 39, los valores de las variables de la geometría de fondo de las señales longitudinales en el medio del río Tercero tienden a un valor estable o de régimen y de esta manera se concluye que a partir del tiempo de 16000 segundos los resultados simulados de las formas de fondo tienden a una convergencia adecuada que reflejarán baja incertidumbre al analizar estas variables.

También, es importante verificar que las variables hidrodinámicas tengan cierta estabilidad sobre el paso de tiempo, para lo cual a continuación en la Figura 3. 40 se presentan los perfiles de velocidad en el medio de la sección de control simulados en el evento con caudal de 113.85 m³/s y que corresponde a los tiempos de 16000, 18000 y 20000 segundos.

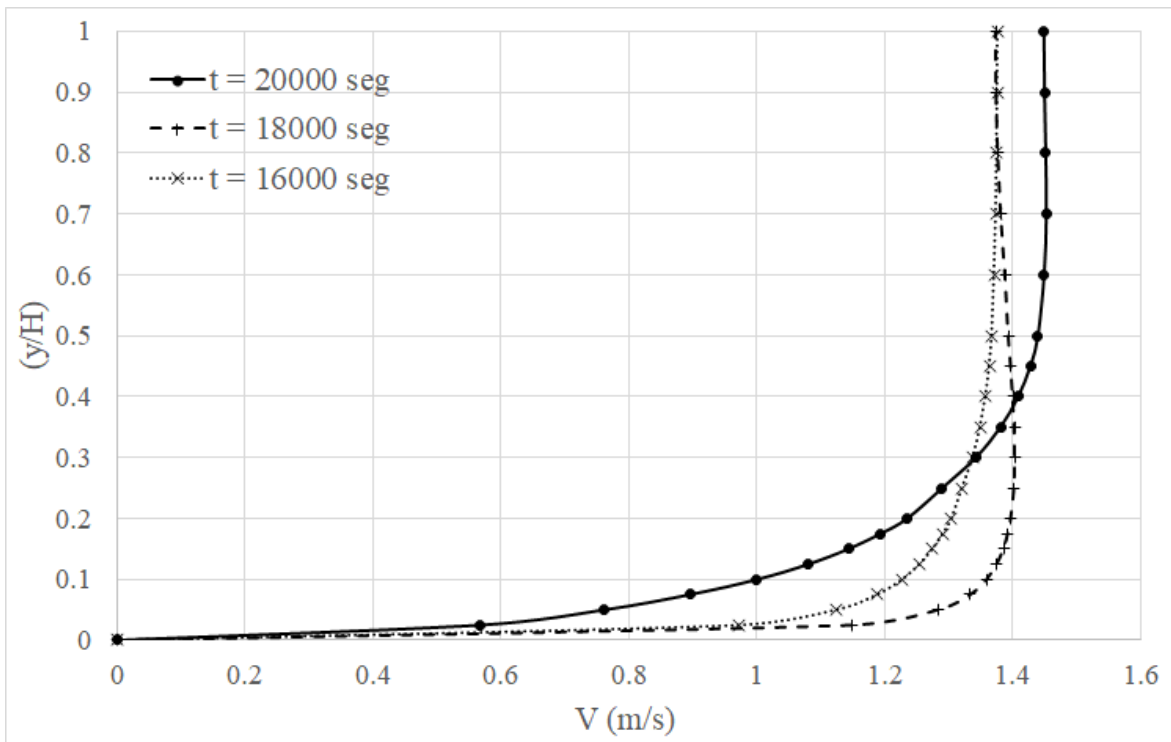


FIGURA 3. 40. PERFILES DE VELOCIDAD EN EL MEDIO DE LA SECCIÓN DE CONTROL SIMULADOS PARA EL EVENTO DE 113.85 M³/S.

Como se puede ver en la Figura 3. 40, los perfiles de velocidad media, en el medio de la sección de control que fueron simuladas en el flujo del río Tercero, mantienen el mismo orden de magnitud en los pasos temporales de 16000, 18000 y 20000 segundos; con variaciones alrededor del 5% cuando se contrastan los resultados de velocidad promediada en la vertical.

Las variaciones de velocidad media observadas Figura 3. 40, se atribuyen al movimiento y desarrollo de las formas de fondo tipo dunas, teniendo en claro que si el fondo del cauce es móvil, se tendrá mayor magnitud de velocidad en las crestas de las dunas (o zonas elevadas de lecho fluvial) respecto a las zonas de valle donde se presentan bajas velocidades del flujo cercano al fondo del río. Por lo tanto, la importancia de verificar que el orden de magnitud de las variables hidrodinámicas se mantenga en el tiempo, que implica un correcto

tratamiento de la interacción del flujo con el transporte de sedimentos, queda evidenciado en base al análisis realizado de la Figura 3. 40.

Finalmente, se destaca que las características del sedimento, que fueron presentadas en las Figura 2. 9 y Tabla 2. 8, tienen una importante influencia en los resultados estimados del transporte de sedimentos y formas de fondo. Las características de las partículas son de arenas pobremente graduadas con poco o nada de finos con un diámetro característico por el que pasa el 90% del material de $D_{90} = 3.5$ milímetros y diámetro medio del material de $D_{50} = 0.55$ milímetros. También una variable de importancia es la velocidad de caída de las partículas en el flujo, que se basó en la ecuación [3.8] dada por la ley de Stokes.

Capítulo 4:

Discretización de las Formas de Fondo Mediante la Identificación de Frecuencias Dominantes

4. Discretización de las Formas de Fondo Mediante la Identificación de Frecuencias Dominantes

Se ha planteado el desafío de llevar a cabo una descripción detallada de la evolución espacial de la geometría de las formas de fondo simuladas en el tramo del río Tercero aguas abajo del puente Juan Bautista Alberdi de la ciudad de Villa María, para lo cual se examinarán las dimensiones dominantes de la geometría de fondo en el tramo estudiado mediante un análisis espectral de frecuencias.

La transformada discreta de Fourier ha sido ampliamente usada en estudios para la determinación de frecuencias dominantes en señales finitas (Catano-Lopera et al, 2009); pero al analizar la cuantificación de la variabilidad de las formas de fondo de un flujo con superficie libre, la transformada discreta de Fourier podría evidenciar limitaciones al considerar señales con desviaciones significativas y con varias frecuencias dominantes que corresponden a procesos no lineales (Gutierrez et al, 2013).

Debido a las limitaciones del análisis mediante la transformada discreta de Fourier, para señales con comportamientos no lineales y amplio rango de frecuencias dominantes; se planteó como alternativa, la aplicación del análisis mediante transformaciones con wavelets. El análisis de frecuencias dominantes con curvas wavelets presenta una resolución de varias escalas que podría ser conveniente para discretizar las dimensiones dominantes de la morfología fluvial de los eventos simulados.

A continuación en el desarrollo de este capítulo, se presentan las metodologías del análisis espectral con la transformada discreta de Fourier y con curvas wavelets, así como también una breve explicación de los diagramas de Hovmöller para ubicar la distribución de las dimensiones dominantes de la morfología fluvial y la correlación cruzada entre dos señales para obtener su desfase; finalmente, con las metodologías descritas se examinarán las señales de formas de fondo resultantes de la simulación realizada con la herramienta computacional SSIIM, se busca encontrar patrones en las escalas de las formas de fondo y las dimensiones dominantes de la morfología en el tramo estudiado.

4.1. Metodología

4.1.1. Discretización con la Transformada Discreta de Fourier

La transformada de Fourier descompone la señal en elementos sinodales, cubriendo el rango de frecuencias que equivalen a la señal original (Torrence y Compo, 1998). La transformada discreta de Fourier, de una secuencia x_n está dada por:

$$\hat{x}_k = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-2\pi i k n / N} \quad [4.1]$$

Donde en la ecuación [4.1], x_n es una muestra de N puntos equidistantes a una distancia Δx de separación, i es la unidad imaginaria, k es el índice de la frecuencia y N es el periodo de

la serie ajustada. Comúnmente, por el carácter simétrico de la transformada discreta de Fourier, el índice de frecuencia varía desde 1 hasta $M/2$.

La transformada discreta de Fourier descompone una señal en funciones seno y coseno que se denominan comúnmente funciones base de la transformada discreta de Fourier. El resultado de la transformada discreta de Fourier es un conjunto de números que representan amplitudes de las funciones base. Las funciones base son un conjunto de ondas seno y coseno con amplitud unitaria, se asigna a cada amplitud (el dominio de frecuencia) la onda seno o coseno adecuada (funciones base), el resultado es un conjunto de ondas de seno y coseno escaladas que se pueden añadir para formar la señal del dominio (Smith, 1999). A continuación en la ecuación [4.2] se presenta la transformada discreta de Fourier, de una secuencia x_n , definida con las funciones base:

$$\hat{x}_k = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_n [\cos(2\pi kn/N) - i \sin(2\pi kn/N)] \quad [4.2]$$

En base a las ecuaciones [4.1] y [4.2], el espectro de energía de las fluctuaciones de la transformada discreta de Fourier de una señal finita se define como:

$$E_{tdf} = 2\Delta x (\hat{x}_k)^2 \quad [4.3]$$

Si $E_{tdf_{m\acute{a}x}}$ es el máximo valor del espectro de energía en una frecuencia determinada basada en la transformación discreta de Fourier de una muestra finita, se define el espectro de energía unitario como:

$$\bar{E} = \frac{E_{tdf}}{E_{tdf_{m\acute{a}x}}} \quad [4.4]$$

La metodología presentada, de la transformada discreta de Fourier, sufre un fenómeno conocido como fuga de energía, que ocurre en la estimación del espectro de energía relacionado con las frecuencias de la señal. Se han desarrollado técnicas con el objetivo de suprimir este fenómeno de fuga de energía, estas metodologías introducen una función del paso espacial o temporal que es igual a la extensión de la señal analizada, lo que permite disminuir los datos del historial y eliminar las discontinuidades al inicio y al final de un registro de baja frecuencia (Bendat y Piersol, 2000). Sin embargo, para un análisis en el que no sería apropiado definir una escala predeterminada, debido al amplio rango de frecuencias espaciales (como el caso de las formas de fondo estudiadas en este trabajo), un método de localización de frecuencias dominantes que tiene escala independiente, como el análisis con curvas tipo wavelets, podría ser la solución (Catano-Lopera et al, 2009). A continuación, se presenta la metodología para la discretización de frecuencias dominantes de señales con curvas tipo wavelets.

4.1.2. Discretización con Curvas Wavelets

Para las señales que presentan múltiples escalas de variabilidad y frecuencia en el espacio o tiempo, puede ser de utilidad, un análisis localizado de transformaciones con curvas tipo wavelets para discriminar las geometrías dominantes de las variables analizadas (Singh et al,

2011). La transformación discreta con curvas tipo wavelet se define como la convolución del producto de la transformada inversa de Fourier (Catano-Lopera et al, 2009):

$$WT_{n(a,n)} = \sum_{k=0}^{N-1} \hat{x}_k \hat{\theta}^*(a\omega_k) e^{i\omega_k n \Delta x} \quad [4.5]$$

Donde en la ecuación [4.5], $WT_{n(a)}$ es la transformada discreta con curvas tipo wavelets; con una escala con valor a , n es un índice de la localización espacial, \hat{x}_k la amplitud de la transformada discreta de Fourier de una secuencia x_n , ω_k es la frecuencia angular y $\hat{\theta}^*$ es una versión proyectada-escalada de la función wavelet base. El sombrero y el asterisco de la función wavelet base $\hat{\theta}^*$ representan la parte real y compleja de la transformada discreta de Fourier de esta función (Torrence y Compo, 1998). La función de la familia de wavelets $\theta_{(a,n)}$ se define como:

$$\theta_{(a,n)} = \frac{1}{\sqrt{a}} \theta\left(\frac{n-n_0}{a}\right) \quad [4.6]$$

En la ecuación [4.6], n_0 es el valor del índice de localización proyectado de la señal analizada. La función de la familia de wavelets $\theta_{(a,n)}$ es un valor complejo y representa la familia de wavelets generada por traslaciones y dilataciones continuas de la función wavelet base. Se han desarrollado gran cantidad de familias de wavelets, que se adaptan a diferentes tipos de análisis, tal como lo es la función Morlet que se asocia con números complejos de funciones Gaussianas o como la función denominada Sombrero Mexicano, que se deriva de la parte real de funciones Gaussianas (Catano-Lopera et al, 2009). A continuación en la Figura 4. 1 se presentan ejemplos de funciones wavelets Morlet y Sombrero Mexicano usados en el análisis de frecuencias:

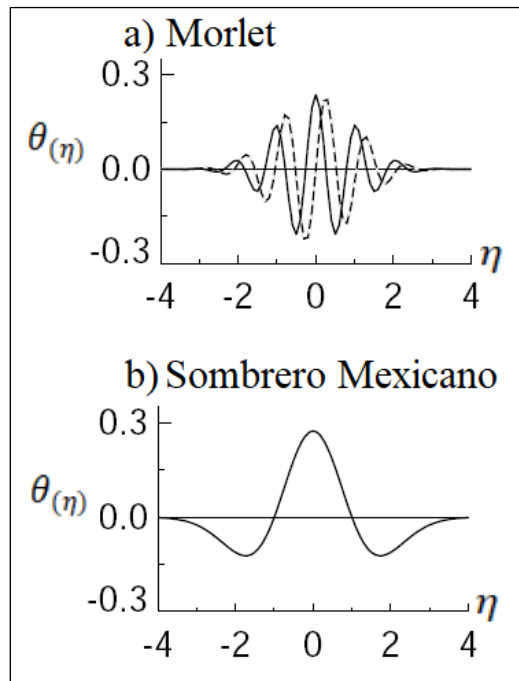


FIGURA 4. 1. FUNCIONES BASE DE WAVELETS TIPO MORLET Y SOMBRERO MEXICANO (TORRENCE Y COMPO, 1998).

En estudios previos realizados por Gutierrez et al (2013), se presentó la discretización de las formas de fondo del río Paraná con la familia de wavelets tipo Morlet. El río Paraná presenta dimensiones de gran escala de la geometría del flujo, a continuación se presenta la función base Morlet para el análisis con wavelets:

$$\theta_{(\eta)} = \pi^{-1/4} e^{i\omega_0\eta} e^{-\eta^2/2} \quad [4.7]$$

En la ecuación [4.7], η es el índice de localización adimensional y ω_0 es la frecuencia adimensional. La función wavelet tipo Morlet consiste en un plano de onda modulado por una función Gaussiana (Torrence y Compo, 1998).

Un análisis con wavelets de las señales de formas de fondo obtenidas en canales de laboratorio de pequeña escala fueron presentados por Singh et al (2011); en este estudio se tomó en cuenta la familia de wavelets de Sombrero Mexicano para realizar el análisis de frecuencias dominantes de las formas de fondo, la función base Sombrero Mexicano se presenta a continuación:

$$\theta_{(\eta)} = \frac{2}{\sqrt{3}} \pi^{-1/4} (1 - \eta^2) e^{-\eta^2/2} \quad [4.8]$$

Con la familia de wavelets definida, el espectro espacial de energía del análisis con curvas wavelets se define como:

$$|WT_{n(a)}|^2 = \sum_{k=0}^{N-1} WT_{n(a)} WT_{n(a)} \quad [4.9]$$

Para facilitar la comparación de los espectros de energía obtenidos con curvas wavelets, se los normaliza dividiéndolos por σ^2 ; en donde σ^2 representa la variancia asociada al espectro de energía de una señal de ruido blanco (Torrence y Compo, 1998). Esta normalización da una medida del espectro de energía relativa a una señal de ruido blanco. Una serie de ruido blanco es una señal aleatoria con densidad de la energía espectral plana que implican que las variaciones del fondo de un cauce natural son atribuida a procesos aleatorios, no pueden ser correlacionados, y por lo tanto, no tienen frecuencias dominantes a lo largo de la señal (Catano-Lopera et al, 2009).

El espectro de energía global basado en el análisis con curvas wavelets, se define como el espectro espacial de energía promediado sobre todo el espectro local de energía de la función wavelet (Torrence y Compo, 1998), a continuación se presenta su definición en forma discreta:

$$\overline{WT_n^2} = \frac{\Delta j \Delta x}{C_\delta} \sum_{j=j_1}^{j_2} \frac{|WT_{n(a_j)}|^2}{a_j} \quad [4.10]$$

En la ecuación [4.10], Δj es el intervalo en que cada conjunto de escalas a_j se divide sobre la función wavelet seleccionada (en la función Morlet $\Delta j = 0.6$ y en la función Sombrero Mexicano $\Delta j = 0.97$), C_δ es una constante empírica de utilidad en la reconstrucción de la parte real de la señal basada en la transformación con curvas wavelets (en la función Morlet

$C_\delta = 0.776$ y en la función Sombrero Mexicano $C_\delta = 1.966$) (Torrence y Compo, 1998). Los límites en la sumatoria, j_1 y j_2 , se refieren a los límites inferiores y superiores de las escalas que serán analizadas. El conjunto de escalas a_j tiene relación con la función wavelet seleccionada y conviene fraccionarla en potencias de 2:

$$a_j = s_0 2^{j \Delta j} \quad [4.11]$$

Donde en la ecuación [4.11], s_0 es la menor escala a resolver. La variable j varía tal que $j = 0, 1, \dots, J$, con la mayor escala a resolver definida por:

$$J = \Delta j^{-1} \log_2(N\Delta x/s_0) \quad [4.12]$$

Se recomienda tomar la menor escala del análisis con transformadas con curvas wavelets s_0 , como el doble del intervalo de los datos de la señal analizada (Catano-Lopera et al, 2009).

En este trabajo, a través del análisis espectral con curvas wavelets, se busca una discretización de las dimensiones dominantes, esta técnica está basada en la filtración por la correlación de bandas de frecuencias. Basado en esto, se ha desarrollado un algoritmo para rastrear las dimensiones dominantes a partir del análisis de las escalas de frecuencias que descompone la señal en bandas que representan las escalas dominantes de la señal original (Xu et al, 1994). El algoritmo usa la correlación espacial directa de la transformación wavelet alrededor de varias escalas para localizar jerarquías de las dimensiones dominantes:

$$Corr_{l(a',n)} = \prod_{i=0}^{l-1} WT_{n(a'+i,n)} \quad [4.13]$$

En la ecuación [4.13], l es el número de escalas analizado en la correlación y a' se relaciona con el total de escalas a de la transformada wavelet original con la siguiente expresión (Xu et al, 1994):

$$a' \leq a - l + 1 \quad [4.14]$$

En la discretización de frecuencias dominantes en base a curvas wavelets de señales de morfología fluvial, se ha evidenciado que la función Morlet ha presentado eficiencia y resultados uniformes al analizar señales con periodicidades bajas; como lo son las formas de fondo tipo rizos y dunas presentados en el flujo de cauces naturales (Gutierrez et al, 2013). Por esta razón, se ha seleccionado la familia de wavelets Morlet para analizar las señales de formas de fondo simuladas en el río Tercero aguas abajo del puente Juan Bautista Alberdi.

Antes de presentar los resultados del análisis espectral de las formas de fondo, se ha visto conveniente realizar un ejercicio para justificar el uso de la metodología de análisis espectral con curvas wavelets y poner en evidencia la hipótesis de pérdida de energía en el análisis con la transformada discreta de Fourier para señales con un amplio rango de periodicidades dominantes. Para este propósito se ha definido una señal sinodal con tres periodos dominantes; que están dados por una amplitud de 1, 0.4 y 0.1; y una longitud de onda de 30, 8 y 2; respectivamente. Sobre esta señal sinodal fue realizado el análisis de frecuencias con

la transformada discreta de Fourier y con curvas wavelets tipo Morlet que se presenta a continuación:

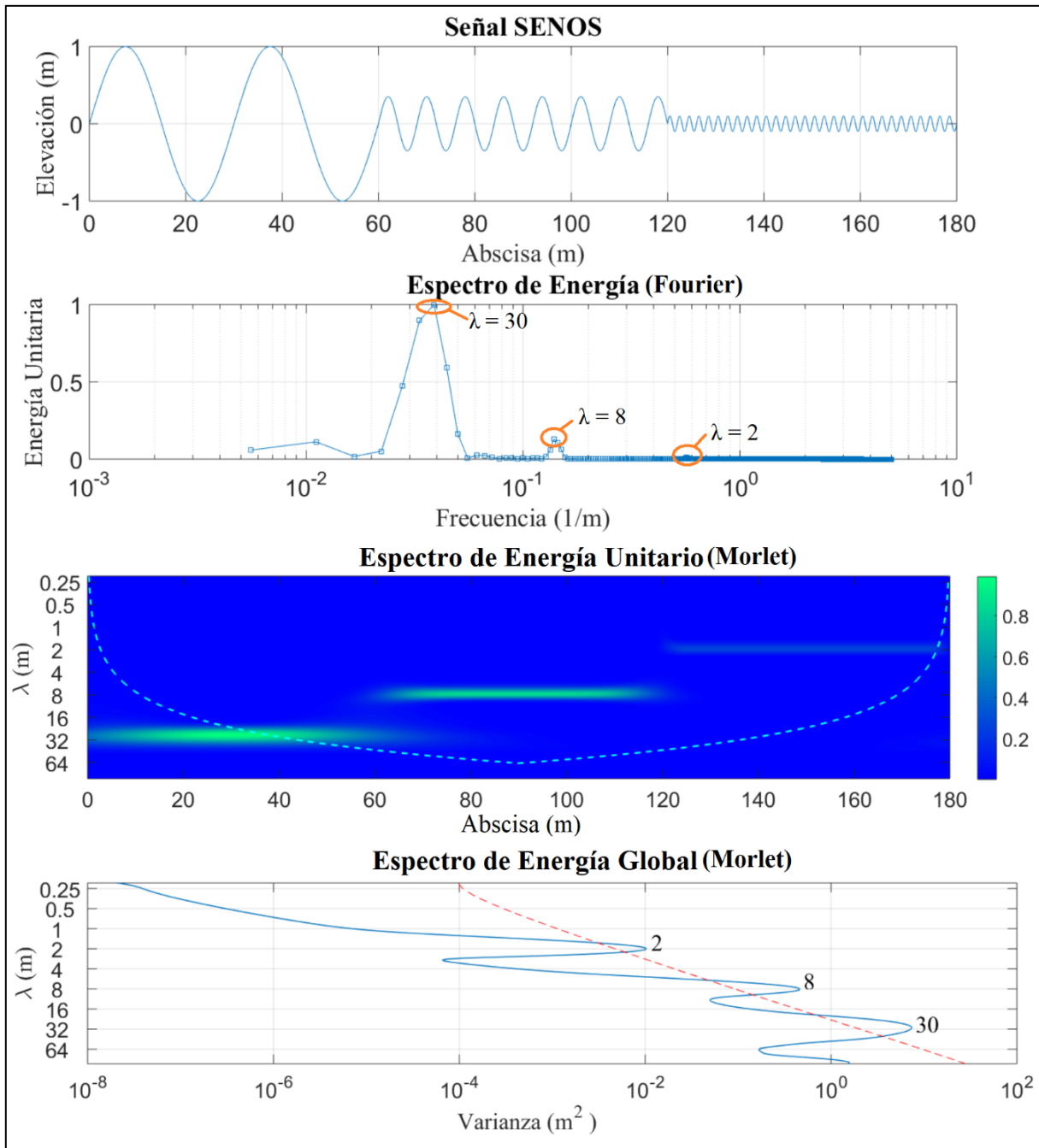


FIGURA 4. 2. EJEMPLO DEL ANÁLISIS ESPECTRAL DE UNA SEÑAL SINODAL.

Como puede observarse en la Figura 4. 2, en el espectro de energía en base a la transformada discreta de Fourier puede identificarse claramente la frecuencia correspondiente a la longitud de onda de 30 metros, sin embargo, la baja energía de las otras frecuencias dominantes dificultan su identificación. En contraste, en el espectro de energía global obtenido con la curva tipo Morlet, las tres frecuencias dominantes son fácilmente identificables, este ejemplo

muestra que el uso de wavelets se justifica al analizar señales con varias frecuencias dominantes como lo son las señales unidimensionales de formas de fondo de un cauce natural.

4.1.3. Diagramas de Hovmöller

El diagrama de Hovmöller es un gráfico de contorno 2D utilizado para mostrar la variación de frecuencias obtenidos con análisis wavelets, en este caso, perfiles de formas de fondo longitudinales, lo cual permite ver la distribución de las distintas frecuencias tomando en cuenta, también, distintas ubicaciones transversales. El diagrama es el resultado de promediar-escalar el espectro espacial de energía del análisis con curvas wavelets (obtenido de la ecuación [4.9]) de las señales de formas de fondo sobre un cierto rango de escalas longitudinales en cada ubicación transversal (Catano-Lopera et al, 2009).

El diagrama resultante permite la evaluación de la variabilidad de la distribución de energía en las direcciones longitudinal y transversal, así como; aislar variables caracterizadas por un cierto rango de dimensiones dominantes (en este estudio, la variable analizada es la longitud de onda de la formas de fondo simuladas). Además, es posible resaltar las zonas en base al espectro espacial de energía que tiene cierto intervalo de confianza (comúnmente entre 80% y 95%), esto utilizando la función de auto correlación en cada ubicación (Torrence y Compo, 1998).

4.1.4. Correlación Cruzada de Señales Unidimensionales

Un análisis con la función de correlación cruzada permite la determinación estadística del grado de similitud entre dos señales de formas de fondo, ya sea en diferentes pasos espaciales o temporales. Con el coeficiente de correlación cruzada se puede obtener una medida que cuantifica la dependencia lineal entre dos señales unidimensionales (Singh et al, 2011). El coeficiente de correlación cruzada entre dos señales de morfología fluvial x_1 y x_2 , con N puntos separados a una distancia Δx , es:

$$Xcorr_{(x_{1n}, x_{2n})} = \frac{\sum_{n=0}^{N-1} [(x_{1n} - \bar{x}_1) - (x_{2n} - \bar{x}_2)]}{N * \sigma_{x_1} * \sigma_{x_2}} \quad [4.15]$$

Donde en la ecuación [4.15], \bar{x}_1 y \bar{x}_2 son los valores medios de la señal, σ_{x_1} y σ_{x_2} los valores de la desviación estándar de las señales analizadas. Relacionando las señales unidimensionales de formas de fondo con la correlación cruzada, se puede obtener el desplazamiento o desfase promedio entre dos señales, que se presenta en el valor máximo del coeficiente de correlación cruzada obtenido con la ecuación [4.15]. Para esto se realiza un reordenamiento de las señales analizadas en base a un vector que se define como X_{Lag} , respetando el paso espacial Δx , pero situando el punto cero en el parte central de datos. El desplazamiento o desfase promedio entre las dos señales corresponde al punto X_{Lag} donde el coeficiente de correlación cruzada $Xcorr$ es máximo.

4.2. Análisis de Resultados

Se ha planteado identificar las escalas dominantes de formas de fondo mediante las técnicas de análisis espectral, lo que permitirá establecer la variabilidad espacial de la morfología fluvial y cuantificar la influencia de las distintas escalas de formas de fondo en el campo de flujo y en la resistencia que ejercen las fronteras sólidas sobre la corriente. La hipótesis es que en un cauce de aguas poco profundas, los procesos hidrodinámicos relacionados con las formas de fondo tendrían características tridimensionales.

La densidad espacial y temporal de los resultados simulados de la morfología fluvial, han permitido plantear como innovación de este trabajo el de emplear metodologías de análisis espectral en base a la transformada discreta de Fourier y curvas wavelets tipo Morlet para describir las escalas dominantes de las señales de formas de fondo estimadas y verificar la hipótesis de distribución tridimensional de la geometría del fondo del cauce.

Se han procesado 21 señales unidimensionales de morfología fluvial simuladas en el tramo del río Tercero para el evento de $113.85 \text{ m}^3/\text{s}$, correspondiente al paso temporal de 20000 segundos y separadas uniformemente a una distancia aproximada de 1 metro, como se presenta a continuación en la Figura 4. 3:

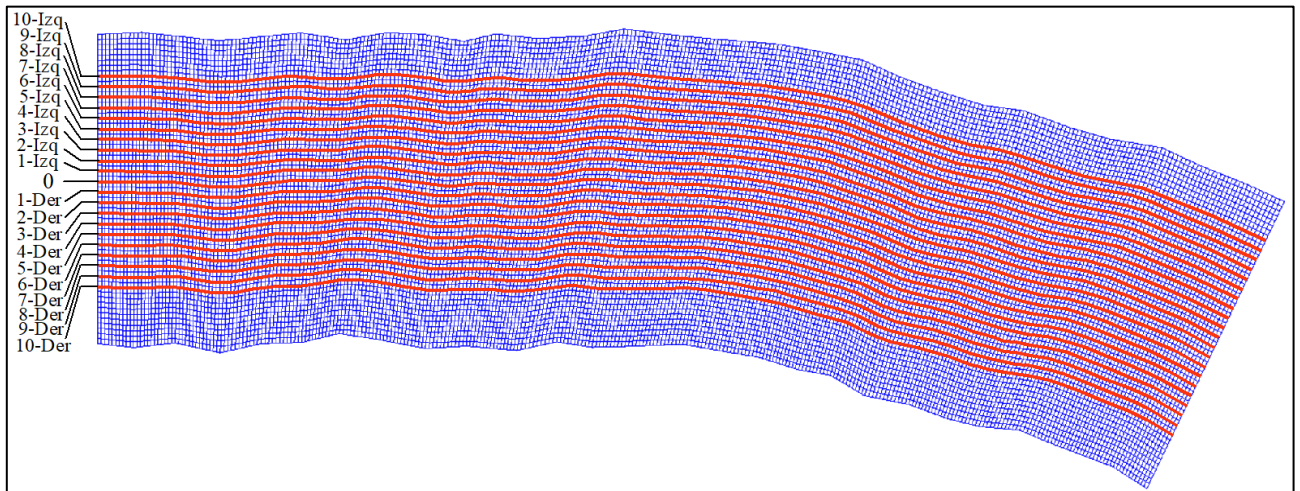


FIGURA 4. 3. ESQUEMA DE LA SEÑALES UNIDIMENSIONALES DE FORMAS DE FONDO ANALIZADAS.

Se puede observar en la Figura 4. 3 que las señales longitudinales de morfología fluvial han sido extraídas en dirección de las líneas de flujo en el tramo del río Tercero simulado. A continuación en la Figura 4. 4 se presentan las 21 señales unidimensionales de morfología fluvial simuladas y proyectadas con pendiente nula y media cero, que corresponden al evento de $113.85 \text{ m}^3/\text{s}$:

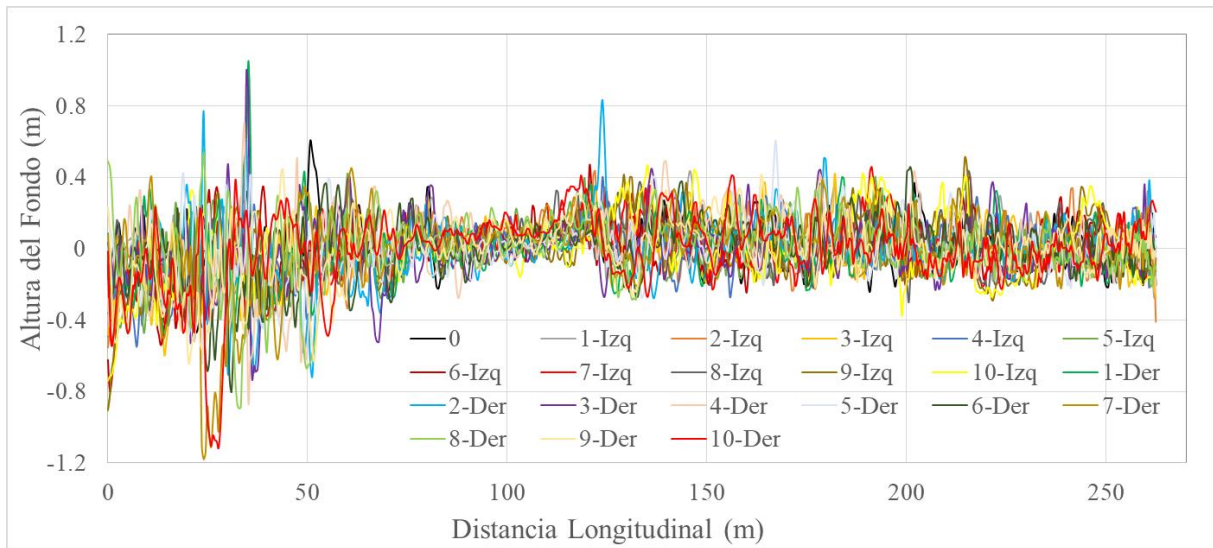


FIGURA 4. 4. SEÑALES UNIDIMENSIONALES DE FORMAS DE FONDO SIMULADAS EN SSIIM, $Q = 113.85 \text{ m}^3/\text{s}$.

De la Figura 4. 4 se desprende que las 21 señales analizadas tendrían un orden de magnitud similar respecto a sus dimensiones geométricas.

Es importante destacar que el análisis espectral mediante la transformada discreta de Fourier y curvas wavelets tipo Morlet ha sido una herramienta fundamental a lo largo de este trabajo, que se ha utilizado para estimar las dimensiones dominantes de las señales unidimensionales de formas de fondo con alta variabilidad de frecuencias. Los valores de altura Δ y de la longitud λ de las formas de fondo presentados en las Tabla 2. 4, Tabla 2. 5, Tabla 2. 6, Tabla 3. 4, Tabla 3. 6, Tabla 3. 7, Tabla 3. 8 y Tabla 3. 9 han sido obtenidos en base al análisis espectral descrito en los párrafos previos.

La longitud λ de las formas de fondo se obtiene directamente de análisis espectral de frecuencias; y para obtener la altura Δ de las formas de fondo es necesario un paso adicional, que consiste en la identificación de las formas de fondo existentes (proceso tiene como parámetro el espectro de bandas de longitud dominantes) y en base a esta identificación se procede a obtener una altura Δ promedio de todas las formas de fondo analizadas.

A continuación en la Figura 4. 5 se presenta el análisis de frecuencias con la transformada discreta de Fourier y con curvas wavelets tipo Morlet realizado sobre la señal “0” de la morfología fluvial en el tramo analizado para un evento de $113.85 \text{ m}^3/\text{s}$:

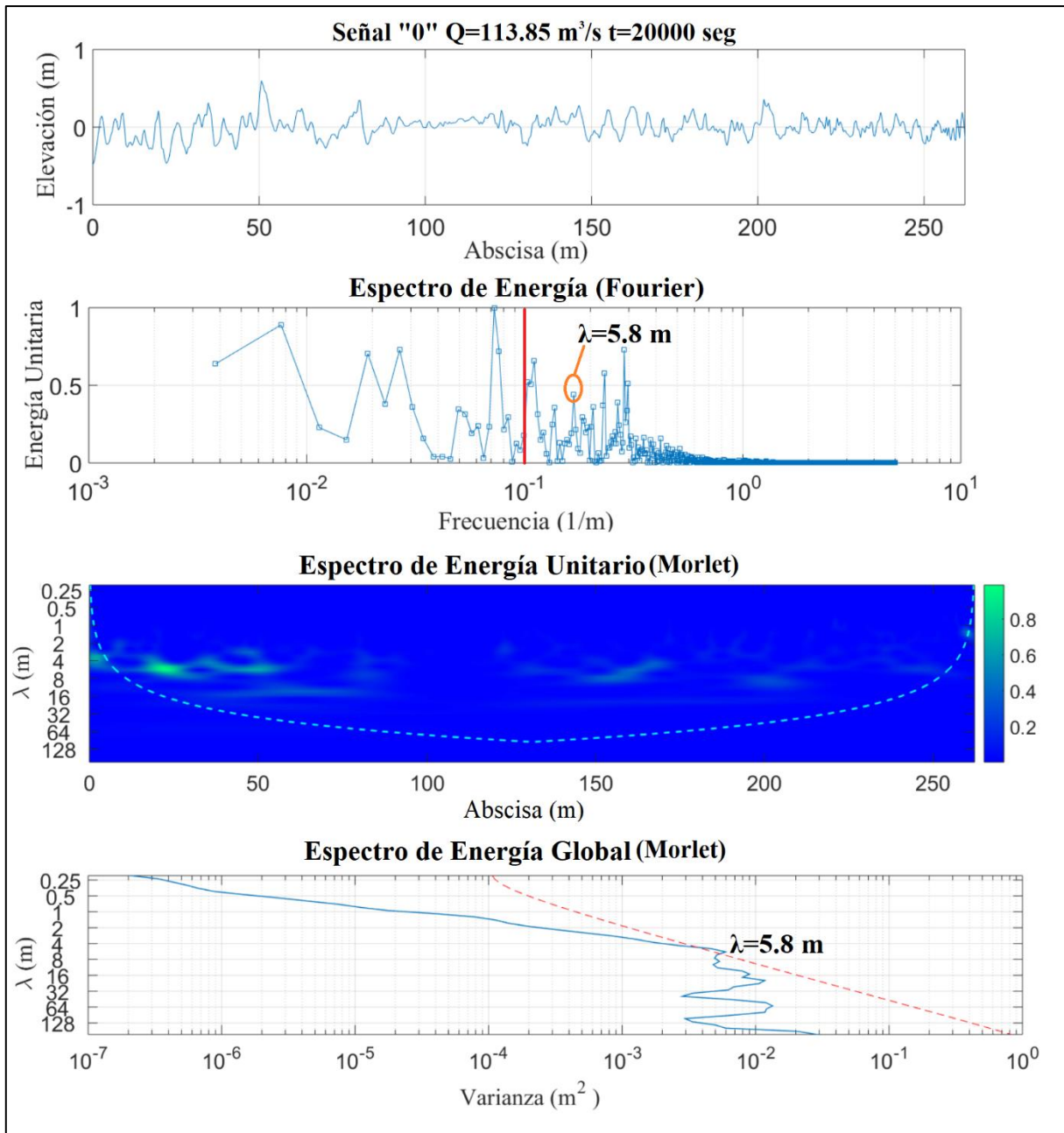


FIGURA 4. 5. ANÁLISIS DE FRECUENCIAS CON LA TRANSFORMADA DE FOURIER Y CURVAS WAVELETS TIPO MORLET, SEÑAL "0" $Q = 113.85 \text{ m}^3/\text{s}$.

Como se puede ver en la Figura 4. 5, con el espectro de energía dado por la transformada discreta de Fourier se dificulta observar con claridad las frecuencias dominantes atribuidas a las formas de fondo tipo dunas, esto se debe a la fuga de energía presentada por las dimensiones de baja frecuencia atribuidas a curvaturas longitudinales del río Tercero que no se consideran en el espectro de formas de fondo (a la izquierda de la línea roja sólida) y a la alta variabilidad de frecuencias de las formas de fondo tipo dunas que presentan diferentes dimensiones a lo largo de la señal.

Si se normaliza sobre la varianza el espectro de energía global obtenido con la transformación wavelet con la curva tipo Morlet en cada longitud característica de la señal se puede obtener el espectro de energía global, donde la línea punteada color rojo representa el intervalo de confianza correspondiente al 80% de la función wavelet considerada y la longitud dominante se obtiene en el máximo valor sobre el intervalo de confianza considerado.

A continuación en la Tabla 4. 1 se presenta los resultados de las dimensiones dominantes obtenidos del análisis espectral realizado sobre las 21 señales presentadas en la Figura 4. 4:

TABLA 4. 1. RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE FRECUENCIAS REALIZADO EN LAS SEÑALES UNIDIMENSIONALES DE FORMAS DE FONDO SIMULADAS EN SSIIM, $Q = 113.85 \text{ m}^3/\text{s}$.

Señal	Δ (m)	λ (m)	h (m)	Δ/λ	Δ/h
0	0.35	5.80	2.70	0.06	0.13
1-Der	0.36	6.60	2.71	0.06	0.13
1-Izq	0.33	4.60	2.70	0.07	0.12
2-Der	0.42	6.40	2.74	0.06	0.15
2-Izq	0.34	5.80	2.70	0.06	0.12
3-Der	0.39	6.00	2.72	0.07	0.14
3-Izq	0.34	5.20	2.71	0.07	0.13
4-Der	0.41	6.60	2.72	0.06	0.15
4-Izq	0.31	4.10	2.70	0.08	0.11
5-Der	0.39	5.00	2.71	0.08	0.15
5-Izq	0.33	4.80	2.71	0.07	0.12
6-Der	0.33	4.40	2.73	0.08	0.12
6-Izq	0.31	6.20	2.70	0.05	0.12
7-Der	0.35	6.40	2.74	0.06	0.13
7-Izq	0.35	4.40	2.68	0.08	0.13
8-Der	0.38	5.80	2.70	0.07	0.14
8-Izq	0.31	6.00	2.65	0.05	0.12
9-Der	0.33	5.80	2.68	0.06	0.12
9-Izq	0.32	4.40	2.62	0.07	0.12
10-Der	0.33	5.80	2.65	0.06	0.12
10-Izq	0.31	6.00	2.59	0.05	0.12
Promedio:	0.35	5.53	2.69	0.06	0.13

De los resultados de la geometría media de las señales de formas de fondo presentados en la Tabla 4. 1 se calculó el empinamiento (Δ/λ) y altura relativa (Δ/h) que relaciona la altura de las dunas con la profundidad del flujo h ; se observa que las señales analizadas en el tramo del río Tercero aguas abajo del puente Juan Bautista Alberdi tienen el mismo orden de magnitud. También, el promedio de la altura Δ de las formas de fondo en el tramo del río Tercero para el evento de $113.85 \text{ m}^3/\text{s}$ es de 35 centímetros y se observa una banda de periodos dominantes de entre 4 a 7 metros, aproximadamente.

A continuación en la Figura 4. 6 se presenta un gráfico de la altura media en función de la longitud media de las dunas correspondientes a las señales analizadas para el evento de $113.85 \text{ m}^3/\text{s}$:

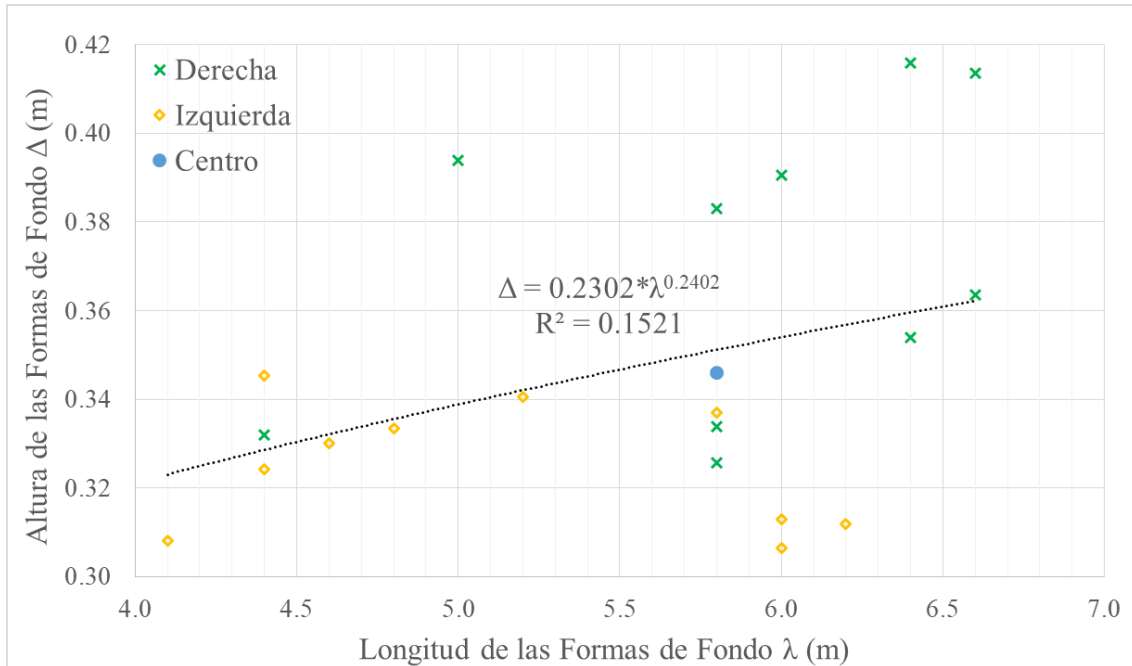


FIGURA 4. 6. RELACIÓN DE LA GEOMETRÍA DE SEÑALES DE FORMAS DE FONDO TIPO DUNAS, $Q = 113.85 \text{ m}^3/\text{s}$.

La Figura 4. 6 muestra que las formas de fondo con mayor magnitud se forman en el lado derecho, lo que es consistente con la pequeña curvatura del tramo analizado; curvatura que puede ser visualizada en el esquema presentado en la Figura 4. 3. También en la Figura 4. 6 se puede observar que las variables geométricas de las formas de fondo tipo dunas, a pesar de tener el mismo orden de magnitud, tienen una dispersión importante con un coeficiente de correlación cuadrático R^2 menor a 0.2, lo que hace suponer que se cumple la hipótesis de la tridimensionalidad de las formas de fondo en el tramo analizado.

Se ha planteado como una cuestión interesante el analizar la distribución de las frecuencias dominantes de la geometría de las formas de fondo simuladas en base a los resultados obtenidos con la función wavelet tipo Morlet, en consecuencia, a continuación en la Figura 4. 7 se presentan los diagramas de Hovmöller para las bandas de longitud de onda de entre 1 a 10 metros:

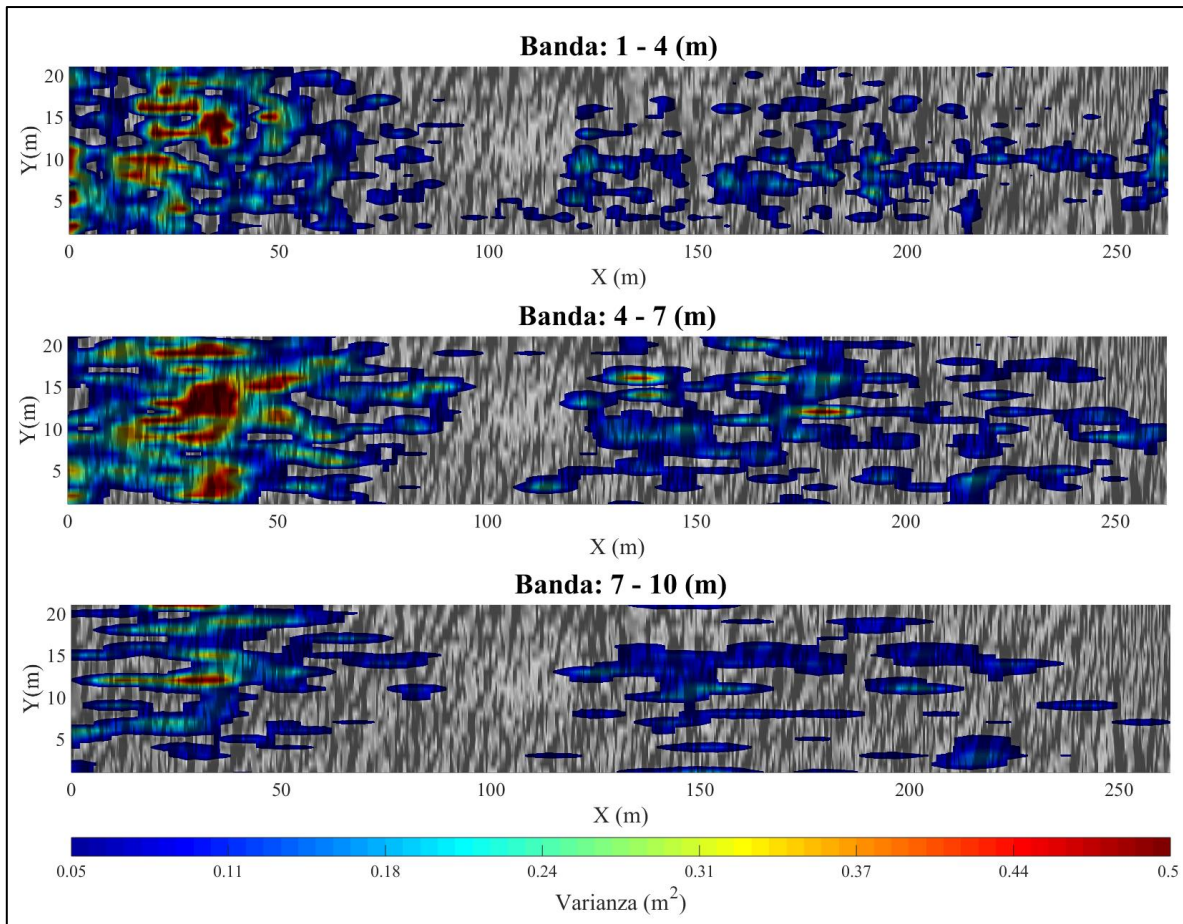


FIGURA 4. 7. DIAGRAMA DE HOVMÖLLER DE FORMAS DE FONDO TIPO DUNAS, $Q = 113.85 \text{ m}^3/\text{s}$.

De la Figura 4. 7 se puede inferir que la mayor variabilidad en las dimensiones de las formas de fondo ocurre antes de los 80 metros de longitud, esta sería la parte en que los procesos tridimensionales serían dominantes respecto a todo el tramo de 270 metros simulados. También, alrededor de la abscisa de 100 metros se observa que los resultados de las dimensiones de formas de fondo simuladas son de menor magnitud, comparables con formas de fondo tipo rizos, y por lo tanto, diferentes en magnitud a las formas de fondo tipo dunas que se presentan simuladas en los otros tramos. A partir de la abscisa 120, las dimensiones de formas de fondo simuladas, tendrían una longitud de onda dominantes de entre 4 y 7 metros, que pertenecen al orden de las formas de fondo tipo dunas simuladas en los primeros 80 metros pero con menor variabilidad.

Otro argumento para que la hipótesis de tridimensionalidad planteada sea demostrada se presenta a continuación, con los resultados de la Tabla 4. 2 de los desplazamientos o desfases promedio obtenidos con la correlación cruzada entre dos señales de formas de fondo contiguas:

TABLA 4. 2. DESFASAJE ENTRE SEÑALES UNIDIMENSIONALES CONTIGUAS DE FORMAS DE FONDO SIMULADAS EN SSIIM, $Q = 113.85 \text{ m}^3/\text{s}$.

Señales	Δx (m)
10-9-Izq	0.3
9-8-Izq	-1.2
8-7-Izq	1.2
7-6-Izq	-0.4
6-5-Izq	0.9
5-4-Izq	-3.8
4-3-Izq	1.4
3-2-Izq	-2.1
2-1-Izq	1.3
0-1-Izq	0.9
0-1-Der	-0.7
1-2-Der	0.8
2-3-Der	-0.2
3-4-Der	1.0
4-5-Der	1.3
5-6-Der	1.5
6-7-Der	-2.0
7-8-Der	-7.3
8-9-Der	-1.6
9-10-Der	-1.4

Como se observa en la Tabla 4. 2, en base a los resultados de desfase Δx obtenidos de la correlación cruzada, las dimensiones de las señales longitudinales contiguas están desfasadas en promedio 1.5 metros, que es alrededor de un 25% de la longitud media de las formas de fondo simuladas para el evento de $113.85 \text{ m}^3/\text{s}$; con lo que aunado a la dispersión de la geometría media de las formas de fondo observada en la Figura 4. 6, se llega a la conclusión de que la evolución espacial de la morfología del lecho a lo largo del tramo del río Tercero aguas abajo del puente Juan Bautista Alberdi presenta características tridimensionales.

Finalmente, en base a la correlación cruzada se analizarán las señales de morfología fluvial correspondientes a pasos temporales de 18000 y 20000 segundos, que fueron presentadas en las Figura 3. 34, Figura 3. 35, Figura 3. 36 y Figura 3. 37; el objetivo es estimar la celeridad promedio de las formas de fondo tipo dunas, resultados que serán validados con los datos obtenidos mediante el ADCP que fueron presentados en la Tabla 2. 1. A continuación en la Tabla 4. 3 se presentan los resultados de velocidad promedio de las dunas simuladas:

TABLA 4. 3. ESTIMACIÓN DE LA CELERIDAD EN BASE AL ANÁLISIS DE CORRELACIÓN CRUZADA EN SEÑALES CON PASOS DE TIEMPO DE 18000 Y 20000 SEGUNDOS.

Q (m ³ /s)	Δx (m)	u _{dunaSSIIM} (m/s)	u _{dunaADCP} (m/s)
113.85	0.4	0.00020	0.00119
65.84	0.7	0.00035	0.00093
24.90	0.2	0.00010	0.00033
18.89	0.2	0.00010	0.00042

Como puede observarse en la Tabla 4. 3, el valor la celeridad promedio estimada en base a la correlación cruzada de las señales simuladas en SSIIM se subestima si es contrastada con los datos de celeridad de formas de fondo tipo dunas medidas con ADCP en el tramo del río Tercero analizado. Aunque es importante destacar, que por la alta variabilidad en el espacio y tiempo de la celeridad de las formas de fondo en un cauce natural, se acepta que los valores presentados en la Tabla 4. 3 presentan una buena aproximación. Esto se suma al hecho de contrastar valores puntuales de celeridad medidos con ADCP con la estimación de celeridad promedio en base a señales de morfología simuladas a lo largo de un tramo de 270 metros. Para justificar esto, a continuación en la Figura 4. 8 se presenta una duna que corresponde a la señal unidimensional de morfología de fondo presentada en Figura 3. 34 del evento de 113.85 m³/s:

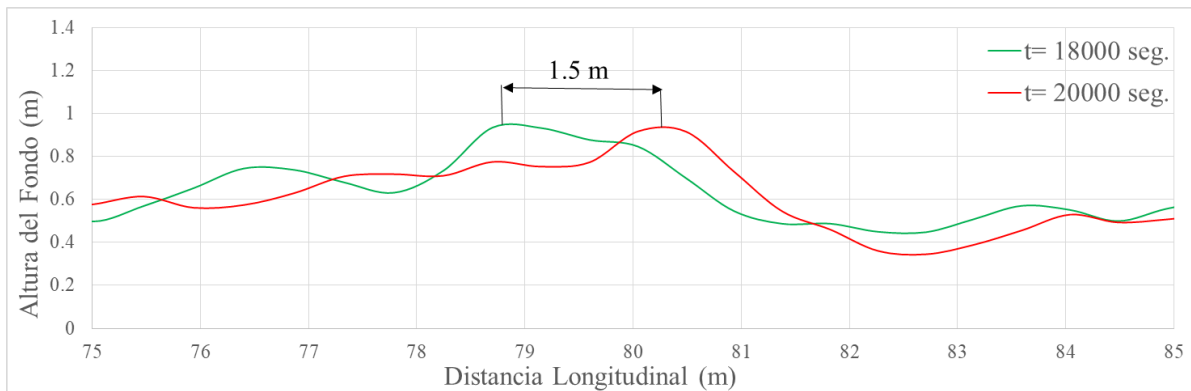


FIGURA 4. 8. DUNA PERTENECIENTE A LA PROYECCIÓN DE UN CORTE LONGITUDINAL DE LA MORFOLOGÍA FLUVIAL DEL RÍO TERCERO, Q = 113.85 M³/S.

La celeridad que corresponde a la duna presentada en la Figura 4. 8 tiene una magnitud de 0.00075 m/s, que está en el orden de los valores de celeridad presentados en la Tabla 4. 3. Se podría obtener puntualmente la celeridad de cientos de dunas en cada una de las señales resultantes de la simulación de la morfología fluvial, pero se acepta que la aproximación obtenida con la técnica de correlación cruzada tiene órdenes de magnitud adecuados.

Capítulo 5:

Conclusiones, Recomendaciones y Aspectos Innovadores

5. Conclusiones, Recomendaciones y Aspectos Innovadores

5.1. Conclusiones

La motivación de este trabajo, que se centra en ríos con características de aguas poco profundas, viene dada por el impacto que tienen este tipo de cauces naturales en su paso por ciudades en desarrollo; por lo tanto, el estudio presentado será de utilidad para los grupos de investigación vinculados a obras civiles en busca de mejorar la situación de riesgo hídrico. El enfoque bidimensional planteado para la solución de las variables de ríos con características de aguas poco profundas ha sido extensamente adoptado en investigaciones previas, con buenos resultados al estimar la mayoría de las variables. En este trabajo, se destaca la importancia de un cambio en este paradigma, con el objetivo principal de analizar con herramientas estadísticas los resultados de las variables hidrodinámicas y de transporte de sedimentos tomando en cuenta un enfoque tridimensional, que ha permitido una descripción detallada de la distribución de las formas de fondo y su interacción con el campo tridimensional del flujo en un cauce natural con aguas poco profundas. A continuación se presentan las principales conclusiones alcanzadas en base al estudio realizado en un dominio particular, que bajo las consideraciones necesarias, se podrán extender a otros cauces naturales con características similares.

Se ha definido el tramo del río Tercero en su paso por la ciudad de Villa María para el estudio de la solución numérica de la hidrodinámica tridimensional con transporte de sedimentos; el tramo tiene características de aguas poco profundas con relación de profundidad pequeña respecto al ancho de la sección del flujo, con pendiente de fondo correspondiente a la de un cauce de planicie (0.03%) y con el material del lecho de tipo arenoso; que fue clasificado con la metodología del sistema de clasificación de suelos unificado (USCS por sus siglas en inglés), como de arenas pobremente graduadas con poco o nada de finos con un diámetro característico por el que pasa el 90% del material de $D_{90} = 3.5$ milímetros y diámetro medio del material de $D_{50} = 0.55$ milímetros.

Se seleccionó el esquema de cálculo basado en el modelo SSIIM (Sediment Simulation In Intakes with Multiblock Option). SSIIM es una herramienta de mecánica de fluidos computacional para la simulación de variables de flujo tridimensional y transporte de sedimentos en flujos con superficie libre. El modelo SSIIM resuelve las ecuaciones tridimensionales de Navier Stokes promediadas por Reynolds con un modelo de cierre de la turbulencia $K - \varepsilon$. Las velocidades de flujo resultantes pueden ser usadas para resolver la ecuación de advección-difusión de la concentración para diferentes tamaños de sedimentos en el flujo. De los resultados de las variables de flujo y de la solución de las ecuaciones de transporte de partículas, se deriva la tasa de eficiencia y el patrón de deposición del sedimento para estimar cambios en el fondo del flujo. Se considera importante destacar que el software es de libre distribución y tiene algunas librerías en código abierto para el desarrollo de metodologías de cálculo.

Se construyeron mallas estructuradas para la discretización del dominio espacial a partir de 479 puntos de 30 secciones en 270 metros de longitud del río Tercero, y con la sección inicial

a aproximadamente 6 metros de distancia aguas abajo del puente Juan Bautista Alberdi en la ciudad de Villa María. Las mallas construidas para cada evento, en función de las condiciones de contorno de profundidad de flujo, tienen una media de 1183025 elementos hexaédricos y han presentado buena calidad respecto a los índices de ortogonalidad y forma de los elementos.

Se implementó y validó satisfactoriamente el flujo del río Tercero con procesos de transporte de sedimentos en su paso por la ciudad de Villa María aguas abajo del puente Juan Bautista Alberdi en el modelo hidrodinámico tridimensional SSIIM. La variable de resistencia al flujo, depende de las dimensiones de las partículas y de la variabilidad espacial de la morfología del río. Los resultados simulados de velocidad media fueron contrastados con los medidos con el instrumento ADCP, mostrando índices en magnitud y forma satisfactorios que reflejan un error porcentual promedio absoluto de aproximadamente 6%. También, los resultados de transporte de partículas de fondo simulados en SSIIM fueron contrastados con datos estimados mediante las observaciones de formas de fondo con el instrumento ADCP, presentando resultados satisfactorios y con una aproximación aceptable.

De la aplicación de modelos numéricos se identificó zonas de estancamiento, aceleración y recirculación en el flujo tridimensional; la localización de estas zonas es principalmente en las cercanías a las márgenes del río. Estos fenómenos se atribuyen, principalmente, a la interacción del flujo turbulento con las fronteras sólidas; su magnitud es función de la intensidad del flujo y de la variabilidad de la morfología del cauce natural simulado.

En base a los resultados obtenidos de la simulación en SSIIM del transporte de sedimentos en el tramo del río Tercero aguas abajo del puente Juan Bautista Alberdi, se ha estimado que el valor de $\delta_b = 30 * D_{90}$ se aproxima a la profundidad de la capa activa de transporte de sedimentos de fondo y su interacción con los sedimentos en suspensión. También a partir del perfil vertical de transporte de partículas, se ha llegado a la conclusión que el cauce estudiado presenta condiciones de flujo diluidas de transporte de sedimentos en suspensión, con valores cercanos al 5% del transporte total de sedimentos.

Con la herramienta SSIIM, se estimaron los cambios en la morfología fluvial para 18 eventos simulados en el rango de 9.64 m³/s hasta 121.22 m³/s en el dominio del río Tercero aguas abajo del puente Juan Bautista Alberdi; la metodología de cálculo se basó en la solución de la ecuación de balance de masa del transporte de sedimentos de fondo estimada con la metodología desarrollada por van Rijn (1984^a, 1984^b y 1984^c) y la implementación numérica se basó en la metodología desarrollada por Olsen (2014). Se extrajeron las señales de formas de fondo simuladas en SSIIM para ser contrastadas con señales de morfología medidas con ADCP en los primeros 60 metros del tramo estudiado, que reflejaron resultados satisfactorios en el mismo orden de las dimensiones de formas de fondo observadas y simuladas.

Se realizó un análisis de sensibilidad de las variables de flujo tridimensional con procesos de transporte de sedimentos simuladas en el dominio considerado del río Tercero, donde se destacó el uso de mallas estructuradas, con discretización no uniforme en la vertical, que han mostrado calidad adecuada para el cálculo de las variables respecto a la ortogonalidad y

forma de los elementos; reflejando precisión, convergencia y estabilidad adecuada en los resultados.

De los resultados de simulación del flujo tridimensional y morfología de fondo del tramo del río Tercero aguas abajo del puente Juan Bautista Alberdi, se observó que la altura de rugosidad del fondo calculada al tomar en cuenta las formas de fondo simuladas presenta variación respecto a la magnitud del evento; con una tendencia similar para eventos con caudal mayor a $50 \text{ m}^3/\text{s}$ con altura de rugosidad media de aproximadamente 22 centímetros y para los eventos con caudal menor a $50 \text{ m}^3/\text{s}$ se estimó una altura de rugosidad media de 5 centímetros.

Para justificar la elección del paso de tiempo, se ha realizado un análisis de las dimensiones de la ecuación de balance de masa del transporte de sedimentos en base a los datos estimados en mediciones con ADCP; siendo el paso de tiempo seleccionado de 20 segundos, con 100 iteraciones para la solución de las variables de transporte de sedimentos y 200 iteraciones para la corrección del flujo turbulento en cada paso de tiempo. También se justificó que el estado de régimen que alcanzan las formas de fondo simuladas en el tramo del río Tercero es a partir de los 16000 segundos.

En base al análisis de frecuencias dominantes de las señales de morfología fluvial simuladas en el flujo del río Tercero, aplicando la transformada discreta de Fourier y las funciones wavelets tipo Morlet, se obtuvo alturas promedio de las formas de fondo tipo dunas en el orden de 35 centímetros; así como bandas de longitud de onda dominantes en el orden de 4 a 7 metros. También, se observó que las formas de fondo con mayor magnitud se han desarrollado en el lado derecho del tramo, lo que es consistente con la curvatura que presenta, y se determinó que existe un comportamiento tridimensional en la distribución espacial de la geometría de las formas de fondo a lo largo del tramo analizado.

También, mediante diagramas de Hovmöller, se presentaron resultados de la distribución de las frecuencias dominantes de la geometría de las formas de fondo simuladas en base a los resultados obtenidos con la función wavelet tipo Morlet, y se llegó a apreciar que los procesos tridimensionales ocurrirán principalmente en los primeros 80 metros del tramo simulado.

Con la técnica de correlación cruzada de señales unidimensionales de morfología que corresponden a diferentes pasos temporales, se estimó la celeridad de las formas de fondo tipo dunas desarrolladas en el tramo del río Tercero aguas abajo del puente Juan Bautista Alberdi de la ciudad de Villa María, presentando resultados satisfactorios y en el mismo orden de magnitud que la celeridad de formas de fondo observadas con un instrumento ADCP.

5.2. Recomendaciones

En este trabajo de investigación, previo a la obtención del título de Doctor en Ciencias de la Ingeniería, se simuló de manera satisfactoria el flujo tridimensional con procesos de transporte de sedimentos del río Tercero en el tramo aguas abajo del puente Juan Bautista Alberdi de la ciudad de Villa María. Los procesos hidráulicos que pueden ser simulados en

el flujo de un cauce natural tienen una gran cantidad de variables, que dependiendo de su nivel de incidencia en los resultados, deberán ser tomadas en cuenta en las ecuaciones que representan el flujo de un río. A continuación, se presentan algunas recomendaciones, con las que se podría mejorar u optimizar cuestiones relacionadas a la metodología de simulación y análisis que se llevó a cabo en este trabajo:

- En la modelación numérica, cuando se va a definir un parámetro de rugosidad dada por los efectos de resistencia que ejercen las fronteras sólidas en el flujo; se recomienda incluir todos los efectos relevantes, como lo son la variabilidad espacial de la morfología fluvial, vegetación, cambios de pendiente repentinos, forma del cauce en planta y la distribución de la granulometría a lo largo del tramo estudiado.
- Se podría tomar en cuenta la distribución inicial de las velocidades en la sección de entrada, para lo cual se recomienda tener esta información en base a una caracterización experimental detallada, que puede ser llevada a cabo con el instrumento ADCP en la sección inicial del modelo para la serie de caudales que se desea simular.
- Se recomienda probar con otros tamaños y distribución de las celdas de las mallas en la discretización del dominio espacial, con el objetivo de mejorar la resolución de los resultados de las variables de flujo con procesos de transporte de sedimentos y bajar tiempos de simulación, con comportamientos de precisión, convergencia y estabilidad adecuados. Inclusive se podría tomar en cuenta otros métodos de discretización espacial, como por ejemplo de mallas no estructuradas.
- En este trabajo se tomó en cuenta la formulación dada por van Rijn (1984^a, 1984^b y 1984^c) para estimar las variables de transporte de sedimentos de fondo. Se recomienda probar otras metodologías o innovar formulación para estimar los procesos de transporte de partículas para ser aplicados en cauces con características propias. También se recomienda tomar en cuenta otras metodologías para la simulación del flujo tridimensional, como por ejemplo, probar otros esquemas de discretización de las ecuaciones de estado o distintos modelos de cierre de la turbulencia.
- Para la simulación de la hidrodinámica tridimensional de un cauce natural, se recomienda tener la mejor resolución espacial posible, que se basa en el modelo digital del terreno construido con puntos topográficos que deberán ser actualizados en campañas de medición.
- Obtener mejor y mayor información de la caracterización de las variables de flujo y transporte de sedimentos siempre es un reto, por lo que se recomienda direccionar los recursos y esfuerzos para obtener equipos y metodologías de vanguardia que permitan el mayor detalle de caracterización de estos procesos físicos que ocurren en la naturaleza.
- Se recomienda tomar en cuenta métodos de análisis de vanguardia para validar los resultados en función de los datos disponibles de la caracterización del dominio que será modelado.

5.3. Aspectos Innovadores Alcanzados

La densidad espacial y temporal de los resultados simulados de la hidrodinámica tridimensional, transporte de sedimentos y evolución de las formas de fondo del río Tercero aguas abajo del puente Juan Bautista Alberdi de la ciudad de Villa María, han permitido direccionar los aspectos innovadores al estudio de un tramo con características de aguas poco profundas y con pendiente de fondo correspondiente a la de un cauce de planicie. Con la ayuda de técnicas estadísticas y de análisis espectral se han identificado las escalas dominantes de formas de fondo para establecer la variabilidad en tiempo y espacio de la morfología fluvial y cuantificar la influencia de las distintas escalas de formas de fondo en el campo del flujo y en la resistencia que ejercen las fronteras sólidas sobre la corriente.

Se ha demostrado la hipótesis planteada al iniciar la investigación, que en un cauce natural de aguas poco profundas, los procesos hidrodinámicos relacionados con las formas de fondo tendrían características tridimensionales, razón por la que también se ha justificado el uso de un modelo tridimensional para simular los procesos hidrodinámicos del tramo del río Tercero aguas abajo del puente Juan Bautista Alberdi.

El principal alcance innovador de este trabajo, ha sido el plantear que en ríos de aguas poco profundas y con pendiente de fondo correspondiente a la de un cauce de planicie, los procesos tridimensionales tendrían magnitudes importantes en el proceso de interacción del flujo turbulento con las fronteras sólidas y se destaca que estos procesos tridimensionales deberán ser evaluados al simular flujos en cauces naturales con las características planteadas.

Se recomienda, que las técnicas de medición en cauces de aguas poco profundas, también tomen en cuenta la tridimensionalidad de los procesos que podrían ocurrir cerca del fondo en este tipo de ríos, sobre todo cuando se tiene como objetivo el caracterizar variables de flujo, transporte de sedimentos y la evolución de la morfología en el fondo del cauce. El enfoque bidimensional, o hasta a veces unidimensional en sentido longitudinal, que se le da a este tipo de ríos, puede llevar a errores en el cálculo e interpretación de las variables hidráulicas y sedimentológicas que se buscan estimar.

Capítulo 6:

Referencias

6. Referencias

Afzal M. S. 2013. “3D Numerical Modelling of Sediment Transport under Current and Waves”. Erasmus Mundus MSC Programme. Norwegian University of Science and Technology.

Bendat J. S., Piersol A.G. 2000. “Random Data”. Third Edition. John Wiley & Sons, INC. United States of America.

Catano-Lopera Y., Abad J. D., Garcia M. H. 2009. “Characterization of Bedform Morphology Generated under Combined Flows and Currents Using Wavelet Analysis”. *Ocean Engineering*, 36, pp. 617–632.

Charlesworth D. J. 2003. “Solution of the Incompressible Navier Stokes Equations on Unstructured Meshes”. Thesis Submitted for the Degree of Doctor of Philosophy of the University of London and Diploma of Imperial College. Department of Mechanical Engineering. Imperial College London.

Cossavella A. M., Carranza P. M., Oroná C., Monarde F., Larrosa N., Nadal F., Roque M., Nuño C., Hunziker M. L., Ferreyra M., Brito R., Saldaño V., Melián J., Bresciano J., Diaz A. 2013. “Gestión de Efluentes Líquidos en la Cuenca del río Tercero (Ctalamochita)”. XXIVº Congreso Nacional del Agua 2013. San Juan, Argentina.

De Villiers E. 2006. “The Potential of Large Eddy Simulation for the Modeling of Wall Bounded Flows”. Thesis Submitted for the Degree of Doctor of Philosophy of the University of London and Diploma of Imperial College. Department of Mechanical Engineering. Imperial College London.

Díaz Lozada J. M. 2014. “Cuantificación y Caracterización del Esgurrimiento Superficial en el Sistema Fluvial del Río Carcaraña”. Tesis de Maestría. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Universidad Nacional de Córdoba.

Díaz Lozada J. M., García C. M., Herrero H., Barchiesi G. M., Romagnoli M., Portapila M., López F., Castelló E., Cossavella A., Brarda J. P. 2015. “Cuantificación del Esgurrimiento Superficial de la Cuenca del Río Carcaraña”. *Revista Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Universidad Nacional de Córdoba*, 2(1), pp. 59-72.

Dwivedi A., Melville B., Shamseldin A. Y. 2010. “Hydrodynamic Forces Generated on a Spherical Sediment Particle during Entrainment”. *Journal of the Hydraulic Division, American Society of Civil Engineers (ASCE)*, pp. 756 – 769.

Empresa Provincial de Energía de Córdoba (EPEC). 2015. “Generación de Centrales Hidroeléctricas”. Tomado de: <http://www.epec.com.ar/generacion_centrales_h.html>.

Engelund F., Fredsøe J. 1976. “A Sediment Transport Model for Straight Alluvial Channels”. *Nordic Hydrology*, pp. 293–306.

Einstein H. A. 1950. “The Bedload Function for Bedload Transportation in Open Channel Flows”. U.S.D.A. Soil Conservation Service, 1026, pp. 1–71.

Esmaeili T. 2015. “Three-Dimensional Numerical Study on Free Flow Flushing for Enhancing the Efficiency of Sediment Management in Reservoirs”. Thesis Submitted for the Degree of Doctor of Philosophy. Kyoto University, Department of Urban Management, Graduate School of Engineering.

Esmaeili T., Sumi T., Takemon Y., Kantoush S. A. 2013. “3D Numerical Study of Time Dependent Bed Changes in the Flushing Channels for Free Flow Sediment Flushing in Reservoirs”. Kyoto University, Disaster Prevention Research Institute Annuals, pp. 655–666.

Fischer-Antze T., Olsen N., Gutknecht D. 2008. “Three-dimensional CFD modeling of morphological bed changes in the Danube River”. *Water Resources Research*, 44, W09422.

García M. H. 1999. “Sedimentation and Erosion Hydraulics”. *Hydraulic Design Handbook*. Chapter 6. Larry Mays. McGraw-Hill, Inc. New York, USA.

García M. H. 2000. “The Legend of A. F. Shields”. *Journal of Hydraulic Engineering*, 126(9), pp. 718–720.

García M. H. 2008. “Sediment Transport and Morphodynamics”. *Manuals and Reports on Engineering Practice - No. 110*. American Society of Civil Engineers (ASCE), pp. 21-163.

García M. H., Niño Y. 2003. “Flow and Transport Equations in Surface Waters”. CEE 498 *Environmental Hydrodynamics*. Spring Sem. United States of America.

Guo Q. C., Jin Y. C. 1999. “Modeling Sediment Transport Using Depth-Averaged and Moment Equations.” *Journal of Hydraulic Engineering*, 125(12), pp. 1262–1269.

Gutierrez R. R., Abad J. D., Parsons D. R., Best J. L. 2013. “Discrimination of Bed Form Scales Using Robust Spline Filters and Wavelet Transforms: Methods and Application to Synthetic Signals and Bed Forms of the Río Parana, Argentina.” *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 118(3), pp. 1400-1418.

Gutierrez R. R., Abad J. D., Choi M., Montoro H. 2014. “Characterization of Confluences in Free Meandering Rivers of the Amazon Basin.” *Journal of Geomorphology*, 220(2014), pp. 1-14.

Haun S., Dorfmann C., Harb. G. 2015. “3D Numerical Modelling of the Reservoir Flushing of the Bodendorf Reservoir, Austria”. *Proceedings of 2nd IAHR European Conference, Munich, Germany*.

Heredia A. 2017. “Caracterización del Transporte de Sedimentos en el Río Tercero (Ctalamochita) Utilizando Tecnología Acústica Doppler”. Tesis de Maestría. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Universidad Nacional de Córdoba.

Heredia A., García C. M., Diaz Lozada J. M., Szupiany R. N., Latosinski F. G. 2017. “Transporte de Sedimento de Fondo en un Tramo del Río Tercero (Ctalamochita) en la Provincia de Córdoba, Argentina”. VIII° Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos 2017. Córdoba, Argentina.

Hillebrand G., Klassen I., Olsen N. R. B. 2017. “3D CFD Modelling of Velocities and Sediment Transport in the Iffezheim Hydropower Reservoir”. *Journal of Hydrology Research*, 48(1), pp. 147–159.

Hoffmann K. A., Chiang S. T. 2000. “Computational Fluid Dynamics Volume I”. Fourth Edition. Engineering Education System, EES. United States of America.

Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INDEC). 2010. “Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas 2010”. Tomado de: <<http://www.censo2010.indec.gov.ar/>>.

Ishii M., Hibiki T. 2006. “Thermo-fluid Dynamics of Two-Phase Flow”. Springer. New York, USA.

Jasak H. 1996. “Error Analysis and Estimation for the Finite Volume Method with Applications to Fluid Flows”. Thesis Submitted for the Degree of Doctor of Philosophy of the University of London and Diploma of Imperial College. Department of Mechanical Engineering. Imperial College London.

Jasak H., Tukovic Z. 2006. “Automatic Mesh Motion for the Unstructured Finite Volume Method”. *Transactions of FAMENA XXX-2*. ISSN 1333–1124.

Julien P. Y. 2002. “River Mechanics”. Cambridge University Press, New York, USA.

Juretic F. 2004. “Error Analysis in Finite Volume CFD”. Thesis Submitted for the Degree of Doctor of Philosophy of the University of London and Diploma of Imperial College. Department of Mechanical Engineering. Imperial College London.

Khassaf S.I., Hassan A. A. 2014. “Three-Dimensional Sediment Transport Modeling for the Upstream of Al-Amarah Barrage”. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 3(6), pp. 848-855.

Latosinski F. G. 2014. “Estimación y Caracterización del Transporte de Sedimento en Cauces Aluviales Utilizando Tecnología Acústica Doppler”. Tesis de Doctorado. Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura. Universidad Nacional de Rosario.

Latosinski F. G., Heredia A., Diaz Lozada J. M., Szupiany R. N., García C. M., Amsler M. L. 2017. “Estructura del Flujo y Transporte de Sedimento sobre Dunas en Ríos de Distinta Escala”. VIII° Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos 2017. Córdoba, Argentina.

Leonard B. 1979. “A Stable and Accurate Convective Modelling Procedure Based on Quadratic Upstream Interpolation”. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 19(1), pp.59–98.

Liu X., García M. H. 2008. “Numerical Simulation of Local Scour with Free Surface and Automatic Mesh Deformation”. Vent Te Chow Hydrosystems Laboratory, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Illinois. United States of America.

Martínez S. J. 2010. “Cuenca del Río Carcaraña”. Subsecretaría de Recursos Hídricos de la República Argentina.

Mendoza A., Abad J. D., Langendoen E. J., ASCE M., Wang D., Tassi P., Abderrezzak K. E. K. 2016. “Effect of Sediment Transport Boundary Conditions on the Numerical Modeling of Bed Morphodynamics”. *Journal of the Hydraulic Division, American Society of Civil Engineers (ASCE)*.

Meyer-Peter E., Müller R. 1948. “Formulas for Bedload Transport”. 2nd IAHR World Congress, Stockholm.

Nagata N., Hosoda T., Nakato T., Muramoto Y. 2005. “Three-Dimensional Numerical Model for Flow and Bed Deformation around River Hydraulic Structures”. *Journal of Hydraulic Engineering*, 131(12), pp. 1074–1087.

Neary V. S., Wright S. A., Bereciartua P. 2001. “Case Study: Sediment Transport in Proposed Geomorphic Channel for Napa River”. *Journal of Hydraulic Engineering*, 127(11), pp. 901–910.

Nezu I., Nakagawa H. 1993. “Turbulence in Open Channel Flows”. Third Edition. International Association for Hydraulic Research (IAHR), Monograph Series. Netherlands.

Ochoa S., Reyna T., Reyna S., García M., Labaque M., Díaz J.M. 2016. “Modelación Hidrodinámica del Tramo Medio del Río Ctalamochita, Provincia de Córdoba”. *Revista Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba*, 3 (2), pp. 95-101.

Odgaard J. A., Bergs M. 1988. “Flow Processes in a Curved Alluvial Channel”. *Water Resources Research*, 24(1), pp. 45–56.

Olesen K. W. 1987. “Bed Topography in Shallow River Bends”. Thesis Submitted for the Degree of Doctor of the Delft University of Technology. Department of Civil Engineering.

Olsen N. R. B. 1999. “Computational Fluid Dynamics in Hydraulic and Sedimentation Engineering”. Class notes, Department of Hydraulic and Environmental Engineering, Norwegian University of Science and Technology.

Olsen N. R. B. 2000. “CFD Algorithms for Hydraulic Engineering”. Department of Hydraulic and Environmental Engineering, Norwegian University of Science and Technology. ISBN 82-7598-044-5.

Olsen N. R. B. 2012. “Numerical Modelling and Hydraulics”. Department of Hydraulic and Environmental Engineering, Norwegian University of Science and Technology. ISBN 82-7598-074-7.

Olsen N. R. B. 2014. “A Three-Dimensional Numerical Model for Simulation of Sediment Movements in Water Intakes with Multiblock Option”. User’s Manual. Department of Hydraulic and Environmental Engineering, Norwegian University of Science and Technology.

Ota K., Sato T., Nakagawa H. 2016. “3D Numerical Model of Sediment Transport Considering Transition from Bed-Load Motion to Suspension: Application to Local Scours Upstream of Cross-River Structure”. Journal of Japan Society of Civil Engineers (JSCE), pp. 173-180.

Patankar S. V. 1980. “Numerical Heat Transfer and Fluid Flow”. Series in Computational and Physical Processes in Mechanics and Thermal Sciences. Hemisphere Publishing Corporation. United States of America.

Pope S. B. 2000. “Turbulent Flows”. Cambridge University Press, U.K.

Ragessi I. M. 2013. “Caracterización del Flujo Turbulento en Componentes Hidráulicas de una Planta de Tratamiento de Agua Potable para Optimizar su Funcionamiento”. Tesis de Maestría. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Universidad Nacional de Córdoba.

Raudkivi A. J. 1990. “Loose Boundary Hydraulics”. Third Edition. Pergamon Press. United States of America, New York.

Robert A., Uhlman W. 2001. “An Experimental Study on the Ripple-Dune Transition”. Earth Surface Processes and Landforms, 26, pp. 615–629.

Ruther N. 2006. “Computational Fluid Dynamics in Fluvial Sedimentation Engineering”. Thesis for the Degree of Doctor Philosophiae. Norwegian University of Science and Technology, NTNU.

Schlichting H. 1979. “Boundary Layer Theory”. McGraw-Hill, Inc. New York, USA.

Singh A., Lanzoni S., Wilcock P. R., Foufoula-Georgiou E. 2011. “Multiscale Statistical Characterization of Migrating Bed Forms in Gravel and Sand Bed Rivers”. *Water Resources Research*, 47, W12526.

Smith S. W. 1999. “The Scientist and Engineer’s Guide to Digital Signal Processing”. Second Edition. California Technical Publishing. United States of America.

Spekreijse S. P. 1995. “Elliptic Grid Generation Base on Laplace Equations and Algebraic Transformations”. *Journal of Computational Physics*, 118, pp. 38–61.

Strauss W.A. 1992. “Partial Differential Equations: An Introduction”. First Edition. John Wiley & Sons, INC. United States of America.

Torok G. T., Baranya S., Ruther N. 2017. “3D CFD Modeling of Local Scouring, Bed Armoring and Sediment Deposition”. *MDPI: Journal of Water*, 9(56), pp. 1–23.

Torrence C., Compo G. P. 1998. “A Practical Guide to Wavelet Analysis”. *American Meteorological Society*, 79(1), pp. 61–78.

US Army Corps of Engineers. Hydrologic Engineering Center. 2010. “River Analysis Sistem Hydraulic Reference Manual”. Version 4.1.0.

Van Rijn L. 1984^a. “Sediment Transport Part i: Bed Load Transport”. *Journal of Hydraulic Engineering*, 110(10), pp.1431–1456.

Van Rijn L. 1984^b. “Sediment Transport Part ii: Suspended Load Transport”. *Journal of Hydraulic Engineering*, 110(11), pp.1613–1641.

Van Rijn L. 1984^c. “Sediment Transport Part iii: Bed Forms and Alluvial Roughness”. *Journal of Hydraulic Engineering*, 110(12), pp.1733–1754.

Vanoni V. A. 1975. “Sedimentation Engineering”. *Manuals and Reports on Engineering Practice-No. 54.* American Society of Civil Engineers (ASCE).

Weber J. F. 2003. “Hidráulica del Transporte de Sedimentos”. *Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.* Universidad Nacional de Córdoba. Córdoba, Argentina.

Wong M., Parker G. 2006. “Flume Experiments with Tracer Stones under Bedload Transport”. *River, Coastal, and Estuarine Morphodynamics.* Taylor & Francis Group, London.

Wu W., Rodi W., Wenka T. 2000. “3D Numerical Modelling of Flow and Sediment Transport in Open Channels”. *Journal of Hydraulic Engineering*, 126(1), pp. 4–15.

Xu Y., Weaver J. B., Healy D. M., Lu J. 1994. “Wavelet Transform Domain Filters: A Spatially Selective Noise Filtration Technique”. IEEE Transactions on Image Processing, 3(6), pp. 747-758.

Zeng J., Constantinescu G., Weber L. 2005. “A fully 3D Non-Hydrostatic Model for Prediction of Flow, Sediment Transport and Bed Morphology in Open Channels”. Civil & Environmental Engineering, IIHR – Hydroscience and Engineering, The University of Iowa, Stanley Hydraulics Laboratory, Iowa City, IA 52242.

Publicaciones en Revistas:

Título: Análisis de la Implementación de un Modelo Hidrodinámico Tridimensional al Flujo de un Cauce Natural.

Autores: Santiago Aurelio Ochoa García, Teresa Reyna, Marcelo García, Horacio Herrero, José Manuel Díaz y Ana Heredia.

Revista: Ingeniería del Agua de la Universitat Politècnica de València, España.

Datos bibliográficos: VOL. 21, NO.2 (2017), pp. 103-117.

Título: Modelación Hidrodinámica del Tramo Medio del Río Ctalamochita, Provincia de Córdoba.

Autores: Santiago Aurelio Ochoa García, Teresa Reyna, Santiago Reyna, Marcelo García, María Lábaque y José Manuel Díaz.

Revista: Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.

Datos bibliográficos: VOL. 3, NO.2 (2016), pp. 95-101.

Título: Evaluación de Modelos Hidrodinámicos para Representar Flujos en Cauces Naturales.

Autores: Santiago Aurelio Ochoa García, Teresa Reyna, Santiago Reyna, Marcelo García, Antoine Patalano y María Lábaque.

Revista: MASKANA de la Universidad de Cuenca, Ecuador.

Datos bibliográficos: VOL. 5, NO. Especial (2014), pp. 83-95.

Presentación en Reuniones Científicas:

Título de la presentación: Discretización de Formas de Fondo Mediante Análisis Espectral y Wavelets.

Autores: Santiago Aurelio Ochoa García, Teresa Reyna, Marcelo García, Horacio Herrero, José Manuel Díaz y Ana Heredia.

Nombre del evento: VIII Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos.

Fecha y lugar del evento: Del 8 al 10 de Noviembre de 2017, en la ciudad de Córdoba, Argentina.

Título de la presentación: Simulación Hidrodinámica Tridimensional con Fondo Móvil Aplicada a un Cauce Natural.

Autores: Santiago Aurelio Ochoa García, Teresa Reyna, Marcelo García, Horacio Herrero, José Manuel Díaz y Ana Heredia.

Nombre del evento: VIII Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos.

Fecha y lugar del evento: Del 8 al 10 de Noviembre de 2017, en la ciudad de Córdoba, Argentina.

Título de la presentación: Simulación Hidrodinámica Tridimensional Aplicada al Tramo Medio del Río Tercero, Provincia de Córdoba.

Autores: Santiago Aurelio Ochoa García, Teresa Reyna, Marcelo García, Horacio Herrero, José Manuel Díaz y Ana Heredia.

Nombre del evento: XXVI Congreso Nacional del Agua.

Fecha y lugar del evento: Del 20 al 23 de Septiembre de 2017, en la ciudad de Córdoba, Argentina.

Título de la presentación: Validación de la Simulación Hidrodinámica Tridimensional de un Cauce Natural Mediante Datos Obtenidos con un Instrumento ADCP.

Autores: Santiago Aurelio Ochoa García, Teresa Reyna, Marcelo García, Horacio Herrero, José Manuel Díaz y Ana Heredia.

Nombre del evento: V Simposio de Métodos Experimentales en Hidráulica.

Fecha y lugar del evento: Del 7 al 9 de Junio de 2017, en la ciudad de Buenos Aires, Argentina.

Título de la presentación: Modelación Bidimensional en Cauces Naturales con Curvaturas. Caso del río Tercero en su paso por la ciudad de BellVile.

Autores: Santiago Aurelio Ochoa García, Teresa Reyna, Santiago Reyna, Marcelo García, Horacio Herrero y Matías Ragessi.

Nombre del evento: XXVII Congreso Latinoamericano de Hidráulica.

Fecha y lugar del evento: Del 28 al 30 de Septiembre de 2016, en la ciudad de Lima, Perú.

Título de la presentación: Modelación Hidrodinámica Unidimensional Y Bidimensional del Tramo Medio del Río Ctalamochita, Provincia de Córdoba.

Autores: Santiago Aurelio Ochoa García, Teresa Reyna, Santiago Reyna, Marcelo García, María Lábaque y José Manuel Díaz.

Nombre del evento: XXV Congreso Nacional del Agua.

Fecha y lugar del evento: Del 15 al 19 de Junio de 2015, en la ciudad de Paraná, Argentina.

Título de la presentación: Evaluación de Modelos Hidrodinámicos para Representar Flujos en Cauces Naturales.

Autores: Santiago Aurelio Ochoa García, Teresa Reyna, Santiago Reyna, Marcelo García, Antoine Patalano y María Lábaque.

Nombre del evento: I Congreso I+D+Ingeniería.

Fecha y lugar del evento: Del 3 al 4 de Diciembre de 2014, en la ciudad de Cuenca, Ecuador.

Título de la presentación: Uso de Modelos Numéricos y Físicos Aplicados a Cauces Naturales. Caso Confluencia del Arroyo La Cañada y el Río Suquía.

Autores: Santiago Aurelio Ochoa García, Teresa Reyna, Santiago Reyna, Marcelo García, Horacio Herrero, Antoine Patalano y María Lábaque.

Nombre del evento: XXVI Congreso Latinoamericano de Hidráulica.

Fecha y lugar del evento: Del 25 al 30 de Agosto de 2014, en la ciudad de Santiago, Chile.

Título de la presentación: Uso de Modelos Numéricos y Modelos Físicos Aplicados a Cauces Naturales. Caso Confluencia del Arroyo La Cañada y el Río Suquía, Provincia de Córdoba.

Autores: Santiago Aurelio Ochoa García, Teresa Reyna, Santiago Reyna, María Lábaque, Marcelo García y Horacio Herrero.

Nombre del evento: I Congreso Iberoamericano de Protección, Gestión, Eficiencia, Reciclado y Reúso del Agua.

Fecha y lugar del evento: Del 9 al 11 de Mayo de 2013, en la ciudad de Córdoba, Argentina.