



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL-HIDRÁULICA

**DINÁMICA DEL FLUJO Y SEDIMENTO EN
SUSPENSIÓN EN MEANDROS**

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
DOCTOR EN INGENIERÍA

PRESENTA:

CHRISTIAN ALBERTO CABALLERO CORANGUEZ

TUTORES PRINCIPALES:

DR. MOISÉS BEREZOWSKY VERDUZCO INSTITUTO DE INGENIERÍA
DR. ALEJANDRO MENDOZA RESENDÍZ INSTITUTO DE INGENIERÍA

COMITÉ TUTOR:

DR. RAMÓN DOMÍNGUEZ MORA INSTITUTO DE INGENIERÍA
DR. OSCAR ARTURO FUENTES MARILES INSTITUTO DE INGENIERÍA
DR. FRANCISCO JAVIER APARICIO MIJARES FACULTAD DE INGENIERÍA

Ciudad Universitaria en Ciudad de México, Abril de 2024.



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO

Presidente: DR. OSCAR ARTURO FUENTES MARILES

Secretario: DR. RAMÓN DOMÍNGUEZ MORA

1er. Vocal: DR. MOISÉS BEREZOWSKY VERDUZCO

2.do. Vocal: DR. FRANCISCO JAVIER APARICIO MIJARES

3er. Vocal: DR. ALEJANDRO MENDOZA RESENDÍZ

Lugar en donde se realizó la tesis: Instituto de Ingeniería, Ciudad Universitaria, UNAM.
Ciudad de México.

TUTORES DE TESIS

DR. MOISÉS BEREZOWSKY VERDUZCO

DR. ALEJANDRO MENDOZA RESENDÍZ

Índice general

| | |
|--|------------|
| Lista de Figuras | VII |
| Lista de Tablas | XI |
| 1. Introducción general | 1 |
| 1.1. Objetivo general | 5 |
| 1.2. Objetivos específicos | 5 |
| 2. Hidrodinámica en un canal curvo de ancho variable | 7 |
| 2.1. Introducción | 7 |
| 2.2. Objetivo | 9 |
| 2.3. Preguntas de investigación | 10 |
| 2.4. Dispositivo experimental | 10 |
| 2.5. Métodos | 12 |
| 2.6. Modelación Física | 12 |
| 2.6.1. Registros de velocidades | 13 |
| 2.7. Modelación numérica | 14 |
| 2.7.1. Modelo matemático Telemac-Mascaret 3D | 15 |
| 2.7.2. Modelo matemático FLOW3D | 16 |
| 2.8. Resultados | 18 |
| 2.8.1. Velocidades experimentales | 18 |
| 2.8.2. Comparación de velocidades medidas vs calculadas | 20 |
| 2.9. Análisis y discusión de resultados | 26 |
| 2.10. Conclusiones | 36 |
| 3. Zona de separación de flujo y recirculación | 39 |
| 3.1. Flujo helicoidal | 39 |
| 3.2. Capa límite | 40 |
| 3.3. Preguntas de investigación | 42 |
| 3.4. Dispositivo experimental y equipo de medición | 43 |
| 3.5. Procedimiento | 43 |
| 3.6. Visualización tridimensional del flujo en laboratorio | 44 |
| 3.7. Pruebas experimentales | 48 |
| 3.8. Resultados | 50 |
| 3.8.1. Análisis de las velocidades experimentales en las secciones 6 y 7 | 50 |
| 3.8.2. Análisis de la energía cinética de la turbulencia, en las secciones 6 y 7 | 52 |
| 3.8.3. Análisis de la intensidad de la turbulencia, en las secciones 6 y 7 | 53 |
| 3.8.4. Análisis del Tensor de esfuerzos de Reynolds específico, en las secciones 6 y 7 | 55 |
| 3.8.5. Análisis de los parámetros de calidad en las secciones 6 y 7 | 57 |

| | |
|---|------------|
| 3.9. Conclusiones | 59 |
| 4. Socavación en la descarga de un canal curvo | 61 |
| 4.1. Introducción | 61 |
| 4.2. Preguntas de investigación | 63 |
| 4.3. Metodología | 63 |
| 4.4. Modelo Físico | 63 |
| 4.4.1. Mediciones de la velocidad | 65 |
| 4.5. Modelo Numérico | 66 |
| 4.6. Resultados | 69 |
| 4.6.1. Medición del campo de velocidades | 69 |
| 4.6.2. Calibración del modelo numérico | 70 |
| 4.6.3. Socavación | 75 |
| 4.6.4. Velocidades experimentales, 3D | 77 |
| 4.6.5. Flujo helicoidal | 80 |
| 4.7. Discusión | 82 |
| 4.7.1. Resultados de la socavación con el modelo numérico. | 82 |
| 4.7.2. Comparación con fórmulas empíricas | 83 |
| 4.7.3. Comparación del calculo 2D vs estructuras del flujo 3D | 86 |
| 4.8. Conclusiones | 87 |
| 5. Dinámica del flujo y sedimento en suspensión en un meandro | 89 |
| 5.1. Introducción | 89 |
| 5.1.1. Sedimento en suspensión | 90 |
| 5.2. Preguntas de investigación | 93 |
| 5.3. Metodología | 94 |
| 5.3.1. Mediciones in situ del campo de velocidad y la CSs | 94 |
| 5.3.2. Proceso del transporte de sedimento en la columna de agua | 99 |
| 5.3.3. Velocidad de caída y perfiles de la CSs en la vertical | 99 |
| 5.4. Modelo Numérico | 104 |
| 5.4.1. Ecuación Advección-Difusión | 104 |
| 5.4.2. Ecuación de transporte de fondo | 105 |
| 5.5. Modelación numérica | 106 |
| 5.5.1. Escenarios de modelación numérica 2DH | 107 |
| 5.6. Discusión | 119 |
| 5.7. Conclusiones | 125 |
| 6. Meandros: Bifurcación y Avulsión | 127 |
| 6.1. Introducción | 127 |
| 6.2. Teoría de ríos meandrantés | 129 |
| 6.3. Meandro Kinoshita | 131 |
| 6.4. Pregunta de investigación | 134 |
| 6.5. Mecanismos de transporte de sedimento | 134 |
| 6.5.1. Transporte de fondo y en suspensión | 134 |
| 6.6. Escenarios de modelación numérica de los meandros tipo Kinoshita | 140 |
| 6.6.1. Meandro principal | 140 |
| 6.6.2. Meandro secundario y proceso de avulsión | 146 |
| 6.7. Análisis y discusión de resultados | 152 |
| 6.7.1. Distribución de caudales | 152 |
| 6.7.2. Distribución de la evolución del fondo media | 153 |

| | |
|---|------------|
| 6.7.3. Distribución de carga de fondo media ($\overline{q_b}$) | 155 |
| 6.7.4. Distribución de carga en suspensión media ($\overline{q_s}$) | 157 |
| 6.7.5. Número de Einstein | 158 |
| 6.8. Conclusiones | 163 |
| 7. Conclusiones generales | 165 |
| 7.1. Sección 2: Caracterización tridimensional Numérico-Experimental de la dinámica del flujo en un canal curvo de ancho variable en condiciones de laboratorio | 165 |
| 7.2. Sección 3: Caracterización de la turbulencia dentro de zonas de separación e interacción con el flujo secundario | 166 |
| 7.3. Sección 4: Dinámica del flujo en un canal curvo como mecanismo en el desarrollo de la socavación | 167 |
| 7.4. Sección 5: Caracterización Numérico - Datos in situ del transporte de sedimento en suspensión en un meandro | 168 |
| 7.5. Sección 6: Procesos hidráulicos y morfológicos en ríos meándricos con canales secundarios | 170 |
| Bibliografía | 183 |

Lista de Figuras

| | |
|--|----|
| 2.1. Geometría de la instalación experimental, vista en planta. | 11 |
| 2.2. Velocímetro Doppler Acústico, MicroADV 16 MHz, y secciones de medición. . . | 13 |
| 2.3. Distribuciones de velocidad experimental en secciones. | 19 |
| 2.4. Distribuciones de velocidad, en azul velocidades experimentales, en gris velocidades calculadas con el modelo TELEMAC3D. | 20 |
| 2.5. Comparación numérico-experimental de las distribuciones de los componentes de velocidad \bar{u}/U , \bar{v}/U y \bar{w}/U (-). | 22 |
| 2.6. Líneas de corriente con el modelo TELEMAC3D, a) $0 < Z \leq 0,10m$, b) $0 <$ $Z \leq 0,08m$, c) $0 < Z \leq 0,06m$ y d) $0 < Z \leq 0,02m$ | 24 |
| 2.7. Líneas de corriente con el modelo FLOW-3D. | 25 |
| 2.8. Relación Numérico-Experimental (RNE), Relación Esperada (RE) y Regresión Lineal (RL). | 29 |
| 2.9. Cosenos directores del vector velocidad, U | 31 |
| 2.10. Relación Numérico-Experimental (RNE), Relación Esperada (RE) y Regresión . | 33 |
| 2.11. Número de Reynolds (Re). | 34 |
| 2.12. Líneas de corriente y vorticidad. | 35 |
| | |
| 3.1. Visualización del flujo con inyección de colorante dentro de la zona de separación. | 46 |
| 3.2. Visualización del flujo con inyección de colorante en distintos puntos del canal. | 47 |
| 3.3. Superficies de velocidad en la sección 6. | 50 |
| 3.4. Superficies de velocidad en la sección 7. | 51 |
| 3.5. Energía cinética de la turbulencia (k), en m^2/s^2 , en las secciones 6 y 7. | 53 |
| 3.6. Intensidad de la turbulencia en la sección 6. | 54 |
| 3.7. Intensidad de la turbulencia en la sección 7. | 55 |
| 3.8. Tensor de esfuerzos de Reynolds específico en la sección 6. | 56 |
| 3.9. Tensor de esfuerzos de Reynolds específico en la sección 7. | 56 |
| 3.10. SNR media en db y Correlación media en %, en las secciones 6 y 7. | 57 |
| | |
| 4.1. Prototipo y Modelo Físico (MF) experimental de la Estructura Hidráulica de Control El Macayo (EHCEM). | 64 |
| 4.2. Distribución del tamaño de grano del sedimento del fondo utilizado en el modelo físico. | 65 |
| 4.3. a) Secciones y zona de medición de velocidades en el CMI (S1, S2, S3) y zona de socavación máxima (SM), b) zona de medición de velocidades dentro de secciones y niveles de agua. | 65 |
| 4.4. Mallas de cálculo utilizadas para el análisis numérico y condiciones de frontera. | 68 |
| 4.5. Vectores de velocidad (U) en m/s, medidos en el CMI (azul) y calculados (naranja), en secciones 1, 2 y 3, y punto de SM. | 69 |
| 4.6. Distribuciones de velocidad, medidas y calculadas, a) en S1, b) en S2, c) en S3, y d) errores relativos. | 70 |

| | |
|--|-----|
| 4.7. Resultados numéricos 3D. | 72 |
| 4.8. Resultados numéricos 2DH y 3D con la configuración de fondo desarrollada después de 4.5 horas. | 72 |
| 4.9. Resultados numéricos 2DH y 3D con la configuración de fondo desarrollada después de 4.5 horas, zona más dinámica. | 73 |
| 4.10. Resultados numéricos 3D de la energía cinética de la turbulencia con la configuración de fondo desarrollada después de 4.5 horas, vista XY. | 74 |
| 4.11. Registros de la magnitud de la velocidad (m/s) a distintas elevaciones, sobre el punto de máxima socavación. | 75 |
| 4.12. Registros de la energía cinética de la turbulencia (k , m^2/s^2) a distintas elevaciones, sobre el punto de máxima socavación. | 76 |
| 4.13. Evolución temporal del fondo (m) medida vs calculada, en punto de socavación máxima experimental. | 76 |
| 4.14. Superficie de velocidades medias y parámetros de calidad en S1. | 78 |
| 4.15. Superficie de velocidades medias y parámetros de calidad en S2. | 78 |
| 4.16. Superficie de velocidades medias y parámetros de calidad en S3. | 79 |
| 4.17. Vector de velocidad y de flujo secundario \overline{FSU} (cm/s), y componentes (\overline{FSU}_y y \overline{FSU}_w) en S1, S2 y S3. | 80 |
| 4.18. Flujo secundario \overline{FSU} (cm/s), y componentes (\overline{FSU}_y y \overline{FSU}_w) en S1, S2 y S3. | 81 |
| 4.19. Configuración final del fondo (m) aguas abajo de la estructura (después de 4.5 horas), numérico-experimental. | 82 |
| 4.20. Configuración final del fondo experimental (m) aguas abajo de la estructura (después de 4.5 horas). | 82 |
| 4.21. Diferencia de elevación (Rz, m), en a) vista general, en b) vista cerca del CMI y en c) error relativo (%). | 83 |
| 4.22. Evolución del fondo (m) en el tiempo (horas), medida vs calculadas | 85 |
| | |
| 5.1. Tramo de análisis del río Colastiné, localizado en Santa Fe, Argentina. | 90 |
| 5.2. Batimetría y geometría del meandro Colastiné | 95 |
| 5.3. Proceso de obtención del campo de velocidades sobre el río Colastiné | 97 |
| 5.4. Proceso de obtención de la concentración de sedimento en suspensión (CSs) sobre el río Colastiné | 98 |
| 5.5. Perfiles en la profundidad de la velocidad y la concentración de sedimento en suspensión, en la sección 1 | 101 |
| 5.6. Diagramas de Shields en sección 1 | 101 |
| 5.7. Perfil de concentración de sedimentos suspendidos, en sección 1 | 103 |
| 5.8. Sección de salida y curva elevación-caudal | 107 |
| 5.9. Comparación de las distribuciones de velocidad medidas (in situ) promediadas en la vertical y calculadas numéricamente | 110 |
| 5.10. Errores relativos de la velocidad (promediada en la vertical) entre datos medidos (in situ) y calculados numéricamente | 111 |
| 5.11. Relación Numérico - Medición (in situ) de la magnitud de la velocidad (promediada en la vertical) | 112 |
| 5.12. Comparación de las distribuciones de concentración de sedimento en suspensión medidas (in situ) y calculadas numéricamente, 2DH | 113 |
| 5.13. Errores relativos de la CSs (promediada en la vertical) entre datos medidos (in situ) y calculados numéricamente | 115 |
| 5.14. Relación Numérico-Medición (in situ) de la concentración de sedimento suspendido | 115 |

| | |
|---|-----|
| 5.15. Comparación de las distribuciones de velocidad medidas (in situ) y calculadas numéricamente | 116 |
| 5.16. Comparación de las distribuciones de Concentración de sedimento en suspensión medidas (in situ) y calculadas numéricamente | 117 |
| 5.17. Relación Numérico-Medición (in situ) | 118 |
| 5.18. Campo de velocidades 3D (m/s) en el tramo de análisis del río Colastiné, . . . | 119 |
| 5.19. Concentración de sedimento en suspensión (<i>CSs</i>) 3D (g/l) en el tramo de análisis del río Colastiné | 120 |
| 5.20. a) <i>CSs</i> (g/l), b) <i>Ri</i> , c) <i>k</i> (m^2/s^2) y d) <i>Re</i> | 121 |
| 5.21. Núcleos máximos de <i>CSs</i> , <i>Ri</i> , y <i>k</i> | 122 |
| 5.22. a)CGF, (m), b)CGF y NCSsM (0.1-0.12 g/l), c)CGF y NVM (0.85 m/s a 1.4 m/s), y d) CGF, NCSsM y NVM | 123 |
| 5.23. ∇V | 124 |
| | |
| 6.1. Evolución del meandro Padma parte baja, Bangladés, Asia. Fuente: NASA, Earth Obseravatory (2023). | 127 |
| 6.2. Definición de parámetros considerados en el análisis de la hidráulica en meandros, \tilde{h} es la profundidad local del flujo, definida como $\tilde{h} = \tilde{\xi} - \tilde{\eta}$, en donde $\tilde{\eta}$ es la elevación local del fondo, y $\tilde{\xi}$ es la elevación local de la superficie libre del agua (adaptado de Ikeda et al. (1981)). | 130 |
| 6.3. Detalles de la geometría del canal de kinoshita, orientación de la curva hacia aguas arriba. | 133 |
| 6.4. Perfiles de concentración de Rouse de sedimento en equilibrio para $a/h = 0,05$ | 139 |
| 6.5. Campo de velocidades del escenario A (m/s) | 141 |
| 6.6. Campo de velocidades del escenario B (m/s) | 141 |
| 6.7. Campo de velocidades del escenario C (m/s) | 142 |
| 6.8. Campo de velocidades del escenario D (m/s) | 142 |
| 6.9. Campo de velocidades del escenario E (m/s) | 142 |
| 6.10. Campo de velocidades del escenario F (m/s) | 143 |
| 6.11. Campo de velocidades del escenario G (m/s) | 143 |
| 6.12. Campo de velocidades del escenario H (m/s) | 144 |
| 6.13. Campo de velocidades del escenario I (m/s) | 144 |
| 6.14. Campo de velocidades del escenario C2-15 (m/s) | 145 |
| 6.15. Esquema general de los escenarios de simulación numérica en el proceso de avulsión entre el meandro principal y secundario | 148 |
| 6.16. Geometrías utilizadas en los escenarios de modelación numérica. | 151 |
| 6.17. Distribución de caudales, en los meandros secundarios. | 152 |
| 6.18. Distribución de la evolución de fondo media en secciones localizadas en la zona de bifurcación. | 154 |
| 6.19. Distribución de la carga de fondo media (\bar{q}_b , m^3/s) en secciones localizadas en la zona de bifurcación. | 156 |
| 6.20. Distribución de la carga en suspensión media (\bar{q}_s , m^3/s) en secciones localizadas en la zona de bifurcación. | 157 |
| 6.21. Secciones de análisis en meandro principal y secundario. | 158 |
| 6.22. Número de Einstein, q^* (%), en meandro principal y secundario. | 159 |
| 6.23. Capacidad combinada del transporte de la carga de fondo (CCTF, $\frac{q_p^*+q_s^*}{q_0^*}$, -). | 159 |
| 6.24. Número de Einstein (-). | 161 |
| 6.25. $\frac{H}{H_0}$ (-). | 161 |

Lista de Tablas

| | |
|---|-----|
| 2.1. Radios de curvatura del eje central. | 11 |
| 2.2. Escenarios y condiciones experimentales. | 14 |
| 2.3. Errores relativos entre los datos experimentales y TELEMAC3D. | 27 |
| 2.4. Errores relativos entre los datos experimentales y FLOW3D. | 28 |
| 2.5. Coeficiente de correlación lineal (R) en la Relación Numérico-Experimental (RNE) del vector de velocidad y sus componentes. | 29 |
| 2.6. Coeficiente de correlación lineal (R) en la RNE de los cosenos directores del vector de velocidad. | 33 |
| 3.1. Localización espacial de los puntos de medición | 48 |
| 4.1. Errores relativos medios y generales de los escenarios numéricos A, B y C. | 71 |
| 4.2. Socavación máxima experimental vs socavación máxima calculada por cuatro métodos teóricos y errores. Los valores calculados con el modelo 2D se ubican en el punto de máxima socavación experimental (MSE) y máxima socavación modelada (MSM). | 85 |
| 5.1. Concentración de sedimentos en suspensión media y velocidad media en las secciones definidas | 100 |
| 5.2. Condiciones hidráulicas para la modelación numérica. | 106 |
| 5.3. Coordenadas de inicio-fin de secciones y anchos de secciones. | 107 |
| 5.4. Escenarios de modelación numérica | 108 |
| 5.5. Errores relativos generales de la velocidad media (promediada en la vertical), en secciones definidas en la Figura 5.2 para los escenarios de modelación numérica E1, indicados en la Tabla 5.4 | 110 |
| 5.6. Parámetros de ajuste de la Relación Numérico-Medición de la magnitud de la velocidad (promediada en la vertical), escenario de modelación numérica E1.4-2DH | 112 |
| 5.7. Errores relativos de la concentración de sedimento en suspensión promediados en la vertical para cada sección, escenario de modelación numérica E2-2DH. | 114 |
| 5.8. Errores relativos generales de la velocidad 3D (elevación a 0.4h), escenarios de modelación numérica E3-3D | 117 |
| 5.9. Errores relativos generales de la concentración de sedimento suspendido 3D (elevación a 0.4h), escenarios de modelación numérica E3-3D | 118 |
| 6.1. Características geométricas del canal de kinoshita | 134 |
| 6.2. Condiciones para los escenarios de modelación numérica | 140 |
| 6.3. Características del meandro | 146 |
| 6.4. Condiciones en escenarios de meandro principal y secundario | 147 |
| 6.5. Características geométricas de los meandros secundarios | 149 |

6.6. Características geométricas de los meandros secundarios 150

Introducción general

Los cauces aluviales desarrollan geometrías complejas, formas del flujo entrelazadas no uniformes, en respuesta principalmente a: el caudal y la carga de sedimento suministrado por la cuenca, las características físicas de los sedimentos, la pendiente del valle en donde se encuentra el cauce, la resistencia a la erosión del material de los bancos. Para comprender el comportamiento dinámico del fenómeno, es necesario tener conocimiento de una gran cantidad de variables cuyas escalas espaciales y temporales caracterizan cada proceso. Por ejemplo, la hidrodinámica se desarrolla en escalas de tiempo relativamente cortas en cuestión de segundos a horas se pueden establecer diversas condiciones del flujo, mientras que el proceso de migración de las márgenes (que conduce a la migración de meandros en ríos meandriformes) se presenta en escalas de tiempo grandes que van desde años, décadas e incluso siglos; por otro lado, el desarrollo de la configuración del fondo, que comprende los procesos de erosión y sedimentación, y el desarrollo de formas del fondo y/o evolución del fondo se presenta en escalas de tiempo intermedias, limitada entre las dos condiciones descritas.

En la literatura existe una gran cantidad de trabajos en los que se analizó principalmente la estructura del flujo en ríos y canales curvos (p.e. D'Áubuisson (1840), Thomson (1879), Gibson y Petavel (1909), Möller y Freeman (1929), Rozovskii (1961), Ikeda et al. (1981), Blanckaert y De Vriend (2004), entre muchos otros). Una reseña histórica de estudios sobre el flujo helicoidal se encuentra en Jiménez et al. (2023). Algunos autores observaron con más detalle el comportamiento del flujo y su interacción con el sedimento de fondo, así como las trayectorias que seguían las partículas de sedimento, es así como identificaron comportamientos de flujo secundario o flujo helicoidal. Quizás la pregunta que une todas estas investigaciones y que es sumamente importante de responder, incluso hoy en día es ¿Cuál es la interacción entre el flujo y el transporte de sedimentos con la forma de los cauces, principalmente en las curvas de los meandros? Los intereses para responder esta pregunta pueden ser diversos, por ejemplo: para la gestión del agua, el control de avenidas, la mitigación de la erosión de las márgenes y su dinámica en el tiempo, evitar inundaciones en zonas bajas, revisar la factibilidad de la navegación o revisar el desarrollo de nueva infraestructura hidráulica para control o abastecimiento, entre otros. En la búsqueda de responder esta pregunta se ha profundizado en el tema estableciendo distintos modelos matemáticos que son de utilidad para atender las diversas necesidades a las que se enfrentan los ingenieros e investigadores.

En este sentido, el desarrollo de metodologías de investigación basadas en la modelación física experimental y la modelación matemática han sido una herramienta que permite comprender la dinámica de los distintos flujos turbulentos que se presentan en canales rectos, canales curvos, meandros, estructuras hidráulicas y numerosas geometrías complejas; así como la dinámica del flujo turbulento sobre fondos móviles, arenosos o granulares. Estas metodologías se complementan con desarrollos tecnológicos como equipos ultrasónicos para medición de la velocidad dentro del flujo, y software de análisis para grandes cantidades de información recolectada. Además, el análisis numérico demanda de equipos de supercómputo distribuido de alto rendimiento para cálculo intensivo y post procesamiento de la información.

Los análisis clásicos en ingeniería de ríos se concentran en la hidrodinámica del flujo, empleando en la mayoría de los casos, modelos unidimensionales y algunos modelos bidimensionales, e incluso en algunos trabajos de aplicación no se considera el análisis de transporte de sedimento, principalmente por la ausencia de información como: las características del sedimento, la batimetría, el transporte de sedimento de fondo y en suspensión. Aunque, se tiene conocimiento de que las características turbulentas del flujo presentan un comportamiento altamente tridimensional (Wilcox, 2004); por otro lado, el cálculo numérico tridimensional del flujo generalmente está limitado por los altos costos computacionales que limitan su aplicación en la práctica profesional pero que no pueden evitarse en la investigación con el fin de mejorar la comprensión del fenómeno.

En las secciones siguientes se establecen algunas preguntas de investigación con el objetivo de caracterizar numéricamente el flujo y determinar el grado de aproximación.

En la Sección 2 se presentan tres conjuntos de 173 mediciones del campo de velocidades en un canal curvo de ancho variable distribuidos a lo largo del canal, en total 519 registros, en condiciones similares: (1) de caudal a la entrada, y (2) nivel de agua a la salida del canal. La medición puntal de velocidad se realizó a $0.4y$, en donde y es la tirante del flujo. Se realizó la modelación matemática tridimensional con TELEMAC-3D y FLOW-3D, para el cálculo del campo de velocidades desarrollado en el canal de sección rectangular con curvatura compuesta y ancho variable. Se resolvieron las ecuaciones de Navier-Stokes en cada modelo matemático, con el enfoque de los promedios de Reynolds (RANS), y se consideró el modelo matemático κ - ε para la modelación de la turbulencia. Se presenta el análisis de la comparación numérico-experimental de la hidrodinámica y se calculan los errores con el objetivo de determinar el grado de aproximación obtenido con cada sistema de modelación, además de la discusión de los factores y fenómenos observados en el laboratorio, esto permite ampliar el conocimiento sobre la complejidad en la naturaleza de los flujos turbulentos en canales con fuertes curvaturas y ancho variable. Se busca responder las siguientes preguntas de investigación (1) ¿Cuál es la capacidad de un modelo tridimensional para reproducir el campo de velocidades medido en condiciones de laboratorio?, y (2) ¿Cuál es la precisión y la aproximación de un modelo tridimensional para calcular los ángulos de desviación del campo de velocidades, en condiciones de laboratorio?, estas preguntas están orientadas hacia la caracterización numérica del flujo, que son herramientas de amplio uso en aplicaciones ingenieriles.

Es importante identificar los distintos procesos que suceden dentro de la estructura de un flujo turbulento tridimensional, como lo es el caso aquí analizado. La comprensión y visualización adecuada del fenómeno permitirá determinar qué tipo de modelación numérica es recomendable utilizar o aplicar a los diversos problemas de flujo a superficie libre a los que se enfrentan los ingenieros. Uno de los mayores retos en la física de los fluidos es la

modelación de la turbulencia. En la sección 3, las preguntas de investigación son: (1) ¿Por qué los modelos numéricos 3D del tipo RANS (Reynolds Average Navier-Stokes) no aproximan correctamente el campo de velocidades que se presentó dentro de la zona de separación del flujo?, (2) ¿Cuál es el impacto de la zona de separación sobre el flujo principal?, y (3) ¿Qué mecanismos o propiedades del flujo permiten identificar una zona de separación?

En la sección 4, se presenta un caso de aplicación en relación con la dinámica del flujo y sedimento alrededor de estructuras hidráulicas. Los procesos de socavación ocurren como resultado de alteraciones de flujo debido a la infraestructura construida en los ríos; su desarrollo es ocasionado por la interacción del flujo y el transporte de sedimentos alrededor de la estructura. Es importante identificar la localización y cuantificar la magnitud de la socavación, para evitar subestimaciones o sobreestimaciones, ya que lo primero pone en riesgo la estructura y lo segundo demanda un costo económico excesivo. El modelo físico corresponde a la estructura hidráulica de control ubicada en la entrada del río Carrizal, afluente de la bifurcación del río Mezcalapa, ubicado en Tabasco, México, en donde la socavación se produce por el efecto del flujo en el canal de descarga lateral.

Se realizaron mediciones experimentales del campo de velocidades en un canal curvo de concreto que descarga a un fondo arenoso, la hidrodinámica que se presenta dentro del canal curvo es el mecanismo principal en el desarrollo del proceso de socavación que se presentó aguas abajo de la estructura hidráulica. Se determinó experimentalmente el punto de socavación máxima, y se obtuvo el registro del perfil de velocidades y la dinámica de la evolución del fondo en el punto de máxima socavación. El experimento tuvo una duración de 4.5 horas. Los datos obtenidos del campo de velocidades y la evolución del fondo arenoso, en el modelo físico con una escala de 1:60 (sin distorsión) se utilizaron para comprobar la precisión de un modelo numérico de superficie libre 2DH para predecir la socavación máxima. El modelo numérico morfo-hidráulico 2D se calibró y se incluyeron los efectos de flujo secundario. La socavación experimental máxima se comparó con los resultados del modelo numérico 2DH y la estimación de cuatro ecuaciones empíricas: Breusers, Farhoudi y Smith, Negm y Dietz. Las preguntas de investigación son: (1) ¿Cuál es la capacidad de un modelo morfo-hidráulico 2DH para reproducir procesos hidrodinámicos, de socavación local y evolución del fondo, para las condiciones de laboratorio presentadas aquí? (2) ¿Cuál es la precisión al calcular la socavación máxima con ecuaciones empíricas frente a mediciones experimentales? (3) ¿Cuál es la precisión del modelo numérico para estimar la dinámica temporal de la evolución del fondo en el punto de máxima socavación local? y (4) ¿Cuáles son las diferencias del campo de flujo promediado en profundidad calculado con un modelo 3D con respecto al cálculo del modelo de superficie libre 2DH?

En la sección 5, se presenta el análisis numérico del comportamiento de la concentración de sedimentos suspendidos y el campo de velocidades del flujo turbulento en el meandro Colastiné, localizado en Argentina, en condiciones de escala real, es decir, la modelación numérica no presenta efectos de escala. Los resultados numéricos del campo de velocidades (U) y la concentración de sedimentos en suspensión (CSs) son comparados con mediciones in-situ reportadas por Dominguez et al. (2021). El análisis numérico del campo de velocidades y la concentración de sedimentos suspendidos se realizó al considerar la condición de flujo permanente. Se presentan las ecuaciones que describen el movimiento de la hidrodinámica y las que describen el comportamiento de la concentración de sedimentos en suspensión (CSs). Estas ecuaciones se resolvieron con el modelo numérico TELEMAC-2DH y TELEMAC-3D. Se presentan los resultados de la calibración de la hidrodinámica con base en las mediciones de la velocidad al obtener un promedio en la vertical, y también se presenta la comparación

numérico-in situ de las distribuciones de la velocidad y de la *CSs*. Finalmente, una discusión de los resultados y las conclusiones de la investigación. Las preguntas de investigación son: (1) ¿Cuál es la precisión de modelo numérico promediado en la vertical y uno tridimensional para calcular el campo de velocidades (U) y la concentración de sedimentos en suspensión (*CSs*) en un meandro caracterizado por grandes curvas, con una alta relación de ancho-profundidad y de bajo gradiente, en condiciones de escala real?, y (2) ¿Por qué el núcleo de máxima Concentración de sedimentos en suspensión (*CSs*) no sigue el núcleo de máxima velocidad, en el tramo de análisis del meandro Colastiné?

En la sección 6, se presenta la distribución del análisis del flujo y sedimento en bifurcaciones sobre un meandro. El conocimiento sobre las diversas estructuras turbulentas y el transporte de sedimentos que se desarrollan alrededor de una bifurcación son poco claras, más aún para las bifurcaciones que se desarrollan en los meandros o canales. En general, los estudios previos para bifurcaciones en canales rectos con variación angular en la conexión y análisis con modelación numérica 3D tipo RANS han sido presentados por Dutta et al. (2017) enfocados principalmente en el fenómeno del efecto bulle, en donde se presenta una carga de sedimento de fondo desproporcionada que se mueven del canal principal hacia el canal secundario (o canal de desvío).

Esta investigación pretende realizar una aproximación de los efectos producidos por la localización y el ángulo de conexión del meandro secundario con el meandro principal en una bifurcación, se evalúa la eficiencia del meandro secundario para capturar el flujo de agua y el sedimento, enfocados principalmente en el proceso de avulsión, con el fin de identificar la supervivencia de un meandro secundario con respecto al meandro principal o su desaparición.

En el análisis se consideró la bifurcación del meandro principal y uno secundario, y el meandro secundario se vuelve a conectar al principal, aguas abajo. Se realizó un análisis numérico 2DH y se establecieron nueve casos de estudio, variando la posición de origen del canal secundario con respecto al vértice del canal principal (aguas arriba, al centro y aguas abajo, con respecto al ápice del meandro principal), el otro parámetro que se modificó fue el ángulo de bifurcación con respecto al eje del meandro secundario ($\pm 10^\circ$). En las simulaciones 2DH se consideró la carga de fondo y el transporte de sedimentos en suspensión. Para analizar únicamente el efecto de la posición y ángulo de la bifurcación, en los modelos geométricos se consideró que, 1) todos los meandros secundarios tienen la misma longitud, 2) los meandros secundarios se reconectan aguas abajo al meandro principal en la misma ubicación y ángulo, 3) el meandro principal se modeló hasta alcanzar el equilibrio del fondo, antes de conectar el meandro secundario, 4) todos los meandros secundarios tienen la misma relación ancho-profundidad y parten de la condición inicial con fondo plano (sin barras puntuales ni ondulaciones). La pregunta de investigación es: ¿Cuál es la influencia en el proceso de avulsión con respecto al ángulo de conexión de un meandro secundario con el principal?; se consideraron los mecanismos de transporte de sedimento de fondo y en suspensión y la turbulencia (modelo κ - ϵ). Finalmente, en la sección 7 se presentan las conclusiones específicas de cada sección.

Las respuestas a las preguntas de investigación planteadas en las secciones descritas permiten alcanzar los objetivos específicos de cada sección y el general.

1.1. Objetivo general

Generar conocimiento sobre la dinámica de los procesos de flujo y transporte de sedimentos en tramos de canales y cauces curvos, y caracterizar estos procesos de flujos turbulentos con modelos numéricos al determinar la aproximación para representarlos, mediante relaciones de comparación directa entre la modelación física y numérica, y/o información in situ disponible.

1.2. Objetivos específicos

Se establecen los siguientes objetivos específicos para alcanzar el objetivo general:

1. Caracterizar experimentalmente el flujo turbulento en un canal curvo de ancho variable de fondo fijo, para identificar la interacción entre el flujo principal, el flujo secundario y las estructuras coherentes de flujo turbulento.
2. Caracterizar numéricamente el desarrollo del flujo turbulento que se presentó en el canal curvo de ancho variable de fondo fijo con modelos numéricos 2D y 3D; por lo que, se realizaron las comparaciones del campo de velocidades determinadas a partir de la modelación física para calibrar los resultados del campo de velocidades determinados con los modelos numéricos.
3. Caracterizar las interacciones del flujo turbulento y los procesos de socavación en un modelo fluvial aguas abajo de un canal curvo de fondo fijo que descarga a un fondo arenoso, con ayuda de la modelación física y numérica.
4. Caracterizar el flujo turbulento y el transporte de sedimentos en suspensión en un meandro a escala de campo, sin distorsión espacial, con ayuda de la modelación numérica y mediciones in situ.
5. Analizar el efecto del flujo turbulento y transporte de sedimento en curvas como un caso de estudio para los procesos morfológicos e hidrodinámicos en ríos, con aplicación para los casos de procesos avulsivos.

Hidrodinámica en un canal curvo de ancho variable

2.1. Introducción

Se tiene conocimiento de que el campo de velocidades del flujo de agua en canales curvos o meandros tiene un movimiento de forma helicoidal (Blanckaert y De Vriend, 2004), también conocido como flujo secundario; la redistribución del campo de velocidades por efecto de las curvas, es visiblemente mayor en comparación con la que se tiene en canales rectos, por ejemplo, ver las distribuciones de velocidad reportadas por Vanoni y Brooks (1957) en un canal recto con efectos de flujo secundario y las reportadas en un canal con curvatura horizontal por Rozovskii (1961). El primer caso es bien aceptada la consideración de flujo unidimensional, sin embargo, para el segundo caso no lo es, más aún cuando se detecta la presencia de estructuras coherentes turbulentas y flujo secundario. La presencia de corrientes secundarias y estructuras coherentes en canales rectos fue estudiada por Nezu et al. (1985), en donde encontraron estructuras de flujo secundario en forma de vórtices horizontales altamente tridimensionales, además su desarrollo también se propicio por el desarrollo de crestas de arena a partir de un fondo horizontal arenoso, dentro de sus conclusiones indican que en canales aluviales rectos, la interacción del flujo y la forma del fondo producirán corrientes secundarias.

Un ejemplo de los efectos del flujo helicoidal en canales rectos son las distribuciones de velocidad reportadas por Vanoni (1940), por efecto de las configuraciones de fondo y la rugosidad. La revisión bibliográfica en el tema del flujo helicoidal en canales, permite considerar que los primeros trabajos publicados, en los que se describe de manera cualitativa el movimiento helicoidal del flujo en la curva horizontal en planta de un canal, fueron los desarrollados por: Boussinesq (1868), Thomson (1876), Thomson (1877), Thomson (1878). Además, Thomson (1878) también estudio la presencia del flujo helicoidal en canales de trazo casi recto, en régimen uniforme. Silva y Ebrahimi (2017) y Jiménez et al. (2023) presentan un estado del arte del flujo helicoidal. Son tres los aspectos por los cuales es importante caracterizar este tipo de flujo: (1) el flujo helicoidal cambia la distribución de velocidades en la dirección principal del flujo, (2) se desarrollan estructuras coherentes que interaccionan con el flujo helicoidal, modificando el campo de velocidades del flujo y (3) el flujo helicoidal que se desarrolla cercano al fondo de los canales es un mecanismo que desarrolla procesos de erosión, depósito y transporte de sedimento.

Uno de los trabajos ampliamente citado por otros autores, es el desarrollado por Rozovskii (1961), quién presentó un análisis físico y matemático sobre la hidrodinámica del flujo en un canal con curvatura horizontal; en el documento se incluyen fórmulas para calcular los componentes de velocidad del flujo en canales con fondo liso y rugoso. Además, presenta una metodología para estimar las líneas de corriente, entre otras características; el autor realiza simplificaciones a las ecuaciones de Navier-Stokes (Navier-Stokes Equations, NSEs), y compara sus resultados con mediciones experimentales. Los resultados de laboratorio reportados en su trabajo, han sido empleados para comparar los resultados obtenidos de otros modelos matemáticos desarrollados; un ejemplo es el de Puri y Kuo (1985).

Entre los muchos estudios desarrollados en laboratorio, que se han centrado en el análisis del campo de velocidades en flujos de canales con ancho de plantilla constante, están: Hooke (1975), Blanckaert (2010), Blanckaert y Graf (2001a), da Silva et al. (2006), Abad y Garcia (2009), Termini (2009), Jamieson et al. (2010), Termini y Piraino (2011). La mayoría de estos trabajos presentan análisis con fondo móvil o fondos arenosos para observar la interacción flujo – sedimento; los más recientes utilizan tecnología ultrasónica, para medir la distribución de velocidades dentro del flujo. Sin embargo, los canales naturales que se desarrollan en la parte de bajo gradiente de las cuencas, en la zona de planicie, presentan sinuosidades, que por conveniencia se asocian a un cierto patrón en la configuración geométrica en planta, con formas sinusoidales o con meandros, y que pueden asociarse al canal de kinoshita (Parker et al., 1982; Abad y Garcia, 2009); estas geometrías tienen un ancho de sección constante. Además, al considerar las distintas escalas de tiempo que son necesarias para cada proceso, por ejemplo: el desarrollo de la configuración del fondo del cauce que puede ir de días, meses o años, considerada como una escala mediana, o el proceso de migración de las márgenes, que puede ir de años a décadas o incluso lustros, considerada como una escala grande; el análisis del fenómeno es más complejo.

En las últimas cuatro décadas se han desarrollado sistemas de modelación matemática que demandan el uso de equipos de cómputo de alto desempeño, basados en métodos numéricos, los cuales son bastante aceptados en aplicaciones académicas y prácticas; se ha promovido el uso de estas herramientas por los distintos desarrolladores. En algunas ocasiones, por la importancia del prototipo, es necesario emplear un modelo físico a escala reducida, o una instalación para desarrollar estudios experimentales, que sean útiles principalmente para desarrollar los procesos de calibración, verificación y validación de los sistemas de modelación matemática que se quieren utilizar (Ji, 2017). Este proceso de calibración requiere que se disponga de cuando menos tres conjuntos de resultados de mediciones de las variables de análisis, ya sea información experimental o de campo (in situ).

Para poder caracterizar numéricamente la hidrodinámica que se presenta en un canal de forma adecuada, es recomendable obtener los registros de las distintas variables que interactúan en el fenómeno, como el tirante, la elevación de la superficie libre del agua, velocidades, la energía cinética de la turbulencia, la intensidad de la turbulencia, los esfuerzos de fricción dinámica, tanto internos en el flujo como con los cercanos a las fronteras sólidas, el transporte de sedimento de fondo, el de suspensión y el total, la evolución del fondo, etc. Esta información se puede obtener en laboratorio cuando se desarrollan experimentos o en investigaciones in situ, aunque claramente tener un control sobre las variables que interactúan es más complejo en aplicaciones que en laboratorio, y son fundamentales para desarrollar los procesos de calibración, verificación y validación de cualquier sistema de modelación matemática que se utilice, desde luego algunas de las variables son complejas de medir. Al desarrollar este proceso, se tendrán condiciones adecuadas para plantear y desarrollar estudios

con diferentes escenarios y condiciones de interés para determinar soluciones al problema en estudio.

En particular, Jiménez y Berezowsky (2004) calcularon los campos de velocidades en canales, considerando diversas geometrías en planta, e incluyeron un canal curvo con alineamiento diferente al del flujo principal, de ancho variable; para ello, desarrollaron un sistema de modelación matemática, que se basa en el empleo de coordenadas curvilíneas generales, lo que permite representar en forma adecuada ese tipo de geometrías; usaron la versión covariante con componentes físicos de las ecuaciones de la hidrodinámica, promediadas en la profundidad, que son válidas cuando se considera la hipótesis de flujo bidimensional horizontal (2DH). En este trabajo, las ecuaciones diferenciales se resuelven en diferencias finitas con el esquema de MacCormack (García y Kahawita, 1986; Fennema y Chaudhry, 1990), que es del tipo explícito y de segundo orden; se incluye el cálculo de la viscosidad turbulenta (ν_t) con los modelos parabólico y $k - \epsilon$. El trabajo contiene el estudio y la comparación de cinco casos: el primero de ellos es el que presenta Molls (1992), quien también utilizó los resultados reportados por Rozovskii (1961); el segundo caso es el publicado por Rajaratnam y Nwachukwu (1983); los otros tres casos están referidos a estudios experimentales desarrollados por Jiménez y Berezowsky (2004). En las conclusiones del este trabajo se indicó que, en general, los resultados obtenidos fueron muy buenos, excepto en el caso correspondiente al de un canal con curvatura horizontal compuesta y ancho de plantilla variable; la comparación de los resultados del estudio numérico – experimental indican que en este canal, se identificaron diferencias entre los valores medidos y calculados de las velocidades, cuyas diferencias son significativas en comparación con el resto del análisis presentado, y también con todos los otros cuatro casos estudiados.

En Aragón et al. (2022) se presenta el estudio numérico-experimental, también con la hipótesis de flujo 2DH, del quinto caso que se incluye en Jiménez y Berezowsky (2004), con el empleo de tres sistemas de modelación matemática, que son: HEC-RAS, Iber y Telemac-Mascaret. Los autores presentan las distribuciones en planta de las velocidades medidas en ocho secciones dentro del canal curvo, bajo la consideración de que la velocidad promediada en la vertical puede ser representada por la velocidad puntual correspondiente a la elevación del cuarenta por ciento del tirante medido desde la plantilla del canal. Los autores presentan la comparación numérico-experimental del campo de velocidades, y muestran un análisis de regresión de las velocidades medidas y calculadas, con lo que obtienen un coeficiente de correlación del orden del 93 %. Sin embargo, identifican que el componente \bar{v} de la velocidad presenta menor ajuste en algunas secciones. También, identificaron el desarrollo del flujo helicoidal, y una capa de corte entre el flujo principal y uno secundario; en esta zona se desarrolló la separación del flujo secundario del principal, todo esto desde el enfoque 2DH. En sus conclusiones indican que en esta zona no es posible tener una buena aproximación bajo esta consideración (2DH), y recomiendan (1) ampliar las mediciones de la velocidad en todo el canal, y (2) estudiar el comportamiento de la velocidad en la zona de separación del flujo.

2.2. Objetivo

Con base en lo anterior, en esta sección se presenta la continuación de esa investigación y debido a los fenómenos reportados por Aragón et al. (2022), como el flujo helicoidal, la zona de separación, la capa de corte, que son fenómenos tridimensionales (Nezu et al., 1985; Nezu y Nakagawa, 1993), se presenta el estudio de la comparación del campo tridimensional

de velocidades del flujo de agua sobre un canal curvo de ancho variable. Así que, en el presente trabajo se amplían las mediciones experimentales de la velocidad y se comparan con las obtenidas por los sistemas de modelación matemática TELEMAC-3D y FLOW-3D, ambos modelos resuelven versiones de las ecuaciones RANS (Ecuaciones de Navier Stokes con promedios de Reynolds, por sus siglas en inglés).

2.3. Preguntas de investigación

El presente estudio, se centra en caracterizar el campo de velocidades del flujo de agua sobre el canal curvo (dispositivo experimental), indicado en Jiménez y Berezowsky (2004) y Aragón et al. (2022). Las preguntas de investigación son:

1. ¿Cuál es la capacidad de un modelo tridimensional para reproducir el campo de velocidades que se presenta en un canal curvo experimental?, y
2. ¿Cuál es la precisión y la aproximación de un modelo tridimensional para calcular los ángulos de desviación del campo de velocidades que se presenta en un canal curvo experimental?

2.4. Dispositivo experimental

En el laboratorio de Hidráulica del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (IIUNAM), se construyó un canal curvo con sección transversal rectangular; el ancho de plantilla tenía una curvatura compuesta en planta, con ancho variable. La curvatura del canal permitió el desarrollo del movimiento de flujo helicoidal. La instalación experimental consta de: un cárcamo con capacidad del orden de 3.5 m^3 ; un sistema de bombeo con dos bombas de 1.5 HP cada una; un sistema de aforo, en el que se tiene un vertedor de pared delgada de forma triangular, con ángulo de 90° ; la longitud del canal fue de 6.5 m; al final del canal se localiza una compuerta vertical plana que se empleó para controlar el tirante, y que permitió la descarga del flujo al cárcamo, con lo que se forma un circuito cerrado de recirculación del flujo.

En la Figura 2.1 se presenta la vista en planta de la mayor parte de la instalación experimental. El ancho de la plantilla con la que inicia el canal fue de 0.78 m (Sección 1, ver Figura 2.1); este ancho se redujo de manera gradual a 0.40 m (en la sección 3, ver Figura 2.1), después se presentó una expansión gradual que va de la sección 3 a la sección 8 (ver Figura 2.1), con un ancho de sección de 0.50 m. Finalmente, se mantiene el ancho de sección de 0.5 m con un canal recto, desde la sección 8 hacia aguas abajo (ver Figura 2.1).

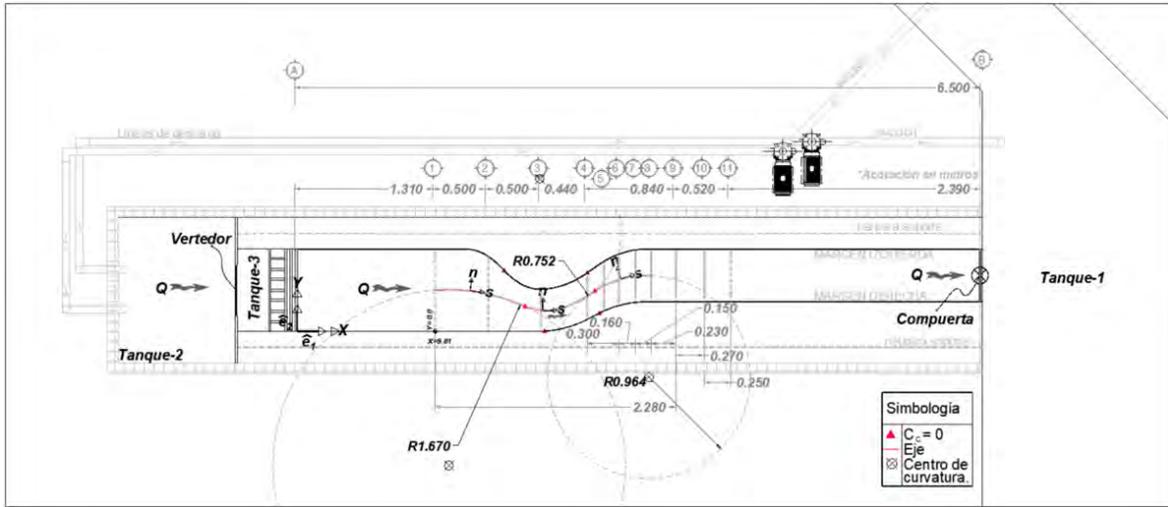


Figura 2.1. Geometría de la instalación experimental, vista en planta.

En el aforo del caudal, se emplearon dos fórmulas semi-empíricas recomendadas internacionalmente: una de ellas es la propuesta por la International Organization for Standardization (ISO 1438, 2017), y la otra es la recomendada por la Universidad Católica de Chile (Sotelo, 2007). Se obtuvieron ambas curvas de descarga del vertedor, cuyos valores calculados del caudal difieren en la quinta cifra significativa; con base en estos resultados, se calculó el valor promedio de los correspondientes caudales, para determinar el modelo numérico de una ley de descarga; así, se obtuvo que, con un valor de $g = 9.78 \text{ m/s}^2$ (para la Ciudad de México (Chanson, 2004)). En donde, Q es el caudal (m^3/s), y h_e es la carga sobre el vertedor (m).

$$Q = 1.3698h_e^{2.5} \quad (2.1)$$

Se identificaron tres radios de curvatura correspondientes al eje central del canal, el primero y el tercero se refiere a una curva cóncava, el segundo a una curva convexa. La información de los radios de curvatura Rc , las coordenadas de los círculos (x_{Rc}, y_{Rc}) asociados a los radios de curvatura, y las coordenadas en donde la curvatura es nula $(x_{(Cc=0)}, y_{(Cc=0)})$, se indican en la Tabla 2.1. La curvatura del eje central del canal se calcula con la siguiente ecuación (Abad y García, 2009):

$$Cc(s) = \frac{1}{Rc(s)} = \frac{\partial\theta(s)}{\partial(s)} \quad (2.2)$$

Tabla 2.1: Radios de curvatura del eje central.

| Rc (m) | x_{Rc} (m) | y_{Rc} (m) | $x_{(Cc=0)}$ (m) | $y_{(Cc=0)}$ (m) |
|----------|--------------|--------------|------------------|------------------|
| 1.67 | 9.94 | -1.2745 | - | - |
| 0.75 | 10.82 | 0.94 | 10.66 | 0.23 |
| 0.96 | 11.83 | -0.43 | 11.32 | 0.38 |

En donde, $\theta(s)$ es la amplitud angular y $Rc(s)$ el radio de curvatura. En la Figura 2.1 se muestra el eje del canal, en color rojo, sobre este eje se ha establecido un sistema de referencia curvilíneo (s, n, z) , en donde el componente s representa la coordenada en el eje de la abscisas, el componente n la coordenada sobre el eje de las ordenadas, y el componente z la coordenada sobre el eje vertical. Sin embargo, observe que los puntos de inflexión, en donde la curvatura es nula, indicados en la Figura 2.1 por triángulos en color rojo, permiten identificar que las secciones transversales para la medición resultan tener un grado de inclinación importante sobre la perpendicularidad del flujo, lo que incluso como se analizará más adelante no asegura que la distribución de velocidad sea completamente perpendicular en estas secciones, debido principalmente por flujo helicoidal. Por tanto, se establece un sistema de coordenadas cartesiano (X, Y, Z) y su correspondiente base ortonormal $(\vec{e}_1, \vec{e}_2, \vec{e}_3)$, en donde, las secciones de medición se orientan sobre este sistema y los puntos de medición se localizan en las secciones perpendiculares al eje X , es decir sobre el eje Y , como se acotan en las secciones de la Figura 2.1.

2.5. Métodos

En la modelación física se miden los componentes de velocidad (u, v, w) , el nivel del agua en la sección 11 (ver Figura 2.1), y el caudal que ingresa al modelo físico (Q) . Desde un punto de vista estadístico, es posible determinar pequeñas muestras representativas del flujo, esto para determinar la velocidad en distintos puntos distribuidos espacialmente dentro del canal, al obtener las muestras se determina un valor medio de los componentes de velocidad (promedios en el tiempo) y finalmente un vector de velocidad, este enfoque, se conoce como promedios de Reynolds. Por otro lado, en la modelación numérica, se obtuvieron aproximaciones del campo de velocidad al resolver las ecuaciones de Navier Stokes mediante esquemas numéricos y procesos iterativos, por lo que es necesario tener un amplio conocimiento sobre el fenómeno analizado, así como equipos de cómputo de alto rendimiento cuando se usan grandes cantidades de elementos en el proceso de mallado. Se recomiendan ambas técnicas de modelación para mejorar la comprensión del fenómeno que se analiza. Sin embargo, esto en la práctica no siempre es posible, por lo que esta investigación permite determinar la aproximación de los modelos numéricos usados aquí, así como la validación y verificación con base en mediciones experimentales, y bajo las condiciones controladas que difícilmente se tendrán en la práctica. Además, los resultados experimentales permiten validar nuevos modelos numéricos.

2.6. Modelación Física

La modelación física es una técnica que permite determinar el campo de velocidades sobre estructuras hidráulicas, ríos, meandros, planicies, entre muchas más aplicaciones, en donde se busca obtener una representación de flujos de agua sobre estas geometrías complejas; permite tener una visualización clara del fenómeno y generar conocimiento sobre la dinámica del flujo, y generalmente en Ingeniería esta técnica es bastante bien aceptada.

El proceso de medición y adquisición de la información de la velocidad de un flujo de agua a superficie libre, ha pasado desde la observación, hasta el uso de trazadores que viajan en la superficie libre, equipos mecánicos de propelas, y numerosos instrumentos. Actualmente el uso de equipos ultrasónicos permite determinar velocidades puntuales y perfiles, con aplicaciones

tanto de laboratorio como de campo. Sin embargo, la física detrás del movimiento de los fluidos actualmente sigue siendo un tema sin resolver, un claro ejemplo es la turbulencia (Wilcox, 2004).

2.6.1. Registros de velocidades

Los componentes de la velocidad se registraron con un Velocímetro Doppler Acústico (MicroADV 16MHz), este equipo se colocó sobre un soporte que permite desplazarlo de forma manual a lo ancho y largo del canal, y colocarlo en la posición espacial específica. El volumen muestreo central, es un cilindro que se localiza a 50 mm por debajo del emisor, este tiene 6 mm de diámetro por una altura de 1-4 mm estándar y puede ser modificada por el usuario, aquí se opera de forma normal. El ADV se conectó mediante una sonda por un puerto USB a un equipo de cómputo portátil, las muestras se recolectaron por un periodo de tiempo de 180 s y se analizaron con el software WinADV (Wahl, 2000), se filtraron con los dos parámetros de calidad; con una correlación (COR) superior a 80 % y una relación ruido-senal (SNR) de 15 dB.

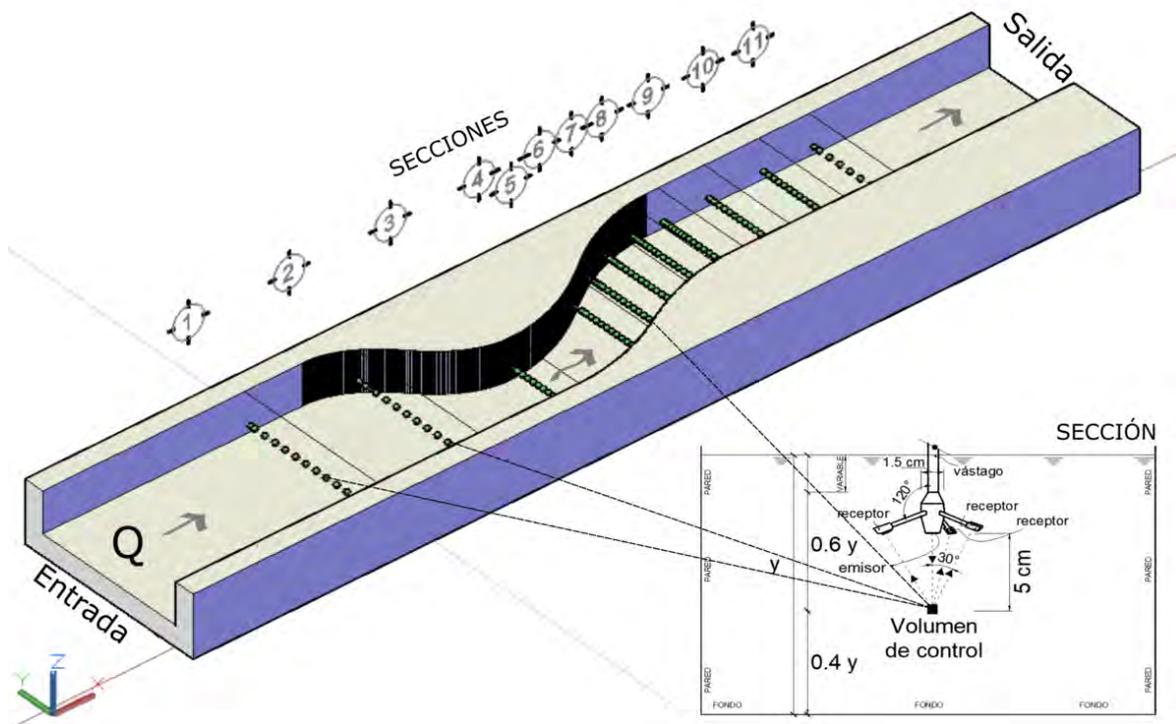


Figura 2.2. Velocímetro Doppler Acústico, MicroADV 16 MHz, y secciones de medición.

La geometría del modelo 3D del canal curvo se presenta en la Figura 2.2, aquí se muestran los 173 puntos de medición (puntos indicados como Volumen de control, en la Figura 2.2) distribuidos espacialmente a lo largo de las once secciones. El equipo MicroADV 16MHz se colocó en un soporte con el objetivo de medir los componentes del vector velocidad localizados en el plano de elevación que corresponde a 40 % de la profundidad del flujo, y se desplazó a lo ancho de cada sección, siempre se orientó en la dirección X; una descripción amplia y detallada de la operación del MicroADV 16MHz se encuentra en Anderson y Lohrmann (1995). Este conjunto de vectores de velocidad determinados experimentalmente son utilizados

en el proceso de calibración y validación de los modelos numéricos.

Tabla 2.2: Escenarios y condiciones experimentales.

| Escenario | Q | y | U | S_w | F_r | R_e | Z_m |
|-----------|-------|--------|-------|--------------------------|-------|---------------------|-------|
| | [l/s] | [m] | [m/s] | [m/m, $\times 10^{-4}$] | [-] | [-, $\times 10^4$] | [m] |
| A | 10.78 | 0.1503 | 0.088 | 2.1 | 0.071 | 1.33 | 0.06 |
| B | 10.66 | 0.1440 | 0.088 | 3.4 | 0.072 | 1.28 | 0.06 |
| C | 10.59 | 0.1465 | 0.084 | 5.1 | 0.067 | 1.23 | 0.06 |

Se realizaron tres pruebas experimentales identificadas como escenarios en la Tabla 2.2 (A, B y C). También, en la misma Tabla se reporta el caudal (Q) en l/s, el tirante (y) en m, la velocidad media de referencia en la sección 1 (U) en m/s (promediada en tiempo (180 s) y a lo ancho de la sección 1, para cada escenario), la pendiente de la superficie libre del agua (S_w) en m/m, el número de Froude (F_r) adimensional, el número de Reynolds (R_e) adimensional y la elevación correspondiente al plano de medición en m ($Z_m = 0.4y \approx 0.06m$).

El campo de velocidades del flujo se puede inferir a través de la solución de las ecuaciones de Navier Stokes (NSEs, por sus siglas en inglés) desde el punto de vista numérico, sin embargo, existen diversos niveles de aproximación que va desde las soluciones del tipo de los Promedios de Reynolds (RANS), Simulación de Grandes Remolinos (LES, por sus siglas en inglés), hasta la Simulación numérica Directa (DNS) (Pope, 2000; Rodi et al., 2013). Este tipo de clasificación se basa en aproximar el comportamiento de la turbulencia que se presenta en el movimiento de los fluidos, incluso existen más clasificaciones dependiendo de las consideraciones sobre el fenómeno de la turbulencia (Wilcox, 2004).

2.7. Modelación numérica

El campo de velocidad turbulenta es descrito a partir de las ecuaciones de Navier-Stokes (NSEs), y una descripción ampliamente conocida es la de los promedios de Reynolds, desde un punto de vista estadístico, es posible describir la velocidad $u(\mathbf{x}, t)$, en un valor medio y la fluctuación (Pope, 2000), en donde \mathbf{x} es el vector de posición y se expresa como:

$$u(\mathbf{x}, t) = \overline{u(\mathbf{x}, t)} + u'(\mathbf{x}, t) \quad (2.3)$$

En este trabajo se usan los sistemas de modelación matemática para flujo tridimensional y turbulento, con el fin de mejorar el conocimiento en general de la hidrodinámica en el canal curvo. Entre algunos de los modelos matemáticos desarrollados para el cálculo de flujo tridimensional se encuentran los publicados por Leschziner y Rodi (1979), Kalkwijk y De Vriend (1980), Huang et al. (2009), entre otros. En este trabajo se usa el sistema de modelación matemática TELEMAT3D (EDF-R&Dc., 2020) y FLOW3D (Flow-Science, 2017a), se presenta una breve descripción de los modelos utilizados.

2.7.1. Modelo matemático Telemac-Mascaret 3D

El sistema de modelación matemática Telemac-Mascaret en su versión 3D permite aproximar una solución a las NSEs (EDF-R&Dc., 2020). En la modelación numérica se usa la versión no hidrostática, para tratar el término de presión que considera: la presión hidrostática más un tratamiento dinámico, en este último se usa el paso de proyección (Hervouet, 2007), ocasionando que el gradiente de presión dinámica actúe como corrección, asegurando la divergencia libre (cero) requerida por la velocidad y corrigiendo el cálculo de la superficie libre. Las ecuaciones a resolver son la de continuidad (Ecuación 2.4) y *momentum* (Ecuaciones 2.5 a 2.7), en las tres direcciones:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2.4)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \Delta(u) + F_x \quad (2.5)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \Delta(v) + F_y \quad (2.6)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - g + \nu \Delta(w) + F_z \quad (2.7)$$

La ecuación de presión no hidrostática es:

$$p = P_{atm} + \rho_0 g (Z_s - z) + \rho_0 g \int_z^{Z_s} \frac{\Delta \rho}{\rho_0} dz + P_d \quad (2.8)$$

En donde, Z_s es la elevación de la superficie libre del agua (m); u, v, w , los componentes de velocidad (m/s); p , la presión (N/m²); P_{atm} , la presión atmosférica (Pa); g , la aceleración de la gravedad (m/s²); ν , la viscosidad cinemática (m²/s); Z_f , la elevación de fondo (m); ρ_0 , la densidad de referencia (kg/m³); Δp , la variación de la densidad alrededor de ρ_0 (-); t , el tiempo (s); x, y, z , las coordenadas espaciales (m); F_x y F_y , los términos fuente; P_d , la presión dinámica (Pa). El proceso de solución se realiza en tres pasos: el primero consiste en estimar los componentes de velocidad advectiva, resolviendo los términos de advección en las ecuaciones de momentum; el segundo calcula nuevamente los componentes de la velocidad advectiva, a partir del paso anterior y toma en cuenta los términos de difusión y fuente de las mismas ecuaciones; y en el tercer paso calcula la profundidad del agua al integrar en la vertical la ecuación de continuidad y momentum, incluyendo únicamente los términos de presión-continuidad. El dominio de cálculo se discretiza con elementos triangulares, y el cálculo lo desarrolla en cada nodo de la malla, también permite incorporar los efectos de la turbulencia mediante el modelo $k - \varepsilon$ (Rodi, 1984; EDF-R&Dc., 2020).

En la etapa de preproceso, se construye la geometría del modelo del canal curvo y se establecen las condiciones de frontera, con la herramienta Blue Kenue (CHC, 2011). Las ecuaciones de flujo y de turbulencia se resuelven en forma modular con el método de pasos fraccionados: primero se calcula la advección con el método de las características, luego la propagación y la difusión (incluida la turbulencia) y los términos fuente en las ecuaciones dinámicas, aunque existen recomendaciones para implementar los esquemas numéricos (Hervouet, 2007). La discretización del canal curvo con Telemac-Mascaret fue con 52,635 nodos por plano, con 30 planos en la vertical distribuidos uniformemente, esto proporciona

un total de 1,579,050 nodos y 8,945,514 elementos (tetraedros), los lados de los elementos triangulares (base de los prismas) presentan longitudes que van desde los 0.003-0.010 m, siendo los mas pequeños cerca de la margen izquierda.

Las condiciones iniciales para la modelación numérica son, un caudal de $0.0106 \text{ m}^3/\text{s}$ ($X = 9.0 \text{ m}$), y un tirante de 0.1465 m a la salida del canal ($X = 13.5 \text{ m}$), que corresponde al escenario *C* de la modelación física indicado en la Tabla 2.2. La fricción en el fondo y en las paredes se consideró con un coeficiente de fricción de Manning de $0.011 \text{ s}/\text{m}^{\frac{1}{3}}$ (canal de concreto liso-pulido). El incremento de tiempo de cálculo es de, $\Delta t = 0.0015 \text{ s}$. El cálculo distribuido se desarrolló en un clúster con 12 núcleos de procesamiento AMD, distribución CentOS, versión 6.9, arquitectura de 64 bits; se utiliza la interfaz de envío de mensajes, MPI (Gropp et al., 2019) y METIS (Karypis y Kumar, 1997), que realiza la distribución de la malla entre el número de procesadores, el desarrollo del cálculo se realizó en tres pasos (P1, P2 y P3), que se indican a continuación:

- P1. Se establecieron las condiciones iniciales, sin considerar los procesos de turbulencia, durante un tiempo de cálculo numérico de 5 minutos (análisis 2DH)
- P2. Se continuó el cálculo anterior (P1) y se adicionó el modelo de turbulencia $k - \epsilon$ durante un tiempo de cálculo de 10 minutos (análisis 2DH con turbulencia), y finalmente,
- P3. Se continuó el cálculo de la hidrodinámica a partir de P2, se consideró un total de 30 planos en la vertical, y se adicionó el mismo modelo de turbulencia en esta dirección (Z), durante un tiempo de cálculo de 1 minuto (análisis 3D).

Los tiempos de cálculo fueron 5.4, 15.6 y 72.77 horas para cada una de los pasos respectivos, con un total de 93.78 horas de proceso de cálculo, que es la suma de todos tres pasos de cálculo.

2.7.2. Modelo matemático FLOW3D

El software FLOW3D V.11.2 (Flow-Science, 2017a) se desarrolló sobre las bases de la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD, por sus siglas en inglés), y puede aproximar una solución a las ecuaciones de movimiento de los fluidos en su versión tridimensional. Esta técnica permite resolver las ecuaciones de gobierno de continuidad, momentum y energía, mediante la discretización espacial con volúmenes de control, usando esquemas numéricos que alcanzan la convergencia necesaria. La discretización de la malla se realiza mediante celdas rectangulares (ortoaedros). Una idea fundamental de la aproximación numérica es que ésta mejora a medida que se reduce el incremento espacial ($\Delta x, \Delta y, \Delta z \rightarrow 0$), sin embargo, en ocasiones se alcanza el límite (al no presentar variaciones importantes) y el modelo numérico no puede reproducir el comportamiento del campo de velocidades del fenómeno analizado, principalmente por efectos de turbulencia, aunque pueden ser varios efectos. Esto presenta la desventaja de que, a mayor número de elementos, el tiempo de proceso es mayor, y también demanda un equipo de cómputo más potente para realizar los cálculos, es por esto, que es necesario determinar un equilibrio y establecer condiciones para llegar a soluciones precisas o adecuadas. Las ecuaciones que permite resolver el software son: continuidad (Flow-Science, 2017b):

$$V_F \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u A_x) + R \frac{\partial}{\partial y} (\rho v A_y) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho w A_z) + \xi \frac{\rho u A_x}{x} = R_{DIF} + R_{SOR} \quad (2.9)$$

En donde, V_F es la fracción de volumen abierto al flujo; ρ , la densidad del fluido; u, v, w , son los componentes de la velocidad en la dirección de un sistema de referencia ortogonal derecho; R_{DIF} , el término de difusión turbulenta y R_{SOR} , la fuente de masa; el primer término del segundo miembro de la Ecuación 2.9 se compone de (Flow-Science, 2017b):

$$R_{DIF} = \frac{\partial}{\partial x} \left(v_p A_x \frac{\partial \rho}{\partial x} \right) + R \frac{\partial}{\partial y} \left(v_p A_y \frac{\partial \rho}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_p A_z \frac{\partial \rho}{\partial z} \right) + \xi \frac{v_p A_x}{x} \frac{\partial \rho}{\partial x} \quad (2.10)$$

El coeficiente v_p es igual a $S_c = \frac{\mu}{\rho}$, en el cual μ es el coeficiente de difusión de momentum; S_c , es el recíproco del número de Schmidt turbulento constante (solo para procesos de mezclado de turbulencia en fluidos con densidad no uniforme). Por su parte R_{SOR} permite inyectar masa a través de superficies porosas u obstáculos. Para fluidos incompresibles la ecuación se reduce a (Flow-Science, 2017b):

$$\frac{\partial}{\partial x} (u A_x) + R \frac{\partial}{\partial y} (v A_y) + \frac{\partial}{\partial z} (w A_z) \xi \frac{u A_x}{x} = \frac{R_{SOR}}{\rho} \quad (2.11)$$

Por su parte, las ecuaciones de momentum en las tres direcciones son (Flow-Science, 2017b):

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(u A_x \frac{\partial u}{\partial x} + v A_y R \frac{\partial u}{\partial y} + w A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right) - \xi \frac{A_y v^2}{x V_F} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \\ + G_x + f_x - b_x - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (u - u_w - \delta u_s) \end{aligned} \quad (2.12)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(u A_x \frac{\partial v}{\partial x} + v A_y R \frac{\partial v}{\partial y} + w A_z \frac{\partial v}{\partial z} \right) + \xi \frac{A_y u v}{x V_F} = -\frac{1}{\rho} R \frac{\partial p}{\partial y} \\ + G_y + f_y - b_y - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (v - v_w - \delta v_s) \end{aligned} \quad (2.13)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(u A_x \frac{\partial w}{\partial x} + v A_x R \frac{\partial w}{\partial y} + w A_z \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} R \frac{\partial p}{\partial z} \\ + G_z + f_z - b_y - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (w - w_w - \delta w_s) \end{aligned} \quad (2.14)$$

En donde G_x, G_y y G_z son aceleraciones de cuerpo; f_x, f_y y f_z , son aceleraciones viscosas; b_x, b_y y b_z , son las pérdidas de flujos en medios porosos; u_w, v_w y w_w , son los componentes de la velocidad del componente fuente; u_s, v_s y w_s son los componentes de velocidad del fluido en la superficie de la fuente Flow-Science (2017b).

Las características geométricas del canal curvo son las ya indicadas en el apartado anterior. Las ecuaciones de flujo y de turbulencia se resuelven en forma modular con el método de volumen de fluido (VOF) (Flow-Science, 2017b; Hirt y Nichols, 1981), para la modelar la

turbulencia se usa el modelo $k - \varepsilon$ RNG, se establece un coeficiente de rugosidad $k_s=0.5$ mm. La geometría está compuesta por 5,516,000 elementos cúbicos con longitud de 0.005 m, el incremento de tiempo es calculado internamente por FLOW3D, el tiempo de calculo numérico fue de 5 minutos, con este tiempo FLOW3D indicó que alcanzó la condición de estabilidad, con un tiempo de proceso de 43.56 horas.

2.8. Resultados

Una representación aceptable de la velocidad instantánea (u) es, en términos de una velocidad promediada en el tiempo (\bar{u}) y una velocidad fluctuante (u') del componente aleatorio (promedios de Reynolds). Por lo tanto, al implementar un sistema cartesiano, las velocidades instantáneas en las direcciones X , Y y Z son (Hinze, 1959; Pope, 2000):

$$u = \bar{u} + u' \quad (2.15)$$

$$v = \bar{v} + v' \quad (2.16)$$

$$w = \bar{w} + w' \quad (2.17)$$

La velocidad promediada en el tiempo se define como (Hinze, 1959; Pope, 2000):

$$\bar{u} = \frac{1}{T} \int_0^T u dt \quad (2.18)$$

La escala de tiempo fue de 180 s, que corresponde a la duración de la muestra. La velocidad fluctuante (u') se define como:

$$u' = u - \bar{u} \quad (2.19)$$

De esta manera se comparan los componentes de la velocidad media experimentales del vector velocidad (\bar{U}) con el campo de velocidades obtenido de la modelación numérica, con fines de aplicación ingenieril, tanto para desarrollar la calibración, la validación, la verificación y la caracterización del flujo el campo de velocidades que se presenta a $0.4y$, en donde y es el tirante del agua, y el campo de velocidades promediado en la vertical que se obtiene de la modelación numérica se puede aproximar con hasta un 93 % de aproximación general (Aragón et al., 2022), para el escenario C analizado (ver Tabla 2.2).

2.8.1. Velocidades experimentales

En la Figura 2.3, se presentan las distribuciones de los componentes de velocidad en las once secciones de análisis; en el eje de las abscisas están los componentes de la velocidad (\bar{u} , \bar{v} y \bar{w}) con relación a la velocidad media de referencia de la sección 1, correspondiente a cada escenario (\bar{U} , reportada en la Tabla 2.2), mientras que en el eje de las ordenadas se presenta la posición referente a la sección transversal en relación al ancho total de la sección (b/B), siendo b la coordenada en Y y B en ancho de la sección.

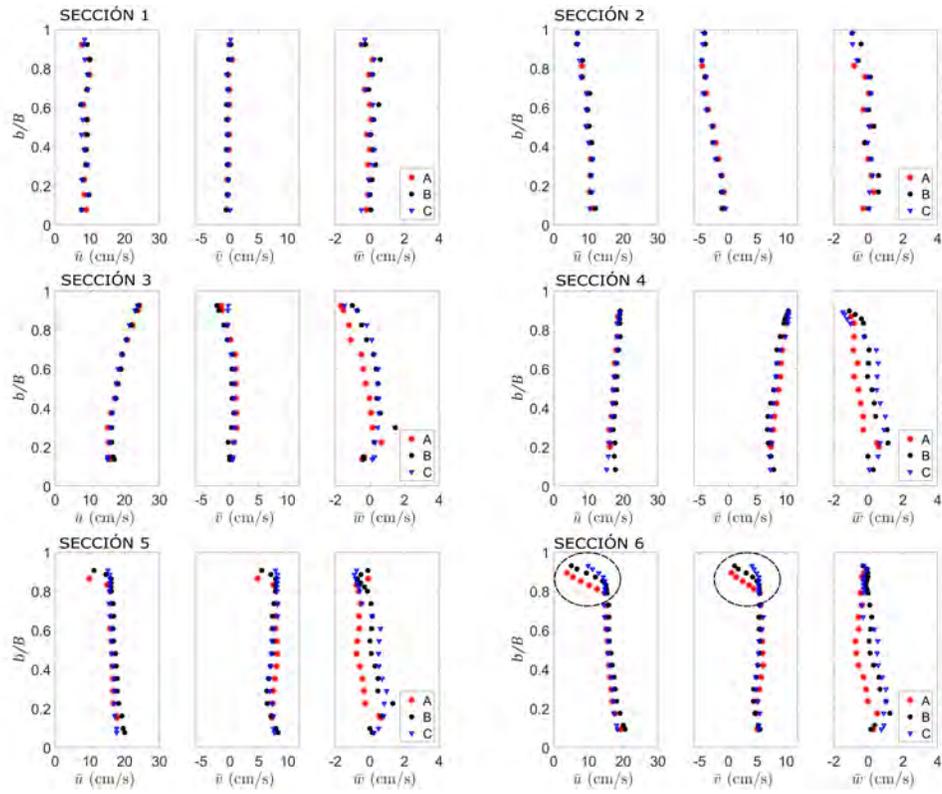


Figura 2.3. Distribuciones de velocidad experimental en secciones 1 a 6.

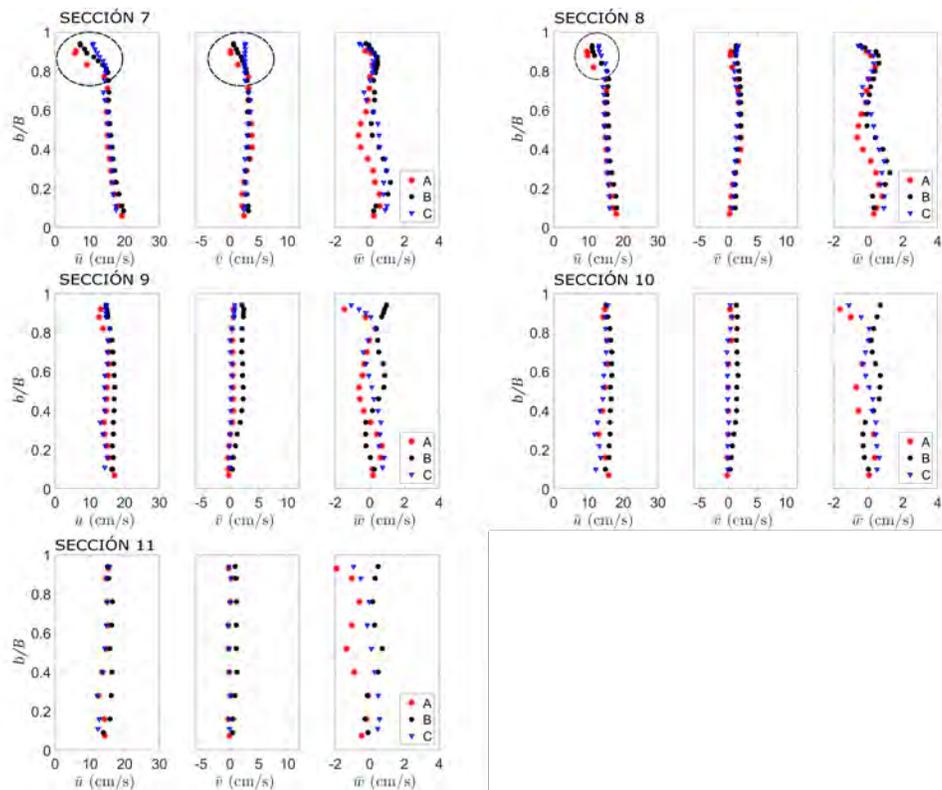


Figura 2.3. Distribuciones de velocidad experimental en secciones 7 a 11.

En la Figura 2.3 en las secciones 5 a 9, se identificó una variación de la velocidad en el 20% del ancho del canal, cerca de la MI, es decir, $0.8 \leq b/B \leq 1$, así como una disminución en magnitud con respecto a la reportada en la parte central del canal. Además, se identificó una variación entre las mediciones experimentales en esta zona, es decir, fuera del rango del ancho adimensional indicado, las velocidades se llegan a mezclar entre los tres escenarios, pero en el rango $0.8 \leq b/B \leq 1$, las velocidades indican un fenómeno claramente tridimensional y que en esta zona, la velocidad presenta comportamientos distintos para cada escenario. En el primer escenario (A), que es el que conduce un caudal ligeramente mayor, se observó una disminución de la velocidad en mayor grado comparado con los otros dos escenarios. También, la velocidad tiende a disminuir a medida que $b/B \rightarrow 1$, este gradiente es más pronunciado para el componente \bar{u} con respecto a los otros dos.

2.8.2. Comparación de velocidades medidas vs calculadas

En la Figura 2.4, se presentan los vectores de velocidad calculados numéricamente (en color gris) con el modelo Telemac 3D y los vectores de velocidad experimentales (en color azul) correspondientes al plano de medición, a una elevación de 0.06 m. Se puede identificar el sentido del flujo por la regla de la mano derecha, además todas las secciones son perpendiculares al eje X, por lo que tiene un sistema de referencias cartesiano.

En la sección 1, se identificó que tanto los vectores de velocidad calculados numéricamente como los determinados experimentalmente no presentaron desviaciones importantes, por lo que se puede considerar que la condición de entrada corresponde a un flujo uniforme, y no se observó una influencia por efecto de la curva como en la sección 2.

En las secciones 2 y 3, con la información numérica se identificó el efecto de flujo helicoidal, ya que el vector de velocidad del flujo en la margen izquierda (MI), tiene una dirección hacia abajo, esto es $-Z$, y cerca de la margen derecha (MD) la orientación del vector fue en dirección positiva, $+Z$. De manera experimental, se colocaron trazadores que viajaban en el fondo y sobre la superficie libre del agua, describiendo trayectorias distintas, que se analizan más adelante. El efecto del flujo helicoidal se observó claramente con los resultados del campo de velocidades en la sección 3, y este fenómeno se mantiene sobre las secciones 4 a 9. En la sección 8, los vectores de velocidad cerca de la MD, en el rango, $0.35 < y < 0.6$, presentaron una desviación mayor para los resultados experimentales con respecto a los numéricos, e incluso se observan que los vectores se orientan en direcciones verticales diferentes.

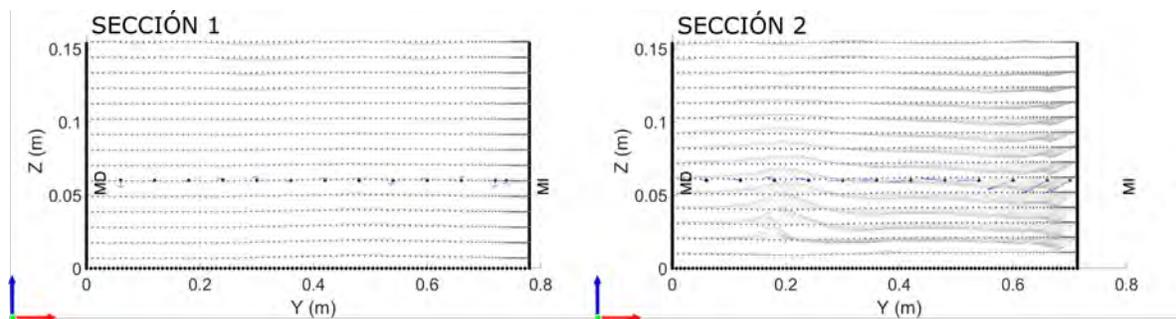


Figura 2.4. Distribuciones de velocidad en secciones 1 y 2, en azul velocidades experimentales, en gris velocidades calculadas con el modelo TELEMAC3D

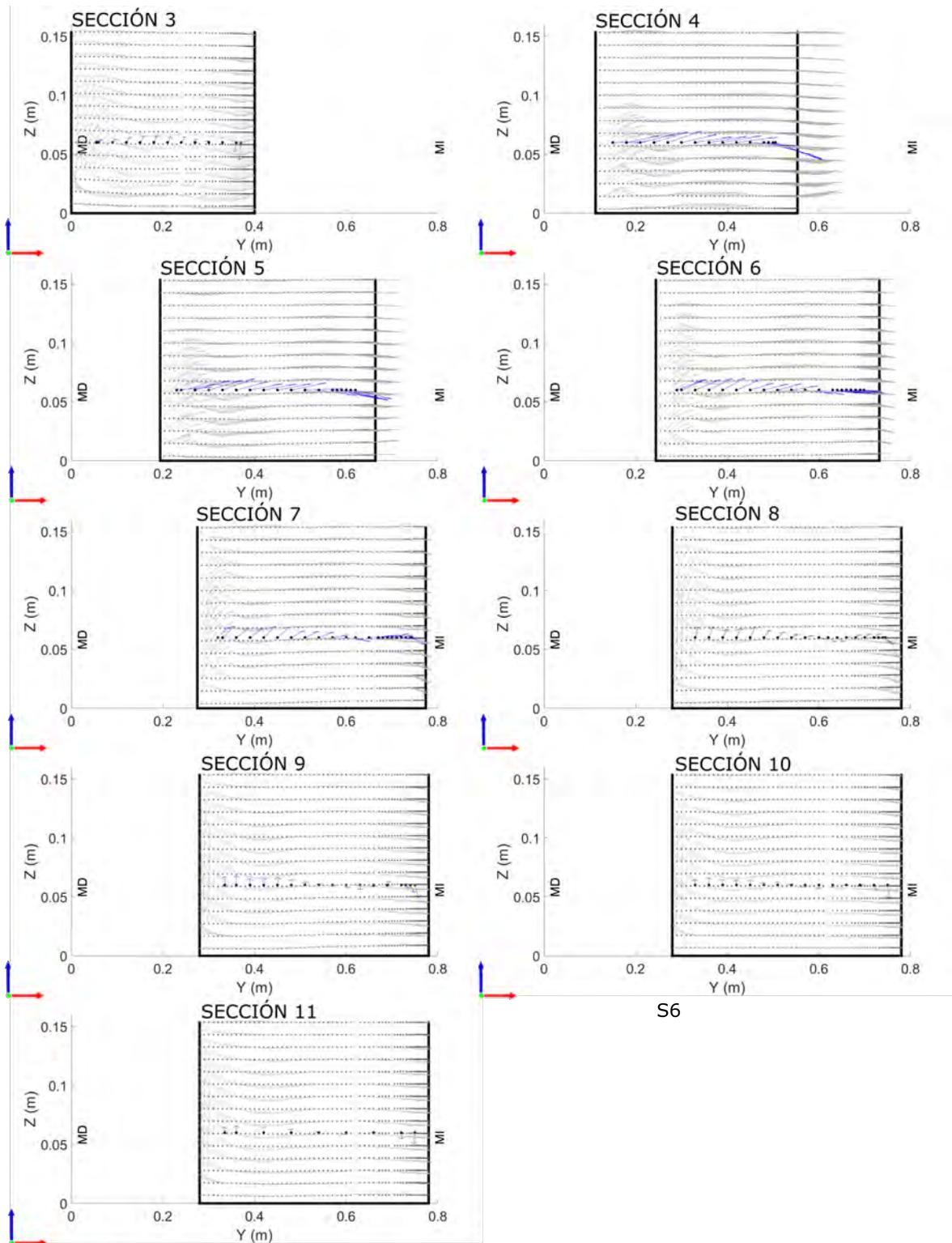


Figura 2.4. Distribuciones de velocidad en secciones 3 a 11, en azul velocidades experimentales, en gris velocidades calculadas con el modelo TELEMAC3D.

En la Figura 2.5, se presenta la comparación numérico-experimental de los resultados del campo de velocidades localizado a una elevación de 0.06 m. En este apartado nos referimos a los componentes adimensionales \bar{u}/U , \bar{v}/U y \bar{w}/U como \bar{u} , \bar{v} y \bar{w} , la comparación se realizó

con ayuda de un código desarrollado en MATLAB $\text{\textcircled{R}}$ (The MathWorks Inc., 2020).

En la sección 1, se observó que la distribución de velocidades fue uniforme a lo ancho de la sección, también predominó el componente \bar{u} , sobre los otros dos, que oscilaron alrededor de cero. En la sección 2, el componente \bar{u} aumentó cerca de la MD y disminuyó en la MI, por su parte \bar{v} presentó valores negativos, lo que indica que el vector se desvía de la MI a la MD, y \bar{w} osciló alrededor de 0. En la sección 3, que corresponde a la sección más estrecha, el componente \bar{u} aumentó su velocidad hasta en un factor de 3 cerca de la MI y en un factor de 2 en la MD, mientras que el componente \bar{v} prácticamente osciló en 0, y el componente \bar{w} presentó un incremento en la MD y disminuyó en la MI.

En la sección 4, el componente \bar{u} osciló en un factor de 2, fue ligeramente mayor cerca de la MI y menor en la MD, el componente \bar{v} , alcanzó a superar el factor de 1 cerca de la MI y disminuyó cerca de la MD, el componente \bar{w} en el rango $0 \leq b/B \leq 0.7$ fue positivo, mientras que al superar este rango disminuyó, observe que en esta sección el modelo FLOW3D se aleja de los resultados experimentales y TELEMAC3D presenta menor error.

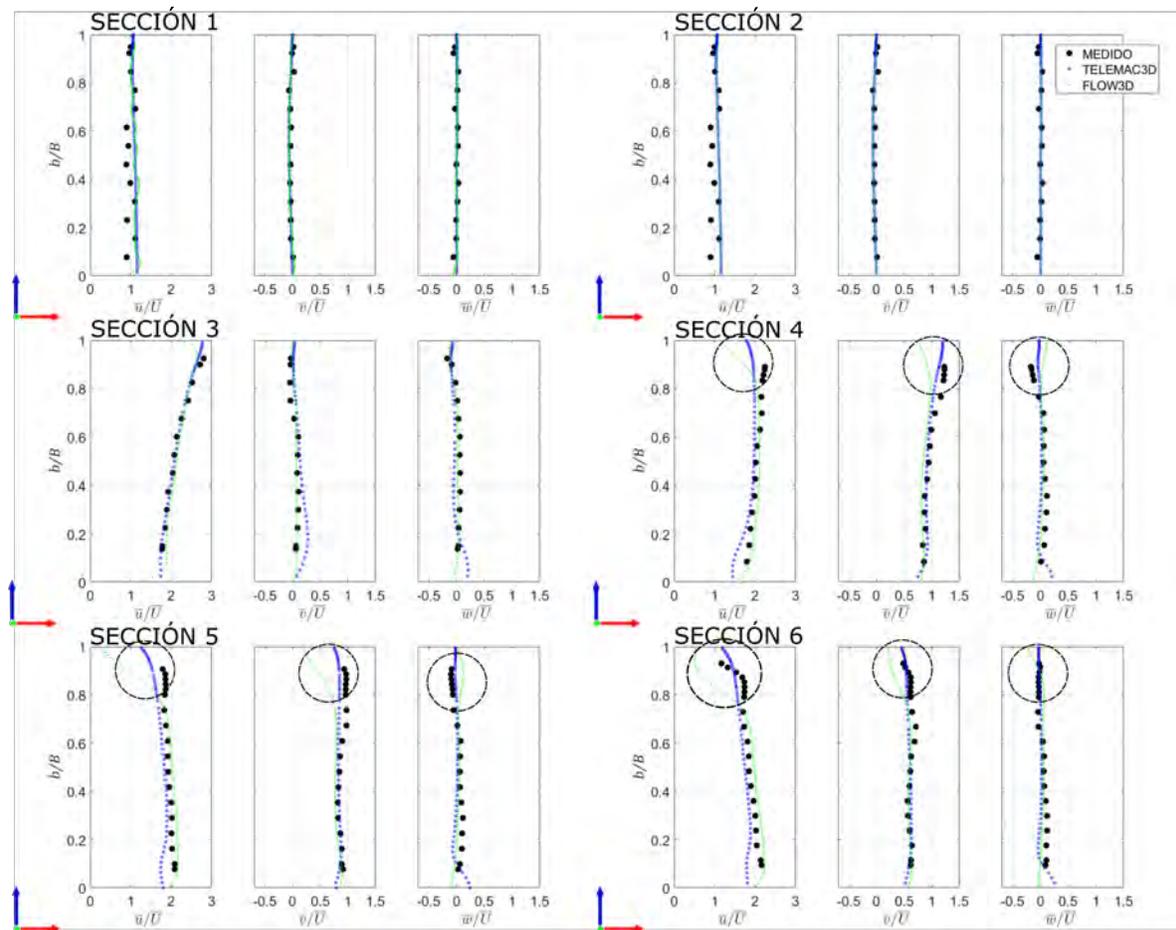


Figura 2.5. Comparación numérico-experimental de las distribuciones de los componentes de velocidad \bar{u}/U , \bar{v}/U y \bar{w}/U (-), en secciones 1 a 6.

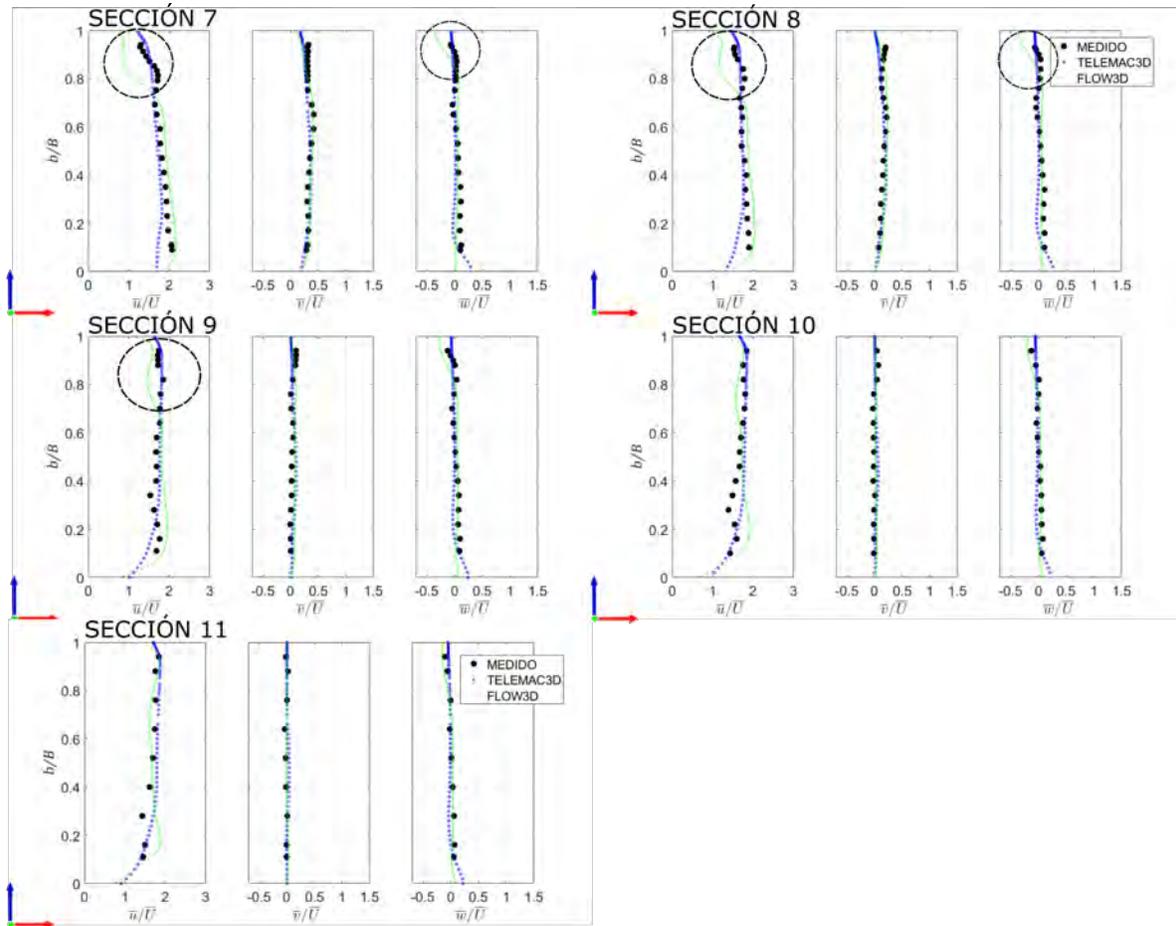


Figura 2.5. Comparación numérico-experimental de las distribuciones de los componentes de velocidad \bar{u}/U , \bar{v}/U y \bar{w}/U (-), en secciones 7 a 11.

En la sección 5, el componente \bar{u} fue de un factor de 2, cargado ligeramente hacia la MD y disminuyó hacia la MI, el componente \bar{v} presentó un factor de 0.8 y su comportamiento es inverso al de \bar{u} , pero se mantuvo positivo, el componente \bar{w} fue positivo en el rango $0 \leq b/B \leq 0.62$ y negativo en el rango $0.62 < b/B \leq 0.7$, el modelo FLOW3D subestimó los componentes \bar{u} y \bar{v} en el rango $0.78 < b/B \leq 1$, también el modelo TELEMAC3D, y en este mismo rango el componente \bar{w} se sobreestimó. En la sección 6, el componente \bar{u} presentó un sesgo en la distribución espacial, fue mayor sobre la MD y disminuyó hacia la MI, con un factor de 2 a 1.7, en el rango de $0 \leq b/B \leq 0.7$, mientras que en el rango de $0.7 < b/B \leq 1$ presentó un gradiente más pronunciado, que alcanzó factores de 1.2, por su parte el componente \bar{u} osciló en un factor de 0.3, se observó como en $b/B \approx 0.7$ presentó un punto de inflexión, el componente \bar{w} presentó oscilaciones alrededor del factor 0, y fue positivo cercano a la MD y negativo cercano a la MI.

En la sección 7, el componente \bar{u} presentó un gradiente pronunciado en el rango de $0.80 < b/B \leq 1$, y cuando $b/B \leq 0.8$, el componente presentó un factor de 2 cerca de la MD, en donde fue máximo, el componente \bar{v} osciló en el rango de 0.3, mientras que el componente \bar{w} osciló alrededor de 0; también en esta sección predominó el componente \bar{u} , esto es, $\bar{w} < \bar{v} < \bar{u}$. La distribución que se calculó con FLOW3D presentó un gradiente pronunciado y se alejó de los datos experimentales. En la sección 8, disminuyó el gradiente del componente \bar{u} en el rango de $0.80 < b/B \leq 1$, y cuando $b/B \leq 0.8$, el componente presentó un factor ligeramente

menor de 2 cerca de la MD, en donde es máximo, el componente \bar{v} osciló en el rango de 0.2, mientras que el componente \bar{w} osciló alrededor de 0, aunque se observó que es ligeramente positivo cerca de la MD y negativo en la MI. Se mantuvo el comportamiento predominante del componente \bar{u} . En la sección 9, el comportamiento del gradiente en $b/B \approx 0.8$ de \bar{u} casi no se observó, sin embargo, cerca de este punto se localizó la velocidad máxima disminuyendo hacia cada una de las márgenes, los dos componentes restantes oscilaron alrededor de 0. En la sección 10, se observó un sesgo del componente \bar{u} , y fue mayor cerca de la MI y disminuyó hacia la MI, presentó un valor mínimo en $b/B \approx 0.28$, los dos componentes restantes oscilaron alrededor de 0, y finalmente, en la sección 11, el comportamiento es muy similar al de la sección 10.

2.8.2.1. Líneas de corriente

En la Figura 2.6, se presentan las líneas de corriente mapeadas con el campo de velocidades en m/s. En la Figura 2.6a), se presenta el corte del volumen analizado que va desde el fondo a 0.10 m de elevación, poco antes de la sección 3 se observa el incremento de la velocidad por efecto de la contracción del ancho del canal, y en esta misma sección las velocidades son máximas y se concentran cerca de la MI ($Y \approx 0.38m$). Se identificó que la velocidad máxima no se mantiene sobre esta margen, sino que cruza hacia la MD, ver sección 5 ($Y \approx 0.25$), en esta misma sección se identificó una zona en donde la velocidad disminuye cerca de la MI ($0.62m \leq Y \leq 0.78m$). Además, en el tramo recto de salida del canal después de la curva (sección 8), se identificó la inclinación de las líneas de corriente, y presentaron una desviación de la MD a la MI, esto para las líneas que se localizan cerca de la superficie libre.

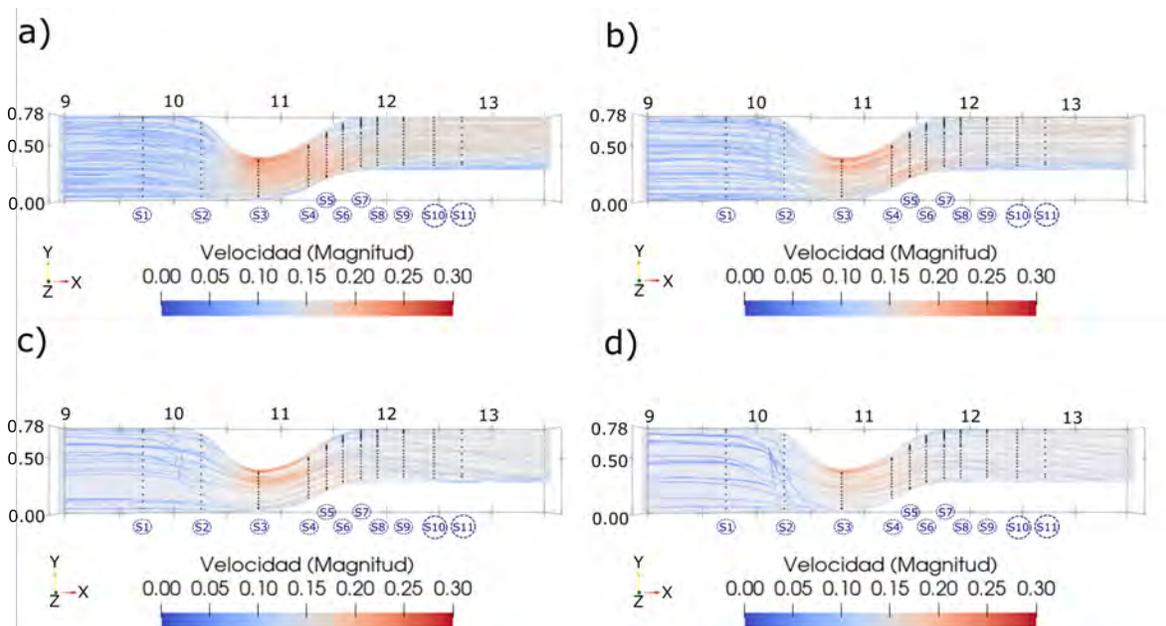


Figura 2.6. Líneas de corriente con el modelo TELEMAC3D, a) $0 < Z \leq 0.10m$, b) $0 < Z \leq 0.08m$, c) $0 < Z \leq 0.06m$ y d) $0 < Z \leq 0.02m$

En la Figura 2.6b), el corte del volumen va desde el fondo hasta 0.08 m de elevación, el comportamiento es muy similar al observado en la Figura 2.6a), sin embargo, se identificó que las líneas de corriente ya no presentaron la tendencia de desviación de la MD hacia la MI,

sino un comportamiento uniforme y paralelo a las paredes laterales (hacia aguas abajo de la sección 8).

En la Figura 2.6c), el corte del volumen va desde el fondo hasta 0.06 m de elevación, que es el plano de elevación en el cual se realizaron las mediciones experimentales, las líneas de corriente cerca de la MI en la sección 2 ($Y \approx 0.78m$) se desviaron hacia la MD, incluso se identificó que unas líneas cruzan de forma casi perpendicular el canal y se alejan del comportamiento observado en líneas de corriente localizadas a mayor elevación. Por otro lado, las líneas de corriente localizadas en la MI después de la sección 3 se contraen hacia esta margen y las otras se desvían hacia la MD, esto permitió identificar la separación del flujo, en por lo menos dos flujos. Además, se observó que alrededor de la sección 8, las líneas de corriente se desvían completamente hacia la MD, este comportamiento se observó con mayor claridad en la Figura 2.6d), donde se presentan las líneas de corriente que corresponden al volumen que va desde el fondo a 0.02 m de elevación, aquí es claro que el comportamiento de la velocidad cercana del fondo es completamente distinto al observado cercano a la superficie libre, estas figuras permiten identificar un flujo helicoidal. Además, se observó que la velocidad localizada en el fondo cercana a la margen izquierda entre la sección 1 y 2, es de muy baja velocidad y que tiende a ser nula, este fenómeno generó que el flujo se desviará por completo de la MI a la MD, más adelante se presentan algunas imágenes del comportamiento de la velocidad correspondientes a estas líneas de corriente.

Por otro lado, en la Figura 2.7 se presentan las líneas de corriente mapeadas con el campo de velocidades calculado con FLOW3D en m/s, el análisis se lleva a cabo mediante la herramienta FlowSight®(Flow-Science, 2017b), propia del software. El análisis de los resultados del modelo numérico 3D permitió identificar una zona de separación con una geometría del tipo cónica, con desviación hacia el interior del flujo, dentro de esta geometría se identificó un flujo secundario, y dentro de esta zona, no se mantiene una ley logarítmica de la velocidad en toda la vertical. Además, este flujo no sigue el comportamiento del flujo principal.

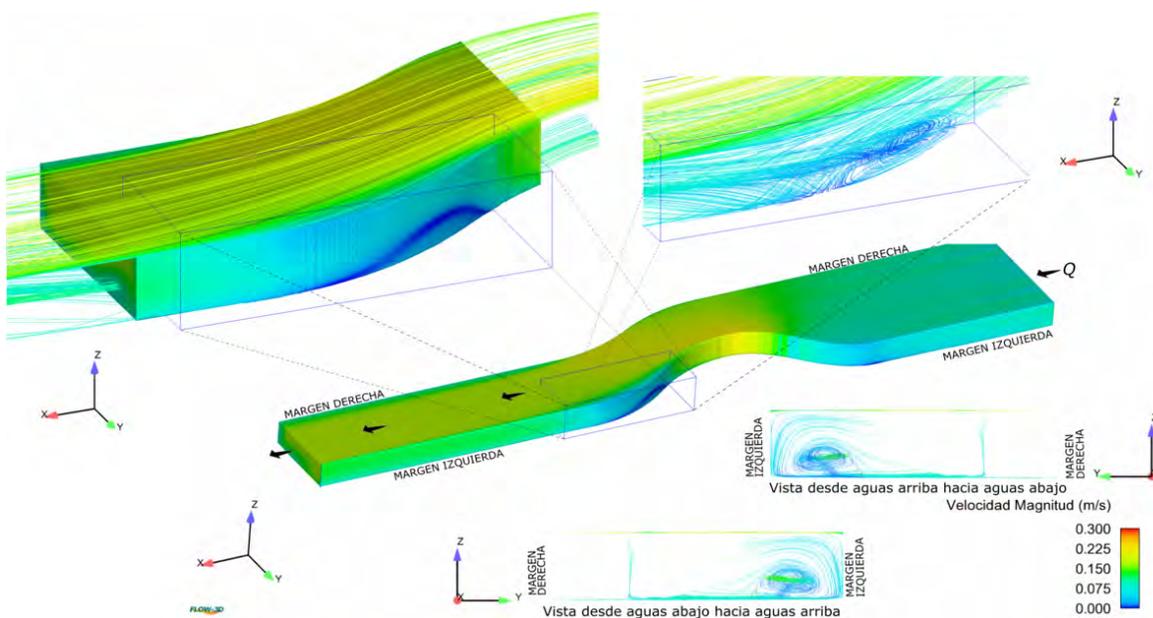


Figura 2.7. Líneas de corriente con el modelo FLOW-3D.

Entre los dos flujos observados, se identificó una capa de corte, en donde la velocidad tiende a ser nula (curva en color azul, según la escala de gráfico, sobre la frontera de la margen izquierda). Las líneas de corriente permitieron identificar que en esta zona se desarrolla un vórtice, y que incluso el flujo viajó en sentido contrario (flujo inverso), se identificó que la velocidad es baja comparada con la región central del canal. En esta zona, en donde se desarrolló el flujo secundario, se presentó un canal de salida interno del flujo, en donde la velocidad alcanzó una mayor magnitud que la que se presentó a elevaciones superiores, y se localizó cerca de del fondo. Esto sigue una distribución más del tipo b , con lo que se verifica que ya no se cumple la distribución logarítmica de velocidad. Esta pequeña zona tiene un efecto importante a lo ancho del canal, ya que reduce la capacidad hidráulica y, por lo tanto, el flujo principal ya no se distribuye sobre toda la sección física, sino más bien en una sección reducida o de menor capacidad.

Al limitar el flujo a una sección reducida por efecto en del desarrollo de la zona de separación (capa límite según Prandtl (1952)), se generó un incremento en la velocidad sobre el flujo principal, la interacción con el flujo secundario es un mecanismo que también obliga la desviación de la velocidad cercana al fondo; esto se debe a que el vórtice dentro de la zona de separación tiene un impacto de giro sobre el flujo principal. La desviación del vector velocidad disminuye a medida se aleja de la interacción con la zona de separación, esto se verifica con los vectores de velocidad localizados en capas superiores, que presentaron la desviación por efecto de la curvatura del canal (con dirección hacia la MD en la superficie libre, y en dirección hacia la MI en el fondo).

2.9. Análisis y discusión de resultados

A partir de los resultados experimentales y numéricos, y con base en la comparación de los componentes de velocidad se busca responder la siguiente pregunta ¿Cuál es la precisión de un modelo tridimensional para reproducir el campo de velocidades en condiciones de laboratorio? Para responder esto, se analizaron los 173 puntos de muestreo de la variable velocidad y se comparó con la variable determinada a partir de los dos modelos numéricos. Para determinar esta precisión, se establece el error relativo al punto de medición, esto permite calcular en qué porcentaje los componentes de velocidad se desvían en magnitud, a partir de los datos experimentales. El error relativo se determina mediante las siguientes ecuaciones para cada componente:

$$e_{r_u} = \frac{u_n - u_e}{u_e}; e_{r_v} = \frac{v_n - v_e}{v_e}; e_{r_w} = \frac{w_n - w_e}{w_e}; \quad (2.20)$$

En donde los subíndices n y e se refieren a los datos numéricos y experimentales, respectivamente. Al utilizar un índice i se puede denotar el componente para cada dirección del vector velocidad (u_i). Además, se determinan los errores relativos medios por sección:

$$|\overline{e_{ui}}| = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \int_{m=1}^N |e_{ui}| dn; i \in \{1, 2, 3\} \quad (2.21)$$

y la desviación máxima y mínima de estos errores relativos por sección es:

$$e_{ui-} = \min(e_{ui}); i \in \{1, 2, 3\} \quad (2.22)$$

$$e_{ui+} = \max(e_{ui}); i \in \{1, 2, 3\} \quad (2.23)$$

Los resultados del error relativo medio ($|\bar{e}_u|$, $|\bar{e}_v|$, y $|\bar{e}_w|$) para cada componente del vector velocidad calculado con TELEMAC3D con respecto a los datos experimentales por sección, se presentan en la Tabla 2.3. Los mayores errores para el componente \bar{e}_u se localizaron en la sección 1 y 2, esto fue a la entrada del canal. El mayor error para el componente \bar{e}_v se localizó en la sección 2, con 5%. El componente \bar{e}_w presentó el mayor error en las secciones 3 a 5 con 4%, y en el resto de las secciones se presentó un 3% de error. También, en la Tabla 2.3 se presentan los valores extremos de error relativo, la sobrestimaron (que es positiva), y la subestimación (negativa). El componente \bar{e}_u se tiene una subestimación de hasta un 18% en la sección 4 y 8, y se sobrestimó hasta en un 29% en la sección 1, y con un 22% dentro de la curva; para el componente \bar{e}_v se subestimó hasta en un 9% en la sección 8 y se sobrestimó en un 12% en la sección 3; para el componente \bar{e}_w , se subestimó hasta un 8% en la sección 5 y se sobrestimó hasta en un 7% en la sección 1, y 6% dentro de la curva.

Tabla 2.3: Errores relativos entre los datos experimentales y TELEMAC3D.

| Sección | $ e_u $ | e_{u-} | e_{u+} | $ e_v $ | e_{v-} | e_{v+} | $ e_w $ | e_{w-} | e_{w+} |
|---------|---------|----------|----------|---------|----------|----------|---------|----------|----------|
| 1 | 0.12 | -0.04 | 0.29 | 0.02 | -0.06 | 0.02 | 0.03 | -0.03 | 0.07 |
| 2 | 0.14 | -0.11 | 0.26 | 0.05 | -0.02 | 0.09 | 0.03 | -0.07 | 0.04 |
| 3 | 0.02 | -0.04 | 0.02 | 0.05 | 0.01 | 0.12 | 0.04 | -0.06 | 0.05 |
| 4 | 0.08 | -0.18 | -0.02 | 0.03 | -0.07 | 0.05 | 0.04 | -0.07 | 0.06 |
| 5 | 0.1 | -0.17 | -0.04 | 0.04 | -0.07 | 0.02 | 0.04 | -0.08 | 0.04 |
| 6 | 0.09 | -0.17 | 0.22 | 0.03 | -0.08 | 0.04 | 0.03 | -0.07 | 0.03 |
| 7 | 0.07 | -0.17 | 0.14 | 0.03 | -0.08 | 0.03 | 0.03 | -0.06 | 0.02 |
| 8 | 0.05 | -0.18 | 0.08 | 0.03 | -0.09 | 0.04 | 0.03 | -0.06 | 0.02 |
| 9 | 0.06 | -0.15 | 0.14 | 0.03 | -0.05 | 0.05 | 0.03 | -0.06 | 0.04 |
| 10 | 0.07 | -0.05 | 0.23 | 0.03 | -0.04 | 0.05 | 0.03 | -0.07 | 0.04 |
| 11 | 0.06 | -0.05 | 0.19 | 0.01 | -0.01 | 0.03 | 0.03 | -0.07 | 0.04 |
| Media | 0.08 | -0.12 | 0.14 | 0.03 | -0.05 | 0.05 | 0.03 | -0.06 | 0.04 |

Con respecto a los errores relativos calculados con FLOW3D y los datos experimentales, el resumen se presenta en la Tabla 2.4. Para el componente \bar{u} , los mayores errores fueron del orden del 11 al 13% y se localizaron en las secciones de entrada y salida, y las secciones 5 y 6. Para el componente \bar{v} el mayor error fue del 6% localizado en la sección 5, y para el componente \bar{w} el mayor error fue del 5% localizado en la sección 5. Por su parte, los errores extremos fueron: para \bar{u} se determinó un error de 32% en la sección 5 y la sección 6, y 37% en la sección 10; para el componente \bar{v} , el error fue de 16% en la sección 5 y 12% en la sección 2; para el componente \bar{w} el error fue de 9% en la sección 7 y 9% en las secciones 4 y 5.

Tabla 2.4: Errores relativos entre los datos experimentales y FLOW3D.

| Sección | $ e_u $ | e_{u-} | e_{u+} | $ e_v $ | e_{v-} | e_{v+} | $ e_w $ | e_{w-} | e_{w+} |
|----------|---------|----------|----------|---------|----------|----------|---------|----------|----------|
| 1 | 0.12 | -0.04 | 0.28 | 0.02 | -0.06 | 0.02 | 0.03 | -0.03 | 0.07 |
| 2 | 0.13 | -0.14 | 0.2 | 0.04 | -0.03 | 0.12 | 0.02 | -0.02 | 0.05 |
| 3 | 0.04 | -0.06 | 0.08 | 0.01 | -0.01 | 0.03 | 0.02 | -0.02 | 0.03 |
| 4 | 0.07 | -0.19 | 0.08 | 0.05 | -0.11 | 0 | 0.04 | -0.05 | 0.09 |
| 5 | 0.11 | -0.32 | 0.07 | 0.06 | -0.16 | 0 | 0.05 | -0.06 | 0.09 |
| 6 | 0.11 | -0.3 | 0.06 | 0.03 | -0.08 | 0.03 | 0.03 | -0.05 | 0.05 |
| 7 | 0.1 | -0.23 | 0.08 | 0.02 | -0.06 | 0.04 | 0.04 | -0.09 | 0.05 |
| 8 | 0.08 | -0.16 | 0.11 | 0.03 | -0.04 | 0.06 | 0.03 | -0.07 | 0.05 |
| 9 | 0.1 | -0.1 | 0.26 | 0.04 | -0.01 | 0.07 | 0.03 | -0.06 | 0.04 |
| 10 | 0.13 | -0.07 | 0.37 | 0.04 | 0 | 0.05 | 0.02 | -0.05 | 0.02 |
| 11 | 0.12 | -0.05 | 0.29 | 0.02 | 0.01 | 0.04 | 0.01 | -0.03 | 0.02 |
| Promedio | 0.1 | -0.15 | 0.17 | 0.03 | -0.05 | 0.04 | 0.03 | -0.05 | 0.05 |

Para responder la pregunta de investigación sobre ¿Cuál es la aproximación de los modelos tridimensionales para reproducir el campo de velocidades en un canal curvo de ancho variable, en condiciones de laboratorio? se realiza un análisis de regresión lineal simple. Por lo tanto, se establece la hipótesis de que la velocidad calculada numéricamente (U_n) debe ser igual a la velocidad experimental (U_e), $U_n = U_e$, la información se comparó en las coordenadas espaciales de medición, y se estableció una Relación Numérico-Experimental (RNE), esta hipótesis en condición ideal establece los datos en una recta de 45° , que es la Relación-Esperada (RE), el ajuste o Regresión-Lineal (RL) de la información permitió identificar la aproximación del modelo tridimensional mediante el coeficiente de correlación lineal, R. Sin embargo, se debe tener en cuenta que existen errores innatos en el proceso de medición que pueden ser propios de los equipos de medición, variaciones de voltaje en equipos electromecánicos, e inclusive del tipo humano, entre otros. Además, se debe tener presente que los esquemas numéricos son aproximaciones y no una solución exacta en el proceso de solución de las NSEs. Sin embargo, la hipótesis es válida al reducir en manera de lo posible los errores descritos.

En la Figura 2.8, se presentan los ajustes de regresión lineal de la RNE determinada con el modelo TELEMAC3D para cada uno de los componentes \bar{u} , \bar{v} y \bar{w} , en a), b) y c), mientras en d), e) y f) los respectivos ajustes lineales de la RNE con el modelo FLOW3D para cada uno de los componentes de velocidad, mientras que en g) y h) se muestran los ajustes de la RNE determinada con los vectores de velocidad calculados con TELEMAC3D y FLOW3D, respectivamente. Se determinó un coeficiente de correlación (R) para el componente \bar{u} de 0.91 y 0.76, para \bar{v} de 0.99 y 0.97 y para \bar{w} de 0.41 y 0.36, en donde el primero corresponde a TELEMAC3D y el segundo a FLOW3D, el resumen se presenta en la Tabla 2.5. Se determinó que la RNE en d) no se ajustó del todo a una línea recta, aunque el modelo de ajuste (RL) sí, pero R disminuye por la dispersión de los datos, esto se debe a que el modelo no reproduce adecuadamente el campo de velocidades.

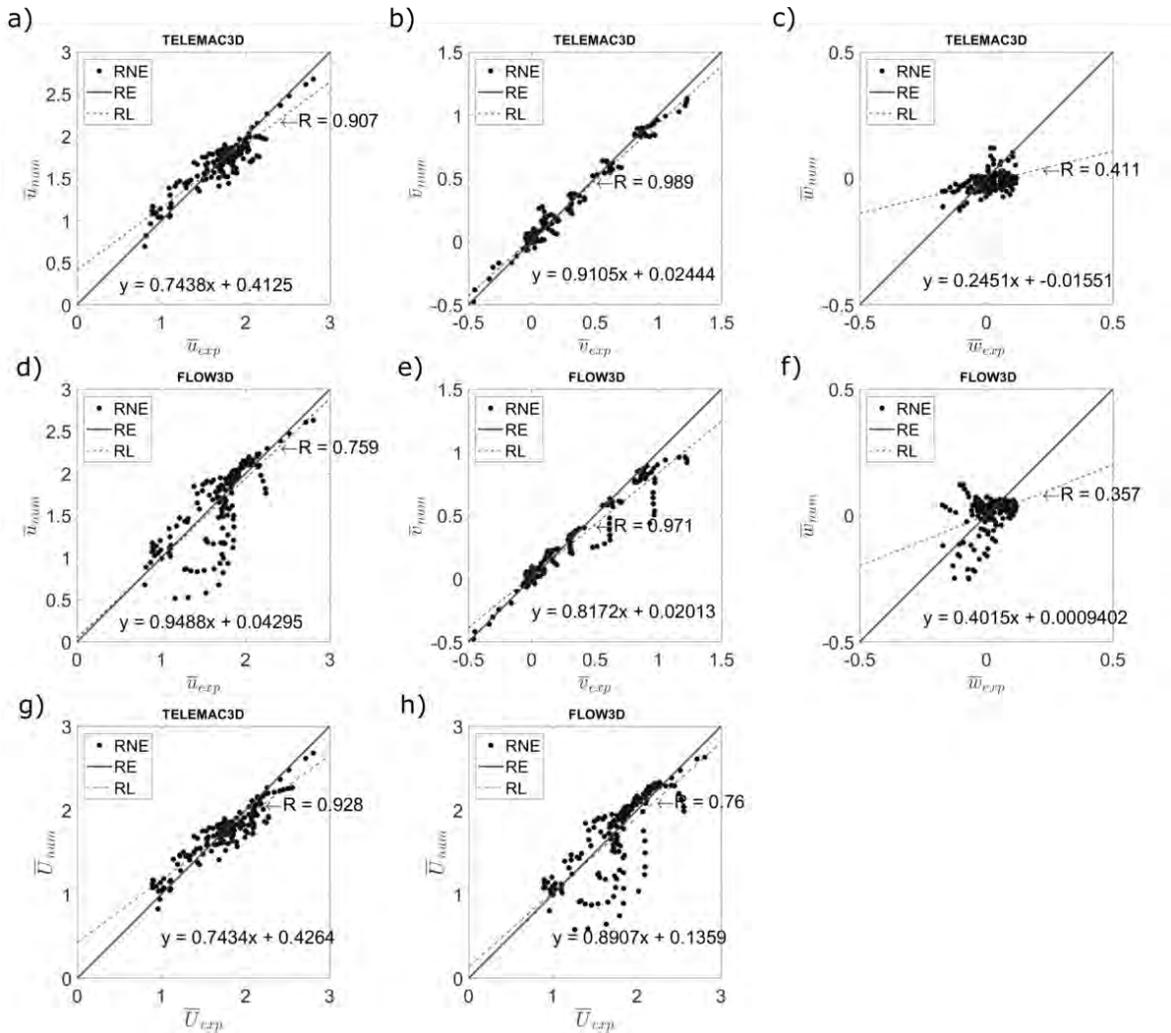


Figura 2.8. Relación Numérico-Experimental (RNE), Relación Esperada (RE) y Regresión Lineal (RL).

Con respecto al componente \bar{w} , los dos modelos numéricos no lo reproducen adecuadamente, e incluso se observa que los modelos tienden a subestimar este componente. En general, se determinan coeficientes de correlación de 0.93 para TELEMAC y 0.76 para FLOW3D, para el vector de velocidad. Se determinó una disminución en la aproximación del vector velocidad para el segundo modelo numérico, que se asocian a los componentes de velocidad localizados entre las secciones 3 a 8, al interior de la curva, cercanas a la MI ($Y \geq 0.58m$).

Tabla 2.5: Coeficiente de correlación lineal (R) en la Relación Numérico-Experimental (RNE) del vector de velocidad y sus componentes.

| Modelo | U | \bar{u} | \bar{v} | \bar{w} |
|-----------|-------|-----------|-----------|-----------|
| TELEMAC3D | 0.928 | 0.907 | 0.989 | 0.411 |
| FLOW-3D | 0.760 | 0.759 | 0.971 | 0.357 |

Una característica importante del campo de velocidades, es el ángulo de desviación del vector velocidad, U , por el flujo helicoidal generado por la curvatura del canal, con respecto al sistema de coordenadas ortogonales $(O; X, Y, Z)$, donde el origen puede ser trasladado al punto de medición, por lo que, para responder la pregunta de investigación sobre ¿Cuál es la aproximación de los modelos tridimensionales para calcular los ángulos de desviación del campo de velocidades que se presenta en un canal curvo de ancho variable, en condiciones de laboratorio? es necesario calcular los ángulos de los cosenos directores del vector velocidad, U , mediante las siguientes ecuaciones:

$$\alpha = \cos^{-1} \frac{\bar{u}}{|U|} \quad (2.24)$$

$$\beta = \cos^{-1} \frac{\bar{v}}{|U|} \quad (2.25)$$

$$\gamma = \cos^{-1} \frac{\bar{w}}{|U|} \quad (2.26)$$

En acuerdo con el sistema de referencia aquí utilizado, en la sección 1 el ángulo α correspondiente al componente \bar{u} se orienta en la dirección de 0° , el ángulo β correspondiente al componente \bar{v} , se orienta en la dirección de 90° al igual que el ángulo γ asociado al componente \bar{w} . Sin embargo, las curvaturas de las márgenes del canal ejercerán un efecto al desviar el vector de velocidad (U) y, por lo tanto, no mantendrán estos ángulos en toda la geometría del canal, es por ello que, con el objetivo de conocer el comportamiento angular del vector de velocidad (U) dentro de la geometría curva del canal se presentan los ángulos α , β y γ .

En la Figura 2.9, se muestran los ángulos determinados experimentalmente y numéricamente de cada uno de los 173 puntos de medición, esto permite observar el comportamiento por las dos aproximaciones. En la sección 2, se determinó que el ángulo α se desvía de 0 a 30° , el ángulo β también presenta una desviación de hasta 30° , que va de 90° a 120° , y el ángulo γ una desviación de hasta 10° . En la sección 3 la desviación del ángulo α es de 10° por el modelo TELEMAC3D, pero los datos experimentales indican una desviación máxima de 4° al igual que el modelo FLOW3D, por su parte la desviación del ángulo β es de 10° para el modelo TELEMAC3D, mientras que FLOW3D y los datos experimentales indican una desviación máxima de 4° , y para el ángulo γ no va más allá de los 4° .

En la sección 4, el ángulo α tiene una desviación de hasta 30° al igual que el ángulo β , y el ángulo γ presentó una desviación de hasta 10° , se identificó que cerca de la margen izquierda el vector presentó una dirección hacia abajo, y cerca de la margen derecha presentó una dirección hacia arriba, esto indicó la presencia de por lo menos dos flujos. En la sección 5, el ángulo α se mantuvo con una desviación de hasta 30° al igual que el ángulo β , y el ángulo γ tuvo una desviación de $\pm 4^\circ$, esto indicó un flujo ascendente y uno descendente. En la sección 6, el ángulo α disminuyó a una desviación de hasta 25° al igual que el ángulo β , y el ángulo γ tuvo una desviación de $\pm 4^\circ$. En la sección 7, el ángulo α disminuyó a una desviación de hasta 15° , mientras que el ángulo β se mantuvo en una desviación de hasta 25° , el ángulo γ tuvo una desviación de $\pm 4^\circ$, pero en el modelo FLOW3D fue de hasta 15° .

En la sección 8, el ángulo α presentó una desviación de hasta 8° , mientras que en FLOW3D fue de 13° , el ángulo β se mantuvo en una desviación de hasta 8° , el ángulo γ tuvo una desviación de $\pm 4^\circ$ y en el modelo FLOW3D llegó a ser de hasta 12° .

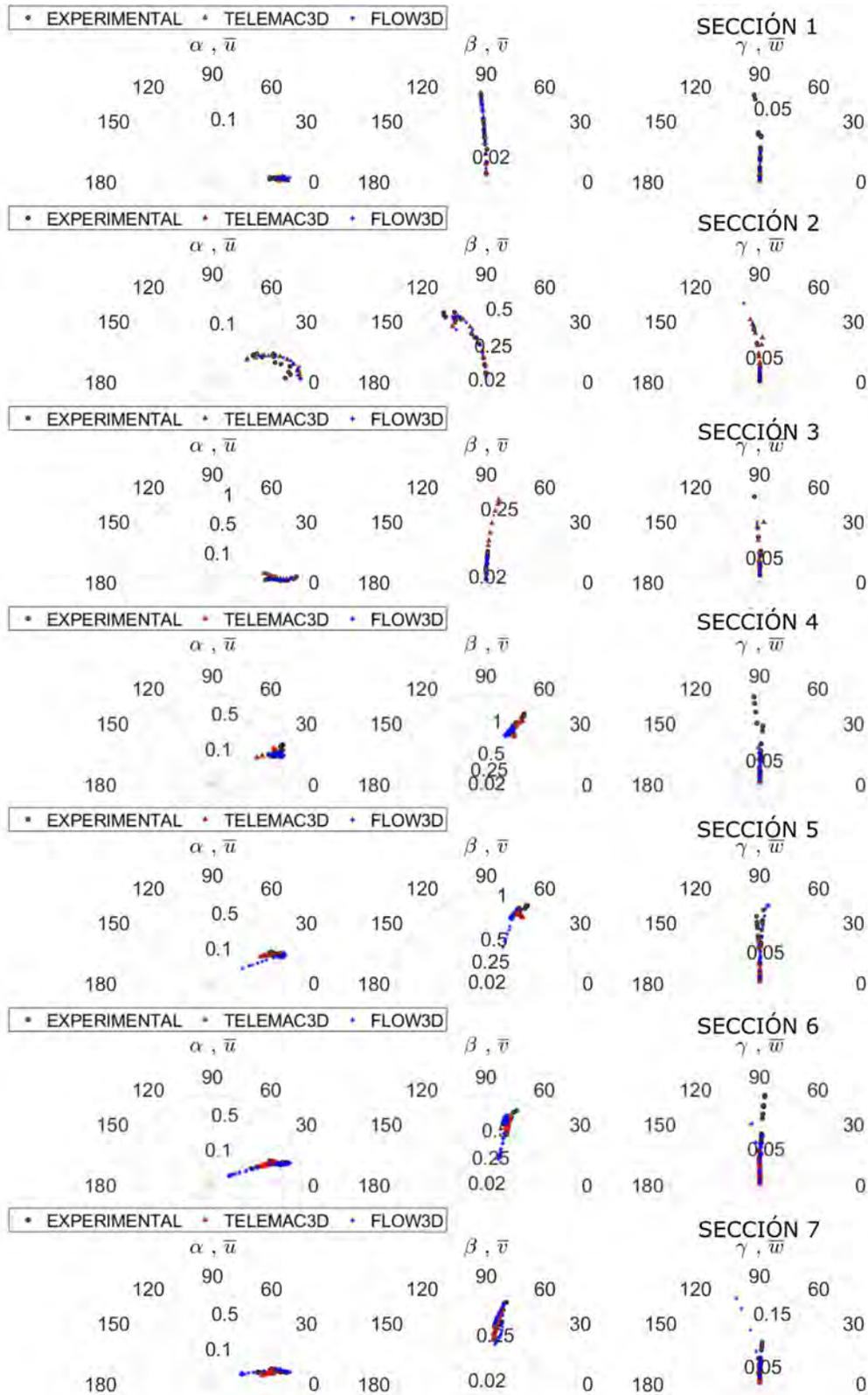


Figura 2.9. Cosenos directores del vector velocidad, U .

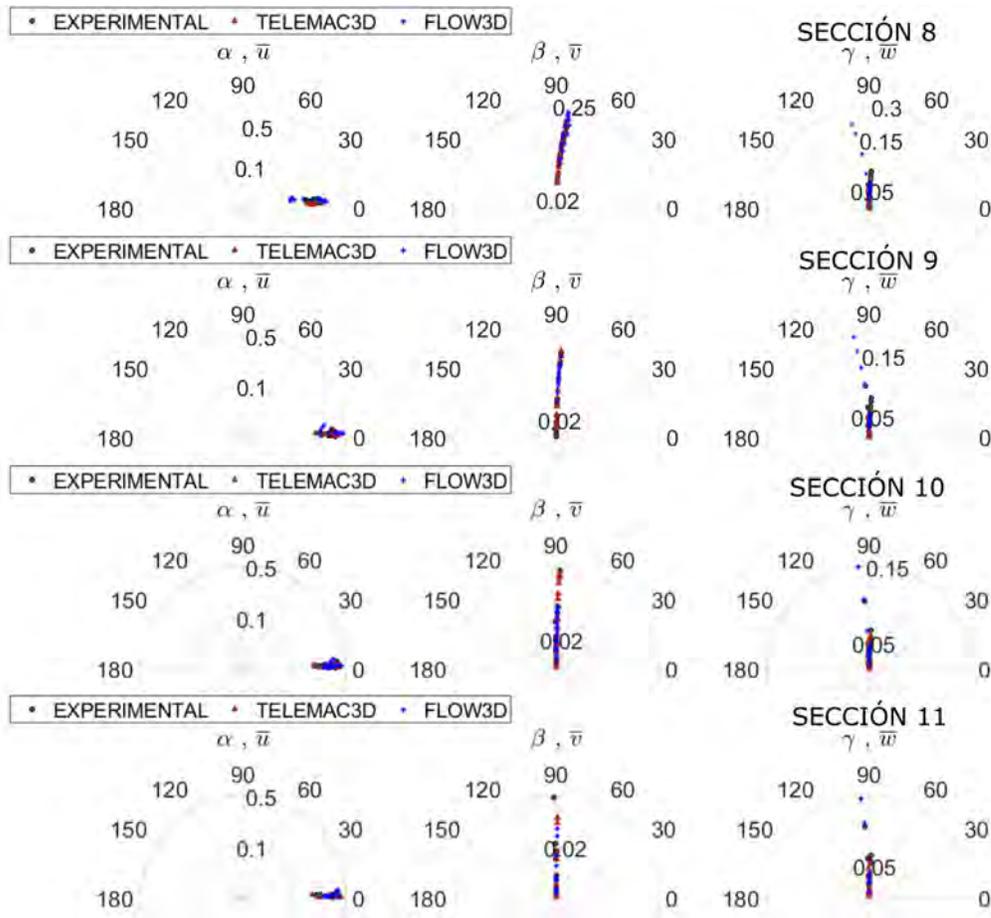


Figura 2.9. Cosenos directores del vector velocidad, U .

En la sección 9, el ángulo α presentó una desviación de hasta 5° , sin embargo, en FLOW3D la desviación fue de hasta 9° , el ángulo β se mantuvo en una desviación de hasta 4° , y el ángulo γ tuvo una desviación de $\pm 4^\circ$, y en el modelo FLOW3D fue de hasta 9° . En la sección 10, el ángulo α fue de 4° , sin embargo, en FLOW3D la desviación fue de hasta 6° , el ángulo β se mantuvo en una desviación de hasta 4° , y el ángulo γ presentó una desviación de $\pm 4^\circ$. Finalmente, en la sección 11, el ángulo α disminuyó a una desviación de hasta 3° , el ángulo β se mantuvo en una desviación de hasta $\pm 2^\circ$, y el ángulo γ presentó una desviación de $\pm 4^\circ$. El análisis muestra que se presentaron desviaciones de los ángulos α y β de hasta 30° , mientras que en para el ángulo γ llegó a ser de 10° .

Para determinar ¿Cuál es la aproximación de los modelos tridimensionales para calcular los ángulos de desviación del campo de velocidad en condiciones de laboratorio?, se establece la misma hipótesis del análisis anterior, pero con la variable de análisis de los ángulos de los cosenos directores asociados a cada punto de medición, en radianes, la hipótesis es que el ángulo calculado numéricamente (α_{num} , β_{num} , y γ_{num}) debe ser igual al ángulo determinado en los datos experimentales (α_{exp} , β_{exp} , y γ_{exp}), por lo que se establece la Relación Numérico-Experimental (RNE). En condición ideal el ajuste establece los datos en una recta de 45° que es la Relación-Esperada (RE), el ajuste o Regresión-Lineal (RL) de la información permite identificar la aproximación del modelo tridimensional mediante el coeficiente de correlación lineal, R.

En la Figura 2.10, se presentan los ajustes para cada uno de los ángulos asociados a los cosenos directores, de los 173 puntos analizados. De manera general se determinó que el ángulo α presentó un coeficiente de correlación de 0.98 (Figura 2.10a)) y 0.97 (Figura 2.10d)), el ángulo β fue de 0.98 (Figura 2.10b) y Figura 2.10e)) y el ángulo γ de 0.47 (Figura 2.10c)) y 0.37 (Figura 2.10f)), para los modelos TELEMAC3D y FLOW3D, respectivamente. El resumen se presenta en la Tabla 2.6. Se identificó que la aproximación disminuyó considerablemente para el ángulo γ , mientras que para los ángulos α y β se determinó una buena aproximación.

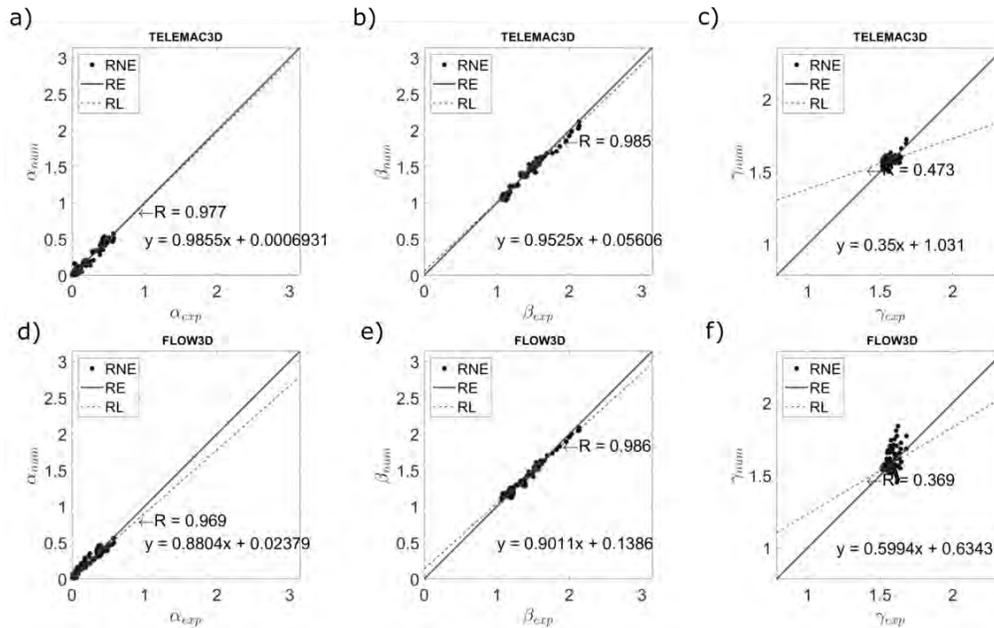


Figura 2.10. Relación Numérico-Experimental (RNE), Relación Esperada (RE) y Regresión, en a) $\alpha_{exp} - \alpha_{num}$, en b) $\beta_{exp} - \beta_{num}$, en c) $\gamma_{exp} - \gamma_{num}$, RNE con el modelo TELEMAC3D, en d) $\alpha_{exp} - \alpha_{num}$, en e) $\beta_{exp} - \beta_{num}$, en f) $\gamma_{exp} - \gamma_{num}$, RNE con el modelo FLOW3D

Tabla 2.6: Coeficiente de correlación lineal (R) en la RNE de los cosenos directores del vector de velocidad.

| Modelo | $\alpha_{exp} - \alpha_{num}$ | $\beta_{exp} - \beta_{num}$ | $\gamma_{exp} - \gamma_{num}$ |
|-----------|-------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|
| TELEMAC3D | 0.977 | 0.985 | 0.473 |
| FLOW-3D | 0.969 | 0.986 | 0.369 |

En la Figura 2.11, se presenta el Número de Reynolds Re localizado en cuatro planos de elevación a 0.10, 0.08, 0.06 y 0.02 m, a), b), c) y d), respectivamente. En la Figura 2.11a) se determinó un aumento del Re poco antes de la sección 3, se identificó que el núcleo de mayor magnitud se localizó cerca de la MI en el interior de la curva y se identificó cómo se trasladó hacia la MD (sección 4 a 6, en color rojo), es decir, no se trasladó hacia aguas abajo en línea recta o simétrica a las fronteras laterales, sino que cruzó de una margen a otra. También, se observó que disminuyó el Re entre las secciones 4 a 8, que corresponde a la salida de la curva hacia el canal recto, incluso se identificó que el gradiente se presentó desde la MD hacia la MI. Por otro lado, en la MI entre las secciones 4 a 8, en Figura 2.11a)

muestra el desarrollo de un núcleo con magnitud muy baja del Re (zona de separación y flujo secundario), indicado en color azul y su claro impacto en el flujo principal. En la Figura 2.11b) se muestra que el núcleo de bajo Re se mantuvo localizado en la MI; también, otra zona similar se presentó sobre la MD, esta última zona ya no fue puntual, sino que se desarrolló sobre toda la MD hacia aguas abajo, esto también se observó en un plano inferior localizado a 0.06 m que corresponde al plano de medición en las pruebas experimentales y corresponde al plano mostrado en la Figura 2.11c), donde se identificó que el Re no es uniforme a lo ancho de las secciones 3 a 8 y que se concentró sobre la MD, mientras que en la MI se mantuvo el núcleo de bajo Re , se resalta que este plano presentó un régimen laminar (zonas en color azul). Finalmente, en la Figura 2.11d) se identificó un Re en condición de flujo laminar, los gradientes no son tan pronunciados como en capas superiores, e incluso las zonas de bajos Re aguas abajo de la sección 3 disminuyen su espesor a lo ancho de la sección.

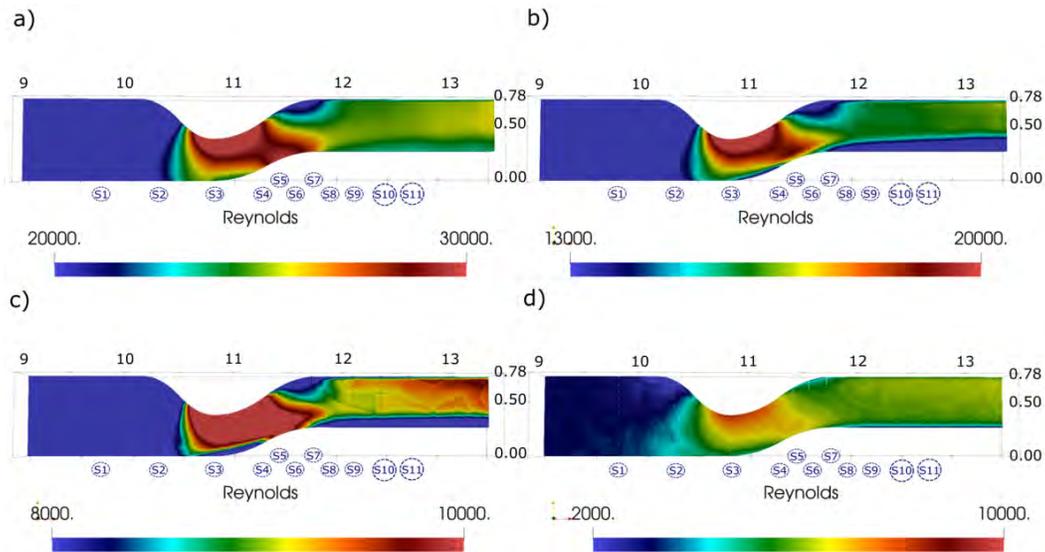


Figura 2.11. Número de Reynolds (Re), en a) $Z = 0.10$ m, en b) $Z = 0.08$ m, en c) $Z = 0.06$ m y en d) $Z = 0.02$ m.

En la Figura 2.12, se presentan las líneas de corriente mapeadas con el campo de vorticidad ($\nabla \times U$) localizado en cuatro planos de elevación que son 0.10, 0.08, 0.06 y 0.02 m, a), b), c) y d), respectivamente. En la Figura 2.12a) se determinó que las líneas de corriente presentaron una magnitud casi nula ($\nabla \times U \approx 0$), pero cerca de la MD en la sección 4 se observó un incremento de magnitud que incluso no interactúa con las líneas de menor magnitud, en la Figura 2.12b) se muestra que las líneas presentaron un incremento en magnitud de la vorticidad comparadas con la figura anterior, incluso se identificó que las líneas de corriente localizadas en planos inferiores tienen una mayor magnitud de vorticidad, estas líneas son las de mayor deformación con respecto a las fronteras del canal (márgenes) y se muestran en color rojo. En la Figura 2.12c), se muestra como las líneas de corriente de mayor magnitud pasan de un margen a otro, por ejemplo, MI a MD en sección 2 a 3, y en la sección 7 hacia aguas abajo; este comportamiento es más claro en la Figura 2.12d).

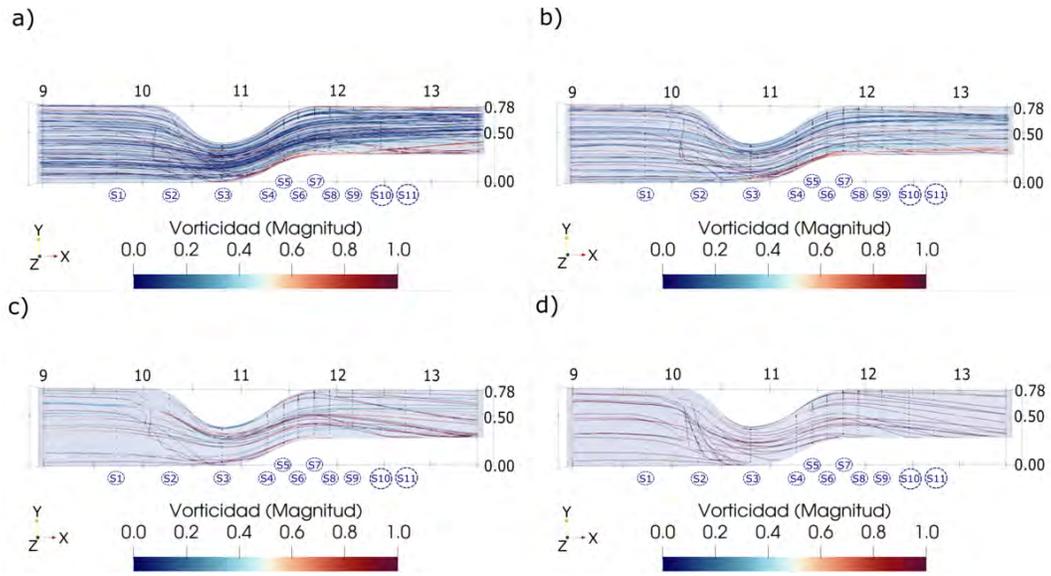


Figura 2.12. Líneas de corriente y vorticidad, en a) $Z = 0.10$ m, en b) $Z = 0.08$ m, en c) $Z = 0.06$ m y en d) $Z = 0.02$ m

2.10. Conclusiones

En la modelación física, se identificó la presencia de una zona de separación que abarca hasta un 20 % del ancho del canal entre las secciones 5 a 8, con las mediciones puntuales de la velocidad. Esto tiene un impacto en la distribución del campo de velocidades ya que reduce el área efectiva y se presentó un incremento de la velocidad. En esta zona, las velocidades entre los tres escenarios de medición no interactúan entre sí como en el resto del canal, y presentan características tridimensionales complejas que no pueden ser caracterizadas por modelos matemáticos del tipo 2DH. Por el comportamiento de los trazadores colocados en la superficie libre del agua y en el fondo, se identificaron trayectorias diferentes a la salida de la curva; en el fondo las partículas se desvían hacia la margen derecha, mientras que en la superficie lo hacen hacia la margen izquierda, esto permitió identificar y visualizar el flujo helicoidal. Entre el flujo helicoidal (principal) y la zona de separación, se desarrolló la capa de corte que es dinámica. La zona de separación localizada en la margen izquierda del canal, se identificó por un gradiente pronunciado en los perfiles de distribución de la velocidad a lo ancho de la sección.

La modelación numérica permitió ampliar el conocimiento del comportamiento del flujo que se desarrolló en el canal curvo. Se identificó el desarrollo completo del flujo helicoidal en la sección más estrecha (sección 3) con efectos hacia la salida de la curva y aguas abajo, lo que explica las trayectorias de las partículas observadas en el laboratorio. También, se presentaron efectos hacia aguas arriba, generados por la curvatura de la margen izquierda. Los resultados con el modelo TELEMAC3D y FLOW3D mostraron variaciones importantes en la zona de separación, en el análisis de la comparación de los componentes de velocidad se determinó que el error relativo medio de las velocidades calculadas con los modelos numéricos con respecto a los datos experimentales fue del 8 % y 10 % para el componente \bar{u} , y del 3 % para los componentes \bar{v} y \bar{w} , respectivamente.

En el análisis del error relativo se determinó la desviación (subestimación o sobreestimación) del componente \bar{u} , \bar{v} y \bar{w} , siendo del 13 % y 16 % para el primer componente y del 5 % para los dos componentes restantes, con TELEMAC 3D y FLOW3D. También, se estableció la Relación Numérico-Experimental (RNE) que determinó el ajuste de aproximación de cada modelo numérico con respecto a los datos experimentales mediante el coeficiente de correlación (R), el componente \bar{u} fue de 0.91 y 0.76, para el componente \bar{v} fue de 0.99 y 0.97 y para el componente \bar{w} fue de 0.41 y 0.36, en donde el primero corresponde al modelo TELEMAC3D y el segundo al modelo FLOW3D. En general, y con respecto al vector de velocidad (U) el coeficiente de correlación fue de 0.93 para TELEMAC3D y de 0.76 para el modelo FLOW3D. El cálculo del campo de velocidades en la zona de separación tiene un impacto negativo en la aproximación del modelo numérico FLOW3D, en donde disminuyó considerablemente comparado con el modelo TELEMAC3D. En la zona de separación las velocidades calculadas son de menor magnitud comparadas con las determinadas experimentalmente. El comportamiento del flujo en la zona de separación es complejo, y los componentes de velocidad son bajos, aunque predominó el componente \bar{u} , y los dos restantes tienden a ser del mismo orden de magnitud.

El análisis de la comparación de los ángulos de desviación o cosenos directores entre los resultados experimentales y numéricos indicó que en la sección 2 el ángulo α se desvía de 0 a 30°, el ángulo β también presentó una desviación de hasta 30°, y el ángulo γ una desviación de hasta 10°; y en la sección 4 y 5 el ángulo α y β se desvió hasta 30°, y después de esta sección las desviaciones disminuyen. En la relación Numérico-Experimental (RNE) con respecto a los ángulos se encontró que el ángulo α tiene un coeficiente de correlación (R)

de 0.98 y 0.97, el ángulo β de 0.98 y 0.98, y el ángulo γ de 0.47 y 0.37, para los modelos TELEMAC3D y FLOW3D, respectivamente. Se identificó que la aproximación disminuyó considerablemente para el ángulo γ , lo que indicó una baja aproximación, mientras que los ángulos α y β presentaron una buena aproximación. La desviación del vector de velocidad es importante para caracterizar adecuadamente el flujo helicoidal.

Se identificó que las líneas de corriente presentaron comportamientos diferentes, ya que las localizadas en el fondo presentaron una mayor desviación con respecto al campo de flujo localizado en capas superiores, mientras que las líneas de corriente localizadas cerca de la superficie libre tienen una desviación hacia la margen izquierda, es decir, su comportamiento es opuesto al que se presentó cerca del fondo. Sin embargo, los gradientes de desviación son distintos, en el fondo es bastante más pronunciado y en la superficie libre es poco pronunciado. Al mapear las líneas de corriente con la vorticidad, se identificó que las del fondo son las que presentaron mayor magnitud, esto se debe a la interacción del flujo con la frontera del fondo (fricción), y se identificó que las líneas de corriente cercanas a la superficie libre, aunque presentaron una deformación por efecto de las paredes laterales, al mapearlas con la vorticidad su magnitud es baja.

En el análisis del Número de Reynolds (Re), se identificaron zonas con núcleos de magnitudes máximas y mínimas, ambas son interesantes, ya que las primeras permiten localizar zonas en donde el flujo incide directamente sobre una superficie o zonas en donde se concentra el flujo; mientras que las segundas, permitieron localizar las zonas en donde el flujo pierde velocidad y retrasa su movimiento e inclusive zonas en donde interactúan, el flujo principal y secundario, lo que modifica su comportamiento en el espacio, y a lo ancho de la sección. Las zonas de separación de flujo se pueden observar en meandros naturales y canales de laboratorio, en donde, la distribución de velocidades no es homogénea a lo ancho de la sección, reduciendo el área efectiva y concentrando la velocidad máxima, por lo que, se tiene una distribución sesgada (vista en planta). Sin embargo, este comportamiento llega a ser muy distinto en el fondo comparado con el campo promedio en la vertical o el que se presenta cerca de la superficie libre.

En este trabajo se determinó una precisión del 93% en la aproximación para caracterizar el campo de velocidades que se presentó en un canal curvo, esto para el plano de medición localizado al 40% de la profundidad del flujo. Sin embargo, se identificó el desarrollo de flujo helicoidal y zonas de separación. La caracterización de flujos turbulentos con la presencia de flujo helicoidal y zonas de separación es una tarea compleja, y es importante ya que es el mecanismo principal en la dinámica del flujo y sedimento que se presenta en meandros y en el desarrollo del proceso de erosión, socavación y migración, tanto del fondo como de las márgenes. También, se encontró que la caracterización del flujo dentro de la zona de separación presentó una baja aproximación, y se recomienda desarrollar más experimentos principalmente en la zona de separación con el objetivo de mejorar las aproximaciones y reducir las incertidumbres, esto desde luego debe extenderse al análisis con el transporte de sedimentos.

Zona de separación de flujo y recirculación

3.1. Flujo helicoidal

Una descripción general sobre el flujo helicoidal en un meandro se presentó por Thomson (1877), e indica que es resultado de la variación en la aceleración centrípeta de las partículas fluidas a lo largo de la profundidad del agua. Se destaca la disminución de la velocidad en el fondo por efecto de la fricción, descripción del flujo helicoidal al entrar a una curva y el comportamiento de partículas, procesos de erosión y depósito sobre el meandro, el movimiento sesgado u oblicuo de las partículas en referencia a las márgenes del canal, la sobreelevación y el gradiente de presión por inclinación de la superficie libre del agua, esto destaca la aplicación del principio de Bernoulli. Posteriormente, uno de los trabajos pioneros en este tema es el de Möller (1883), quién realizó experimentos de flotación en el río Ruhr, en Alemania, y observó que el agua se movía en forma de espiral con algunos efectos complejos, indicando que el agua fluyó con mayor velocidad a lo largo del talweg, y en el caso de canales rectos se erosiona la parte central y se deposita el material cerca de las márgenes. Freeman (1929) destaca el trabajo de Möller y Freeman (1929), quienes presentan distribuciones tridimensionales de la velocidad en un canal con flujo a superficie libre, destaca la descripción del movimiento de flujo en espiral (helicoidal), e incluso presentó la descripción de dos flujos helicoidales en la sección de un canal rectangular.

El movimiento del flujo secundario afecta: el flujo principal debido a que redistribuye el campo de velocidades (Blanckaert, 2010), la dispersión de contaminantes (Baek et al., 2006) y el transporte de sedimentos (Vanoni, 1946; Caballero et al., 2023). Por lo que, determinar con precisión este comportamiento no es una tarea fácil y es importante para el diseño de estructuras hidráulicas, evaluaciones ambientales y/o ecológicas, así como establecer los costos-beneficios en el desarrollo de la infraestructura hidráulica.

En Shaheed et al. (2021) se presenta un resumen de una amplia cantidad de trabajos experimentales sobre el flujo en canales curvos de laboratorio, que investigan principalmente el flujo helicoidal que se presenta en meandros. También, presentan una discusión sobre el análisis numérico en este campo y su complejidad al calcular la hidrodinámica en canales curvos. Aquí, definimos el flujo secundario como flujo helicoidal, este movimiento del flujo en meandros desarrolla una trayectoria en forma de helicoide, esto es, un trazador sobre la superficie libre localizado a la entrada de la curva se desplaza de la margen interna hacia

la margen externa, mientras que el comportamiento en el fondo del meandro es opuesto. Al determinar una superficie de velocidad sobre una sección de interés, y ver la proyección de las velocidades sobre este plano se observará que la dirección del vector de velocidad es opuesta en los extremos (superficie libre y fondo). Además, la velocidad máxima pasa de la margen interna a la margen externa en un punto de inflexión de la curvatura, alternándose este comportamiento en curvas subsecuentes. También, Se produce un aumento en el nivel de agua cerca de la margen exterior y disminuye cerca de la margen interna. Esto genera una distribución de presiones que no es uniforme en la sección transversal. Aunque, se habla de que las aceleraciones centrifugas se contrarrestan con la aceleración centrípeta, para la descripción del movimiento desviado del flujo principal (Shaheed et al., 2021), aquí se considera que el mecanismo principal es el choque del flujo con las márgenes, lo que genera un ligero aumento de nivel, denominado en la literatura como sobreelevación o super-elevación (Graf, 1998, p. 100), y se desarrolla el gradiente de presión, además de un aumento en la aceleración del flujo generado por el choque, lo que lleva a modificar su trayectoria original.

En referencia al flujo helicoidal, Nezu et al. (1985) investigó su existencia en un canal recto de fondo fijo, y determinó su presencia independientemente de la relación ancho/profundidad (B/h), también indicó que la interacción del flujo y el sedimento de fondo arenoso es un mecanismo para el desarrollo de corrientes secundarias. En canales curvos el flujo helicoidal corresponde a la celda de región central y se tiene conocimiento del desarrollo de pequeñas celdas de flujo que se presentan cerca de las márgenes, una de ellas es la celda que se desarrolla en la margen exterior, en la proximidad de la superficie libre y presenta un movimiento en dirección opuesta al flujo helicoidal (Blanckaert, 2009, 2011), y que es generada principalmente por la anisotropía de la turbulencia y que interactúa dinámicamente con el flujo principal, se considera que esta celda tienen un efecto importante sobre la erosión en la margen exterior (Rodi et al., 2013). En la margen interna también se pueden desarrollar celdas en donde la velocidad disminuye después de ápice de la curva, denominadas zonas de estancamiento o de baja velocidad, incluso se puede desarrollar flujo en reversa, y están asociadas a zonas de separación, en general estas celdas desarrolladas en las márgenes son las capas límites indicadas por Prandtl (1952).

Por su parte, Blanckaert y De Vriend (2004), establecen dos tipos de flujo secundario en canales curvos: el primero es el flujo helicoidal, generado por las fuerzas centrifugas y el gradiente de presión, y el segundo tipo corresponde a la celdas o células de recirculación que se desarrollan en las márgenes exteriores, de menor magnitud que el flujo helicoidal, y con sentido contrario de giro, y que son complejos de caracterizar por los modelos numéricos principalmente por la falta de información experimental detallada . Además, esta celda tiene un impacto en el flujo helicoidal y también se considera es el mecanismo de erosión sobre la margen exterior, presentan un comportamiento dinámico, lo que indica variaciones en el espacio y tiempo (Blanckaert y De Vriend, 2004; Rodi et al., 2013).

3.2. Capa límite

Prandtl (1952), presentó el fenómeno de la separación de flujo en canales de laboratorio, dentro de esta zona de separación se puede presentar el flujo inverso (o en reversa) y la recirculación del flujo, este fenómeno está relacionado con su mayor aportación que es la teoría de la capa límite Prandtl (1904). En su trabajo presentó imágenes sobre el comportamiento del campo de flujo mediante trazadores de distintas sustancias, mostrando así las líneas de

corriente que se formaban dentro del flujo, con esto identificó estos fenómenos. El autor indicó que este comportamiento se debe a discontinuidades en el flujo y que también son el resultado de la interacción del flujo con las fuerzas de fricción. Los fluidos se adhieren a la frontera o límite del cuerpo que los contiene, por ello, una pequeña capa se forma en las paredes como resultado de la adherencia, es así que la velocidad cercana a la pared se considera nula, sin embargo, fuera de esta capa la magnitud de la velocidad presentará una variación en donde la **fricción** tiene un papel importante, a medida que se aleja de la frontera la magnitud será mayor. Por su parte, la capa límite es muy pequeña, aunque está en función de la viscosidad y de la rugosidad absoluta de la pared, esta aportación de la capa límite proporcionada por Prandtl (1952) permitió establecer formulaciones matemáticas para inferir los perfiles de velocidad y determinar los efectos de retraso en la distribución de velocidades dentro de un perfil vertical.

En su descripción sobre la formación de remolinos identificó las zonas de separación, o zonas en donde la velocidad disminuyó considerablemente con respecto al flujo principal y fue posible visualizar la formación de remolinos, a las que también denominó capas límites o capas libres. (Prandtl, 1952, p. 135) indicó que estas capas límites retrasadas que se forman en la superficie libre de un cuerpo “*son resultado de una ligera viscosidad y tienen otra propiedad, y es que sin importar si el movimiento en ellas es suave o turbulento, bajo ciertas condiciones dan lugar a la formación de capas libres: de discontinuidad, de remolinos o vórtices.*”

Una explicación sobre la formación de las zonas de separación tiene sus bases en el teorema de Bernoulli, en donde,

“*si existen diferencias de presión que aceleren o retrasen el movimiento del fluido exterior que se une con la capa límite, estas diferencias de presión afectan también el fluido en la capa límite.*” (Prandtl, 1952, p. 136).

Sin embargo, el trabajo de Prandtl (1904) y su teoría de la capa límite trata sobre el análisis del movimiento de fluidos reales, y en el estudio de zonas de separación planteó dos casos:

“*el primero, si el flujo externo se acelera mediante una caída de presión en la dirección del movimiento, las partículas del fluido que viajan más lentamente en la capa límite, también reciben un impulso en la dirección del movimiento. Por lo tanto, todas las partículas continuarán su camino más allá de la superficie del cuerpo. El segundo, si, por el contrario, hay una caída de presión en la dirección opuesta a la del movimiento, retardando el flujo externo, las partículas que se mueven más lentamente en la capa límite se retrasan fuertemente aún más y finalmente, cuando toda su energía cinética ha sido transformada a alguno de los otros dos tipos, el flujo retrocede. Así, mientras el flujo externo con su mayor suministro de energía continúa fluyendo, cerca de la frontera el fluido se detiene o se invierte. Ahora bien, como el fluido fresco sufre el mismo destino a lo largo de la frontera, en poco tiempo se acumula cada vez más fluido retardado, entre la frontera y el flujo externo; el flujo hacia atrás se amplía rápidamente y el flujo externo es empujado más lejos y más lejos del límite, por lo que, comienza a separarse a partir de la frontera.*” (Prandtl, 1952, p. 136).

En referencia al flujo en canales curvos, Prandtl (1952)[p. 138] indicó que,

“*si el flujo se desvía hacia un lado se produce una caída transversal de presión en la parte de la curva del flujo. Por lo tanto, según la ecuación de Bernoulli, la velocidad aumenta en el lado interior de la curva y disminuye en el exterior.*”

En consecuencia, se espera que se desarrollen estructuras turbulentas alrededor de puntos de inflexión que están relacionados con la geometría del canal, más específicamente, la curvatura. Sin embargo, Prandtl (1952)[p. 140] estableció que la separación del flujo depende:

“del número de Reynolds y también en gran medida de la forma del límite detrás del punto de separación. Además, el número de Reynolds formado a partir del radio de curvatura en el punto de separación, parece ser importante la disminución o el aumento de la curvatura en la dirección del flujo. Para bajos números de Reynolds se presentó una zona separación de flujo mucho más amplia espacialmente, con respecto a la zona de separación que se desarrolló con altos números de Reynolds, en donde identificó que el flujo se une, y por lo tanto la zona disminuye espacialmente.”

Prandtl (1952)[p. 135-136], resalta que no existe una regla o ley clara sobre la formación de vórtices. Su conclusión esencial fue que:

“en un movimiento en donde la velocidad se incrementa en la dirección del flujo, el fluido avanza adhiriéndose siempre a la frontera, mientras que en un movimiento en donde la velocidad disminuye en la dirección del movimiento el flujo externo puede separarse de la pared y formar remolinos de considerable tamaño y puede formarse debido al flujo hacia atrás de las partes internas de la capa límite.”

En el desarrollo de la formación de la capa límite que mostró en sus trabajos, se observan canales abiertos curvos con vista en planta, sobre estos canales se presentaron estructuras como pilas circulares, diques perpendiculares en forma de pared, curvas pronunciadas, y objetos de diferentes geometrías, en donde se identificaron las perturbaciones (zonas de separación) que afectan el comportamiento del campo de velocidades del flujo que fluyó por los canales utilizados, presentando la formación de vórtices aguas abajo de las estructuras utilizadas.

Prandtl (1952)[p. 142-149], también se planteó el problema de cómo evitar las zonas de separación, estableciendo soluciones como el ensanchamiento gradual del canal, propuestas de geometrías esbeltas para que el empuje de la corriente predomine sobre la presión, y la succión en las paredes laterales del canal. Además, establece tres tipos de flujo secundario, el primero asociado al flujo en tuberías en donde el núcleo de velocidad se aleja de las fronteras y se concentra en el centro, aunque en los cambios de dirección, el comportamiento es más complejo; el segundo tipo trata sobre canales rectos de sección no circular, mostrando geometrías triangulares y rectangulares, y el tercer tipo de flujo secundario lo describe como el comportamiento del flujo que se produce por pequeñas oscilaciones de cuerpos sólidos en fluidos. Resalta que el flujo secundario tiende a desplazar la velocidad máxima (formación de núcleo), por ejemplo, el flujo sobre un codo de 90° en una tubería circular, modifica el campo de velocidades aguas abajo del cambio de dirección y concentra el flujo sobre la pared externa, presentando la separación de flujo en la pared interna (flujo secundario del primer tipo).

3.3. Preguntas de investigación

Las preguntas de investigación son: (1) ¿Por qué los modelos numéricos 3D del tipo RANS (Reynolds Average Navier-Stokes) no aproximan correctamente el campo de velocidades que

se presentó dentro de la zona de separación del flujo?, (2) ¿Cuál es el impacto de la zona de separación sobre el flujo principal?, y (3) ¿Qué mecanismos o propiedades del flujo permiten identificar una zona de separación?

3.4. Dispositivo experimental y equipo de medición

En la Coordinación de Hidráulica del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (IIUNAM), se tiene un equipo ultrasónico de efecto Doppler, que permitió medir los perfiles de la velocidad con una longitud de 3 cm en la vertical, el equipo se puede desplazar tantas veces sea necesario para determinar un perfil más completo. El equipo se conoce como Vectrino–II (Nortek, 2022) y registró los tres componentes de la velocidad asociados a un sistema tridimensional de coordenadas rectangulares. El equipo se montó sobre un soporte que permitió desplazarlo por todo el canal curvo para obtener la información de la velocidad y características de la turbulencia. El objetivo de esta sección es ampliar el conocimiento del comportamiento de la velocidad dentro de la zona de separación, se realizaron las mediciones de la velocidad en dos secciones localizadas a la salida de la curva del canal (descrito en el apartado anterior). Las secciones se localizan principalmente en la zona de separación; esta zona presentó complicaciones de aproximación numérica por los modelos numéricos 2D y 3D. Los equipos ultrasónicos cuentan con su reporte de calibración emitido por la empresa de fabricación. El rango de perfil de velocidad fue de 40 a 70 mm por debajo del emisor central, el tamaño de celda máxima dentro del perfil fue de 1 mm, lo que proporcionó un total de 30 celdas de medición. El límite de velocidad aceptable fue de $\pm 1\%$, ± 1 mm/s y se ha verificado en laboratorio.

3.5. Procedimiento

Se utilizó el canal con curvatura localizado dentro de las instalaciones del IIUNAM, presentado en el Figura 2.1. La carga sobre el vertedor fue de 0.1404 m y se utilizó la ecuación de Kindsvater-Shen para determinar el caudal (ISO 1438, 2017, p. 20).

$$Q = C_d \frac{8}{15} \tan \frac{\alpha}{2} \sqrt{2gh_e}^{2/5} \quad (3.1)$$

En donde, C_d es el coeficiente de descarga determinado en función de tres variables, $C_d = f(h/p, p/B, \alpha)$, p es la altura del vértice del vertedor con respecto al suelo del canal, B el ancho del canal de llegada, h_e la carga efectiva sobre la cresta del vertedor, y α el ángulo interno del vertedor (90°). Se determinó un caudal de entrada de 10.31 l/s y el tirante (y) localizado en la sección 11 fue de 14.97 cm. El equipo Vectrino–II se usó con los sensores en posición hacia abajo y se operó en modo adquisición de datos, y fue necesario recolectar los datos en forma manual.

Se utilizó la siguiente infraestructura, instrumentos y materiales:

- Equipo de medición Vectrino–II y accesorios
- Computadora portátil
- Canal de curvas (dispositivo experimental)

- Soporte para equipos de medición
- Estructuras hidráulicas (compuertas y vertedores)
- Equipo de bombeo
- Cárcamo (almacenamiento de agua)

El procedimiento en las mediciones de los perfiles de la velocidad fue el siguiente:

1. Instalación de equipo de bombeo, y limnómetros sobre el vertedor triangular localizado aguas arriba y otro localizado aguas abajo (en la sección 11)
2. Se colocó el equipo de medición Vectrino–II en los soportes que se apoyan sobre el canal curvo, los soportes se pueden desplazar en dirección aguas arriba y aguas abajo (sobre el eje X), y el Vectrino–II se desplazó transversalmente sobre el soporte para colocarlo en la posición en donde se midieron los perfil de velocidades (sobre el eje Y)
3. Se verificó que el Vectrino–II estuviera a nivel para desarrollar las mediciones
4. Se estableció un caudal constante en el canal curvo
5. Se revisaron que los equipos de medición proporcionarán señales en los equipos de cómputo
6. Se recolectaron muestras de los perfiles de velocidad con una duración de 3 minutos dentro del flujo establecido, para la medición de los perfiles de velocidad por el equipo Vectrino–II se utilizó una frecuencia de 100 Hz
7. Se desplazó el equipo Vectrino–II en el sentido vertical mediante el vernier lateral y se realizaron los pasos del 3 al 5 para cada prueba
8. Se midió un perfil de la distribución de la velocidad en la vertical con el Vectrino–II
9. Se desplazó el equipo en sentido horizontal sobre la sección de medición hasta obtener los puntos deseados
10. El proceso se repitió de los pasos 6 a 9 hasta obtener los puntos deseados
11. Finalmente, se procesó la información de los registros recolectados y se determinaron los componentes de velocidad y las características de la turbulencia

3.6. Visualización tridimensional del flujo en laboratorio

Durante los experimentos en el laboratorio, se identificaron pequeños vórtices que viajaron sobre la superficie libre, y que se desprendían a partir de la sección 3, estas estructuras de flujo se desplazaron sobre la margen izquierda en dirección hacia aguas abajo. Esta dinámica de las estructuras del flujo no se observó en los análisis numéricos tridimensionales del flujo, presentados en la sección anterior.

En la Figura 3.1, se presenta el comportamiento de un colorante al inyectarlo al interior del flujo, específicamente en la zona de separación, entre las secciones 4 y 5. La inyección del colorante se realizó mediante un equipo desarrollado en IIUNAM. El equipo de inyección de colorante consta de una bolsa en donde se almacena el colorante, una manguera conectada

a un catéter, a la salida del catéter otra manguera que se conecta a un tubo cilíndrico de 5 mm de espesor, y al final el tubo tiene una salida curva con un orificio de 2.5 mm, que se orienta en la dirección principal del flujo (en dirección X), el catéter permite controlar el goteo del colorante, el cual desciende por gravedad. En la Figura 3.1(a), se presenta la inyección del colorante entre las secciones 4 y 5. En la cercanía de la salida del colorante la concentración es abundante (en color azul), el colorante desarrolló ondulaciones en forma de vórtices que viajan hacia aguas abajo. En la Figura 3.1(b), el colorante que viajó hacia aguas abajo se dispersa y forma una nube azul, aquí se observaron pequeños *manchones* de tinta, sin embargo, el proceso de difusión fue rápido y se desarrolló el mezclado.

En la Figura 3.1(c), se observa que el colorante que forma la región azul es de menor espesor espacial, con respecto a las dos Figuras anteriores. Además, se identificó que el colorante viajó hacia la parte de atrás de la aguja de inyección, esto permite visualizar claramente el flujo en retroceso o hacia atrás, y es claro que no sigue el flujo principal, en dirección hacia aguas abajo (en dirección +X, o hacia la sección 11). En la Figura 3.1(d), el colorante viajó más atrás de la posición de la aguja, los *manchones* de tinta permanecieron cercanos al punto de inyección y su desplazamiento hacia aguas abajo fue lento. En la Figura 3.1(e) el colorante viajó más atrás de la posición de la aguja comparada con la imagen anterior, y también se identificó un aumento espacial de la región azul, que presento un comportamiento dinámico.

En las Figuras 3.1(h, i, j) se observa que el colorante cubre una zona más atrás del punto de inyección. La región azul presentó variaciones constantes, y los *manchones* de colorante se mantuvieron cerca del punto de inyección. Se identificó que el colorante que viajó hacia atrás del punto de inyección no ascendió por completo hasta la superficie libre, sino que se mantuvo en una región entre los 4 y 10 cm, que es en donde se desarrolló la zona de separación.

En la Figura 3.2(a) se presenta la inyección de colorante dentro del flujo entre las secciones 1 y 2, el punto de inyección se localizó muy cercano a la margen izquierda y del fondo. Se observó cómo el colorante se amplió en la región cercana al fondo y no siguió una trayectoria paralela a alguna margen del canal, por ejemplo, es diferente al comportamiento mostrado en la Figura 3.2(c), en donde el colorante siguió una trayectoria más o menos definida y la concentración del colorante se mantiene a lo largo de la trayectoria.

En la Figura 3.2(d), se visualiza la inyección de colorante en un punto cercano a la superficie libre, al centro de la sección 3, se observaron pequeñas ondulaciones del colorante en dirección hacia aguas abajo, estas ondulaciones son inducidas por las vibraciones en la aguja producto del choque del flujo de agua sobre la misma, aunque, el prevaleció concentrado el comportamiento del colorante sobre la trayectoria. En la Figura 3.2(e, f), se presenta la inyección del colorante en un punto cerca del fondo del canal, inyectado poco antes de la sección 2, y ligeramente más hacia el centro del canal, cubre una mayor área e inclusive se aleja de la margen izquierda. En la Figura 3.2(g), se presenta el resultado de la inyección de colorante después de 15 minutos, identificando una zona *muerta* o de muy baja velocidad, en la que el colorante permanece inalterado por este periodo de tiempo.

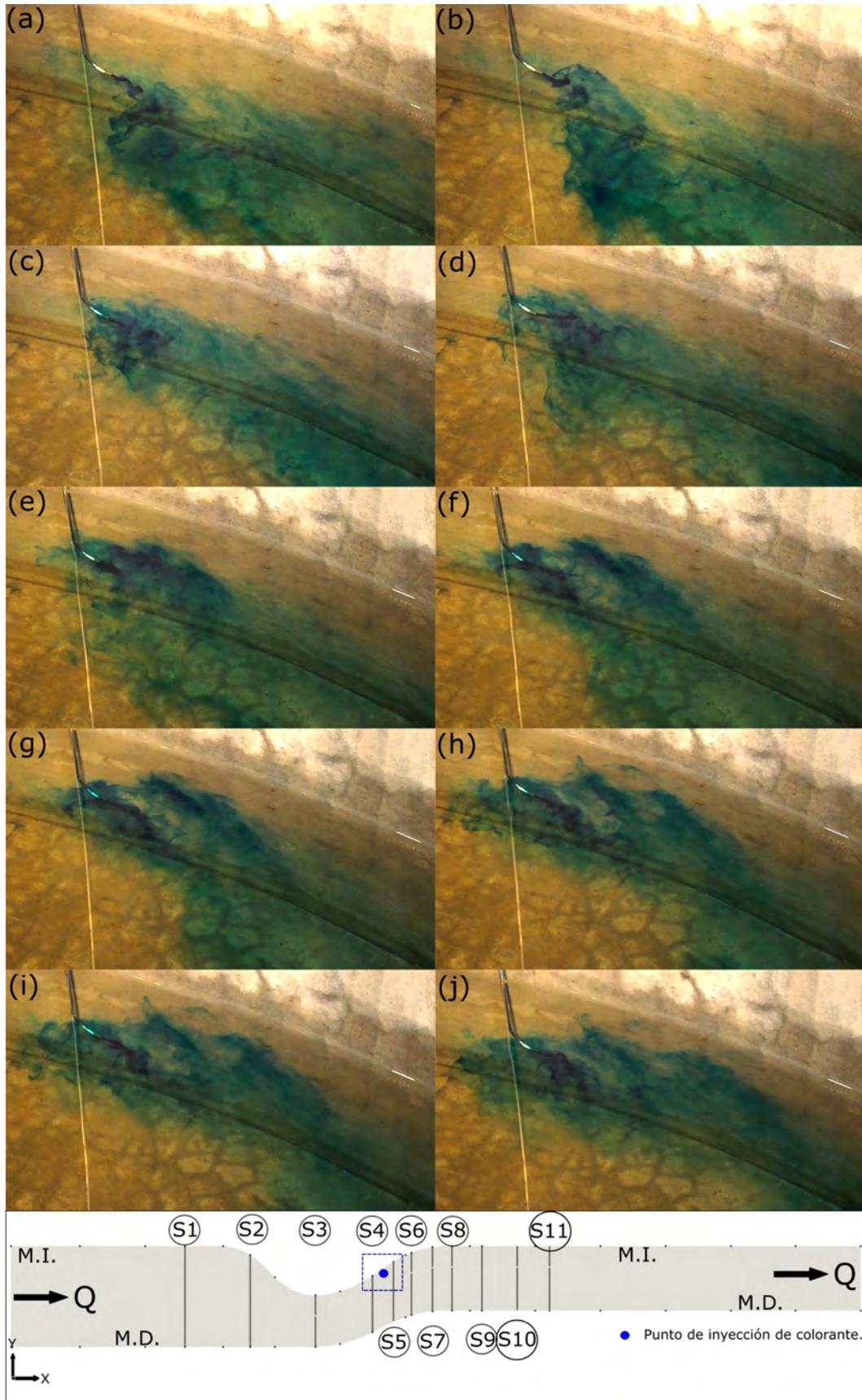


Figura 3.1. Visualización del flujo con inyección de colorante dentro de la zona de separación.

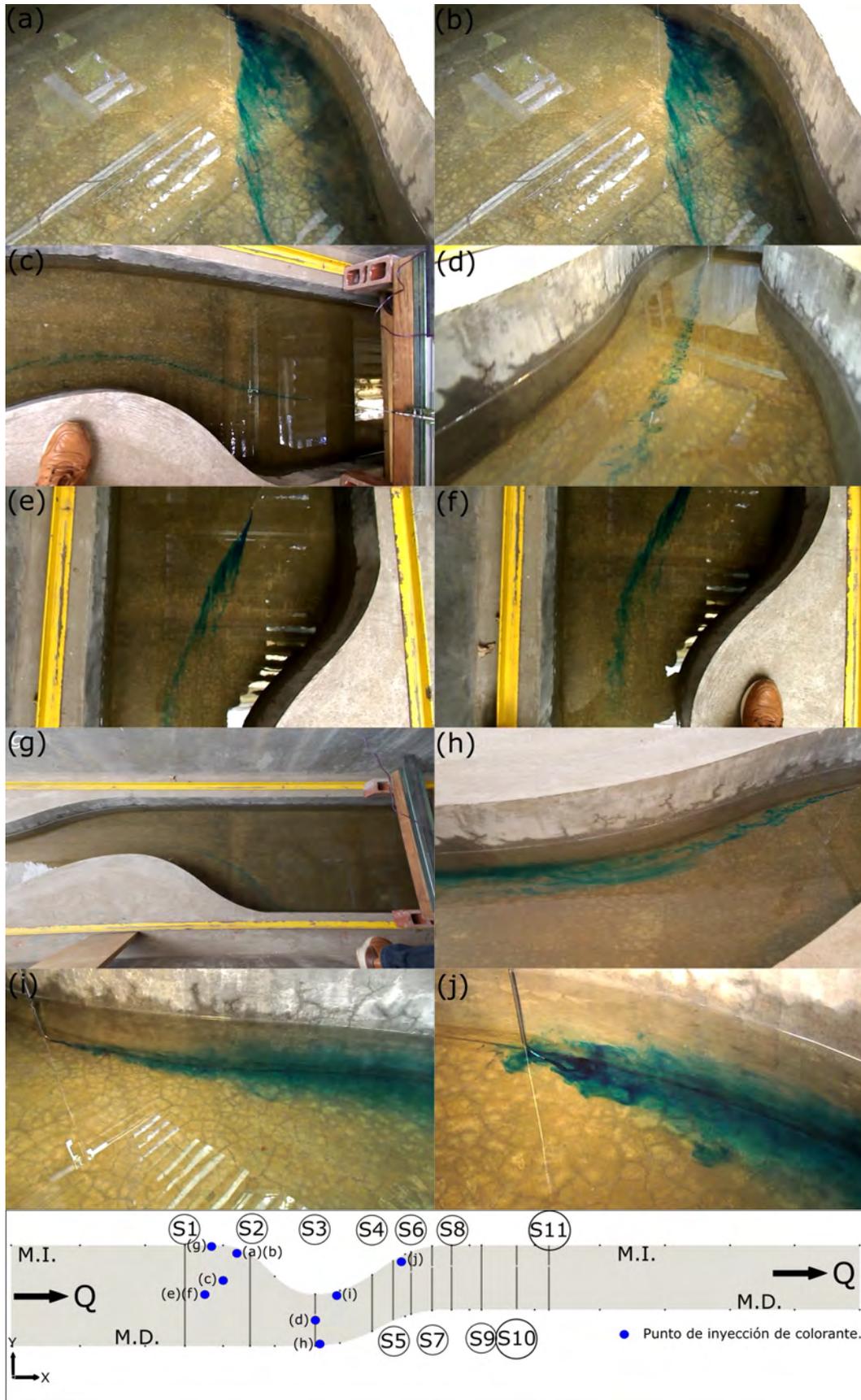


Figura 3.2. Visualización del flujo con inyección de colorante en distintos puntos del canal.

En la Figura 3.2(h), se presenta la inyección del colorante en el flujo en un punto cercano a la margen derecha, ligeramente aguas abajo de la sección 3, se observó el ascenso del colorante a medida que se acercaba a la salida de la curva, incluso se aprecia la curvatura de este cambio en el colorante y como el proceso de difusión desarrolló el mezclado del colorante.

En la Figura 3.2(i) se presenta la inyección de colorante en el flujo poco antes de la sección 4, sobre la margen izquierda y muy cerca del fondo, a partir de este punto y hacia aguas abajo se desarrolló la zona de separación, se observó que éste adquiere una trayectoria uniforme y después existe una difusión que abarca una zona bastante amplia, en donde se da un proceso de mezclado por efecto de la difusión turbulenta, alcanzando una gran parte de la profundidad del nivel de agua. En la Figura 3.2(j) el colorante se inyectó entre la sección 5 y la sección 6, el flujo en el fondo viajó hacia atrás de la aguja de inyección del colorante, observando el fenómeno de flujo en reversa, claramente tridimensional. También, en estas últimas dos Figuras se identificó que el colorante no entró dentro del flujo principal, con lo que la zona de separación de flujo quedó definida en color azul.

3.7. Pruebas experimentales

Las mediciones del campo de velocidades se realizaron dentro de la zona de separación, específicamente en las secciones 6 y 7. Se utilizó el equipo Vectrino–II ultrasónico de efecto Doppler para medir los perfiles de velocidad en la vertical en un rango de 3 cm de longitud, con una resolución de 1 mm, con lo que fue posible obtener 30 registros en la vertical de los tres componentes de la velocidad. La información se almacenó con una frecuencia de muestreo de 100 Hz y se utilizó un intervalo de tiempo de 180 s. Se desarrollaron instrumentos para montar el Vectrino–II y desplazarlo en el sentido horizontal, transversal y vertical.

El equipo se colocó en la sección 6 ($X = 11.55m$) lo más cerca posible de la margen izquierda, en donde se presentó la recirculación secundaria, y a una elevación inicial de 14 cm, por lo que se obtuvo un perfil en el rango vertical de 7 a 10 cm. Posteriormente, el equipo se desplazó en el sentido horizontal a 1 cm del punto anterior (hacia la margen derecha, sobre el eje Y) y se obtuvo nuevamente el perfil de velocidades para el mismo rango, en total se obtienen 12 perfiles a una misma elevación. Después, el equipo se desplazó en el sentido vertical 3 cm, en cuatro ocasiones, para obtener una distribución espacial del comportamiento de la velocidad en la sección 6, y corresponden a las elevaciones de 7 a 10 cm, 4 a 7 cm, 1 a 4 cm y 0 a 1 cm, con un total de 48 perfiles y cada uno con una resolución de 1 mm, y 30 celdas por perfil, así se determinaron 1440 puntos distribuidos en la sección. Sin embargo, el último perfil solo se desplazó 1 cm a partir de la cuarta profundidad de elevación, con lo que se reduce a 1200 puntos por sección, el procedimiento se repitió para la sección 7 ($X = 11.71m$). La información de la localización espacial de los perfiles obtenidos se muestra en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1: Localización espacial de los puntos de medición

| ID | Sección | X (cm) | Y (cm) | Z (cm) | ID | Sección | Z (cm) | Y (cm) | Z (cm) |
|----|---------|-------------|-------------|-------------|----|---------|-------------|-------------|-------------|
| 0 | 6 | 11.55 | 68.5 | 14 | 0 | 7 | 11.71 | 72.5 | 14 |
| 1 | 6 | 11.55 | 68.0 | 14 | 1 | 7 | 11.71 | 72.0 | 14 |
| 2 | 6 | 11.55 | 67.0 | 14 | 2 | 7 | 11.71 | 71.0 | 14 |

Tabla 3.1 Localización espacial de los puntos de medición

| ID | Sección | X (cm) | Y (cm) | Z (cm) | ID | Sección | Z (cm) | Y (cm) | Z (cm) |
|----|---------|-----------|-----------|-----------|----|---------|-----------|-----------|-----------|
| 3 | 6 | 11.55 | 66.0 | 14 | 3 | 7 | 11.71 | 70.0 | 14 |
| 4 | 6 | 11.55 | 65.0 | 14 | 4 | 7 | 11.71 | 69.0 | 14 |
| 5 | 6 | 11.55 | 64.0 | 14 | 5 | 7 | 11.71 | 68.0 | 14 |
| 6 | 6 | 11.55 | 63.0 | 14 | 6 | 7 | 11.71 | 67.0 | 14 |
| 7 | 6 | 11.55 | 62.0 | 14 | 7 | 7 | 11.71 | 66.0 | 14 |
| 8 | 6 | 11.55 | 61.0 | 14 | 8 | 7 | 11.71 | 65.0 | 14 |
| 9 | 6 | 11.55 | 60.0 | 14 | 9 | 7 | 11.71 | 64.0 | 14 |
| 10 | 6 | 11.55 | 59.0 | 14 | 10 | 7 | 11.71 | 63.0 | 14 |
| 11 | 6 | 11.55 | 58.0 | 14 | 11 | 7 | 11.71 | 62.0 | 14 |
| 12 | 6 | 11.55 | 68.5 | 11 | 12 | 7 | 11.71 | 72.5 | 11 |
| 13 | 6 | 11.55 | 68.0 | 11 | 13 | 7 | 11.71 | 72.0 | 11 |
| 14 | 6 | 11.55 | 67.0 | 11 | 14 | 7 | 11.71 | 71.0 | 11 |
| 15 | 6 | 11.55 | 66.0 | 11 | 15 | 7 | 11.71 | 70.0 | 11 |
| 16 | 6 | 11.55 | 65.0 | 11 | 16 | 7 | 11.71 | 69.0 | 11 |
| 17 | 6 | 11.55 | 64.0 | 11 | 17 | 7 | 11.71 | 68.0 | 11 |
| 18 | 6 | 11.55 | 63.0 | 11 | 18 | 7 | 11.71 | 67.0 | 11 |
| 19 | 6 | 11.55 | 62.0 | 11 | 19 | 7 | 11.71 | 66.0 | 11 |
| 20 | 6 | 11.55 | 61.0 | 11 | 20 | 7 | 11.71 | 65.0 | 11 |
| 21 | 6 | 11.55 | 60.0 | 11 | 21 | 7 | 11.71 | 64.0 | 11 |
| 22 | 6 | 11.55 | 59.0 | 11 | 22 | 7 | 11.71 | 63.0 | 11 |
| 23 | 6 | 11.55 | 58.0 | 11 | 23 | 7 | 11.71 | 62.0 | 11 |
| 24 | 6 | 11.55 | 68.5 | 8 | 24 | 7 | 11.71 | 72.5 | 8 |
| 25 | 6 | 11.55 | 68.0 | 8 | 25 | 7 | 11.71 | 72.0 | 8 |
| 26 | 6 | 11.55 | 67.0 | 8 | 26 | 7 | 11.71 | 71.0 | 8 |
| 27 | 6 | 11.55 | 66.0 | 8 | 27 | 7 | 11.71 | 70.0 | 8 |
| 28 | 6 | 11.55 | 65.0 | 8 | 28 | 7 | 11.71 | 69.0 | 8 |
| 29 | 6 | 11.55 | 64.0 | 8 | 29 | 7 | 11.71 | 68.0 | 8 |
| 30 | 6 | 11.55 | 63.0 | 8 | 30 | 7 | 11.71 | 67.0 | 8 |
| 31 | 6 | 11.55 | 62.0 | 8 | 31 | 7 | 11.71 | 66.0 | 8 |
| 32 | 6 | 11.55 | 61.0 | 8 | 32 | 7 | 11.71 | 65.0 | 8 |
| 33 | 6 | 11.55 | 60.0 | 8 | 33 | 7 | 11.71 | 64.0 | 8 |
| 34 | 6 | 11.55 | 59.0 | 8 | 34 | 7 | 11.71 | 63.0 | 8 |
| 35 | 6 | 11.55 | 58.0 | 8 | 35 | 7 | 11.71 | 62.0 | 8 |
| 36 | 6 | 11.55 | 68.5 | 7 | 36 | 7 | 11.71 | 72.5 | 7 |
| 37 | 6 | 11.55 | 68.0 | 7 | 37 | 7 | 11.71 | 72.0 | 7 |
| 38 | 6 | 11.55 | 67.0 | 7 | 38 | 7 | 11.71 | 71.0 | 7 |
| 39 | 6 | 11.55 | 66.0 | 7 | 39 | 7 | 11.71 | 70.0 | 7 |
| 40 | 6 | 11.55 | 65.0 | 7 | 40 | 7 | 11.71 | 69.0 | 7 |
| 41 | 6 | 11.55 | 64.0 | 7 | 41 | 7 | 11.71 | 68.0 | 7 |
| 42 | 6 | 11.55 | 63.0 | 7 | 42 | 7 | 11.71 | 67.0 | 7 |
| 43 | 6 | 11.55 | 62.0 | 7 | 43 | 7 | 11.71 | 66.0 | 7 |
| 44 | 6 | 11.55 | 61.0 | 7 | 44 | 7 | 11.71 | 65.0 | 7 |
| 45 | 6 | 11.55 | 60.0 | 7 | 45 | 7 | 11.71 | 64.0 | 7 |
| 46 | 6 | 11.55 | 59.0 | 7 | 46 | 7 | 11.71 | 63.0 | 7 |
| 47 | 6 | 11.55 | 58.0 | 7 | 47 | 7 | 11.71 | 62.0 | 7 |

3.8. Resultados

3.8.1. Análisis de las velocidades experimentales en las secciones 6 y 7

En la Figura 3.3 se presentan los componentes, \bar{u} , \bar{v} , \bar{w} y la magnitud de la velocidad, \bar{U} , en cm/s, respectivamente. En la Figura 3.3(a) el componente \bar{u} es muy similar al comportamiento de la magnitud de la velocidad, \bar{U} , que se muestra en la Figura 3.3(d), lo que indica que \bar{u} es el componente principal en la magnitud y dirección de la velocidad y predominante. En la Figura 3.3(d) la velocidad disminuye desde $y = 0.63$ m hacia la margen izquierda ($y = 0.68$ m), mientras que en el sentido opuesto la magnitud de la velocidad alcanza los 16 cm/s. La zona en color azul se identificó como *zona de separación o de recirculación*. Además, cerca del fondo la velocidad disminuye por efecto de la fricción con el fondo del canal, se identificó que la magnitud de la velocidad en la zona de la recirculación es baja y tiene a magnitudes cercanas a 2 cm/s. La zona en donde se presentó el mayor gradiente de velocidad no va más allá de los 4 cm de espesor (zona de color anaranjado a cian). También, se identificó que en la zona de recirculación ($0.65 \leq Y \leq 0.68$) el perfil de la distribución de la velocidad es mayor cerca del fondo ($0.003 \leq Z \leq 0.04$), por lo tanto, no sigue el comportamiento de perfil de velocidades parabólico, si no que presentó una forma del tipo S . Por otro lado, en la Figura 3.3(b), se identificó una zona localizada ($0.38 \leq Z \leq 0.64$ y $0.65 \leq Y \leq 0.68$) en donde el componente \bar{v} disminuyó por debajo de 0, con magnitudes de hasta -0.55 cm/s ($Y = 0.685m, Z = 0.0568m$) este comportamiento explica la separación del flujo, con magnitudes similares, pero en dirección opuesta, uno asociado al flujo principal y otro dentro de la zona de separación.

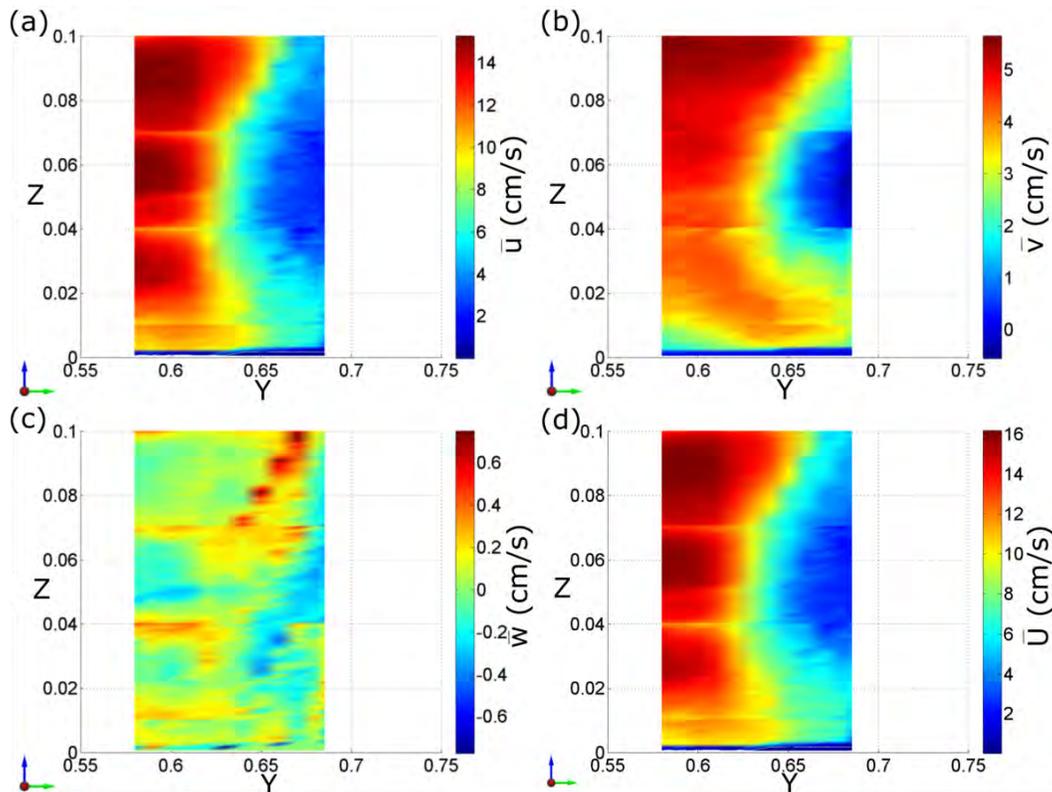


Figura 3.3. Superficies de velocidad en la sección 6; (a) \bar{u} , en cm/s, (b) \bar{v} , en cm/s, (c) \bar{w} , en cm/s, (d) \bar{U} , en cm/s.

Además, se identificó que la velocidad cerca del fondo es mayor ($0.003 \leq Z \leq 0.04$) comparada con la que se localizó a elevaciones mayores ($0.04 \leq Z \leq 0.13$) lo que está en acuerdo con el comportamiento del perfil tipo S .

En la Figura 3.4 se presentan las superficies de velocidad de los componentes, \bar{u} , \bar{v} , \bar{w} y \bar{U} , en cm/s, respectivamente. En la Figura 3.4(d) la velocidad disminuye desde $Y = 0.65$ m hacia la margen izquierda ($Y = 0.72$ m), mientras que en el sentido opuesto la magnitud de la velocidad alcanza los 16 cm/s. La zona de separación o de recirculación secundaria se identifica en color azul, se observó un incremento espacial de esta zona, con respecto a la zona en la sección 6. La velocidad cerca del fondo disminuyó por efecto de la fricción con el fondo del canal, se identificó que la magnitud de la velocidad en la zona de la recirculación es baja y tiene a magnitudes del orden de 2.6 cm/s. La zona en donde se presentó el mayor gradiente de velocidad no va más allá de los 4 cm de espesor (zona de color amarillo a color cian). También, se identificó que en la zona de recirculación secundaria ($0.65 \leq Y \leq 0.72$) no presentó un perfil de velocidades del tipo parabólico, por lo que a diferencia de la sección 6, se presentó un perfil del tipo b , se identificó que la velocidad cerca del fondo ($0.003 \leq Z \leq 0.038$) fue mayor que la localizada a elevaciones superiores.

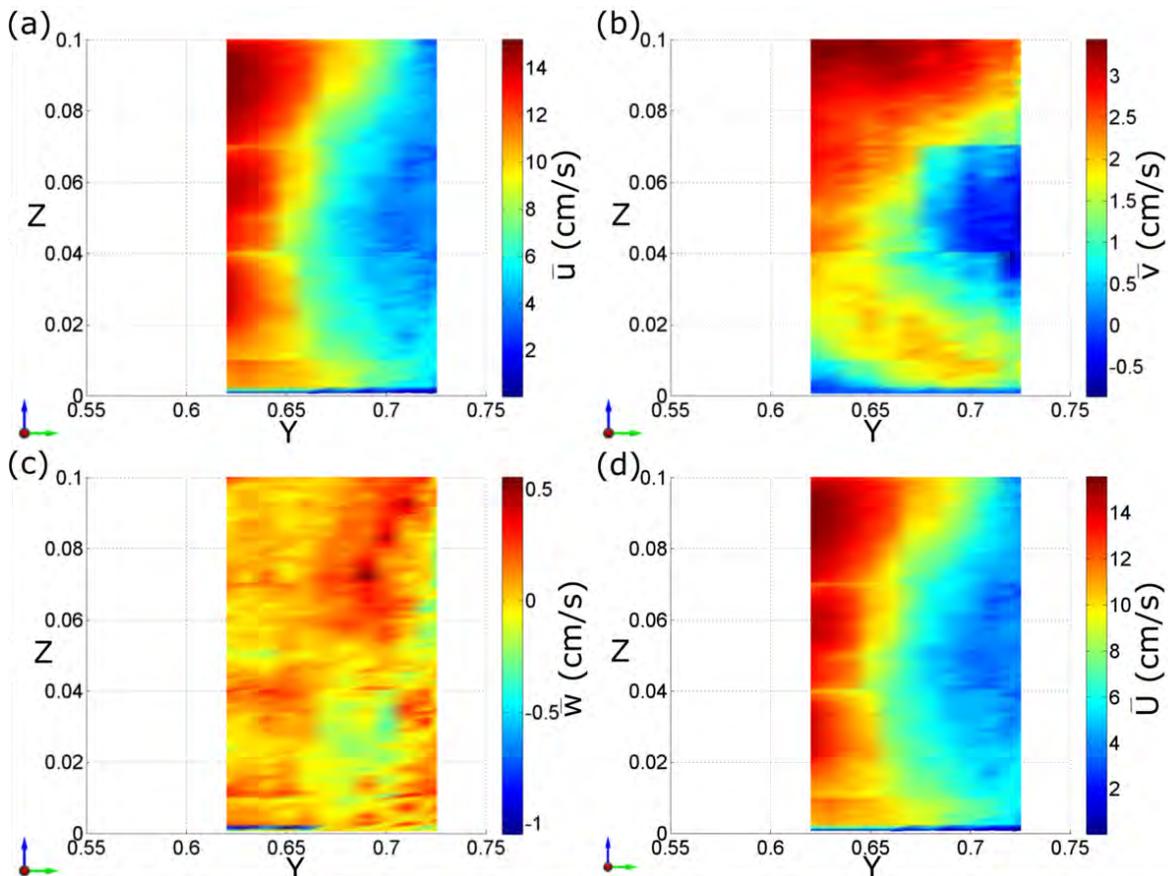


Figura 3.4. Superficies de velocidad en la sección 7; en (a) \bar{u} , en cm/s, en (b) \bar{v} , en cm/s, en (c) \bar{w} , en cm/s, en (d) \bar{U} , en cm/s.

Por otro lado, en la Figura 3.4(b), se identificó una zona ($0.65m \leq Y \leq 0.72m$ y $0.01m \leq Z \leq 0.08m$) en donde el componente \bar{v} disminuyó por debajo de 0, con magnitudes de hasta -0.85 cm/s ($Y = 0.72m, Z = 0.04m$) este comportamiento también explica la

separación del flujo, es clara la zona en donde el componente de velocidad \bar{v} disminuyó. Además, se identificó que la velocidad cerca del fondo fue mayor ($0.003m \leq Z \leq 0.01m$) comparada con la localizada a elevaciones superiores ($0.01m \leq Z \leq 0.09m$) lo que está en acuerdo con el comportamiento del perfil tipo **b**. Esto permite identificar un vórtice con centro en donde el componente \bar{v} presentó la magnitud más baja (negativa) y alrededor de él una con magnitud positiva, esto dentro de la zona de separación e interactúo con el flujo principal (zona superior en color rojo). En la Figura 3.4(c), se identificó que en el rango $0.66m \leq Y \leq 0.72m$ y $0.05m \leq Z \leq 0.1m$, el componente es positivo, mientras que por abajo de este rango el componente es negativo, lo cual complementó el desarrollo del vórtice dentro de la zona de separación.

3.8.2. Análisis de la energía cinética de la turbulencia, en las secciones 6 y 7

Los flujos turbulentos y su dinámica en el tiempo son una tarea compleja de analizar, y desde el enfoque de los promedios de Reynolds (en el tiempo) es aceptable hacer uso del análisis estadístico a los registros de los componentes de la velocidad. El comportamiento de la velocidad ($u_i(\mathbf{x}, t)$) es descrito mediante la velocidad media ($U_i(\mathbf{x})$) y sus fluctuaciones alrededor de ella ($u'_i(\mathbf{x}, t)$), esto es (Wilcox, 2004, p. 31):

$$u_i(\mathbf{x}, t) = U_i(\mathbf{x}) + u'_i(\mathbf{x}, t) \quad (3.2)$$

en donde, \mathbf{x} es el vector de posición, t el tiempo, y el subíndice $i = \{1,2,3\}$ está asociado a cada uno de los ejes cartesianos. Observe que $U_i(\mathbf{x})$ es un promedio en el tiempo que se define como (Wilcox, 2004, p. 32):

$$U_i(\mathbf{x}) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_t^{t+T} u_i(\mathbf{x}, t) dt \quad (3.3)$$

Además, por definición la media de la fluctuación será cero (Wilcox, 2004, p. 32).

$$u'_i = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_t^{t+T} [u_i(\mathbf{x}, t) - U_i(\mathbf{x})] = 0 \quad (3.4)$$

y los cuadrados de los componentes de las fluctuaciones siempre serán positivos.

La suma de los esfuerzos normales, que se localizan sobre la traza del Tensor de Reynolds, y que corresponden a, $\overline{u'^2}$ se ven afectos por 0.5, de esta manera se determina la energía cinética de la turbulencia (k) o energía cinética por unidad de masa del campo de velocidad fluctuante, y se expresa como (Wilcox, 2004; Pope, 2000, p. 41, p. 88):

$$k = \frac{1}{2} \left(\overline{u'_i u'_i} \right) \quad (3.5)$$

La complejidad matemática y numérica, para determinar los esfuerzos de Reynolds ($\overline{u'_i u'_i}$) es alta, en la modelación matemática lo más aceptable es determinar k a partir de los modelos de turbulencia, considerando que las fluctuaciones son más o menos isotrópicas.

En la Figura 3.5 se muestra la energía cinética de la turbulencia obtenida a partir de los registros de medición en las secciones 6 y 7. Se identificó la presencia de una zona de mayor energía (mostrada en color rojo) localizada en la zona en donde se presentaron las bajas magnitudes de velocidad, y que corresponde a la zona de separación.

En la Figura 3.5(a) que corresponde a la sección 6, en el rango $0.58m \leq Y \leq 0.62m$, la energía cinética de la turbulencia es menor, comparada con la que se presentó en la zona de separación, el orden de magnitud es de $4 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}^2$, el análisis de la información indicó un orden de magnitud mayor en la zona de la recirculación; en el fondo la energía cinética de la turbulencia fue aún menor con una magnitud por abajo del orden de $1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}^2$. Este comportamiento de incremento de energía dentro de la zona de separación es importante, ya la zona de separación interactúa con el comportamiento del flujo principal. En la Figura 3.5(b), que corresponde a la sección 7, en el rango $0.65m \leq Y \leq 0.7m$, la energía cinética de la turbulencia es mayor, fuera de este rango la energía cinética de la turbulencia disminuye (color amarillo a color azul), el análisis de la información indicó un orden de magnitud mayor en la zona de la recirculación; en el fondo la energía cinética de la turbulencia fue aún menor con una magnitud del orden de $1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}^2$.

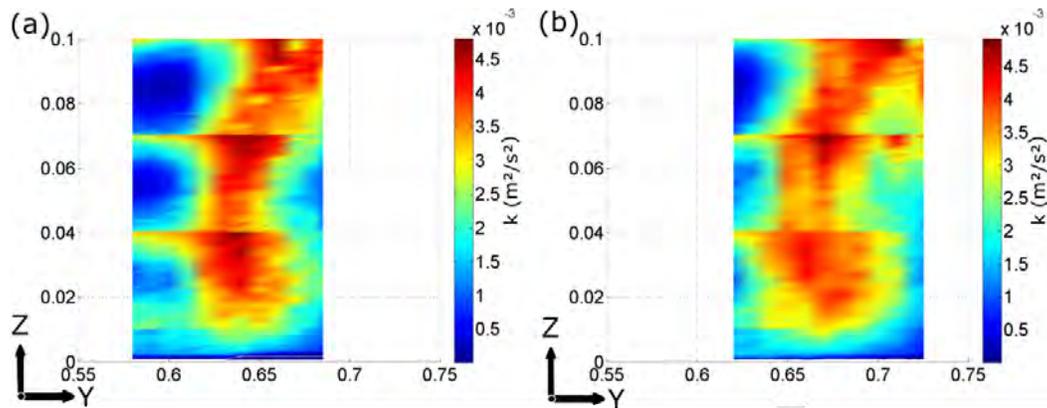


Figura 3.5. Energía cinética de la turbulencia (k), en m^2/s^2 , en (a) la sección 6, en (b) la sección 7

También, en la Figura 3.5 se observan discontinuidades entre los perfiles medidos, esto se debe a que el fenómeno es dinámico y debido a que las muestras se realizaron a distintos tiempos se pierde la continuidad en las elevaciones de empalme. Sin embargo, es claro que en la zona de separación se presentó un incremento importante de la energía cinética de la turbulencia (k), y se debe al comportamiento del flujo dentro de la zona de separación, limitado por la capa de corte, entre el flujo principal, la zona de separación y la frontera (pared), por lo que las fluctuaciones de velocidad aumentan, independientemente de su magnitud.

3.8.3. Análisis de la intensidad de la turbulencia, en las secciones 6 y 7

La intensidad de la turbulencia se define como la raíz cuadrada de la media de las fluctuaciones al cuadrado, y se expresa como una intensidad relativa de tres cantidades descritas mediante la siguiente expresión:

$$\frac{\sqrt{\overline{(u')^2}}}{\bar{u}}; \frac{\sqrt{\overline{(v')^2}}}{\bar{u}}; \frac{\sqrt{\overline{(w')^2}}}{\bar{u}} \quad (3.6)$$

En la Figura 3.6 se presenta la intensidad de la turbulencia de los componentes de velocidad y su magnitud en la sección 6.

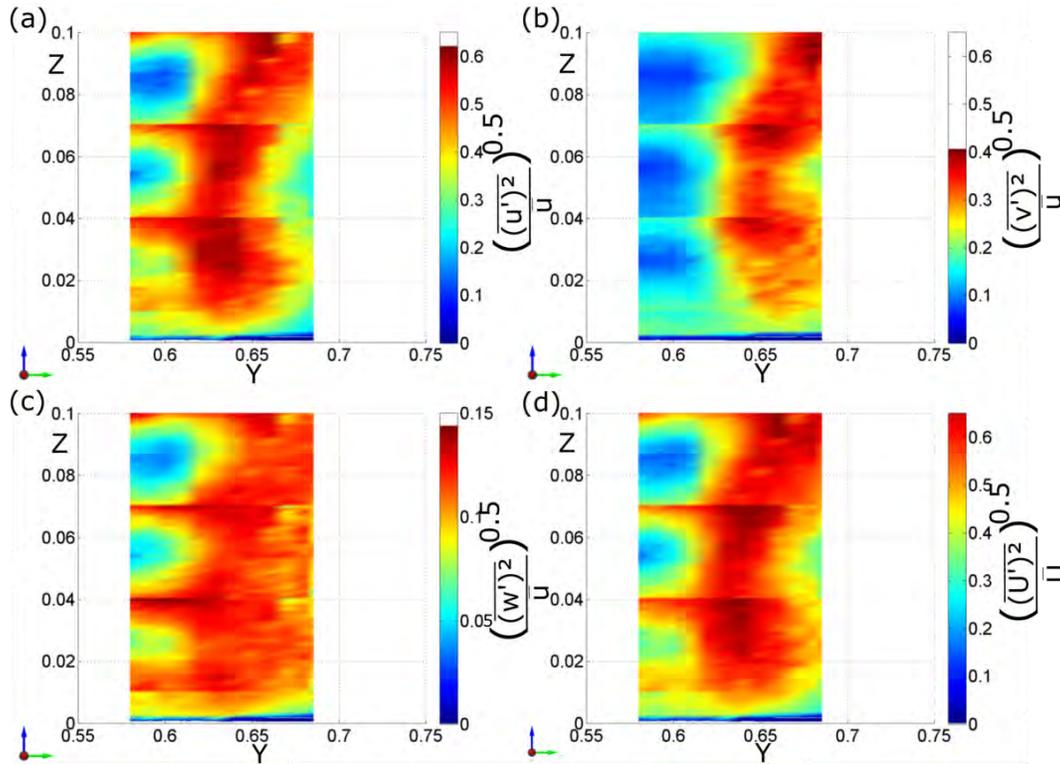


Figura 3.6. Intensidad de la turbulencia en la sección 6, en (a) $\frac{\sqrt{\overline{(u')^2}}}{\bar{u}}$, en (b) $\frac{\sqrt{\overline{(v')^2}}}{\bar{u}}$, en (c) $\frac{\sqrt{\overline{(w')^2}}}{\bar{u}}$, y en (d) $\frac{\sqrt{\overline{(U')^2}}}{\bar{U}}$

En la Figura 3.6 se identificó que la zona de mayor intensidad corresponde a la interacción entre la zona del flujo principal y la zona de separación, y disminuye hacia la margen derecha ($Y \leftarrow 0.58m$), la intensidad de la turbulencia en la zona llega a superar el 60% (en color rojo), por otro lado, la intensidad de la turbulencia en el rango $0.58m \leq Y \leq 0.62m$, es menor al 20% (en color azul). Este análisis indica que la intensidad de la turbulencia es alta, lo que significa que las fluctuaciones de la velocidad también lo son. Además, se identificó que la intensidad de la turbulencia cerca del fondo es menor al 20%, por lo que, la intensidad es de menor magnitud comparada con la que se presentó en la zona de interacción del flujo principal y la zona de separación. Lo anterior resulta interesante, ya que, estas diferencias de magnitudes descartan la idea de que la intensidad en la zona de interacción entre el flujo principal y la zona de separación sean producto de la interacción entre el flujo y fondo del canal o por efecto de la fricción de pared, este comportamiento también se observó en la sección de medición inmediata aguas abajo, ver Figura 3.7; también, se identificó un incremento espacial en la zona de la intensidad de la turbulencia comparado con la sección 6.

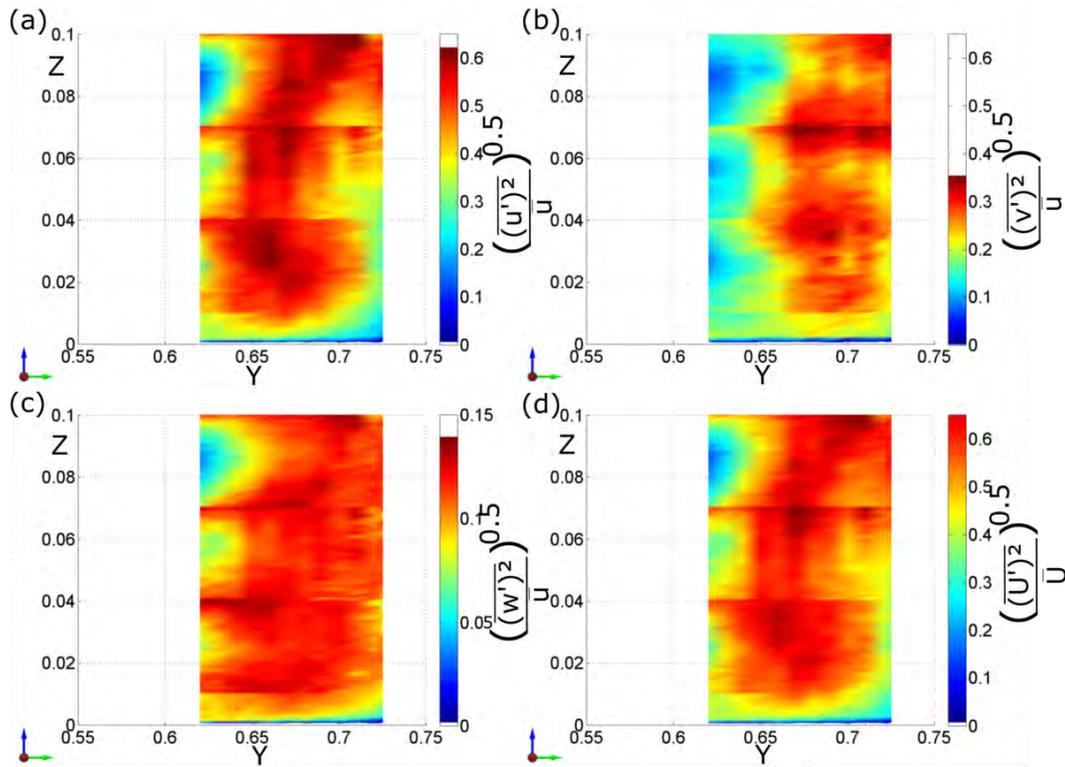


Figura 3.7. Intensidad de la turbulencia en la sección 7, en (a) $\frac{\sqrt{(u')^2}}{u}$, en (b) $\frac{\sqrt{(v')^2}}{u}$, en (c) $\frac{\sqrt{(w')^2}}{u}$, y en (d) $\frac{\sqrt{(U')^2}}{U}$

3.8.4. Análisis del Tensor de esfuerzos de Reynolds específico, en las secciones 6 y 7

En la Figura 3.8 se presentan los esfuerzos normales y tangenciales calculados a partir de los registros de la velocidad en la sección 6. En la Figura 3.8(a) se presenta el esfuerzo normal $\overline{u'^2}$, se identificó que en el rango $0.62 \leq Y \leq 0.66$ se concentran las mayores magnitudes. En la Figura 3.8(b) se presenta el esfuerzo normal $\overline{v'^2}$, se identificó que en el rango $0.62 \leq Y \leq 0.68$ se concentran las mayores magnitudes, aquí se concentran hacia la margen izquierda y disminuyen hacia la margen derecha (flujo principal). En la Figura 3.8(c) se presenta el esfuerzo normal $\overline{w'^2}$, se identificó que en el rango $0.62 \leq Y \leq 0.68$ se concentran las mayores magnitudes, aunque son dos escalas de magnitud menor con respecto al componente $\overline{u'^2}$ y una escala menor para el componente $\overline{v'^2}$. Los esfuerzos $\overline{u'^2}$, $\overline{v'^2}$ y $\overline{w'^2}$ son los componentes en el cálculo de la energía cinética de la turbulencia. En la Figura 3.8(d) se presenta el esfuerzo tangencial $\overline{u'v'}$, se identificó que en el rango $0.62 \leq Y \leq 0.68$ se concentran las mayores magnitudes, incluso se observa el incremento contenido dentro de dos medios círculos. En la Figura 3.8(e) se presenta el esfuerzo tangencial $\overline{u'w'}$, se identificó que en el rango $0.65 \leq Y \leq 0.68$ y $0 \leq Z \leq 0.07$ se concentran las mayores magnitudes, por debajo de este rango se identificó una disminución considerable (en color azul); en este esfuerzo se pierde un poco la continuidad en los resultados del perfil superior ($7\text{cm} \leq Z \leq 10\text{cm}$), asociados principalmente por la dinámica del flujo. En la Figura 3.8(f) se presenta el esfuerzo tangencial $\overline{v'w'}$, se identificó que en el rango $0.62 \leq Y \leq 0.68$ se presentaron altos gradientes en espacios muy pequeños, localizados en toda la vertical, se muestran los cambios de color rojo-azul.

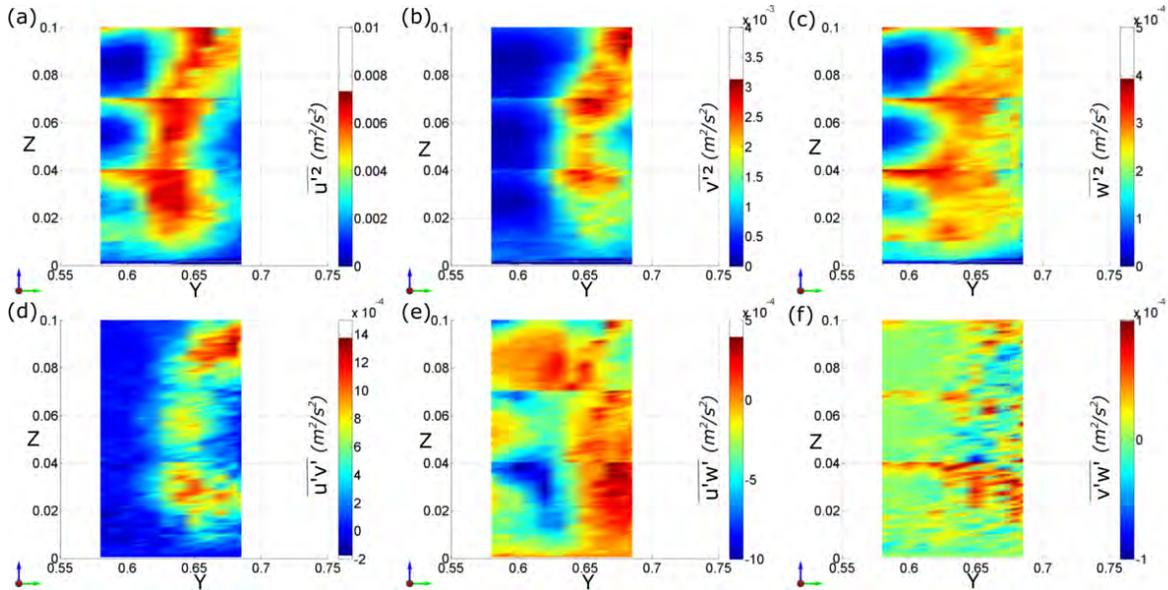


Figura 3.8. Tensor de esfuerzos de Reynolds específico, (a) $\overline{u'^2}$ en m^2/s^2 , (b) $\overline{v'^2}$ en m^2/s^2 , (c) $\overline{w'^2}$ en m^2/s^2 , (d) $\overline{u'v'}$ en m^2/s^2 , (e) $\overline{u'w'}$ en m^2/s^2 , (e) $\overline{v'w'}$ en m^2/s^2 , en la sección 6

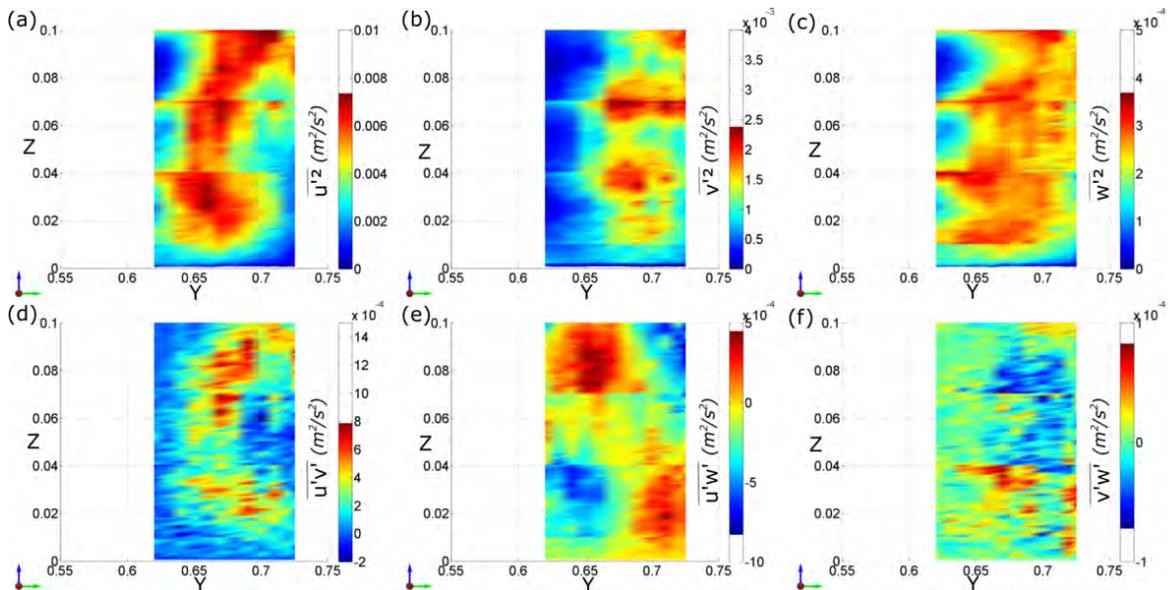


Figura 3.9. Tensor de esfuerzos de Reynolds específico, (a) $\overline{u'^2}$ en m^2/s^2 , (b) $\overline{v'^2}$ en m^2/s^2 , (c) $\overline{w'^2}$ en m^2/s^2 , (d) $\overline{u'v'}$ en m^2/s^2 , (e) $\overline{u'w'}$ en m^2/s^2 , (e) $\overline{v'w'}$ en m^2/s^2 , en la sección 7

En la Figura 3.9(a) se presenta el esfuerzo normal $\overline{u'^2}$, se identificó que en el rango $0.64 \leq Y \leq 0.68$ se concentran las mayores magnitudes en la zona entre el flujo principal y la zona de separación (en color rojo). En la Figura 3.9(b) se presenta el esfuerzo normal $\overline{v'^2}$, se identificó que en el rango $0.62 \leq Y \leq 0.73$ se concentran las mayores magnitudes, aquí se concentran hacia la margen izquierda y disminuyen hacia la margen derecha (flujo principal). En la Figura 3.9(c) se presenta el esfuerzo normal $\overline{w'^2}$, se identificó que en el rango $0.65 \leq Y \leq 0.73$ se concentran las mayores magnitudes, aunque son dos escalas de magnitud menor con respecto al componente $\overline{u'^2}$ y una escala menor para el componente $\overline{v'^2}$.

En la Figura 3.9(d) se presenta el esfuerzo tangencial $\overline{u'v'}$, se identificó que en el rango $0.64 \leq Y \leq 0.73$ se concentran las mayores magnitudes, se identificó que la magnitud de los esfuerzos aumentó en una zona con forma de medio toroide. En la Figura 3.9(e) se presenta el esfuerzo tangencial $\overline{u'w'}$, el análisis de la información mostrado en la figura permitió identificar cuatro núcleos de células, dos en color rojo y dos en color azul, se identifican en posición opuesta y también con signo opuesto. En la Figura 3.8(f) se presenta el esfuerzo tangencial $\overline{v'w'}$, se identificó que en el rango $0.66 \leq Y \leq 0.73$ se presentaron dos comportamientos: el primero localizado en la parte baja del perfil ($0.001m \leq Z \leq 0.04m$) de signo positivo, y el segundo, que se localizan en la parte superior del perfil ($0.04m \leq Z \leq 0.10m$) de signo negativo. Entre la sección 6 y 7, se presentó una ampliación espacial entre los esfuerzos, en general se mantienen las características de los esfuerzos hacia aguas abajo.

3.8.5. Análisis de los parámetros de calidad en las secciones 6 y 7

En la Figura 3.10 se presenta la relación ruido-señal (o SNR, por sus siglas en inglés) correspondientes a las secciones 6 y 7. En general, la SNR presentó un aumento en magnitud cercano a la parte central del rango de elevación de los perfiles medidos (≈ 5.5 cm por debajo del sensor central). En las elevaciones de 2.5, 5.5 y 8.5 cm la SNR fue del orden de 30 dB, y disminuyó a 20 dB cerca de los extremos de cada perfil, es decir, en las elevaciones de 1, 4, 7 y 10 cm, en ambas secciones.

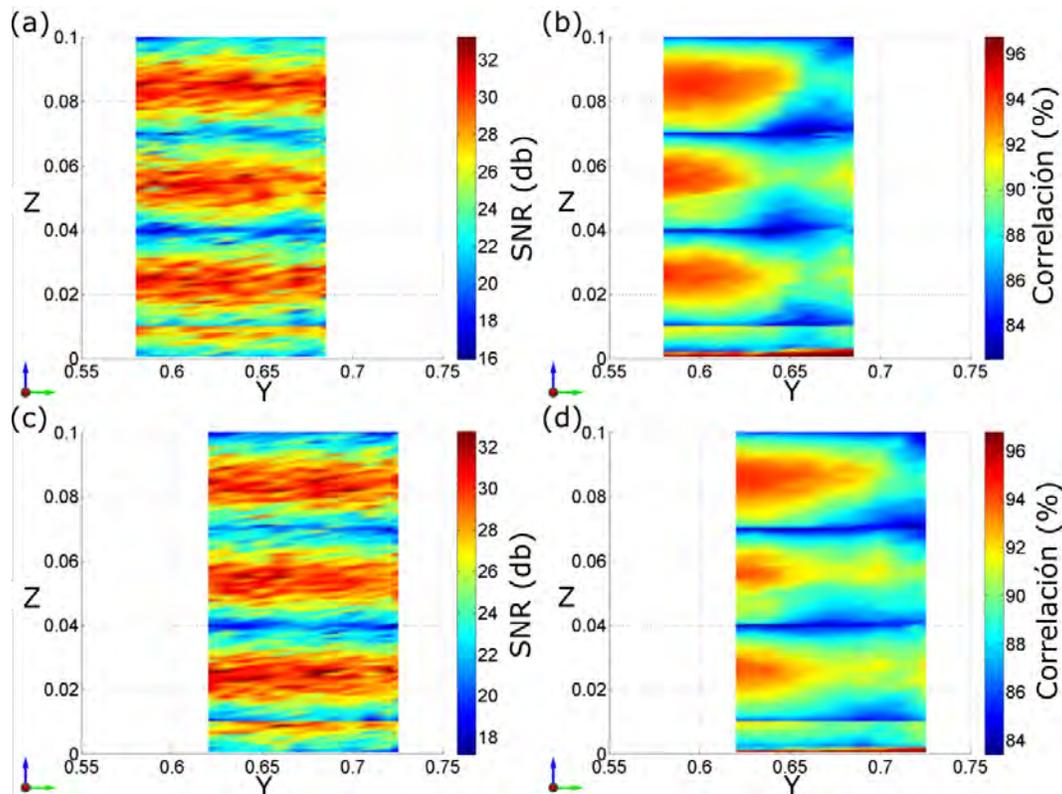


Figura 3.10. SNR media en db y Correlación media en %, en las secciones 6 y 7

Las superficies mostradas superan los 15 dB, que es un umbral en la calidad recomendado en el análisis de la información (Nortek, 2022). Los datos indican que el equipo Vectrino-II presentó una mejor calidad de la información a los 5.5 cm dentro del perfil de medición (4 a

7 cm) por debajo del emisor central, posteriormente la calidad disminuyó a medida que se alejó del volumen de muestreo principal, aunque los datos mostrados superan el criterio de calidad de la información. Por otro lado, el mayor gradiente dentro de la superficie de SNR se presentó cerca de los primeros 2 mm a partir del fondo y fue ligeramente mayor cerca de la margen izquierda, es decir, sobre el flujo principal, ver Figura 3.10(a)(c) .

Otro parámetro de la calidad de la información es la correlación entre los cuatro sensores de recepción de sonido con los que cuenta el equipo ultrasónico, en la Figura 3.10(b)(d) se muestra la correlación media de la información de los datos recopilados en el laboratorio correspondientes a las secciones 6 y 7. En la Figura 3.10(b)(d) se muestra la correlación media. Por debajo de $Y = 0.65$ m se alcanzó una correlación superior a 90 % (color amarillo a color rojo), para las elevaciones que corresponden a los extremos de los perfiles, es decir, 1, 4, 7 y 10 cm, no disminuyó por debajo del 83 %, incluso en el resto del ancho de la sección del canal se superó la correlación del 83 %. La correlación en el fondo del canal fue del 96 % dentro de los primeros 2 mm de elevación. La información presentada supera el criterio recomendado por el fabricante, siendo superior o igual al 70 %.

3.9. Conclusiones

En el análisis de los registros de la velocidad se identificó la presencia de una zona de separación localizada a la salida de la curva sobre la margen izquierda del canal. En la superficie libre se observó el desarrollo de vórtices que se producen a partir de la sección 3 sobre la margen izquierda en dirección hacia aguas abajo, y que viajaron en la superficie libre del agua. En la zona de separación se identificaron las siguientes características:

- La zona de separación presentó una disminución considerable de la velocidad que se debe por efecto de la expansión y la curvatura del canal, y no directamente por la fricción de pared.
- El perfil de velocidades dentro de la zona de separación es tipo S en la sección 6 y tipo b en la sección 7, y no sigue la ley de distribución logarítmica dentro de la zona de separación (ver por ejemplo, Rodi et al. (2013)).
- Dentro de la zona de separación, se presentó un flujo inverso, en dirección opuesta al movimiento principal del flujo (dirección principal $+X$), el fenómeno del flujo inverso es dinámico y no se mantiene en el tiempo. Sin embargo, al promediar en el tiempo, las magnitudes de la velocidad dentro de la zona de separación tienden a ser nulas. El componente \bar{u} tiende a cero, pero por algunos instantes el flujo fue hacia atrás y después hacia adelante, por lo que al promediar en el tiempo la magnitud osciló alrededor de cero, por su parte el componente \bar{v} presentó magnitudes negativas, es decir, en dirección hacia la pared opuesta a la dirección del flujo principal o flujo helicoidal, ya que fuera de la zona de separación los componentes de velocidad \bar{v} localizados cerca del fondo se dirigen hacia la margen derecha. El componente \bar{w} presentó estructuras en dirección hacia arriba en la parte superior del perfil y en dirección hacia abajo en la parte baja del perfil de velocidades, dentro de la zona de separación.
- En la zona de contacto o capa de corte, entre el flujo principal y la zona de separación, se presentó un incremento de la energía cinética de la turbulencia al igual que la intensidad de la turbulencia, debido a la interacción entre el flujo principal y la zona de separación, y al gradiente de velocidades pronunciado que se desarrolla en la zona, esta dinámica del flujo resulta compleja de aproximar por los modelos numéricos del tipo RANS.
- En cuanto a los esfuerzos de Reynolds, los esfuerzos principales presentaron un aumento en la capa de corte (zona de contacto); el componente \bar{u} predominó sobre los otros dos. Con respecto a los esfuerzos tangenciales; se identificó que el esfuerzo tangencial $\overline{u'v'}$ aumentó de la zona de contacto hacia la zona de separación, este esfuerzo presentó un incremento en magnitud con formas de medio círculo, y se observó que al centro de esta zona la magnitud disminuyó; para el esfuerzo tangencial $\overline{u'w'}$, se identificaron cuatro regiones, dos con una magnitud positiva y dos con magnitud negativa, y que se localizaron en lados opuestos a la zona de contacto; dentro de la zona de separación, la positiva se localiza en parte inferior del perfil, mientras que la de magnitud negativa en la parte superior, esto se invierte fuera de la zona de separación. Por su parte, el esfuerzo tangencial $\overline{v'w'}$ se identificaron dos comportamientos dentro de la zona de separación, uno con signo positivo en la parte baja del perfil, mientras que en la parte superior el signo es negativo. Estos esfuerzos tangenciales muestran los mecanismos de giro o vorticidad en la zona de separación y de contacto, y tienen una implicación importante en el comportamiento del flujo principal (helicoidal) ya que, este comportamiento es el mecanismo que desvió el flujo principal localizado cerca del fondo, que fue de la

margen izquierda a la margen derecha, por otro lado, el flujo principal localizado cerca de la superficie libre presentó un movimiento hacia la margen izquierda, por efecto de la geometría de la curva y no presentó un gradiente de desviación como en el fondo.

- El desarrollo de la zona de separación tiene una implicación importante, ya que su presencia reduce el área efectiva del flujo principal, lo que generó un aumento de velocidad sesgado y la presencia de un núcleo de velocidad máxima, lo que modificó la distribución de velocidades. Esto debe ser considerado en análisis numéricos de flujos, ya que se puede caer en errores de aproximación de la distribución de velocidades y calcular distribuciones más uniformes a lo ancho de la sección, en lugar de distribuciones sesgadas.
- La información analizada permitió observar el gradiente de velocidad que se presentó en la vertical y que va desde el fondo del canal hacia la superficie libre, en donde el espesor de la capa límite es menor a 1 mm, esto muestra que la zona de separación lateral que se desarrolló cerca de la margen izquierda aguas abajo de la sección 3, no se debe al efecto de la fricción en la pared. En la zona de separación, los gradientes de velocidad son mayores con respecto al observado en el fondo, así como las dimensiones espaciales en las que se desarrolla, ya que abarca un mayor volumen con respecto a los efectos por fricción desarrollados en el fondo. El desarrollo de la zona de separación se debe principalmente a la expansión lateral y la inercia del flujo, y no a la fricción entre el flujo y la pared lateral.
- Se determinó que las características de la turbulencia como la intensidad, la energía cinética y los esfuerzos de Reynolds presentaron discontinuidades en la zona de transición entre el flujo principal y la zona de separación, inclusive dentro de la zona de separación las discontinuidades se presentaron en la profundidad, esto se debe a que el flujo dentro de la zona de separación es turbulento, estas discontinuidades dentro de las superficies mostradas se deben a que las todas las mediciones no se desarrollaron en sincronía de tiempos, estas limitaciones muestran la complejidad en la dinámica del fluido que se presentó dentro de la zona de separación. En un análisis más completo se puede considerar: (1) aumentar los equipos de medición y medir en sincronía de tiempos, sin embargo, la zona de separación se puede ver afectada por los equipos de medición. A pesar de estas limitaciones, los resultados muestran una tendencia considerando la turbulencia estacionaria, lo que permitió tener una comprensión un poco más clara de este fenómeno y se proporciona información experimental para validar modelos numéricos, sin embargo, se debe tener presente la complejidad de aproximar la dinámica del flujo numéricamente.

Socavación en la descarga de un canal curvo

4.1. Introducción

En los cauces bajo ciertas condiciones se producen aceleraciones convectivas en el flujo que producen un cambio en la capacidad de transporte de sedimentos; esto conduce a un desequilibrio entre el transporte de sedimentos promedio, y la capacidad de transporte, que es alterada por la aceleración convectiva. Es así como se debe alcanzar un nuevo equilibrio del fondo que se adapta a las condiciones hidráulicas, que son ajustadas por la capacidad de transporte, y por lo tanto, por la nueva configuración de fondo o por la socavación (Hoffmans y Verheij, 1997, p. 25). El fenómeno de socavación en cauces es un problema complejo de la hidráulica fluvial, y se presenta alrededor de estructuras y obras hidráulicas, pero también en curvas o meandros (Garde y Ranga, 2015, p. 457, 501). La estimación de la magnitud de la socavación es importante desde la perspectiva ingenieril debido a que una subestimación puede conducir a fallas estructurales de obras hidráulicas, y una sobre estimación tiene un efecto adverso en los costos (Sousa y Ribeiro, 2021). En muchos casos la deducción de ecuaciones para el cálculo de transporte de sedimento de fondo se realizó a partir de datos obtenidos en canales rectos de laboratorio Vanoni y Brooks (1957), y la mayoría están limitadas en la representación de fenómenos más complejos, tales como flujos secundarios, pendientes transversales del fondo, zonas de separación, efectos de turbulencia, etc. Como alternativas, por ejemplo, (Hoffmans y Verheij, 1997, p. 29) indican que cuando no existen fórmulas específicas para las condiciones que se están analizando, es recomendable utilizar modelación física (MF) a escala, en donde se aplican leyes de similitud; sin embargo, resulta complicado tratar de reproducir ciertas características inherentes a la física del flujo y las propiedades de los sedimentos de forma simultánea.

La socavación se clasifica en local y general, (Hoffmans y Verheij, 1997, p. 26). La socavación local se debe a la interacción entre el flujo y estructuras hidráulicas individuales, por ejemplo, en las inmediaciones de estribos, pilas de puentes, o también aguas abajo de canales que descargan a un río. En este último caso, la socavación ocurre por una redistribución del campo de velocidades que lo concentra en una zona reducida, en donde las características de la turbulencia son más complejas. Por otro lado, la socavación general es más lenta que la local, esto se debe a la degradación general del fondo del cauce y existen diferentes causas. En algunos casos, se presenta por una reducción en la sección del cauce, que produce un incremento de la velocidad; también se desarrolla en curvas debido a la

redistribución del flujo y el transporte de sedimentos o en las confluencias de los cauces. La magnitud de la socavación aguas abajo de una estructura depende de las características de la estructura, así como de las condiciones hidrodinámicas, y de las características físicas del sedimento en la zona (Hoffmans y Verheij, 1997). En las estimaciones de la socavación, el parámetro más relevante es la socavación máxima; sin embargo, Bombardelli et al. (2018) destacan la importancia de considerar la evolución temporal de la socavación, e identifican una fase a la que denominan de desarrollo, y otra, que denominan fase desarrollada (Bombardelli et al., 2018; Luque, 1980).

En el último siglo, se han propuesto diversas fórmulas empíricas para estimar la profundidad de equilibrio de la socavación; la mayoría de estas fórmulas han sido obtenidas con base en análisis dimensional, con un enfoque heurístico. Las fórmulas pueden contener múltiples exponentes que se han determinado a través de ajustes a partir de datos experimentales (Bombardelli et al., 2018). Los métodos se catalogan de acuerdo con las condiciones de transporte de sedimentos, por un lado, se trata de condiciones de agua clara, cuando no hay transporte aguas arriba, y la profundidad de la fosa ocasionada por la socavación se alcanza asintóticamente en el tiempo. Por otro lado, cuando hay transporte de sedimento aguas arriba se denomina condiciones de fondo activo; en este caso la profundidad de la fosa se alcanza más rápidamente y después de un tiempo oscilará alrededor de un valor medio (Hoffmans y Verheij, 1997, p. 31-32). Un factor clave empleado para calcular la socavación local es la relación $\frac{U}{UT_C}$, en donde U (m/s) es la velocidad promediada en profundidad justo aguas arriba de la estructura, y UT_C (m/s) es el valor de U correspondiente a la condición de umbral para el inicio del movimiento del material de fondo. Actualmente, el cálculo de la socavación máxima a través de fórmulas todavía tiene incertidumbre cuando se compara con la socavación real, por ejemplo, Zhao et al. (2019) presentan una serie de comparaciones entre datos medidos y los resultados calculados para el caso de socavación por un chorro, con fórmulas propuestas en la literatura, en este trabajo se observa una gran dispersión de la información. Franzetti et al. (2022) propusieron una fórmula para calcular la socavación producida por pilas circulares para condiciones de agua clara, con un error inferior al 25 %.

Los modelos numéricos de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD, por sus siglas en inglés) de socavación local están ganando popularidad en el campo de la ingeniería, y son una herramienta prometedora (Ettema et al., 2017). Un modelo numérico de socavación requiere de tres componentes principales: un solucionador del flujo turbulento, un solucionador del transporte de sedimento, y un modelo morfodinámico para la evolución del fondo (Lai et al., 2022). Los modelos LES (Large Eddy Simulation, por su siglas en inglés) pueden calcular las estructuras de flujo mejor que los modelos RANS (Reynolds Average Navier-Stokes, por sus siglas en inglés), sin embargo, el cálculo de socavación con modelos LES es muy cara desde la perspectiva computacional para calcular un proceso de socavación completo, por ello los modelos RANS, que requieren menor capacidad computacional son más utilizados, y actualmente se acepta que los modelos tipo RANS sean la opción en el futuro cercano (Lai et al., 2022). En esta dirección se encuentra, por ejemplo, el trabajo de Castillo et al. (2016), que utilizan un modelo físico y uno numérico para determinar la socavación por la descarga de un salto. Sin embargo, es necesario identificar las capacidades de los modelos RANS y caracterizar su exactitud para dimensionar la socavación.

4.2. Preguntas de investigación

En el contexto del uso de un modelo numérico morfo-hidráulico de superficie libre 2D (NM-2DH) para calcular la socavación máxima, las preguntas de investigación son: (1) ¿Cuál es la capacidad de un modelo morfo-hidráulico 2DH para reproducir procesos hidrodinámicos, de socavación local y evolución del fondo, para las condiciones de laboratorio presentadas aquí? (2) ¿Cuál es la precisión al calcular la socavación máxima con ecuaciones empíricas frente a mediciones experimentales? (3) ¿Cuál es la precisión del modelo numérico para estimar la dinámica temporal de la evolución del fondo en el punto de máxima socavación local? y (4) ¿Cuáles son las diferencias del campo de flujo promediado en profundidad calculado con un modelo 3D con respecto al cálculo del modelo de superficie libre 2DH?

4.3. Metodología

Para responder las preguntas planteadas, se emplearon dos técnicas, la modelación física, y el uso de un modelo numérico. La primera permite tener mediciones para caracterizar la socavación, se midió la profundidad del agua, las velocidades y la evolución del fondo. Las mediciones se realizaron por un periodo de tiempo suficiente para determinar los valores medios. La segunda técnica, resuelve las ecuaciones de gobierno del flujo, transporte de sedimento, y evolución del fondo con esquemas numéricos, y se basó en la información obtenida en el modelo físico. Se utilizó un modelo numérico 2DH para resolver el flujo y la socavación y un modelo numérico tridimensional para caracterizar las estructuras de flujo.

4.4. Modelo Físico

El Prototipo de la Estructura Hidráulica de Control El Macayo, se localiza en el río Carrizal, en Tabasco, México (Figura 4.1a-e). Tiene como finalidad regular la distribución de caudales en la bifurcación del río Mezcalapa. Las pruebas experimentales se realizaron con un modelo físico a escala reducida de esta estructura, en el Instituto de Ingeniería de la UNAM (Figura 4.1f-i).

La estructura está integrada por una cortina y dos canales de descarga en ambas márgenes, el Canal de la Margen Izquierda (CMI), y el Canal de la Margen Derecha (CMD). En cada canal se tiene un conjunto de compuertas radiales, que están apoyadas por pilas. El modelo físico se construyó a una escala de 1:60. El caudal de diseño de la estructura es de $850 \text{ m}^3/\text{s}$; basado en el principio de similitud de Froude, el caudal en el modelo físico corresponde a 30.48 l/s . Los canales son de concreto, y aguas arriba y aguas abajo se tiene una capa de 20 cm de arena fina, que tiene un $D_{50} = 0.2664 \text{ mm}$ (indicada en la curva de granulométrica, Figura 4.2) y una densidad (ρ_s) de 2723.75 kg/m^3 .

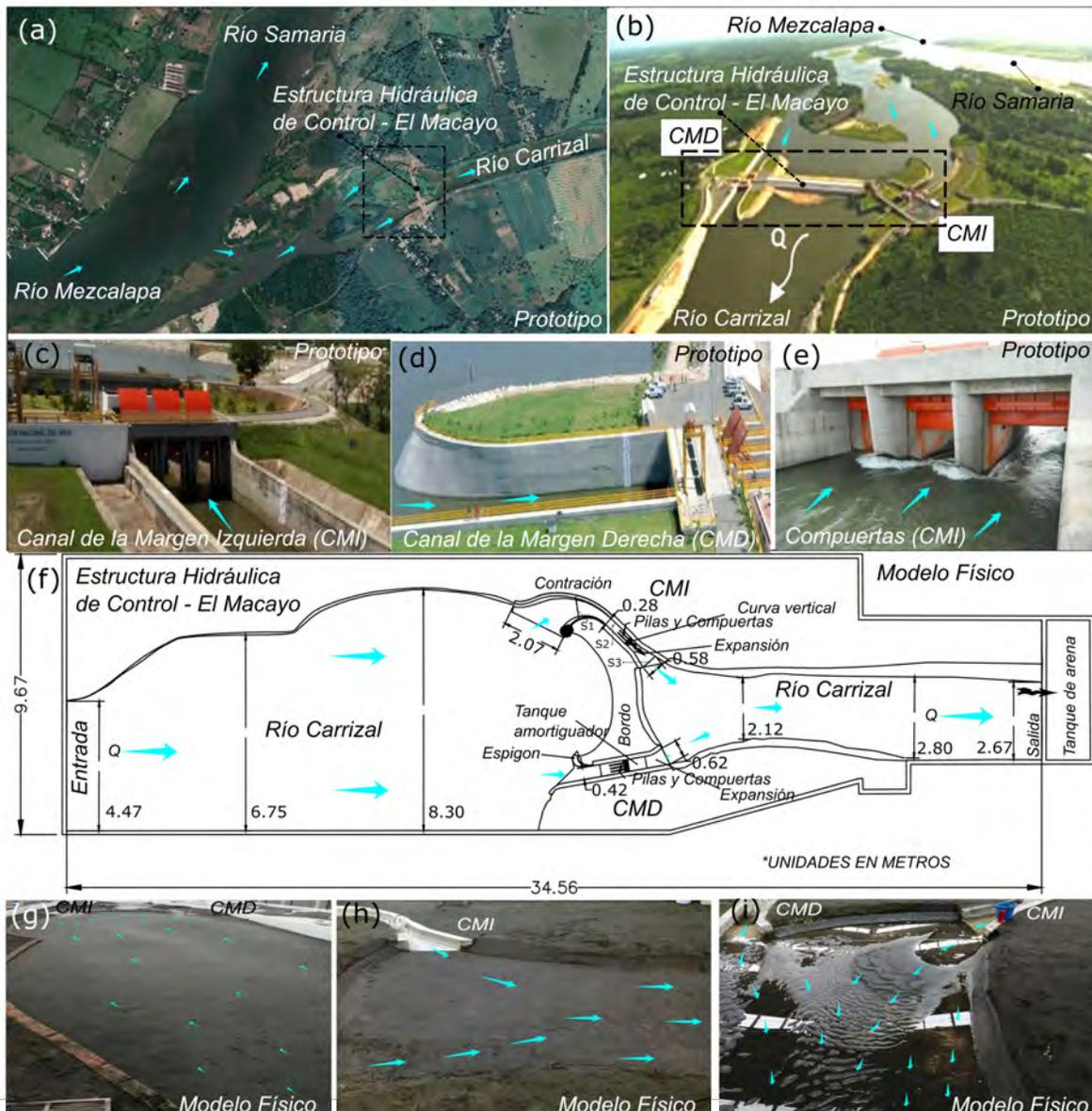


Figura 4.1. Prototipo y Modelo Físico (MF) experimental de la Estructura Hidráulica de Control El Macayo (EHCEM). a) Localización EHCEM, b) vista aérea de la EHCEM, c) canal de la margen izquierda (CMI) y compuertas, d) canal de la margen derecha (CMD), e) compuertas del CMI vista aguas arriba hacia aguas abajo, f) geometría del MF experimental, en g) y h) MF con fondo horizontal, i) MF con fondo desarrollado y Socavación Máxima aguas abajo del CMI. Figuras b, c, d, y e tomadas de Jiménez (2017), con autorización del autor.

Se utilizó el método estándar (ASTM, 2006) para determinar el análisis de distribución del tamaño de partícula del sedimento utilizado en los experimentos. La uniformidad de las partículas de arena fina se determinó a partir de la curva de clasificación después de calcular la desviación estándar geométrica (σ_g) con la ecuación $\sigma_g = (d_{84}/d_{16})^{0.5}$ (Hamdan et al., 2022). Los diámetros son $d_{16} = 0.144$ mm y $d_{84} = 0.428$ mm, y $\sigma_g = 1.72$. Por lo tanto, la arena presentó falta de uniformidad de las partículas.

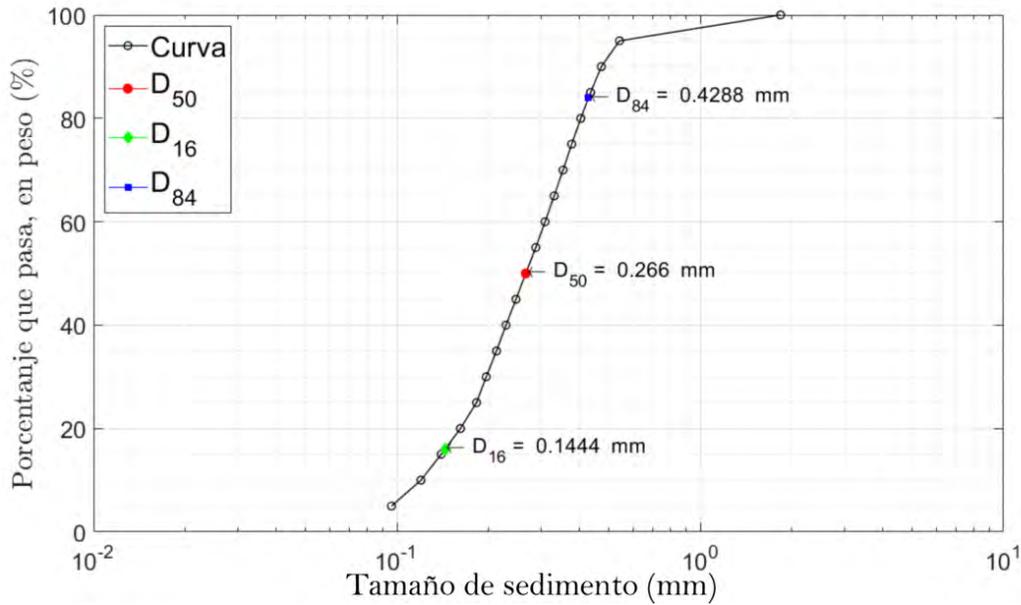


Figura 4.2. Distribución del tamaño de grano del sedimento del fondo utilizado en el modelo físico.

4.4.1. Mediciones de la velocidad

Las mediciones de los tres componentes de velocidad se obtuvieron con un Perfilador de Velocimetría Acústico del tipo Doppler, Vectrino-II, descrito en la Sección 3. Se establecieron tres secciones de medición en el CMI, la primera se localizó a la entrada del canal, la segunda poco antes de las pilas y la tercera a la salida, en donde termina la expansión. Además, en la Figura 4.3a), se indica la localización del punto de socavación máxima determinado experimentalmente. Se midieron 12 perfiles de velocidad en la sección 1 (S1), cinco perfiles en la sección 2 (S2), y 10 perfiles en la sección 3 (S3).

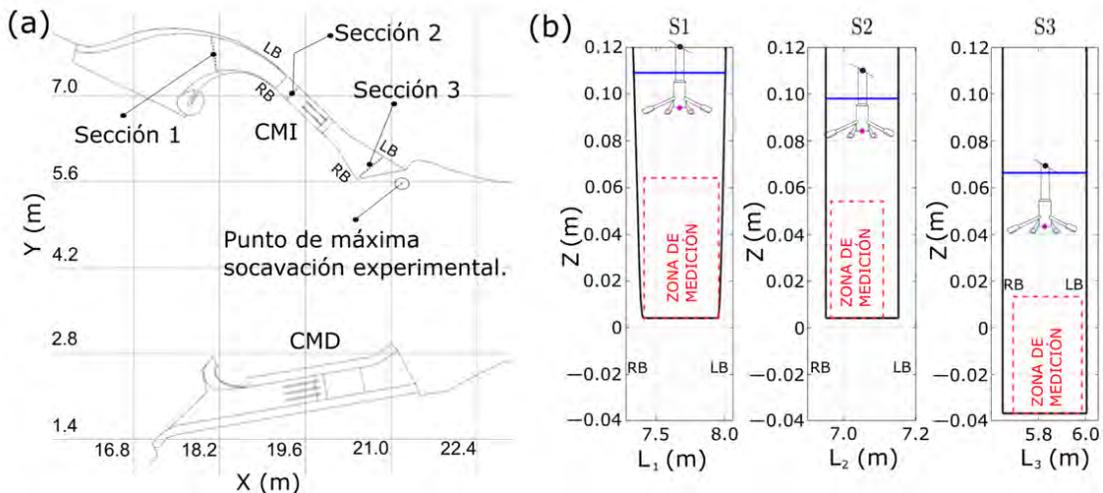


Figura 4.3. a) Secciones y zona de medición de velocidades en el CMI (S1, S2, S3) y zona de socavación máxima (SM), b) zona de medición de velocidades dentro de secciones y niveles de agua.

En la Figura 4.3a), se indica la localización de los puntos de medición en las tres secciones. El Vectrino–II se colocó en un soporte a lo largo de cada una de las tres secciones de medición, *perpendicular a la dirección del flujo principal*, y se desplazó verticalmente para obtener dos perfiles a partir del fondo, y determinar el campo de velocidades. En la Figura 4.3b) se indican las zonas de medición (recuadro en línea punteada color rojo), así como la profundidad del agua (línea en color azul) para cada sección (S1, S2, S3). La profundidad del agua fue de 0.109 m, 0.098 m, y 0.103 m, para la S1, S2, y S3, respectivamente. El muestreo en cada punto se realizó con un tiempo de registro de 180 segundos, con una frecuencia de medición de 100 Hz. Se utilizaron las velocidades medidas en el plano localizado a $0.4h$, en donde h es la profundidad, para calibrar el modelo numérico 2DH. Una descripción detallada de la operación del equipo de medición se encuentra en Nortek (2022).

Adicionalmente, se realizaron las mediciones de la velocidad y de la elevación del fondo en la zona en donde se desarrolló la socavación máxima (SM) aguas abajo del CMI. Para esto, se realizó una prueba experimental previa que permitió identificar la zona de máxima socavación. En este sitio se colocó el Vectrino–II a una elevación de 7 cm sobre el fondo, para medir el perfil de velocidades con el fondo inicial (horizontal), antes de desarrollar la socavación. El objetivo fue obtener la distribución de velocidades en los primeros 3 cm sobre el fondo original, con una precisión a cada milímetro, con un total de 30 puntos de medición en la vertical. El equipo se orientó en la dirección principal del flujo, y se configuró para una medición de 18 registros (1R a 18R) con una frecuencia de medición de 10 Hz para la velocidad, y 2.5 Hz para el medir la posición del fondo, con una duración de 15 min cada uno, para obtener un registro continuo durante el tiempo que duró la prueba (4.5 horas).

4.5. Modelo Numérico

Se realizó el análisis numérico con las ecuaciones de Saint - Venant para la caracterización del flujo, el sistema de ecuaciones se resolvió con el sistema de modelación Telemac-Mascaret (EDF-R&Da., 2020). La ecuación de momentum se define a continuación:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \vec{u} \cdot \vec{\nabla}(h) + h \vec{\nabla} \cdot (\vec{u}) = S_h \quad (4.1)$$

Las ecuaciones de Saint - Venant a lo largo del eje X y del eje Y, se expresan como:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \vec{u} \cdot \vec{\nabla}(u) = \frac{1}{h} C_f u |\vec{u}| - g \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{1}{h} \vec{\nabla} \cdot (h \nu_t \vec{\nabla} u) \quad (4.2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \vec{v} \cdot \vec{\nabla}(v) = \frac{1}{h} C_f v |\vec{u}| - g \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{1}{h} \vec{\nabla} \cdot (h \nu_t \vec{\nabla} v) \quad (4.3)$$

donde h es la profundidad del agua, en m; S_h es la fuente o sumidero de fluido, en m/s; $\vec{u} = u \vec{i} + v \vec{j}$ es el vector velocidad con componentes horizontales u y v , en las direcciones X e Y, respectivamente, en m/s; η es la elevación de la superficie libre de agua, en m; C_f coeficiente de fricción; t el tiempo, en s; ν_t coeficiente de viscosidad turbulenta, en m^2/s .

El transporte de sedimentos y la morfología de fondo se resolvió con el módulo Sisyphé, mediante las ecuaciones de conservación de masa para sedimento o ecuación de Exner, una descripción se puede encontrar en (García, 2008, p. 69-70). En Telemac el módulo de sisyphé

se acopla con el módulo hidrodinámico (EDF-R&Db., 2020, p. 17). La ecuación de Exner se expresa:

$$(1 - \lambda) \frac{\partial Z_b}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{Q}_b + (E - D)_{z=a} = 0 \quad (4.4)$$

En donde $\vec{Q}_b = Q_{bx} \vec{i} + Q_{by} \vec{j}$ es el vector de la tasa de transporte volumétrico unitario sin poros, en m^2/s ; λ la porosidad del material del fondo, adimensional ($\lambda = 0.4$); Z_b es la elevación del fondo, en m; E y D las tasas de erosión y depósito a la elevación $z = a$, correspondiente a la interfase entre la carga de fondo y la carga suspendida.

La carga de fondo se calcula como una función de capacidad de transporte de sedimento, y al ser un vector, se puede descomponer, esto es (EDF-R&Db., 2020, p. 17):

$$\vec{Q}_b = (Q_{bx}, Q_{by}) = (Q_b \cos \alpha, Q_b \sin \alpha) \quad (4.5)$$

el ángulo α entre la dirección de la carga de fondo y la dirección del flujo es definido por la pendiente del fondo y la presencia de corrientes secundarias. El módulo de Sisyphé ha sido validado y calibrado (Huybrechts et al., 2010; Cao et al., 2002). Por otro lado, el transporte de sedimento adimensional se expresa mediante (EDF-R&Db., 2020, p. 17):

$$\Phi_b = \frac{Q_b}{\sqrt{g(S-1)d^3}} \quad (4.6)$$

donde, S es la densidad relativa, $S = \rho_s/\rho$, adimensional; ρ_s es la densidad del sedimento, en kg/m^3 ; ρ es la densidad del agua, en kg/m^3 ; d el diámetro característico de grano de sedimento para arenas, en m; y g , la aceleración de la gravedad, en m/s^2 . Se calculó Φ_b con la ecuación de Meyer-Peter & Müller como primera aproximación, y la carga de fondo se calibró a partir de la socavación medida en los experimentos del modelo físico a través del Factor Morfológico (FM), que se explica en la siguiente sección.

La concentración de transporte en suspensión se calcula usando la ecuación de advección-difusión (EDF-R&Db., 2020, p. 29).

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U \frac{\partial C}{\partial x} + V \frac{\partial C}{\partial y} = \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_s \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon_s \frac{\partial C}{\partial y} \right) \right] + \frac{(E - D)_{z=a}}{h} \quad (4.7)$$

En donde C es la concentración volumétrica de sedimento en suspensión promediado en la vertical, ε_s el coeficiente de difusión para sedimentos, U y V las velocidades del flujo promediadas en la profundidad en las direcciones X y Y , respectivamente, y h la profundidad del agua. El cálculo de la Erosión (E) está determinada por la concentración de equilibrio (C_{eq}) cerca del fondo determinada por una fórmula empírica, en esta sección se utilizó la ecuación de Zyserman y Fredsoe (EDF-R&Db., 2020, p. 30). Para el depósito de material, éste es afectado por la concentración de referencia ($C_{z=a}$) localizada a una elevación a , y se evaluó entre la interfaz de la carga de fondo y la carga suspendida, y depende de la velocidad de caída del sedimento y las condiciones aguas arriba del sedimento suspendido dada por la Ecuación 4.7. Por lo tanto, la tasa neta de flujo de sedimento es determinado con base en el concepto de concentración en equilibrio; en donde la tasa de deposición de sedimentos es igual a la tasa de arrastre de sedimentos del fondo.

El análisis numérico (MN-2DH) se realizó mediante dos procesos, el primero con la malla general conformada por 431,701 elementos, ver la Figura 4.4(a); y el segundo, con la malla reducida conformada por 54,542 elementos, ver la Figura 4.4(b). En el primer análisis, con la geometría general del modelo, se establecieron las condiciones de frontera para el cálculo de la hidrodinámica: (1) el caudal de entrada y (2) el nivel de agua a la salida del modelo físico aguas abajo, y se determinaron los caudales que circulan por cada uno de los canales; después, se desarrolló el proceso de calibración del cálculo de la hidrodinámica que se analiza más adelante; para un tiempo de cómputo de modelación de la hidrodinámica de 15 minutos fue necesario un tiempo de proceso de 8.3 horas, con un $\Delta t = 0.001s$, en un clúster con 60 núcleos de procesamiento AMD [®], distribución CentOS, versión 6.9, arquitectura de 64 bits. Posteriormente, con el objetivo de reducir tiempos de proceso de cálculo del análisis numérico de la socavación y el análisis 3D, se utilizó la malla reducida, se establecieron las condiciones de frontera para cada uno de los canales y un nivel aguas abajo (datos obtenidos del primer análisis), así como las condiciones del transporte de sedimento en equilibrio. Debido a que los canales son de concreto, se utilizó la subrutina NOEROD de Sisyphé para evitar la erosión en ellos. Las mallas de cálculo contienen la geometría y las elevaciones asociadas al modelo físico experimental. Se estableció como condición inicial un caudal $Q = 30.48 \text{ l/s}$ a la entrada del modelo ($Q_{CMD} = 0.54Q$; $Q_{CMI} = 0.46Q$, información obtenida del primer análisis) y un nivel del agua a la salida correspondiente a $h = 0.1025 \text{ m}$, un coeficiente de rugosidad de Manning de $0.018s/m^{1/3}$ para los canales de concreto (CMI y CMD) y en el resto del modelo se determinó una n de $0.028 s/m^{1/3}$ para la arena, que se describe más adelante, aunque una discusión detallada para determinar la rugosidad en fondos erosionables se encuentra, en Garcia (2008), p. 99-102. El tiempo de proceso con la malla reducida fue de 5.4 horas.

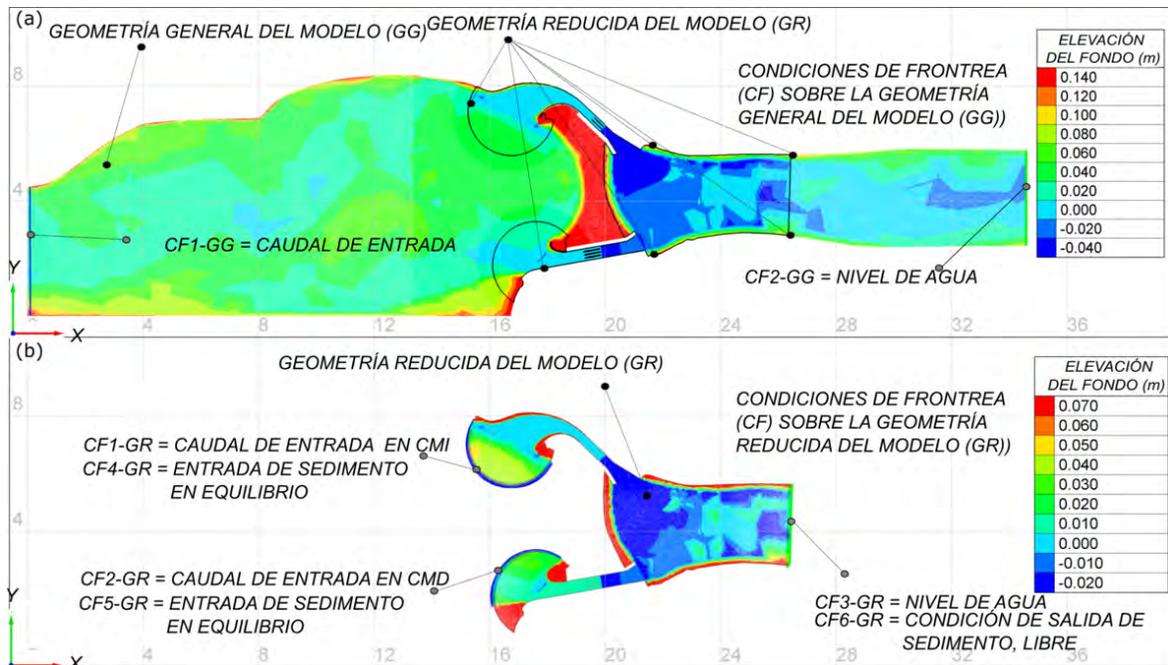


Figura 4.4. Mallas de cálculo utilizadas para el análisis numérico y condiciones de frontera; a) malla general con elementos triangulares que van de 5 cm a 0.5 cm, en b) malla reducida con elementos triangulares que van de 4 cm a 0.5 cm.

El análisis 3D es una continuación de los resultados del análisis de la MN-2DH, en donde se calibró la hidrodinámica (primer proceso) y se calculó la socavación máxima (segundo

proceso). Se determinó una altura de rugosidad hidráulica equivalente de $ks = 0.003$ m en los canales de concreto. El tiempo de cómputo para simular 89 segundos del flujo fue de 5 días, con un $\Delta t = 5 \times 10^{-5}$ s, utilizando las mismas características del clúster con 60 núcleos de procesamiento, y una malla tridimensional con ocho planos en la vertical.

4.6. Resultados

4.6.1. Medición del campo de velocidades

En la Figura 4.5 se presentan las distribuciones de los vectores de velocidad medidos y calculados en las secciones S1, S2 y S3 (los vectores medidos corresponden a la elevación de $Z_m = 0.4y$). Los vectores de velocidad calculados fueron obtenidos con el modelo Telemac-2D. Las magnitudes de la velocidad media en dirección del flujo (U) son: 0.236, 0.548, y 0.219 m/s, para la S1, S2, y S3, respectivamente. La magnitud de velocidad U aumentó en un factor de 2.3 para la S2, y disminuyó ligeramente para la S3, de 0.93, con respecto a la velocidad medida en la S1. Es importante resaltar que en la sección 3 se desarrolló una zona de separación cerca de la margen derecha a la salida del canal (ovalo color gris, Figura 4.5), y aguas abajo de la presa se desarrolló una zona de recirculación como se presentará más adelante. En la Figura 4.5 también se indica el punto en color rojo en donde se desarrolló la socavación máxima en el modelo físico.

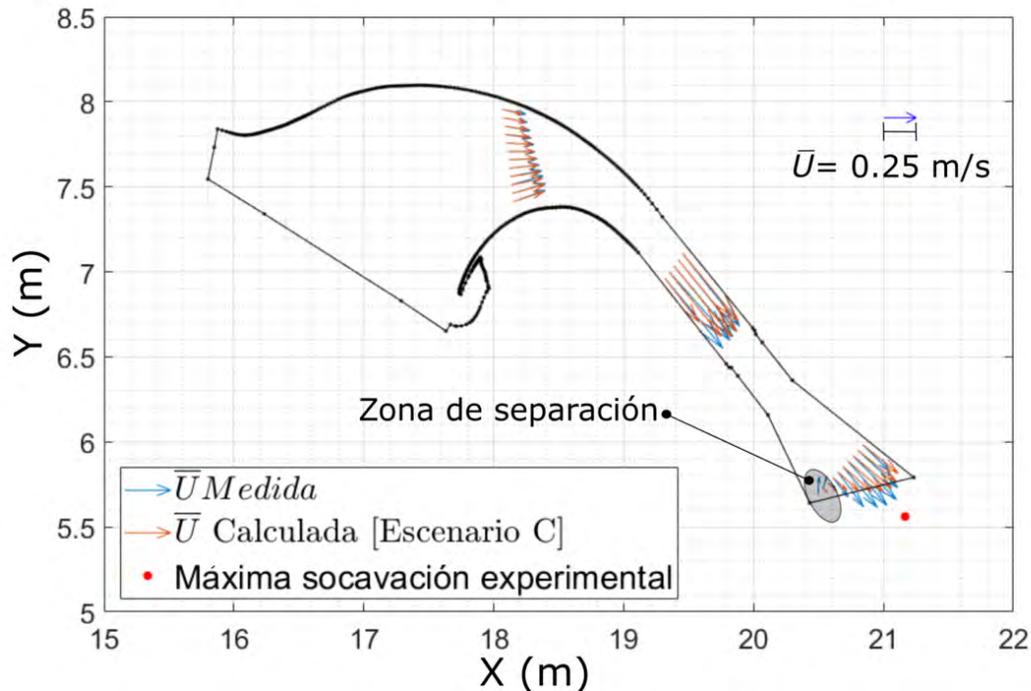


Figura 4.5. Vectores de velocidad (U) en m/s, medidos en el CMI (azul) y calculados (naranja), en secciones 1, 2 y 3, y punto de SM.

4.6.2. Calibración del modelo numérico

Se realizó el cálculo del flujo con el modelo numérico 2DH, utilizando la malla general indicada en la Figura 4.4(a) en donde se indican las condiciones de frontera utilizadas; por un lado, se definió el caudal a la entrada, y el nivel de la superficie libre del agua a la salida. En el CMI, se identificó el desarrollo de flujos secundarios generados principalmente por la curvatura del canal, por lo que se consideró la corrección de este fenómeno en el modelo numérico de flujo bidimensional (MN-2DH). Telemac-2D utiliza la corrección propuesta por Finnie et al. (1996). También, es importante resaltar que la energía cinética de la turbulencia (k) es del doble para la S2 y de 191 veces mayor para la S3, ambas comparadas con la S1, esto se determinó a partir de los registros de medición. La aproximación de los componentes de la velocidad mejoró al ajustar el coeficiente de Manning y el factor de producción de flujo secundario, como se muestra en la Figura 4.6.

En la Figura 4.6(a-c), se presenta la comparación de los componentes de velocidad (2DH) medidos contra los calculados en las tres secciones en donde se realizaron las mediciones (S1, S2 y S3). En el caso de los valores calculados se muestran los resultados del modelo en el que no se consideró la Corrección de Flujo Secundario (CFS), y el de dos modelos con corrección de flujo secundario (CFS). En las Figura 4.6(a) a la Figura 4.6(c), en color azul se indican los componentes \bar{u} y \bar{v} , calculados sin considerar la Corrección de Flujo Secundario (sin CFS), en color verde se indican los componentes calculados cuando se usa la CFS con un coeficiente de flujo helicoidal, $\alpha=14$ (por un factor de 2 del valor recomendado, (EDF-R&Da., 2020, p. 72)), y en color rojo se indican los componentes calculados considerando la CFS con un $\alpha=3.5$; Estos resultados son identificados en la Figura 4.6 como escenarios A, B y C.

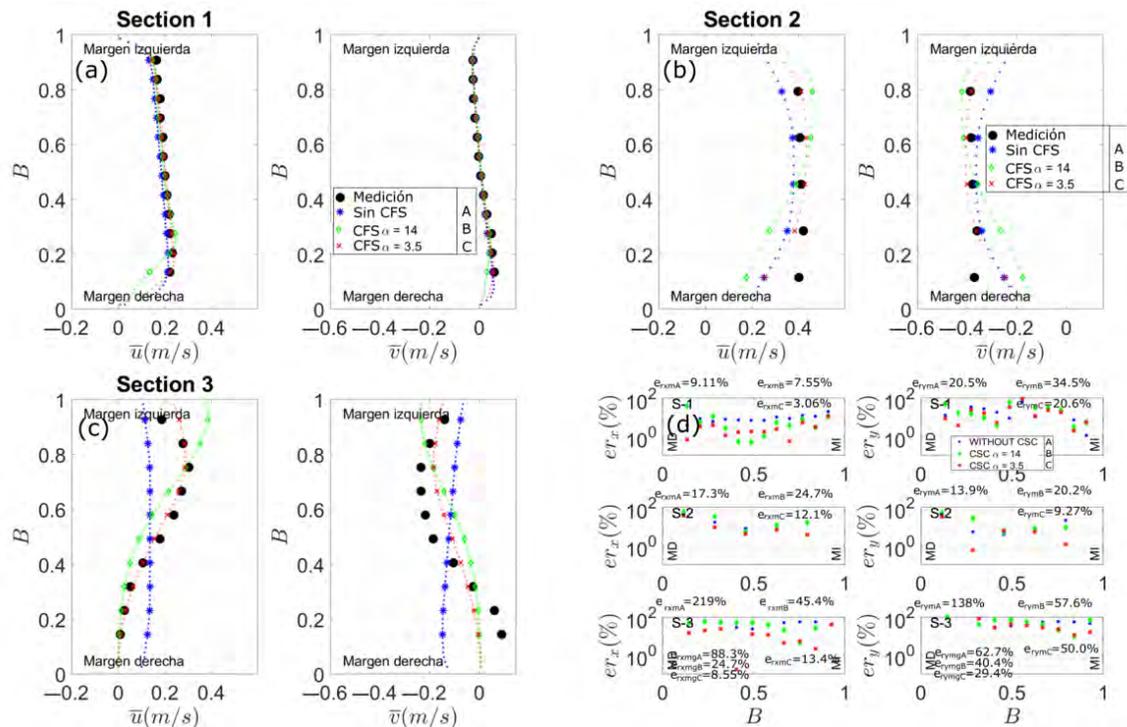


Figura 4.6. Distribuciones de velocidad, medidas y calculadas, a) en S1, b) en S2, c) en S3, y d) errores relativos.

Un análisis de resultados detallado permitió identificar si los cálculos numéricos mejoraron utilizando alguno de los escenarios que considera la CFS. Para ello, se analizó el error relativo (e_r) de la velocidad medida con respecto a cada uno de los componentes (\bar{u}, \bar{v}) calculados, mediante la ecuación, $e_{rx} = (\bar{u}_m - \bar{u}_c) / \bar{u}_m$ y $e_{ry} = (\bar{v}_m - \bar{v}_c) / \bar{v}_m$, en donde los subíndices m y c denotan medido y calculado. Después, se obtuvo el error relativo medio por sección (e_{rxm}, e_{rym}), y finalmente uno general (e_{rxmg}, e_{rymg}), representativo a la MN-2DH, estos errores relativos se presentan en la Figura 4.6(d).

Los errores relativos medios generales (e_{rxmg}, e_{rymg}) en las secciones S1, S2 y S3 para los escenarios A, B y C, se indican en la Tabla 4.1. De forma general el e_r es de 88.3, 24.7 y 8.5% para el componente \bar{u} , mientras que para el componente \bar{v} es de 62.7, 40.4 y 29.4%, para los mismos escenarios. Con respecto a las distribuciones de velocidad, se muestra que los componentes para la S1 son los que presentan los errores más bajos, en la S2 se aprecian ligeras diferencias y que los errores disminuyen para el escenario C, mientras que en la S3, la distribuciones ya presentan diferencias importantes; Por ejemplo, el escenario A, tiene una distribución más uniforme a lo ancho del canal comparada con el escenario B (ver Figura 4.6(c)), el cual se ajusta mejor a las mediciones experimentales, y el escenario C, presentó un mejor ajuste cerca de la margen izquierda para el componente \bar{u} , y mejoró la aproximación del componente \bar{v} .

Tabla 4.1: Errores relativos medios y generales de los escenarios numéricos A, B y C.

| Sección | S1 | | S2 | | S3 | | General | |
|--------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Escenario | \bar{u} (%) | \bar{v} (%) |
| A (sin CFS) | 9.11 | 20.5 | 17.3 | 13.9 | 219 | 138 | 88.3 | 62.76 |
| B ($\alpha=14$) | 7.55 | 30.4 | 24.7 | 20.2 | 45.4 | 57.6 | 24.7 | 40.4 |
| C ($\alpha=3.5$) | 3.06 | 20.6 | 12.1 | 9.27 | 13.4 | 50 | 8.55 | 29.4 |

El cálculo 3D del campo de flujo con la configuración de fondo horizontal (antes de la socavación) se muestra en la Figura 4.7. En la Figura 4.7(a), las zonas de recirculación se identifican con la ayuda de las líneas de corriente, también se identificó la zona de separación dentro del CMI, que es un indicador de que el caudal se concentra hacia la margen izquierda, y se verifica con la distribución de velocidades medida. En la Figura 4.7(b) se muestra la magnitud del campo de velocidad 3D en las secciones transversales S1, S2 y S3, donde se distingue la zona de separación y la reducción de la velocidad cercana a la margen derecha de la S3, así como la presencia de un núcleo de máxima velocidad a la salida del CMI. La Figura 4.7(c) se muestran las líneas de corriente con la magnitud de vorticidad, definida como $\vec{\Omega} = \nabla \times \vec{U}$, donde $\vec{\Omega}$ es el vector de vorticidad (1/s) y \vec{U} el vector de velocidad (m/s). Los resultados numéricos permiten identificar zonas donde se desarrollaron vórtices y recirculación de flujo aguas abajo de la estructura de control; las líneas de mayor vorticidad se encuentran en la zona más angosta del CMI y en la zona de transición del cambio de material (hormigón-arena) donde se desarrolló la socavación máxima.

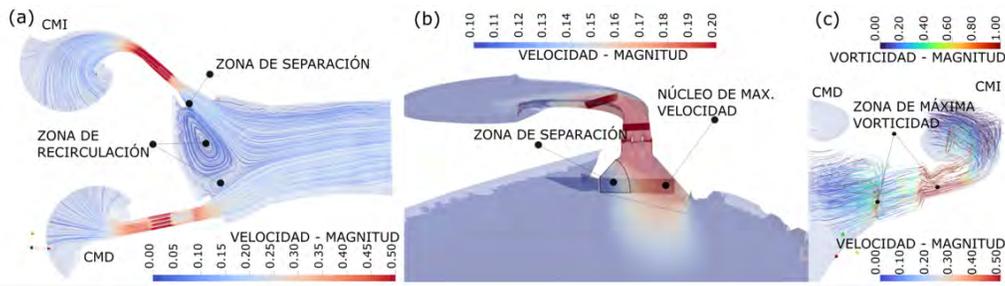


Figura 4.7. Resultados numéricos 3D, a) líneas de corriente, b) campo de magnitud de velocidad 3D y zona de separación, c) líneas de corriente mapeadas con la vorticidad (1/s).

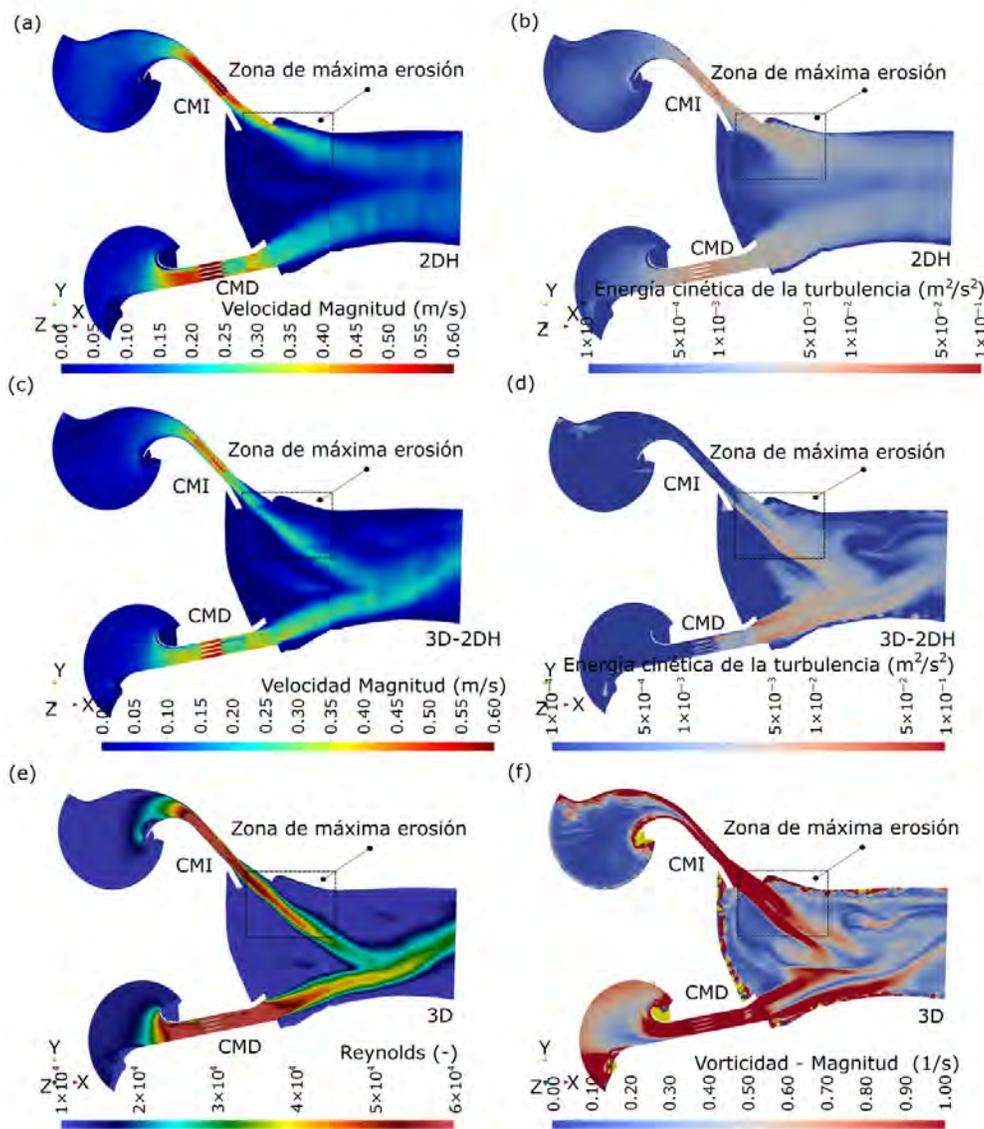


Figura 4.8. Resultados numéricos 2DH y 3D con la configuración de fondo desarrollada después de 4.5 horas, a) Campo de velocidad 2DH (m/s), b) Campo de k 2DH (m^2/s^2), c) Campo de velocidad 3D (m/s), d) Campo de k 3D (m^2/s^2), e) Número de Reynolds (-), f) Campo de vorticidad (1/s)

También se analizó el campo de flujo tridimensional considerando la configuración del fondo desarrollada después de 4.5 horas, socavación máxima, la formación de la duna y las formas de fondo (ondulaciones). En la Figura 4.8(a), se presenta la magnitud del campo de velocidades 2DH. En la Figura 4.8(c) la magnitud de la velocidad promediada en la profundidad calculada a partir del análisis numérico 3D. Se observan dos diferencias, por un lado, el campo de velocidad es más difusivo en la salida, aguas abajo de los canales en los resultados 2DH, y por el otro lado, el flujo en la salida del CMI calculado por el modelo 2DH se desvía hacia la margen izquierda. En la Figura 4.8(b) se muestra el comportamiento de la energía cinética de la turbulencia (k) a partir del análisis 2DH. En la Figura 4.8(d) se presenta la energía cinética de la turbulencia (k) promediada en la vertical, calculada a partir del análisis 3D; se observó su desarrollo desde el inicio de la expansión en el CMI y su magnitud máxima se presentó entre la zona de recirculación y el jet de salida en el CMI. Los resultados 2D son más difusivos. En la Figura 4.8(e) se muestra el Número de Reynolds (Re), y en la Figura 4.8(f) se presenta el campo general de la vorticidad.

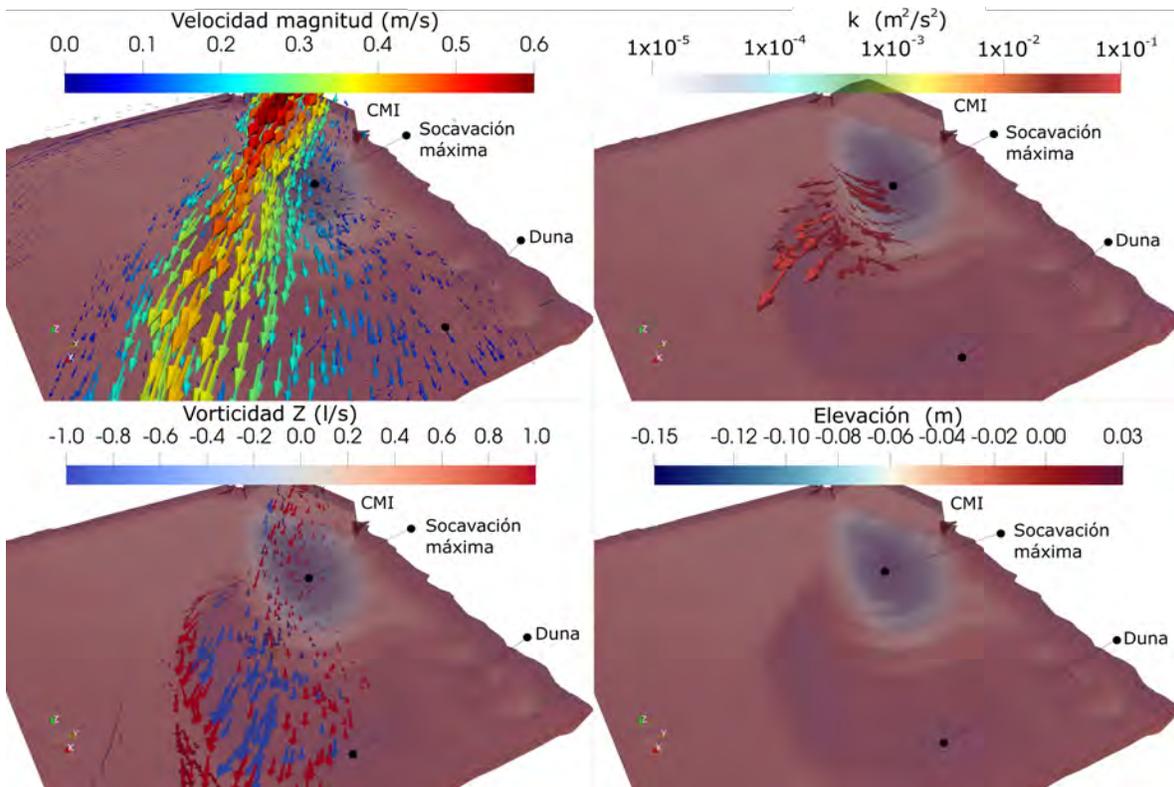


Figura 4.9. Resultados numéricos 3D con la configuración de fondo desarrollada después de 4.5 horas, a) Campo de velocidades (m/s), b) Campo de velocidades mapeado con k (m^2/s^2), c) Campo de vorticidad Z (1/s), y d) elevación y configuración de fondo en zona de máxima socavación (m).

En la Figura 4.9(a) se presentan los vectores del campo de velocidades; se identificó el núcleo de velocidades concentrado en una región en la parte superior; en el fondo el comportamiento es de menor magnitud y se observó una desviación entre la orientación del agujero de socavación y el comportamiento del flujo. En la Figura 4.9(b) se presentan los vectores del campo de velocidades y la energía cinética de la turbulencia (k), localizados muy cercanos al fondo, los vectores indican por lo menos dos zonas de interacción, una dentro del agujero de socavación en dirección hacia el interior y otra sobre la duna en dirección hacia la

parte externa y aguas abajo, estas dos zonas son de alta energía cinética de la turbulencia (k), por otro lado, el componente de la vorticidad Z permite identificar por lo menos dos flujos en el jet de salida del CMI que interactúan entre sí; en la Figura 4.9(d) se presenta la configuración de fondo analizada, en donde se visualiza el agujero de socavación y la duna.

La energía cinética de la turbulencia (k) en la zona de máxima erosión se presenta en la Figura 4.10, en donde se han realizado cortes en la profundidad (eje Z) para observar su comportamiento. En la Figura 4.10(a) se muestra la energía cinética de la turbulencia (k) ($-0.15 \leq Z \leq 0.17$), en la Figura 4.10(b) k que va de $-0.15 \leq Z \leq 0.10$, en la Figura 4.10(c) k que va de $-0.15 \leq Z \leq 0.05$ y en la Figura 4.10(d) k que va de $-0.15 \leq Z \leq 0.025$. La figura permite identificar el desarrollo de k en la expansión dentro del CMI y su comportamiento hacia aguas abajo, la k aumentó entre la zona de recirculación (color azul) y el jet de salida del flujo. También, su magnitud es mayor cercana al fondo y presentó un incremento de magnitud en la zona de la duna.

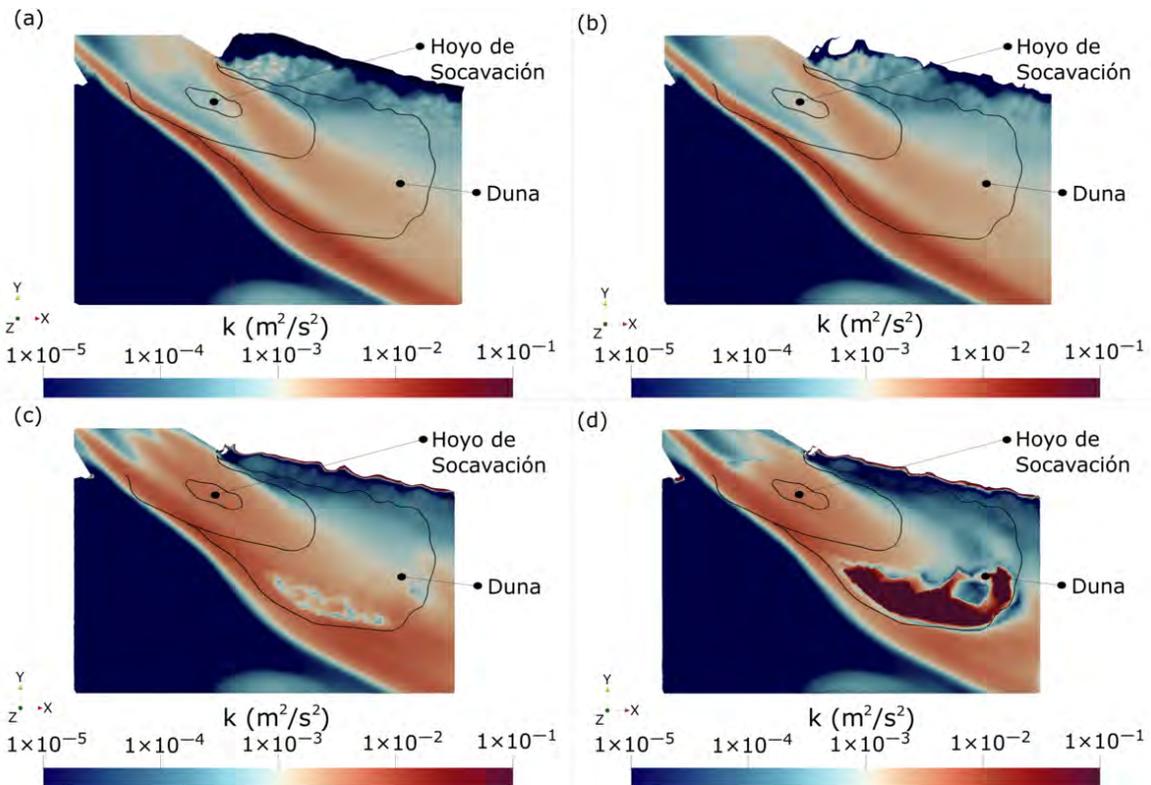


Figura 4.10. Resultados numéricos 3D de la energía cinética de la turbulencia con la configuración de fondo desarrollada después de 4.5 horas, vista XY, a) k (m^2/s^2) en la superficie libre, b) k (m^2/s^2) a una elevación de 0.10 m. c) k (m^2/s^2) a una elevación de 0.05 m. d) k (m^2/s^2) a una elevación de 0.025 m.

4.6.3. Socavación

La configuración inicial (t_0) del fondo aguas abajo de la estructura de control es horizontal, y después de las 4.5 horas ($t_{f=4.5hrs}$) que duró el experimento, se desarrolló una nueva configuración debida al proceso de erosión aguas abajo de la estructura. La configuración final del fondo se midió con una estación total Leica TS07, con una resolución de $0.1''$ de la pantalla y precisión para los ángulos horizontales y verticales (absoluto, continuo y diametral de $1''$, $2''$ y $3''$; sin prisma para medición del fondo y con prisma para los puntos de control (bases). En la Figura 4.11 se presentan los registros de la velocidad media en cinco puntos a diferente elevación, sobre el punto de máxima socavación, los datos puntuales se promediaron cada 15 minutos, determinado a partir de 18 registros continuos de medición (R1 a R18), con la misma duración cada uno (líneas verticales en color gris, Figura 4.11). Los registros se obtuvieron a partir del fondo plano inicial.

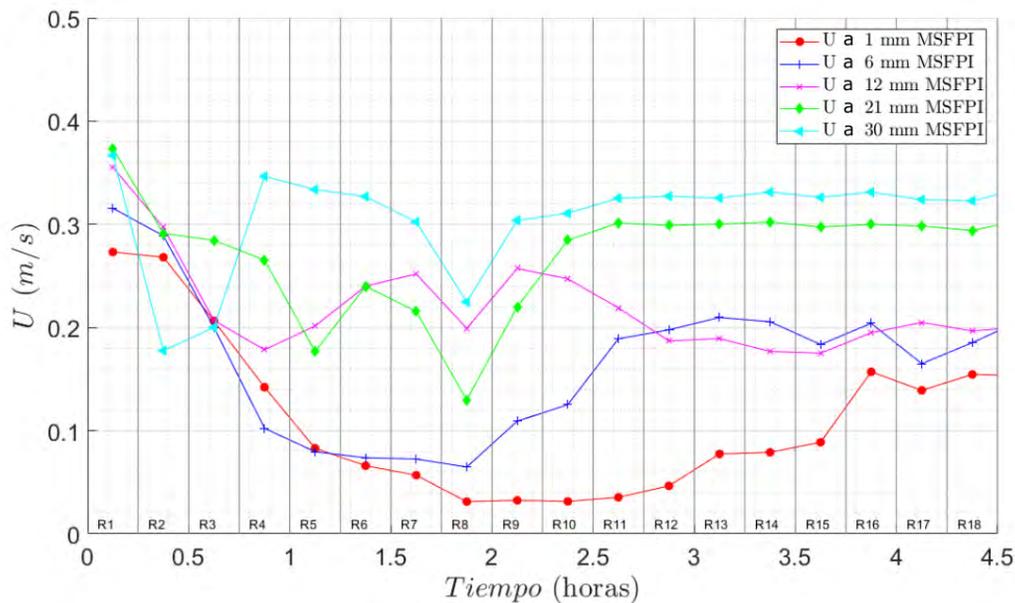


Figura 4.11. Registros de la magnitud de la velocidad (m/s) a distintas elevaciones, sobre el punto de máxima socavación. Medidos Sobre el Fondo Plano Inicial (MSFPI)

En la Figura 4.12 se presentan los registros de la energía cinética de la turbulencia (k) media en cinco puntos a diferente elevación, sobre el punto de máxima socavación, los datos puntuales se promediaron cada 15 minutos, determinado a partir de 18 registros continuos de medición (R1 a R18), con la misma duración cada uno (indicados en la Figura 4.12, con líneas verticales en color gris).

En la Figura 4.13, se muestra la evolución de la máxima socavación aguas abajo de la estructura. El punto se localiza a 59 cm aguas abajo del centro de la S3 (indicado en la Figura 4.5). El muestreo en este punto se realizó durante 4.5 horas, con una frecuencia de medición de 10 Hz para la velocidad y 2.5 Hz para el fondo, y se colocó a una elevación para medir los primeros 3 cm sobre el fondo plano inicial. La señal se filtró con correlaciones mayores a 70% y SNR mayores a 15 dB.

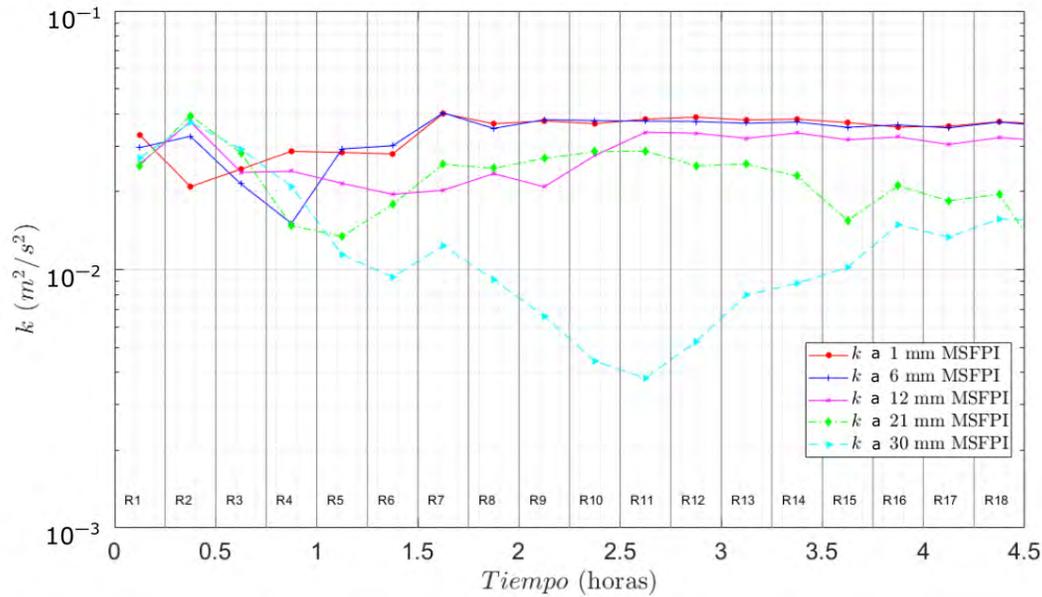


Figura 4.12. Registros de la energía cinética de la turbulencia (k , m^2/s^2) a distintas elevaciones, sobre el punto de máxima socavación. Medidos Sobre el Fondo Plano Inicial (MSFPI).

En la Figura 4.13, en color azul, se presenta el comportamiento de la evolución del fondo en el tiempo, mientras que la línea-punto en color verde indica el comportamiento de la socavación calculada numéricamente con Telemac-Mascaret 2DH acoplado con el módulo Sysiphe, la comparación se realiza en el punto de socavación máxima identificada en el modelo físico.

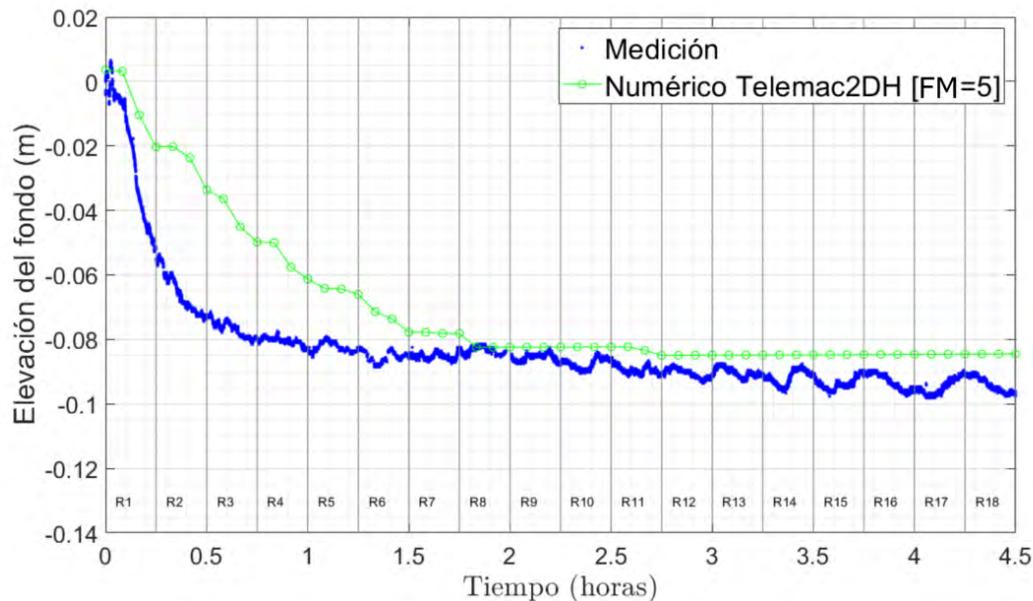


Figura 4.13. Evolución temporal del fondo (m) medida vs calculada, en punto de socavación máxima experimental.

Se determinó que la erosión fue de 8.4 cm con los resultados del MN-2DH, mientras que la medición experimental fue de 9.4 cm; después de calibrar el transporte de carga de fondo con el factor morfológico, se determinó un error de 1 cm, lo que equivale a un 10.6% de error con respecto a la erosión medida en el modelo físico. Sin embargo, la erosión máxima calculada numéricamente se localiza en la cercanía de la estructura hidráulica, en la zona arenosa justamente abajo del cambio de la estructura de concreto con la arena, y es del orden de 4.6 veces más profundo que la erosión máxima experimental. Debido a que no se realizaron mediciones de transporte de sedimento, se utilizó un Factor Morfológico (MF) de 5 para calibrar el proceso de socavación del modelo físico, este factor ha sido analizado por Knaapen y Joustra (2012) y Morgan et al. (2020). El tiempo computacional de modelación de la hidrodinámica y transporte de sedimento de 1 hora (considerando el modelo físico) demandó un tiempo de proceso de 94.6 horas, con un $\Delta t=0.0005s$ utilizando los mismos procesadores y características del clúster.

4.6.4. Velocidades experimentales, 3D

Los resultados del campo de velocidades medio (\bar{U}), sus componentes ($\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}$), así como los parámetros de calidad correspondientes a la Correlación (%) y la relación ruido-síñal (SNR, db), se muestran en las Figuras 4.14 a 4.16, correspondientes a las secciones analizadas. Nortek (2022) recomienda valores de SNR superiores a 15 dB y coeficiente de correlación mayor al 70%, para tener una descripción adecuada de las características del flujo y de la turbulencia. En los experimentos, los datos se filtraron con SNR superior a 15 dB y 70% de correlación, por lo que, en este estudio en particular, no fue necesario introducir ningún tipo de partículas de siembra para mejorar las mediciones debido a la naturaleza turbulenta del flujo y las propiedades del sedimento.

En la Figuras 4.14e), 4.15e), y la 4.16e), la correlación fue del 95%, 90% y 85%, únicamente en la S3 la correlación bajó al 73% muy cerca del fondo. Por su parte la SNR, en las Figuras 4.14f), 4.15f) y 4.16f), fue superior a 30 db en todas. Sin embargo, se identificó que la SNR presentó mejora de la calidad de la información al centro de los perfiles de medición; por ejemplo, en la S1, va de $0.50 < Z < 0.38$, en la sección 2 va de $0.24 < Z < 0.1$, y en la sección 3 va de $0.43 < Z < 0.33$. Los resultados de los parámetros de calidad permiten identificar que las mediciones de la velocidad representan adecuadamente el flujo analizado, y con esta información se analizaron las características turbulentas del flujo.

En la Figura 4.14a), la \bar{u} se concentró cerca de la margen derecha, al interior de la curva, $B \approx 0$, en donde B es el ancho adimensional de la sección ($B = 0.2$, $Z = 0.45$, $\bar{u} = 23.8$ cm/s), y en la parte inferior se presenta un núcleo del mismo orden de magnitud ($B = 0.2$, $Z = 0.11$, $\bar{u} = 23.8$ cm/s). También, se identificó una región en donde este componente disminuyó, aproximadamente en $0.17 < Z < 0.24$, aquí la velocidad $\bar{u} = 1.2$ cm/s ($B = 0.86$, $Z = 0.21$), localizada cerca de la margen derecha (al exterior de la curva, $B \approx 1$). En Figura 4.14b), se muestra el componente \bar{v} , la velocidad máxima se localiza muy cerca del fondo, en la margen derecha ($B = 0.2$, $Z = 0.11$); en toda esa región, de $0.12 < B < 0.4$, se presentaron las mayores magnitudes de este componente y disminuye hacia la margen izquierda, aquí se observaron dos núcleos de velocidades bajas ($B = 0.8$, $Z = 0.4$, $\bar{v} = -5$ cm/s; y $B = 0.8$, $Z = 0.08$, $\bar{v} = -5.2$ cm/s). En Figura 4.14c), el componente \bar{w} , cerca de la margen derecha presento una dirección de flujo hacia abajo, mientras que cerca de la margen izquierda presento una tendencia hacia arriba, se observó que en el rango, $Z = 0.15$, $Z = 0.24$, disminuye la magnitud del componente, y fuera de ese rango aumentó su magnitud, por ejemplo, en $B = 0.66$, $Z =$

0.3, $\bar{w} = -0.76$ cm/s y en $B = 0.4$, $Z = 0.2$, $\bar{w} = -0.86$ cm/s.

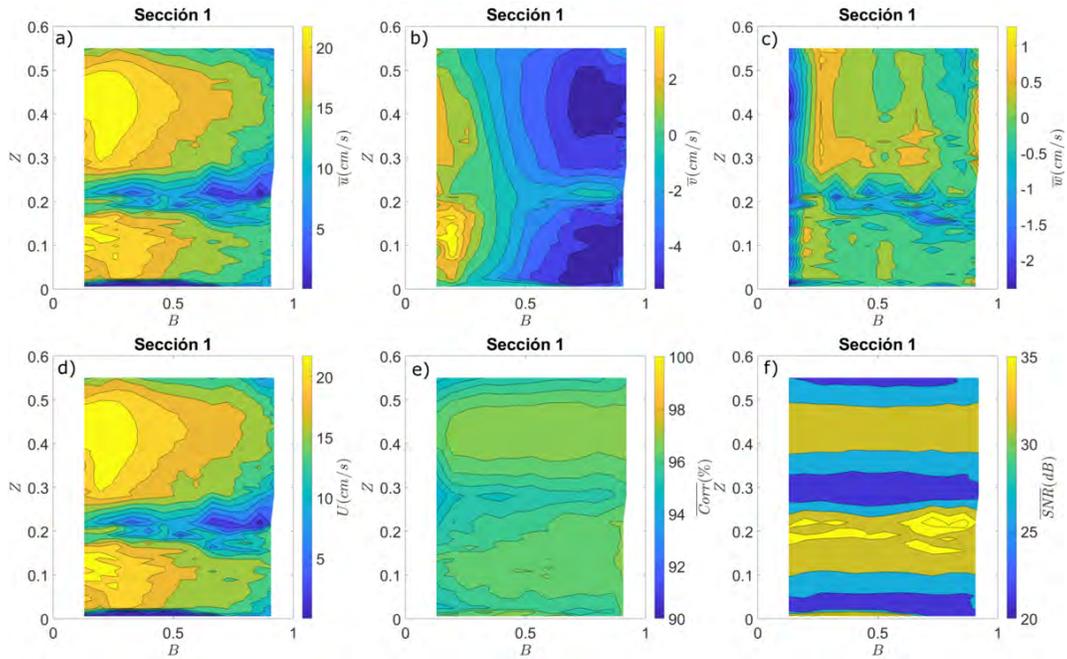


Figura 4.14. Superficie de velocidades medias y parámetros de calidad en S1, a) \bar{u} , en m/s, b) \bar{v} , en m/s, c) \bar{w} , en m/s, d) Magnitud de la velocidad \bar{U} , en m/s, e) Correlación (%), (f) SNR (db).

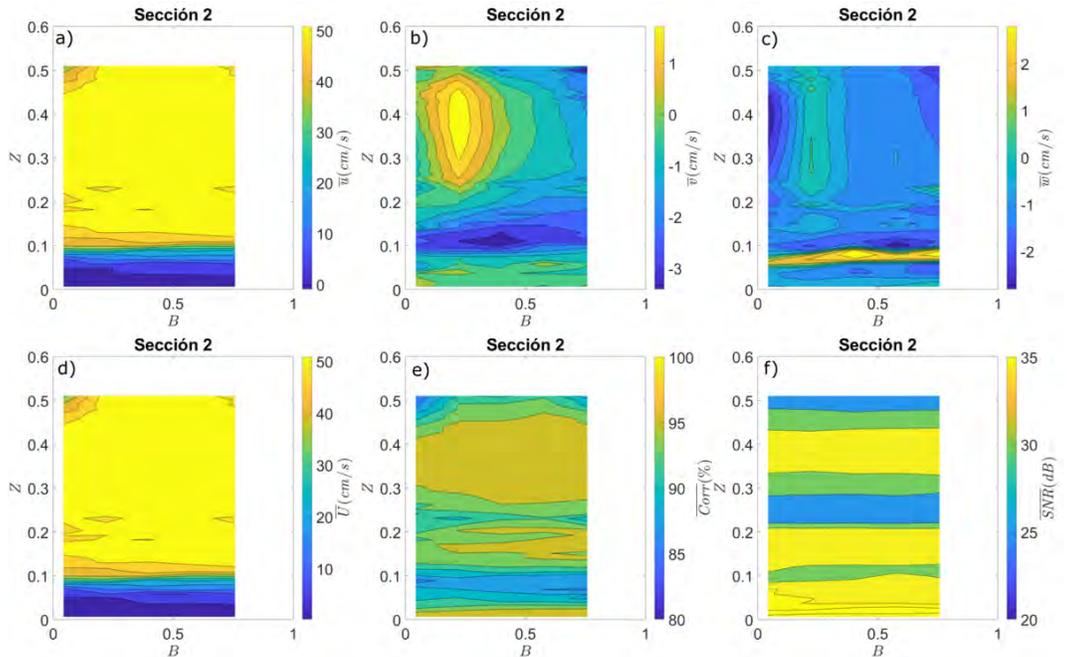


Figura 4.15. Superficie de velocidades medias y parámetros de calidad en S2, a) \bar{u} , en m/s, b) \bar{v} , en m/s, c) \bar{w} , en m/s, d) Magnitud de la velocidad \bar{U} , en m/s, e) Correlación (%), (f) SNR (db).

En la Figura 4.15a), el componente \bar{u} muestra un claro comportamiento de perfil logarítmico, esto debido a la reducción del ancho de la sección y que el flujo se confina. En $B = 0.1$ se observó un gradiente importante, ya que \bar{u} disminuye de 41.73 cm/s hasta 2.7 cm/s (en $B = 0.7, Z = 0.02$); en la parte superior $\bar{u}=55$ cm/s ($Z = 0.5$). En la Figura 4.15b), se identificó un núcleo del componente \bar{v} , cerca de la margen derecha ($B = 0.22, Z = 0.37, \bar{v}=2.2$ cm/s), a partir de este núcleo el componente disminuye; también, se determinó una zona en donde el componente disminuyó, en $0.8 < Z < 0.18$, con una $\bar{v}= -3.2$ cm/s ($B = 0.4, Z = 0.11$). En la Figura 4.15c), se muestra una región en donde $\bar{w}=0.54$ cm/s ($B = 0.22, Z = 0.3$), sin embargo, el núcleo del componente $\bar{w}=3.33$ cm/s, se localiza cerca del fondo ($B = 0.4, Z = 0.08$).

En la Figura 4.16a), se identificó que el componente \bar{u} se concentró cerca de la margen izquierda, $\bar{u}=38.14$ cm/s ($B = 0.76, Z = 0.42$), a partir de aquí disminuye hacia elevaciones menores y hacia la margen derecha. En $B \approx 0.3$ se localiza el componente de velocidad $\bar{u}=0$, en el rango de $0.15 < B < 0.3$, el componente \bar{u} es negativo, esto indica que el flujo se invierte e ingresa hacia el canal, por la margen derecha, por ejemplo, $\bar{u}=-7.6$ cm/s ($B = 0.15, Z = 0.26$), por lo que se identificó una zona de separación.

En la Figura 4.16b), se presentan dos núcleos de velocidades máximas del componente \bar{v} , el primero se localiza cerca de la margen derecha con $\bar{v}=10.19$ cm ($B = 0.15, Z = 0.12$) y el segundo con $\bar{v}=9.34$ cm/s ($B = 0.59, Z = 0.09$), este último núcleo se extiende hacia la superficie con un cierto sesgo, cargado hacia la margen izquierda.

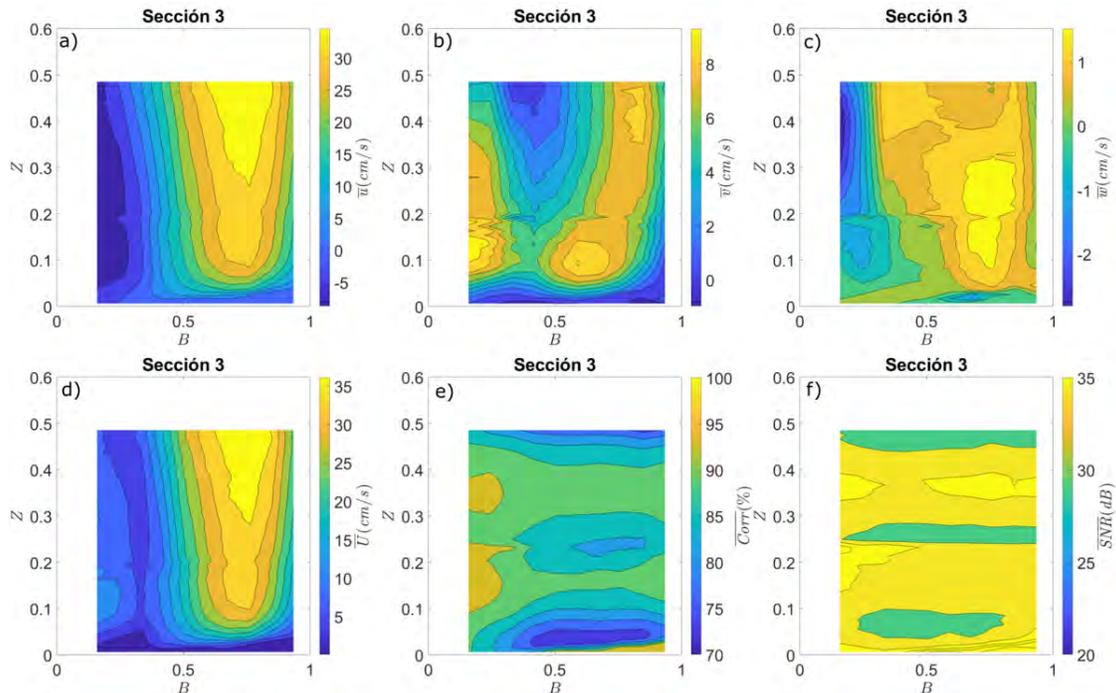


Figura 4.16. Superficie de velocidades medias y parámetros de calidad en S3, a) \bar{u} , en m/s, b) \bar{v} , en m/s, c) \bar{w} , en m/s, d) Magnitud de la velocidad \bar{U} , en m/s, e) Correlación (%), (f) SNR (db).

En la Figura 4.16c), el componente \bar{w} quedo confinado muy cerca de la margen izquierda, la máxima velocidad de $\bar{w}=1.7$ cm/s ($B = 0.76, Z = 0.25$), en el rango $0.3 < B < 0.93$, \bar{w} fue

positiva, es decir, con dirección hacia arriba; mientras que en el rango de $0.15 < B < 0.3$, \bar{w} fue negativa.

4.6.5. Flujo helicoidal

Otra variable de análisis es el flujo helicoidal, esto es, el comportamiento del vector velocidad presenta una desviación hacia alguna de las márgenes y no se mantiene paralelo a las márgenes del canal o meandro. Generalmente, los meandros no presentan anchos constantes, por lo que el análisis del flujo helicoidal tiene importancia en el comportamiento del campo de velocidades del flujo. El vector de flujo secundario (\overline{FSU}) se define como la proyección del vector velocidad \bar{U} sobre el vector \bar{V} , en donde, \bar{V} es el vector normal a un plano o superficie de medición, por lo tanto, el \overline{FSU} , se define como: $\overline{FSU} = \bar{U} - \text{Proy}_{\bar{V}}\bar{U}$, que se muestra en la Figura 4.17, y contiene dos componentes, según el sistema de referencia usado.

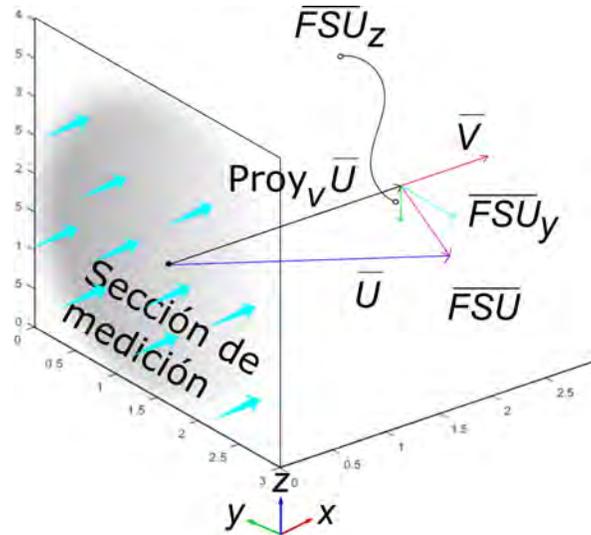


Figura 4.17. Vector de velocidad y de flujo secundario \overline{FSU} (cm/s), y componentes (\overline{FSU}_y y \overline{FSU}_w) en S1, S2 y S3.

Se calculó el flujo secundario en las secciones S1, S2 y S3, y los resultados se presentan en la Figura 4.18. En la Figura 4.18a), \overline{FSU} (superficie y vectores), en la Figura 4.18b), \overline{FSU} y \overline{FSU}_y (vectores), en la Figura 4.18c), \overline{FSU} y \overline{FSU}_z (vectores), esto para la sección 1, las mismas variables se presentan para las secciones 2 y 3.

En la sección 1, en la Figura 4.18a), se identifican tres núcleos de \overline{FSU} , uno en la parte superior y otro cerca del fondo, los dos localizados cerca de la margen izquierda en dirección hacia la margen derecha ($B = 0.8$, $Z = 0.42$, $\overline{FSU}=5$ cm/s; $B = 0.8$, $Z = 0.08$, $\overline{FSU}=5.2$ cm/s) y el tercero se localiza en el fondo en la margen derecha con dirección hacia la margen izquierda ($B = 0.20$, $Z = 0.10$, $\overline{FSU}=4.8$ cm/s); en la zona central, en $0.2 < Z < 0.3$, el \overline{FSU} presentó magnitud nula, esto también se identificó en una franja en el sentido vertical, que va de $0.26 < B < 0.46$. En la Figura 4.18b), se presenta el componente \overline{FSU}_y , en donde las velocidades en los extremos son del orden de 4 cm/s y se encuentran cerca de $0.26 < B < 0.46$. En la Figura 4.18c), se identificó una zona de bajo \overline{FSU} en color azul ($0.2 < B < 0.8$, $Z = 0.22$), esta zona es el límite que define la dirección de los vectores que

van hacia arriba localizados en la parte superior y los que se dirigen hacia abajo, parte inferior.

En la Figura 4.18d), se identificó que el \overline{FSU} de mayor magnitud se localizó cerca del fondo ($B = 0.4, Z = 0.11, \overline{FSU}=3.5$ cm/s, en color amarillo) y una célula cerca de la margen derecha ($B = 0.04, Z = 0.38, \overline{FSU}=2.6$ cm/s, óvalo), se identificó que en la parte superior ($0.22 < B < 0.5$) el \overline{FSU}_y se dirige hacia la margen izquierda, mientras que la zona cercana al fondo se dirige hacia la margen derecha, el \overline{FSU} localizado sobre la margen derecha ($B \approx 0.1$) se dirige hacia la margen izquierda, esto se identifica mejor en la Figura 4.18e) y la Figura 4.18f). El vector de \overline{FSU} en la sección 3, se dirige de la margen derecha a la margen izquierda, sin embargo, en $0.15 < B < 0.33$, los vectores se dirigen hacia abajo y al superar este rango los vectores se dirigen hacia la superficie libre del agua (Figura 4.18g)); los dos núcleos de el \overline{FSU} presentan una magnitud de 8.55 y 9.23 cm/s ($B = 0.24, Z = 0.12; B = 0.59, Z = 0.10$), y ambos se localizan cerca del fondo, en la Figura 4.18f), prácticamente los vectores cercanos a la margen derecha se dirigen hacia abajo, los demás se dirigen hacia arriba.

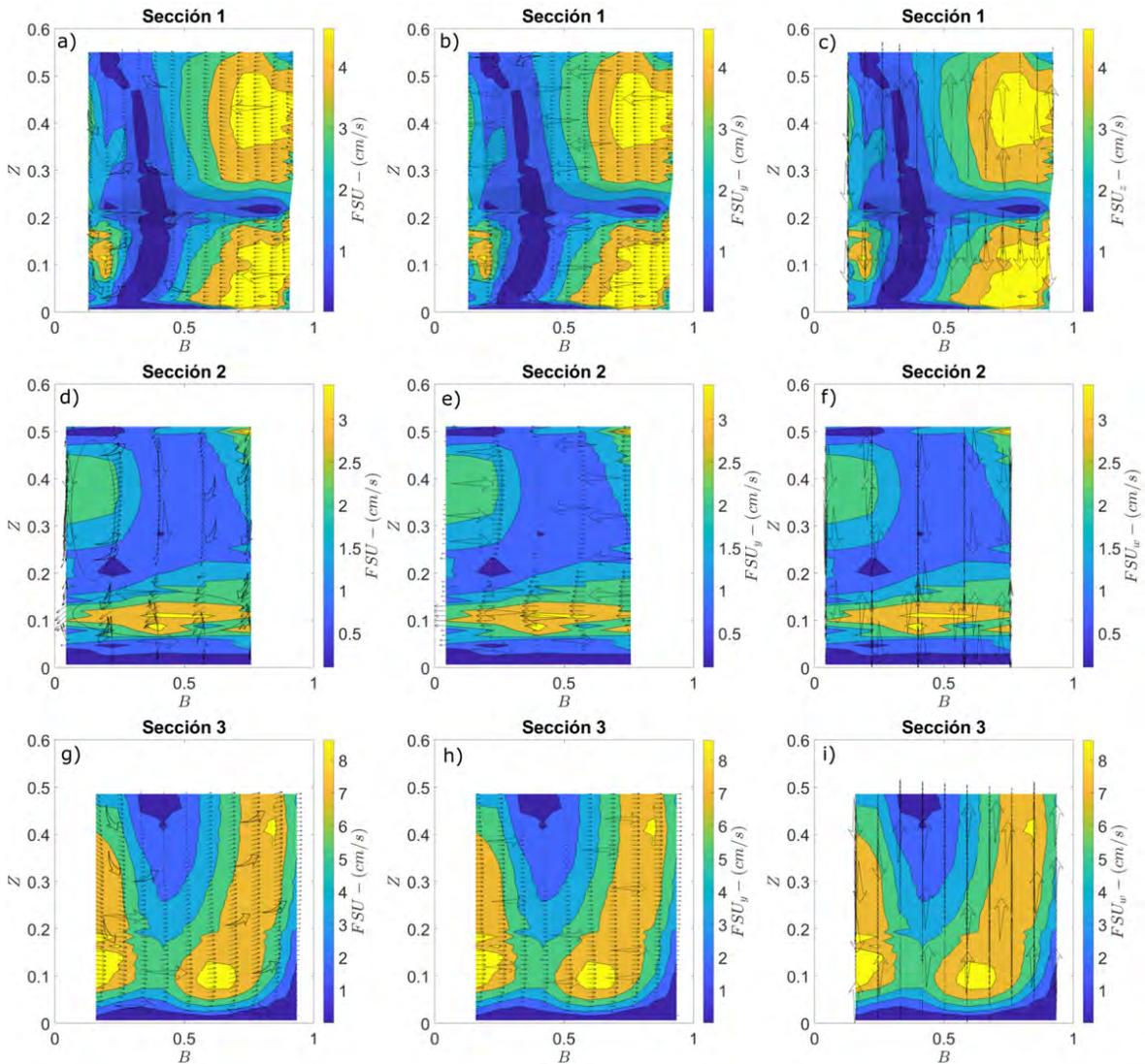


Figura 4.18. Flujo secundario \overline{FSU} (cm/s), y componentes (\overline{FSU}_y y \overline{FSU}_w) en S1, S2 y S3.

4.7. Discusión

4.7.1. Resultados de la socavación con el modelo numérico.

En la Figura 4.19(a) se muestra la comparación de la configuración final del fondo calculada con Telemac-Mascaret 2DH y la Figura 4.19(b) muestra la configuración final del experimento. En la Figura 4.19(a), la socavación máxima se desarrolló justo aguas abajo de la salida del canal, y el sedimento se depositó hacia los lados donde se desarrollaron los núcleos de máxima velocidad. La erosión se extiende hasta el borde de la margen izquierda. En la parte final se desarrolló un patrón de depósito de material en forma de U.

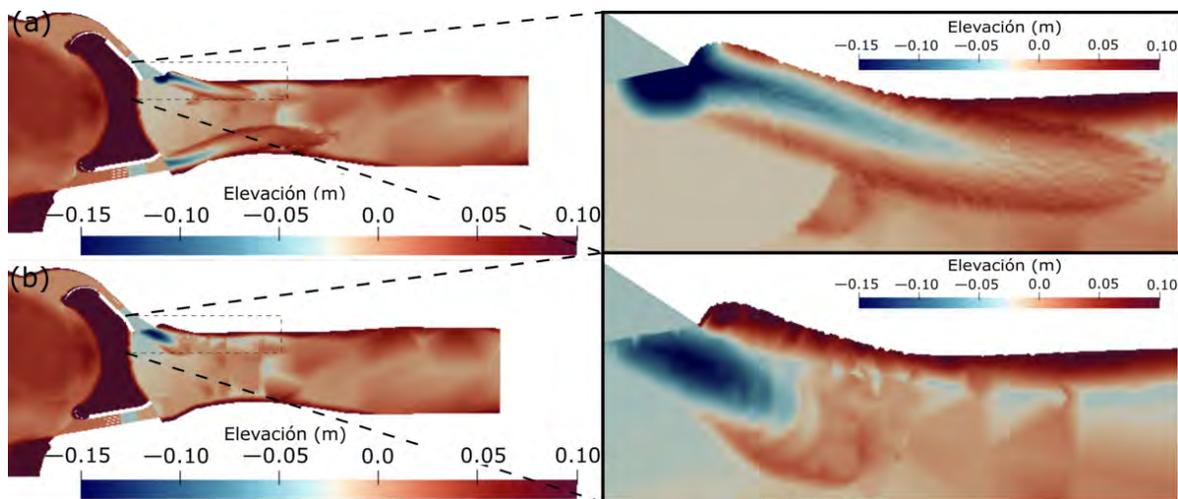


Figura 4.19. Configuración final del fondo (m) aguas abajo de la estructura (después de 4.5 horas), a) calculada con Telemac-Mascaret, b) medición experimental.

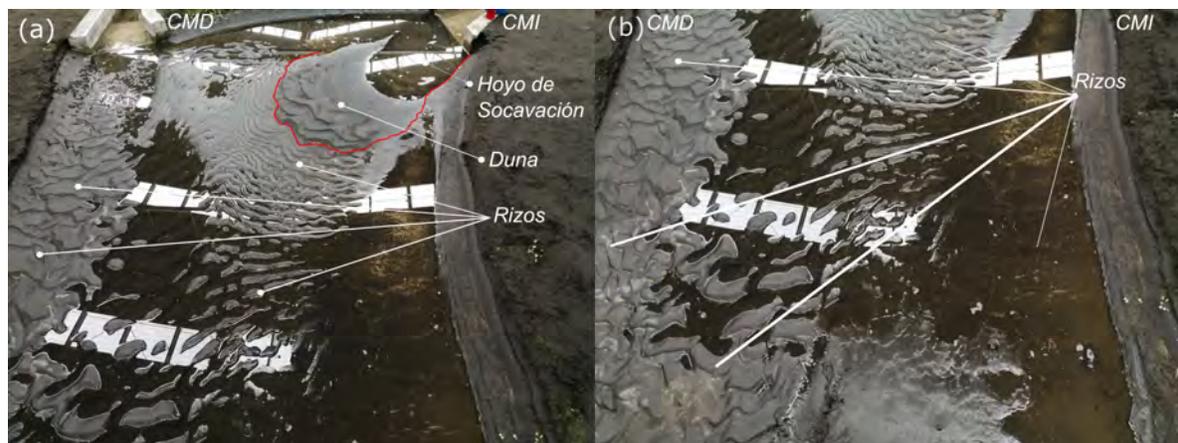


Figura 4.20. Configuración final del fondo experimental (m) aguas abajo de la estructura (después de 4.5 horas), en a) Socavación máxima y formas de fondo desarrolladas (rizos), en b) formas de fondo desarrolladas (rizos).

En los resultados experimentales que se muestran en la Figura 4.19(b) y la Figura 4.20, se identificó que en el CMI se desarrolló una erosión alargada y posteriormente, un depósito de material con forma de duna; incluso se observan pequeñas ondulaciones sobre la duna

(Figura 4.20(a) y Figura 4.20(b) (al interior del borde en color rojo). La zona de erosión máxima no se localizó inmediatamente aguas abajo de la salida de los canales, sino ligeramente más abajo. Se encontró que el modelo numérico no reproduce estas formas (Figura 4.20(a)).

Se realizó el levantamiento topográfico de la configuración del fondo final (CFF), aguas abajo de la estructura hidráulica. Se midieron 312 puntos que describen esta configuración, puntos en color blanco en la Figura 4.21(a) y la Figura 4.21(b). Con la información anterior se obtuvo la diferencia de elevación entre la configuración fondo final (CFF) de los datos numéricos y experimentales, mediante la relación $Rz = (CFF_{exp} - CFF_{num})$, en donde los resultados se presentan en la Figura 4.21(b). El error relativo al punto de medición se calcula como $E_r = Rz/CFF_{exp}$, los resultados se presentan en la Figura 4.21(c). En general, se determinó un error relativo medio (e_r) de -3.6% .

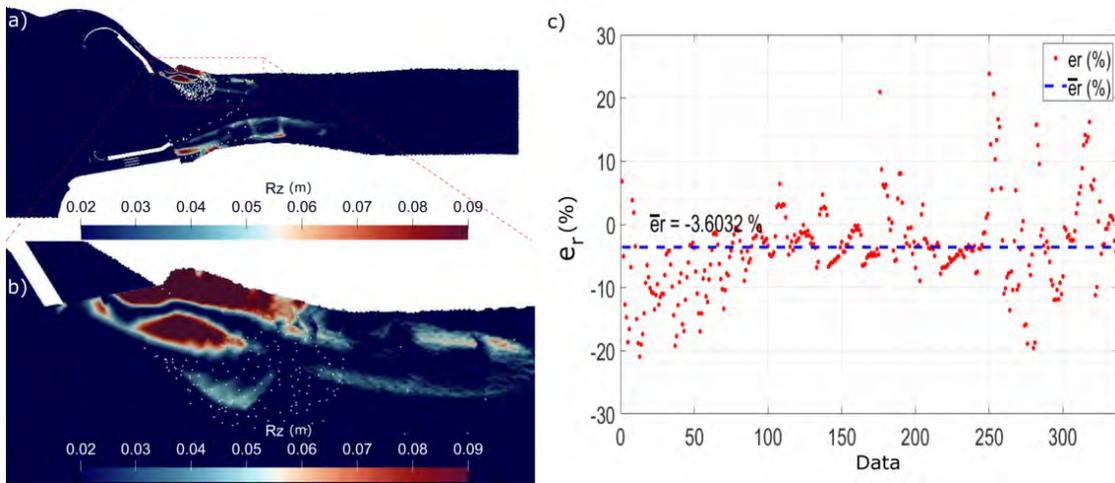


Figura 4.21. Diferencia de elevación (Rz , m), en a) vista general, en b) vista cerca del CMI y zona de socavación, y en c) error relativo (%).

4.7.2. Comparación con fórmulas empíricas

Con el fin de contrastar los resultados, se realizó un análisis teórico de la socavación máxima aguas abajo de estructuras de carga baja, con base en cuatro ecuaciones, o métodos. Breusers y Raudkivi (1991) presentaron diversos estudios sobre socavación local, destacando los realizados por Breusers (1967); en sus experimentos determinaron una escala de tiempo entre el modelo físico y el prototipo para el desarrollo de la socavación local, y propusieron la siguiente expresión para el cálculo de la evolución en el tiempo, t , asociada a la profundidad máxima de socavación, Y_{smax} (Breusers, 1967, p. 277):

$$\frac{Y_{smax}}{h_0} = \left(\frac{t}{t_0} \right)^\beta \quad (4.8)$$

En donde, t_0 es la escala de tiempo en horas requerida para alcanzar la socavación máxima Y_{smax} , h_0 es la profundidad que se tienen al final del fondo del canal protegido, t es el tiempo, en horas, y $\beta = 0.38$ es un coeficiente de ajuste. (Breusers y Raudkivi, 1991, p. 129) determinan la siguiente expresión de la escala de tiempo:

$$t_0 = 330 \left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho} \right)^{1.7} h_0^2 (\alpha V - V_{cri})^{-4.3} \quad (4.9)$$

En donde, ρ_s es la densidad del sedimento, ρ la densidad del agua, V_{cri} es la velocidad crítica determinada con el esfuerzo cortante crítico (τ_c), α un factor que depende de la distribución de velocidades y que su valor se puede estimar mediante la siguiente ecuación (Breusers y Raudkivi, 1991, p. 129):

$$\alpha = 1 + 3 \left(\frac{\overline{v'}}{V} \right) \quad (4.10)$$

En donde, $(\overline{v'})$ es la intensidad turbulenta media relativa, y V la velocidad media del flujo cerca del fondo. Al utilizar este método se determina que la socavación máxima en equilibrio es de 7.64 cm.

(Farhoudi y Smith, 1982, p. 1149, 1155), propusieron una formulación similar a la de Breusers (1967), como:

$$\frac{Y_{s_{max}}}{d_0} = \left(\frac{t}{t_0} \right)^{0.19} \quad (4.11)$$

En donde, d_0 es una longitud característica, aquí se utilizó el nivel balanceado aguas abajo. Sin embargo, la escala de tiempo se determina mediante gráficos, y para el ejemplo analizado, se determinó una escala de $t_0 = 212$ horas y, por lo tanto, una socavación máxima en equilibrio de 5.87 cm.

Negm et al. (2002), realizaron 210 experimentos de laboratorio en un canal recto con dimensiones de 0.3 m de ancho, 0.25 m de profundidad y 3.5 m de longitud, con una capa de arena de 7.5 cm de espesor y un D_{50} de 1.77 mm. Utilizaron una compuerta que regula el nivel aguas arriba, a la entrada del canal y el desarrollo de un salto hidráulico; después de una longitud L , se localiza el fondo arenoso que es erosionado. Además, realizaron un análisis dimensional para calcular la socavación máxima aguas abajo y obtuvieron la Ecuación 4.12:

$$\frac{ds_{max}}{G} = 1.13F_G - 28.9 \left(\frac{D_{50}}{G} \right) + 0.26 \left(F_G \left(\frac{B-b}{b} \right) \right) - 3.59 \left(\frac{G}{H_u} \right) + 2.1 \quad (4.12)$$

En donde, G es la abertura de la compuerta, F_G el número de Froude aguas abajo de la compuerta, H_u la carga de agua, aguas arriba de la compuerta, b el ancho del canal de llegada aguas arriba (antes de la expansión) y B el ancho aguas abajo (en la expansión). Aquí se ha sustituido G , por el tirante conjugado menor (0.10 m) y H_u con el nivel localizado poco antes de las pilas (0.12 m); se determinó una socavación máxima en equilibrio de 4.5 cm.

Dietz y Wittke (1969), presentan una ecuación para calcular la socavación máxima teórica, reportada en Breusers y Raudkivi (1991)[p. 133]:

$$\frac{ys_{max(equi)}}{y_0} = \frac{U_{max} - U_c}{U_c} \quad (4.13)$$

Con la relación $d/D = 0.0876m/(2.66 \times 10^{-4}m) = 328.83$, se determinó una velocidad crítica (U_c) de 0.23 m/s utilizando la ecuación de Lischtvan-Lebediev (García F. y Maza A. (1997)[Ec. 8.96. p. 74]), por lo tanto, de la ecuación anterior se determinó que la socavación

máxima en equilibrio fue de 6.48 cm.

En la Figura 4.22, se presenta el comportamiento temporal de la socavación determinada experimentalmente en el modelo físico (puntos en color azul), el calculado numéricamente con Telemac-Mascaret 2DH acoplado con el módulo de Sisyphé (la línea en color verde con círculos sin relleno). Además de los métodos indicados anteriormente; se ha puntualizado en la socavación máxima alcanzada en el tiempo de 4.5 horas, los resultados puntuales se indican en la Tabla 4.2.

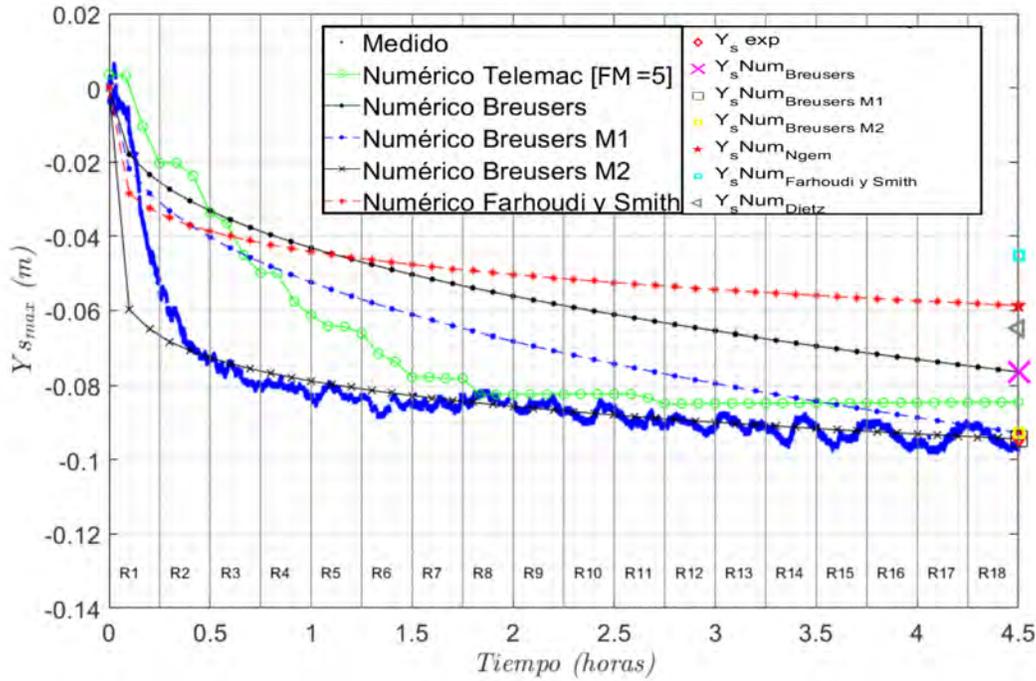


Figura 4.22. Evolución del fondo (m) en el tiempo (horas), medida vs calculadas, en punto de máxima socavación experimental.

Tabla 4.2: Socavación máxima experimental vs socavación máxima calculada por cuatro métodos teóricos y errores. Los valores calculados con el modelo 2D se ubican en el punto de máxima socavación experimental (MSE) y máxima socavación modelada (MSM).

| Método | $Y_{s_{max}}$ (cm) | Error $\left(1 - \frac{Y_{s_{num}}}{Y_{s_{exp}}}\right)$ |
|-----------------------------------|--------------------|--|
| Experimental | 9.40 | - |
| Modelo Telemac2D-Sishype (MSE) | 8.40 | 0.106 |
| Modelo Telemac2D-Sishype (MSM) | 43.20 | - 3.600 |
| Breusers M1 (1967) | 7.64 | 0.187 |
| Breusers M1 (\bar{v}') (1967) | 9.27 | 0.014 |
| Breusers M2 (β) | 9.44 | 0.004 |
| Continúa | | |

Tabla 4.2 – continuación

| Método | Y_{smax} (cm) | Error $\left(1 - \frac{Y_{snum}}{Y_{sexp}}\right)$ |
|-------------------------|-----------------|--|
| Farhoudi y Smith (1982) | 5.87 | 0.376 |
| Negm (2002) | 4.50 | 0.521 |
| Dietz (1969) | 6.48 | 0.311 |

En la Figura 4.22, se observa que el registro de la socavación experimental desarrolló fluctuaciones temporales. Durante el experimento, se formaron ondas a lo largo del fondo (ver Figura 4.19(b) y Figura 4.20), que están relacionadas con efectos tridimensionales. La migración de las ondas produjo las fluctuaciones temporales del fondo en la zona de máxima socavación. Por otro lado, un modelo de flujo 2D acoplado con un modelo de evolución del fondo (Telemac2D-Sisyphe) no es capaz de reproducir la formación de este tipo de ondulaciones (ver Figura 4.20(a)), y una consecuencia es la falta de fluctuaciones en la evolución temporal de la socavación (Figura 4.22).

4.7.3. Comparación del calculo 2D vs estructuras del flujo 3D

La socavación calculada por el MN-2D se inclinó hacia la margen izquierda, mientras que los resultados experimentales están más centrados con respecto a la salida del CMI (comparar las Figura 4.19(a),(b)). Este comportamiento está correlacionado con el campo de flujo 2D; las velocidades más altas a la salida del CMI también se inclinan hacia la margen izquierda (Figura 4.19(a)). En contraste, el campo de flujo 3D promediado en profundidad calculó las velocidades máximas a la salida del CMI con un patrón más consistente con respecto a la zona de socavación máxima experimental (Figura 4.8(c)). Es importante resaltar que ambos cálculos se realizaron utilizando la cama experimental desarrollada después de 4.5 horas. Otra diferencia es la energía cinética turbulenta, k ; el MN-2D es más difusivo (comparar las Figura 4.8(b) y Figura 4.8(d)).

4.8. Conclusiones

En el proceso de calibración en el análisis numérico 2DH se determinó que, un coeficiente de producción del modelo de flujo secundario de $\alpha = 3.5$ mejora la aproximación numérica al reducir los errores en más de un factor de 10 para el componente \bar{u} , y en un factor de 2 para el componente \bar{v} , esto con respecto al análisis numérico que no considera la corrección de flujos secundarios, por lo ello es importante que se considere en diseños ingenieriles cuando se aplican modelos numéricos 2DH. Además, se determinó una aproximación del 91 % para el componente \bar{u} y de un 70 % para el componente \bar{v} , aquí la aproximación de este último componente decae por efecto de la zona de separación. Por otro lado, se calculó una socavación máxima aguas abajo de la estructura de control El Macayo de 8.4 cm con el modelo numérico 2DH, y experimentalmente se midió una socavación de 9.4 cm, por lo que, se tiene un 1 cm de error, la aproximación del modelo para reproducir la socavación máxima es del 89.3%. Además, se comparó la configuración del fondo después de 4.5 horas, tanto numérico como experimental, se determinó un error relativo medio de -3.6 %, esto indica un cálculo de erosión mayor a lo experimental; sin embargo, no se presenta un buen ajuste de la configuración final del fondo calculada numéricamente con respecto a la información experimental. Aquí, los mayores errores se localizaron en la zona de máxima socavación y en la zona de la duna desarrollada aguas abajo de la fosa generada por la socavación. El análisis numérico indica que la erosión máxima se localiza directamente en la cercanía de la estructura del canal izquierdo, y es del orden de 4.6 veces más profundo que la socavación máxima experimental reportada, siendo un caso de sobreestimación.

Se calculó la socavación máxima con ecuaciones empíricas y se comparó con la información experimental, se encontró que, el método de Breusers tiene una precisión del 81.3 %. Sin embargo, al utilizar una modificación (M1) de la intensidad turbulenta media local ($\overline{v_b'}$) y cercana al fondo (elevación de 1mm sobre el fondo plano original), el ajuste mejora considerablemente, alcanzando el 98.6 % de precisión, y al realizar una segunda modificación (M2) del exponente β de ajuste, el modelo mejoró para obtener una precisión del 99.5 %, pero demanda el conocimiento de la velocidad y la turbulencia sobre este punto, es decir, realizar mediciones. La aplicación del modelo y la modificación M1, no reproducen el comportamiento de la socavación máxima en el tiempo, pero la modificación M2 lo describe mejor.

El método de Farhoudi y Smith es complicado debido a que requiere utilizar gráficas y no cuenta con una ecuación para el cálculo de la escala de tiempo necesario para el desarrollo de la socavación máxima, aquí se determina una precisión de 62.4 %, pero presenta una tendencia similar a la socavación en el tiempo, solo que se observa desplazado en la vertical (de menor magnitud). El método de Negm para el experimento analizado tiene una precisión de 48 %. Por su parte, la precisión en el modelo de Dietz es de 69 %.

Se establece una condición de aceptación del 75 % de precisión para el cálculo de la socavación máxima y solo el método de Breusers es aceptable. Los métodos presentados, subestimaron la socavación máxima que se midió en el modelo físico, lo que pondría en riesgo la estructura; a excepción de la modificación M2 en el modelo de Breusers que desarrolló una socavación mayor en los primeros 25 minutos del experimento, pero el ajuste después de este tiempo mejoró considerablemente con respecto a todos los modelos implementados, que no describieron el proceso de socavación en el tiempo. Por su parte, al desarrollar el proceso de calibración del análisis numérico 2DH presenta un buen grado de aproximación en la descripción de la dinámica de la socavación, sin embargo, en el análisis general del comportamiento de la configuración de fondo desarrollada después de 4.5, este proceso de

calibración es insuficiente para la descripción matemática del fenómeno, por lo que es necesario realizar análisis tridimensional. Se estima un tiempo de proceso de 2.5 años implementando las condiciones establecidas en la malla reducida y las características de computo distribuido utilizado, por lo que el análisis se considera poco factible en el corto plazo. Actualmente, no se tiene una descripción clara y precisa de la interacción del fluido-sedimento en la zona de contacto o cercana al fondo, por lo que, este campo de investigación continúa en desarrollo.

La información experimental, permitió identificar una zona de separación en la sección 3 del canal izquierdo, esta zona ocasionó una redistribución de las velocidades, generando un núcleo con mayor velocidad. Además, en esta zona las características de la turbulencia jugaron un papel importante en el comportamiento del flujo, ya que, aunque desarrollaron velocidades de magnitudes similares, no lo fueron en características de la turbulencia. Este comportamiento es importante porque es complejo de reproducir numéricamente, y es la condición hidrodinámica inmediatamente aguas arriba que interactúa en la zona en donde se desarrolla el proceso de socavación máxima, por ello, es importante caracterizarlo adecuadamente. Por otro lado, el perfil de velocidades sobre el punto de máxima socavación tiene un comportamiento no permanente en el tiempo, incluso también muestra registros donde la velocidad invierte su dirección, influenciado por efectos tridimensionales.

En el análisis numérico 3D se identificó que la zona de transición entre el concreto y el fondo arenoso presenta un incremento de vorticidad, por lo que estas estructuras propias del flujo, además de la zona de separación y las de recirculación, son una clara evidencia de la necesidad del uso de modelos numéricos 3D para el cálculo de la socavación alrededor de estructuras. Además, el modelo RANS no calcula las estructuras turbulentas coherentes cercanas al fondo ni los fenómenos de ruptura (bursts) y vórtices como se observaron en la modelación física.

Dinámica del flujo y sedimento en suspensión en un meandro

5.1. Introducción

El río Paraná es el segundo río más largo en Sudamérica; este río transporta una cantidad importante de sedimentos, tanto en el fondo como en suspensión, y se localiza en los países de Brasil, Paraguay y Argentina. En este último, cerca de la ciudad de Santa Fe, se presenta un canal secundario del río Paraná que recibe el nombre de *río Colastiné*; sobre un tramo de tres curvas Dominguez et al. (2021) presentaron el comportamiento hidrodinámico, morfológico y de transporte de sedimentos de este río, y proporcionaron una descripción física de la estructura del flujo, el sedimento en suspensión y la morfología del fondo, usando equipos Doppler (ADCP) y los sistemas de posicionamiento global (GPS); los equipos (ADCP) son utilizados para medir la velocidad del flujo pero también para evaluar la concentración de sedimento en suspensión (*CSs*), mediante la fuerza acústica de retrodispersión (Latosinski et al., 2014). Estos estudios de campo ofrecen una alta resolución espacio-temporal, y actualmente los esfuerzos continúan para minimizar los distintos tipos de errores con el objetivo de que los resultados sean útiles en aplicaciones prácticas. Dominguez et al. (2021) publicaron las mediciones del campo de velocidad (U) y de la concentración de sedimento en suspensión (*CSs*) en doce secciones localizadas sobre un tramo del río Colastiné, indicadas en la Figura 5.1. Las dos campañas de medición se desarrollaron en 2010 y 2013.

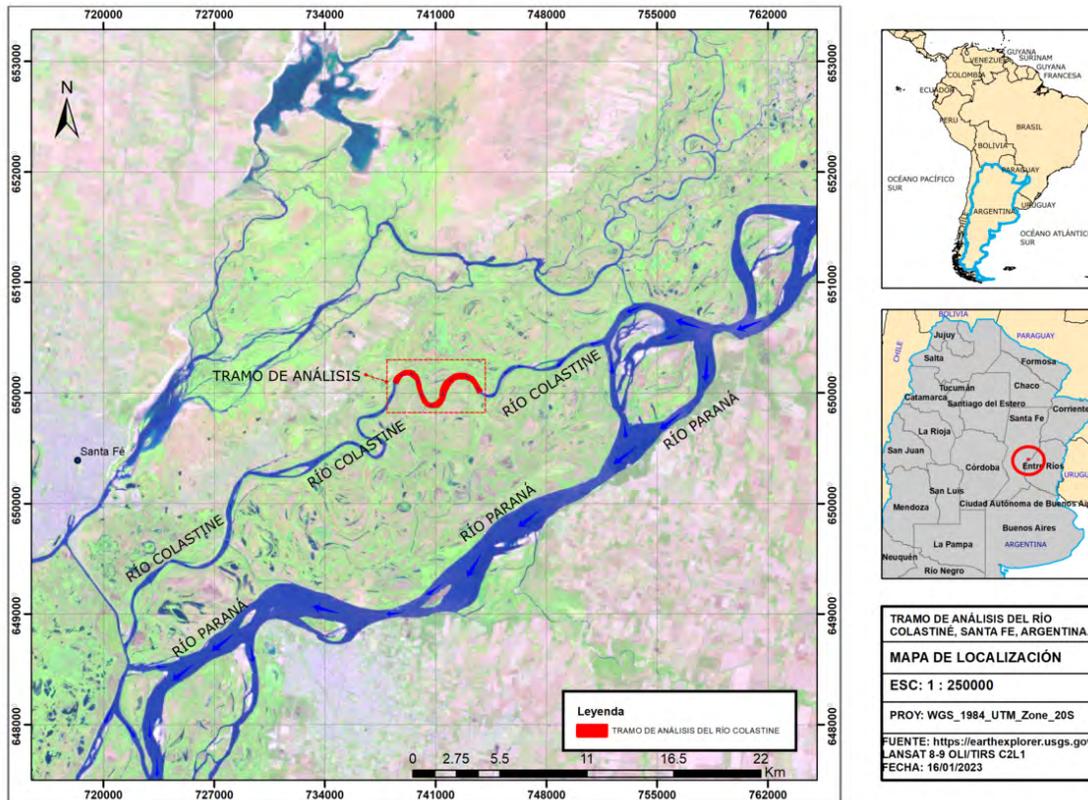


Figura 5.1. Tramo de análisis del río Colastiné, localizado en Santa Fe, Argentina.

El río Colastiné presenta un comportamiento dinámico, lo que provoca un cambio continuo en su morfología. En el río Paraná, Alarcón et al. (2003) encontraron con mediciones en un tramo del río, entre las localidades de Villa Urquiza y el Túnel Subfluvial Hernandarias que la carga de lavado representa alrededor del 90 % del transporte total de sedimentos, y que la relación del transporte de la carga promedio de fondo de sedimento suspendido (arena) a la carga de fondo presenta un factor de 10. En el río Colastiné, el material de fondo se compone casi por completo de arena de cuarzo (>90 %) y pequeñas cantidades de limos y arcillas (< 4%) (Drago y Amsler, 1998). El tamaño medio del sedimento del fondo suspendido es aproximadamente igual a 110 μm (0.11 mm) (Latosinski et al., 2014; Dominguez et al., 2021). Además, sobre las márgenes exteriores del río Colastiné, se aprecia vegetación sobre la llanura aluvial y árboles embebidos entre el cauce y la llanura aluvial, lo que modifica la estructura del flujo y la rugosidad. También, sobre la margen exterior se produce erosión lateral.

5.1.1. Sedimento en suspensión

Los investigadores e ingenieros asociados con el desarrollo y gestión de los recursos hídricos se enfrentan con problemas relacionados con ríos y canales aluviales. Algunos de esos problemas son: conservación y erosión de suelo, inundaciones y estructuras hidráulicas para su control, Meandro, cálculo del transporte de sedimento de fondo y en suspensión, sedimentación de cuerpos de agua y embalses, agradación y degradación de suelo en ríos, socavación local alrededor de estructuras hidráulicas o en las márgenes de los ríos, diseño de canales estables, rectificación de arroyos y ríos, navegación, entre otros. Determinar la cantidad de sedimento que es transportada por la corriente de un río es una de las variables

importantes en los problemas de transporte de sedimentos, ya que presenta una variabilidad espacio-temporal que depende de distintas variables hidrológicas e hidráulicas que influyen en la tasa de transporte de sedimento (Garde y Ranga, 2015, p. 2 a 13.).

Las características descritas anteriormente del río Colastiné indican que el mecanismo de transporte de sedimento que predomina es la suspensión y, por lo tanto, se esperan problemas de sedimentación, migración de márgenes, afectaciones en la navegación por efecto de la sedimentación, dragado, rectificación, diseño de estructuras hidráulicas de protección y diques, entre otros. El problema se agrava cuando la concentración de sedimentos finos aumenta y lleva a investigaciones sobre lodos y fango, y la presencia de estratos de sedimentos en la vertical, desde luego esto tiene un alto impacto en la biota acuática y en actividades humanas que se desarrollan entorno al meandro. Esta sección se enfoca en el problema de transporte de sedimentos en un meandro, un problema es determinar la cantidad de sedimento que es transportada por la corriente y otro es caracterizar su comportamiento espacial y su dinámica. Al tener conocimiento sobre esto, se pueden abordar soluciones a los distintos problemas que se afronten y establecer diversos escenarios que permitan minimizar impactos negativos.

La concentración de sedimento suspendido en la columna de agua se incrementa a medida que el meandro se desarrolla en la planicie y/o cerca de la desembocadura. El principal problema del sedimento que viaja en suspensión es que en alguna parte se va a depositar, y generalmente lo hace en las zonas bajas en donde el gradiente hidráulico también es bajo, esto ocasionará algún problema como los descritos en el párrafo anterior. Una de las condiciones para que se desarrolle el depósito de material grueso es que la velocidad del flujo disminuya, y favorezca el proceso de asentamiento de la partícula, otra condición puede ser inducida por el cambio de pendiente de un canal, a pendiente suave, o el ensanchamiento del ancho del canal o transición abrupta, en cualquier caso, se busca que la velocidad disminuya. Para material fino la condición de sedimentación se puede inducir por agentes floculantes.

A lo largo del trayecto principal del meandro, se presentan problemas de sedimentación, por lo tanto, a menudo requiere una frecuente operación de dragado, en donde se remueven grandes cantidades de material; y en algunos casos, se superan varios o cientos de millones de metros cúbicos anualmente, los trabajos se realizan con el fin de salvaguardar la navegación de embarcaciones, flora y fauna acuática, así como la vida de las personas con el fin de evitar inundaciones, y mitigar la migración de los meandros en las cercanías a la ciudades. En la zona de análisis del río Colastiné se tienen vestigios de la migración de los meandros, con tiempos de escala relativamente grande (décadas).

Los procesos de transporte de sedimento en suspensión tienen una interacción importante en la vertical, la CS_s es máxima en el fondo y disminuye hacia la superficie libre. La mezcla de agua-sedimento se puede considerar como un fluido Newtoniano, bajo ciertas consideraciones, en el cual se da un balance entre el proceso de mezclado turbulento en la columna de agua y la velocidad de caída del grano de sedimento. Esta consideración es válida, para bajas concentraciones de sedimento y cuando se trata de sedimento no cohesivo. Sin embargo, el análisis es más complejo a medida que el diámetro de la partícula disminuye y tiende al análisis del sedimento cohesivo. Incluso Winterwerp (2001), estudia los efectos estratificados por la interacción entre la suspensión de grano fino cohesivo y no cohesivo, ya que es complejo vislumbrar el límite para las suspensiones bajo este enfoque en ambientes costeros o de estuarios, y su análisis no estaría lejos de aplicarse a ríos de planicie. Además, revela que la interacción de los efectos de estratificación de grano fino y el flujo turbulento, pueden ocasionar una modificación importante en los perfiles de velocidad, y esto se ha demostrado

en experimentos de laboratorio como los de Vanoni (1946) que analiza tamaños de grano en suspensión de $100\ \mu\text{m}$ (0.1 mm), $160\ \mu\text{m}$ (0.16 mm), y $233\ \mu\text{m}$ (0.233 mm); en sus conclusiones argumenta que existen pequeñas diferencias en los perfiles de concentraciones medidos con respecto a los teóricos, resaltando la zona cercana al fondo y las diferencias son importantes a medida que el sedimento es más fino, también indica que el coeficiente de transferencia de sedimento (ε_s) no es igual al coeficiente de transferencia de momentum (ε_m), y plantea la idea que la constante de von Kármán (el coeficiente κ) disminuye con la concentración de sedimentos, lo que tiene un impacto en el perfil de velocidades, esto también se asocia a la flotabilidad de los sedimentos lo que ocasiona un amortiguamiento en la turbulencia. Además, la carga de sedimento puede ser un factor en el desarrollo de flujos secundarios en ríos, que se discute más adelante. Una observación importante, es que, en una prueba, Vanoni (1946) indica que la velocidad en el fondo difiere de la ley logarítmica de velocidad.

Chien y Einstein (1955) también desarrollaron experimentos de laboratorio en un canal, con diámetros de arena que van desde los 94 a $150\ \mu\text{m}$ (0.094mm a 0.150mm), las concentraciones son mayores que las reportadas por Vanoni (1946), y también concluyen que existe una disminución de κ con el incremento de la concentración, aunque Coleman (1981) argumenta lo contrario. Coleman (1981) analizó las suspensiones con diámetros de granos de $105\ \mu\text{m}$ (0.105 mm), $210\ \mu\text{m}$ (0.210 mm) y $420\ \mu\text{m}$ (0.42 mm), con partículas de cuarzo y feldespato, en un canal recto de lucita de 15 m de longitud por 0.035 m de ancho, en donde analizó la idea inicial de Vanoni (1946), sobre el comportamiento de κ y su efecto en los perfiles de velocidad, concluye que κ no varía con la concentración de sedimentos, pero ésta última si modifica los perfiles de velocidad. En su trabajo, indicó que el número de Richardson (Ri) es un parámetro de similitud bueno para describir la medida ponderada de la concentración total de la suspensión y que tiene una correlación implícita con el tamaño de partícula de sedimento en suspensión, argumenta que la forma de evaluar κ es incorrecta en los trabajos previos (Coleman, 1981, p. 227).

Winterwerp (2001) analizó los efectos de estratificación inducidos por la interacción entre suspensiones de sedimentos cohesivos y no cohesivos de grano fino en un flujo turbulento. En un trabajo posterior, el autor indicó que cuando se excede la capacidad de carga de sedimento no cohesivo de un flujo turbulento, los granos del material se depositan y forman un fondo rígido (acorazamiento del río), y se adapta un nuevo equilibrio en la carga de sedimentos, la cual disminuye (Winterwerp, 2006). Sin embargo, en aplicaciones prácticas, la recolección de las muestras de sedimento contendrán sedimento cohesivo y no cohesivo.

Cuando se tienen sedimentos finos y no cohesivos, se presenta una capa de lodo fluido sobre el fondo ya que se depositan los flóculos de sedimento cohesivo, por efecto de la alta cantidad de flóculos contenidos en la columna de agua. Es así como se forman dos capas, y la capa inferior es más densa, esto es un sistema de dos capas de fluido. Debido a que la mayor turbulencia se desarrolla en la capa inferior por efecto de la fricción, se produce un amortiguamiento importante de los procesos de mezclado vertical inducidos por la flotabilidad, lo que disminuye aún más la capacidad de carga. Esto da como resultado un colapso catastrófico del campo de turbulencia y también del perfil de concentración, a esto se le denominó saturación, y la concentración correspondiente se denomina concentración de saturación, c_s (Winterwerp, 2006). Este autor derivó una ley de escala para este comportamiento de saturación de la teoría clásica del flujo estratificado, desarrollando un modelo numérico unidimensional, en donde a partir de una concentración inicial, las capas o isolutas (líneas de concentración constante) se mantienen constantes sobre la vertical, pero al aumentar la concentración, el perfil de concentración colapsa, generando que la concentración se establezca en el fondo formando una

capa horizontal de lodo-fluido. Por lo tanto, este perfil de CS_s ya no sigue el comportamiento planteado por Rouse (Rouse, 1939), y se identifica claramente por el colapso del perfil de la concentración (caída en vertical). Su modelo lo implementó en el río Amarillo, y encontró que, en concentraciones de sedimentos en suspensión bastante bajas, se generó una estratificación por efectos de flotabilidad inducidos por los sedimentos; concentraciones del orden de unos 100 mg/l.

Winterwerp (2006) definió el concepto de saturación cuando un flujo turbulento colapsa, y el número de Richardson (Ri) excede un valor crítico (Ri_c); define el número de Richardson (Ri) como un parámetro de eficiencia para el mezclado vertical, esto es, la energía requerida para mezclar sedimentos sobre la columna de agua y la energía cinética disponible proporcionada por el flujo. Es así que, para una condición hidrodinámica dada el número de Richardson (Ri) puede aumentar a medida que la concentración aumenta, y alcanzar un valor crítico, en el que el campo de flujo turbulento colapsa, siendo el Ri_c , el límite entre condiciones *subsaturadas* y *supersaturadas*, esto es, si $Ri < Ri_c$ la condición es *subsaturada*, y si $Ri > Ri_c$, la condición es *supersaturada*. Winterwerp (2006) también destaca que a concentraciones de carga de sedimento muy pequeñas los efectos de flotabilidad inducidos por sedimentos no son importantes, pero para concentraciones mayores, los efectos de flotabilidad inducidos por sedimentos se vuelven importantes y afectan el mezclado vertical, esto en régimen *subsaturado*. Además, cuando la concentración sigue aumentando, se exceden las condiciones de capacidad y la suspensión se satura, se presenta un colapso del campo de la turbulencia. El autor establece cuatro regímenes:

- condiciones *sobresaturadas* ($Ri > Ri_c$); es decir, el flujo turbulento es inestable y no puede transportar la carga de sedimentos disponible,
- suspensiones *subsaturadas* de baja concentración con números Ri pequeños sin interacción sedimento-fluido; la cantidad de sedimentos transportados por la corriente está muy por debajo de su capacidad,
- suspensiones *subsaturadas* de alta concentración con números Ri elevados, pero por debajo del Ri_c , con interacciones sedimento-fluido pronunciadas; la cantidad de sedimento es transportado por el flujo o está cerca de su capacidad, y
- suspensiones *subsaturadas* de hiperconcentración con grandes números de Ri , pero por debajo del Ri_c , con pronunciadas interacciones sedimento-fluido.

5.2. Preguntas de investigación

¿Cuál es la precisión de modelo numérico promediado en la vertical y uno tridimensional para calcular el campo de velocidades (U) y la concentración de sedimentos en suspensión (CS_s) en un meandro caracterizado por grandes curvas, con una alta relación de ancho-profundidad y de bajo gradiente?, y ¿Por qué el núcleo de máxima Concentración de sedimentos en suspensión no sigue el núcleo de máxima velocidad?

La última pregunta fue planteada en las conclusiones de la investigación realizada por Dominguez et al. (2021).

5.3. Metodología

Se utiliza la modelación numérica, primero se resuelven las ecuaciones de Saint Venant y después las ecuaciones de Navier-Stokes con promedios de Reynolds (RANS, por sus siglas en inglés). Se resuelven las ecuaciones de momentum, acopladas con las ecuaciones de la turbulencia y las ecuaciones transporte de sedimento. La solución de estas ecuaciones se obtiene mediante esquemas numéricos y procesos iterativos junto con la optimización de procesos mediante equipo de alto rendimiento (supercómputo). El software utilizado es Telemac-Mascaret EDF-R&Dc. (2020). Con el objetivo de mejorar la aproximación de la modelación numérica se comparan los resultados con la información de campo in situ del río Colastiné, esta información se tomó de la campaña de medición reportada por Dominguez et al. (2021). Esta información permite validar los resultados de los escenarios de modelación numérica y evaluar si se representa adecuadamente la dinámica de flujo y sedimento en suspensión en un meandro.

5.3.1. Mediciones in situ del campo de velocidad y la CSs

5.3.1.1. Batimetría y geometría del meandro

Actualmente, es posible obtener información a partir de una imagen, esto al implementar herramientas de procesamiento de imágenes o toolbox, (Gonzalez et al., 2009; Blanchet y Charbit, 2013), disponibles con el software Matlab®(MathWorks, 2000). Estas herramientas se utilizaron para obtener la información de la batimetría correspondiente al meandro Colastiné reportada por Dominguez et al. (2021).

El procedimiento para obtener la información fue el siguiente: La imagen original se presenta en la Figura 5.2a), reportada por Dominguez et al. (2021). En la Figura 5.2b) se eliminó la información para facilitar el análisis sobre la zona de interés. Se realizó un filtro de la imagen en la cual se eliminan los píxeles que no son necesarios, por ejemplo, el color negro que corresponde al borde en donde termina la escala de colores y a las marcas que indican las secciones 1 a 12 (Figura 5.2b)). Con la información previa se realiza un barrido para identificar el primer elemento de abajo para arriba y viceversa, esto permitió identificar los bordes que componen el límite de la curva del meandro, que corresponden a la frontera (Figura 5.2d)). Se realizó un ajuste de la información con base en la escala gráfica reportada por Dominguez et al. (2021), y se implementó un sistema local para realizar el análisis numérico. En la Figura 5.2e) se muestra la información de la batimetría que se utilizó en la modelación numérica y, en la Figura 5.2f) se identifican las doce secciones sobre las que Dominguez et al. (2021) presentó los resultados de las mediciones del campo de velocidades y la concentración de sedimentos en suspensión, esta información se utilizó en el proceso de calibración del modelo numérico que se describe más adelante.

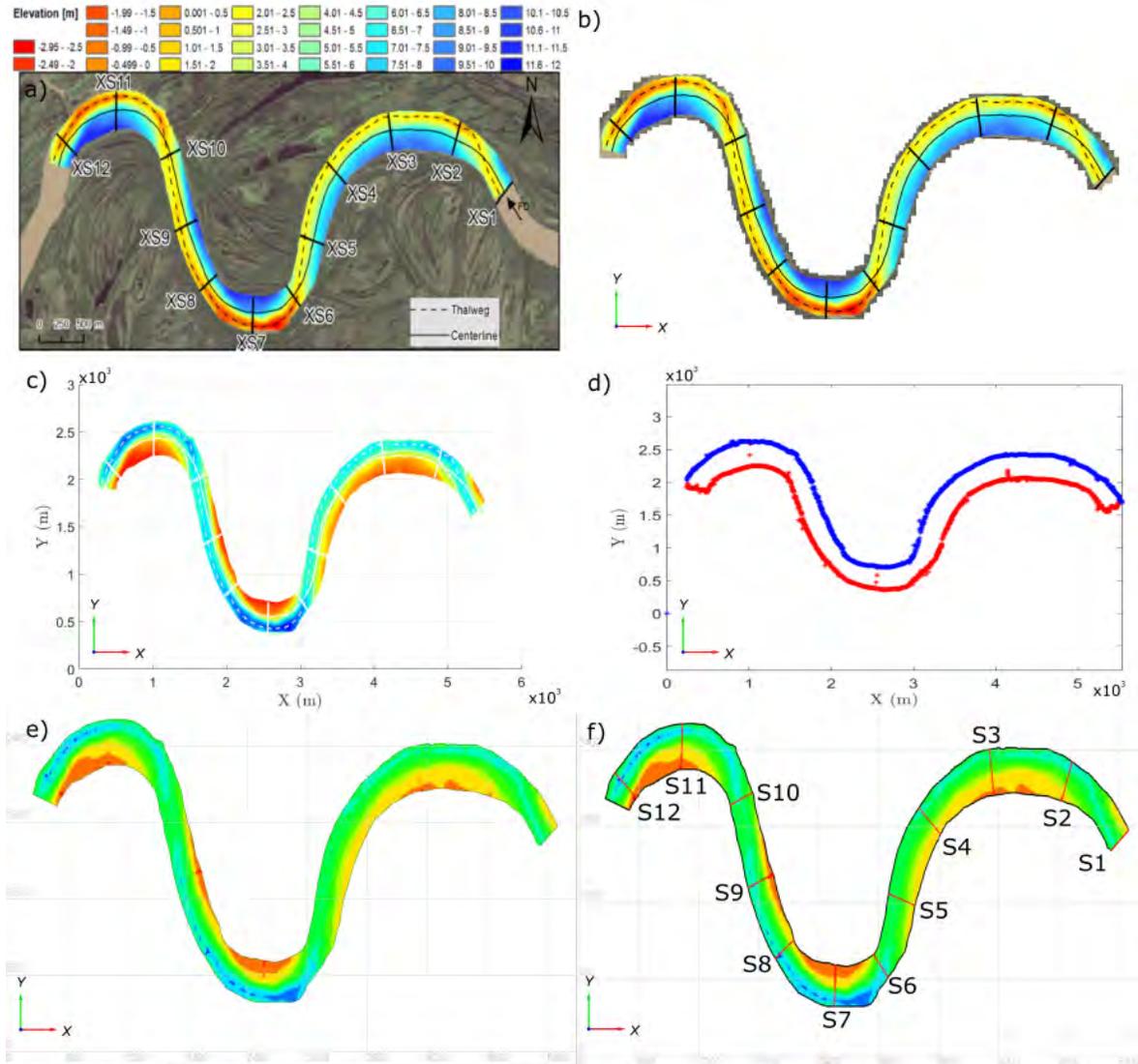


Figura 5.2. Batimetría y geometría del meandro Colastiné, a) Batimetría reportada por Dominguez et al. (2021), b) imagen a procesar, c) Filtro en imagen que elimina la información no necesaria, d) Cálculo de coordenadas que conforman la frontera del dominio, e) geometría utilizada en la modelación numérica, y f) secciones de medición.

5.3.1.2. Campo de velocidades in situ

Se capturaron las imágenes de cada una de las doce secciones correspondientes al campo de velocidades; y se estableció una relación para determinar la geometría de la sección transversal con la escala gráfica horizontal y vertical, y con la escala de colores se determinó la magnitud de las velocidades asociadas con a cada pixel de la imagen, este proceso se desarrolló en Matlab®(MathWorks, 2000), y se describe a continuación:

-
- A. Lectura de imagen con información de la magnitud la Velocidad (U), Figura 5.3b)
 - B. Se identificó la velocidad (U) asociada a cada pixel según la escala de gráficos reportada
 - C. Se ajustó la información con base en la escala gráfica y se estableció un sistema coordinado Y-Z, en donde Y corresponde al ancho de sección, y Z a la elevación, ambas unidades en metros
 - D. Se eliminaron las magnitudes asociadas al color negro que corresponden a la escala gráfica y el borde de la sección (límite inferior), al quitar esta información se tiene un impacto en la información de la magnitud la velocidad (U) dentro de la sección
 - E. Se realizó un sobreposicionamiento de la información de la sección analizada con la geometría de la misma sección determinada en el apartado anterior (batimetría y geometría del meandro), para revisar los factores de ajuste tanto horizontal como vertical y tener una descripción de ajuste más adecuada de la información, este proceso se repitió de los incisos C-E hasta alcanzar una descripción que se consideró adecuada y minimizar errores, Figura 5.3c)
 - F. Se realizó un proceso de remoción de información mediante el gradiente de la magnitud la velocidad (∇U), ya que se identificó que los mayores gradientes corresponden al cambio que se localizan en los límites de la sección (asociados al color negro, cercanos al borde), Figura 5.3d)
 - G. Se determinaron las magnitudes de la velocidad (U) localizadas dentro de la sección de medición y se restauró la información eliminada en el paso D con la información inicial, de esta manera se obtuvo la información de la magnitud de la velocidad tridimensional (U), Figura 5.3e)
 - H. Se calcularon las velocidades promediadas en la vertical, reportadas en color azul, Figura 5.3f), y finalmente
 - I. Se calcularon las velocidades promediadas a lo ancho de la sección en longitudes de 5m; la longitud está asociada al tamaño del elemento de la geometría de la malla, esto con la finalidad de comparar la información recolectada in situ y la calculada numéricamente. En la Figura 5.3f) se reportan las distribuciones de la velocidad vs el ancho adimensional de la sección (b/B,-); la información promediada y filtrada se indica en color rojo, y se utilizó en el proceso de calibración del modelo numérico.

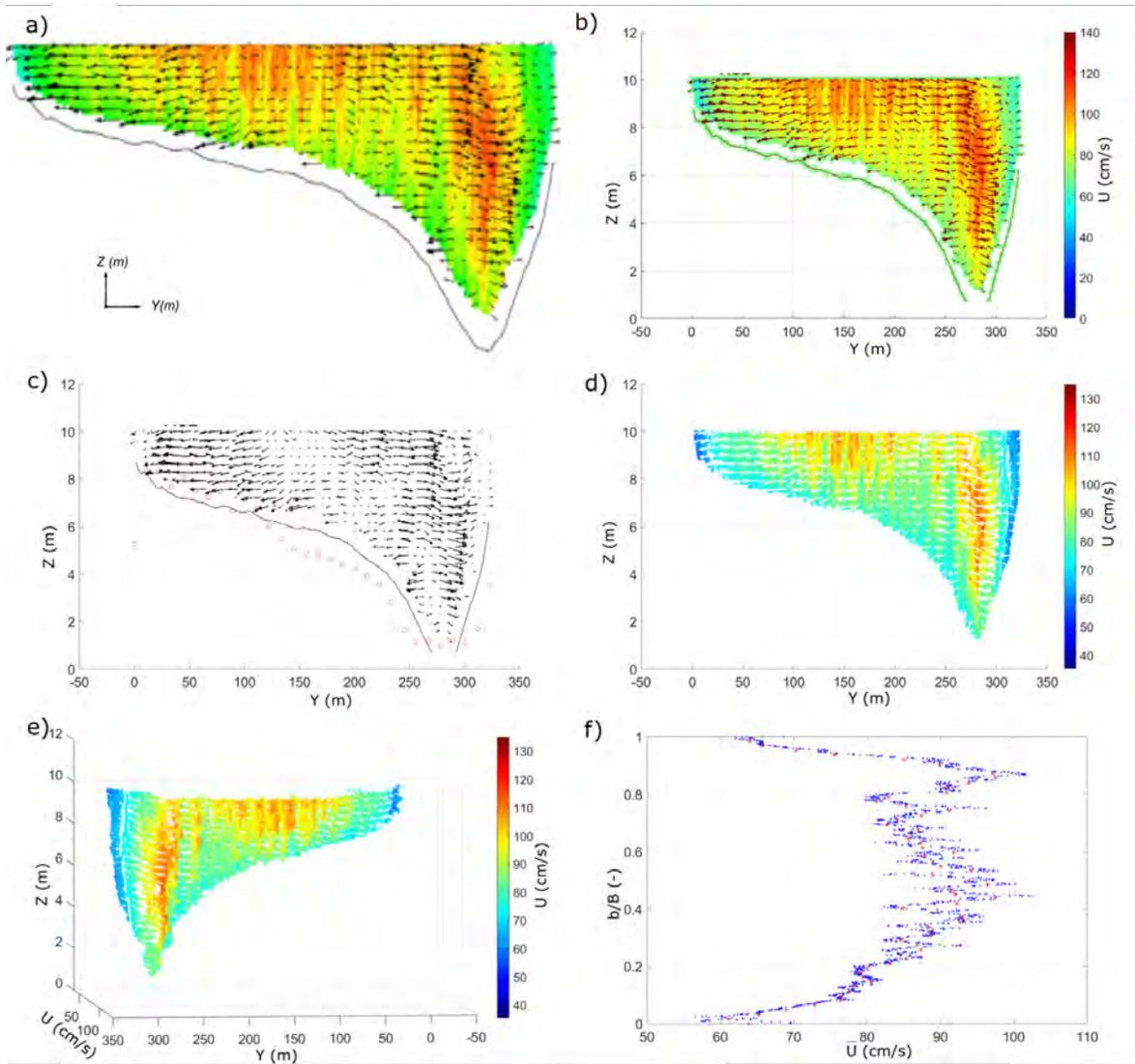


Figura 5.3. Proceso de obtención del campo de velocidades sobre el río Colastiné, en sección 2 a) Magnitud de velocidades (U), información de entrada, reportada por Dominguez et al. (2021), b) Lectura de la U en Matlab®(MathWorks, 2000) c) sobreposicionamiento de la sección transversal con la información de la batimetría, d) remoción del borde y vectores de velocidad, e) filtro ∇U , f) cálculo de la velocidad promediada en la vertical.

5.3.1.3. Concentración de sedimento en suspensión in situ

El procedimiento descrito anteriormente se utilizó para obtener la información de la concentración de sedimentos en suspensión (CS_s) en las doce secciones localizadas sobre el río Colastiné, esto al cambiar la variable de análisis U por CS_s y las imágenes a procesar. En la Figura 5.4, se muestra este procedimiento descrito de forma gráfica y los resultados, se utilizaron dos filtros adicionales. La información obtenida se utilizó para calibrar el comportamiento de la CS_s calculada con el modelo numérico.

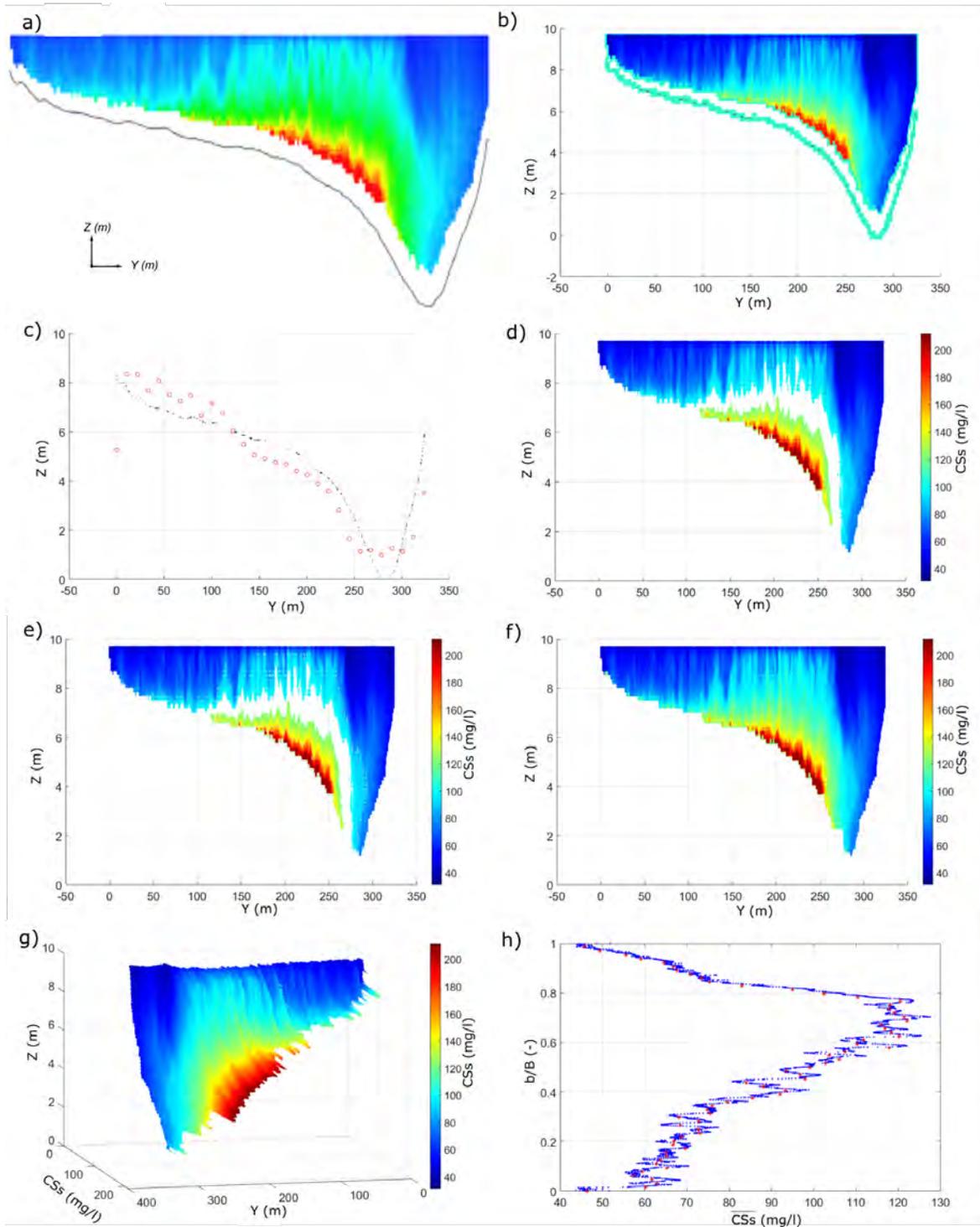


Figura 5.4. Proceso de obtención de la concentración de sedimento en suspensión (CSs) sobre el río Colastiné, en sección 2, a) CSs reportadas por Dominguez et al. (2021), b) Lectura de la CSs , c) sobreposicionamiento de información, d) remoción del borde, e) filtro ∇CSs , f) restitución de elementos con información de la CSs , g) información obtenida de la CSs , h) CSs promediada en la vertical.

5.3.2. Proceso del transporte de sedimento en la columna de agua

Determinar la concentración de sedimento en suspensión requiere la solución de la ecuación de balance de masa de sedimento o ecuación de continuidad, en donde generalmente se analiza bajo el enfoque de un elemento diferencial de volumen de fluido. Por ejemplo, el comportamiento de las partículas en suspensión puede ser asumido por analogía del proceso de difusión-dispersión, sin embargo, este modelo no toma en cuenta adecuadamente todas las influencias pero ha explicado muchos problemas de suspensión (Graf, 1984, p. 164).

El análisis de la continuidad requiere que la tasa de cambio de masa de sedimento dentro del elemento diferencial de volumen, es igual a la masa de sedimento neta dentro del elemento por unidad de tiempo. Además, el balance se aplica a cada tamaño de clase i , debido a la gran cantidad de partículas (Mehta, 2013, p. 356). La descripción detalla del balance de masa de sedimento en carga suspendida puede encontrarse en Garcia (2008)[p. 107 a 123], Mehta (2013)[p. 356 a 367] y Julien (2010)[p. 173-201], entre otros.

Desde el punto de vista del análisis numérico y matemático, la ecuación que describe la conservación de masa de la suspensión de sedimento es la ecuación de Advección-Difusión, que es válida solo para suspensiones diluidas de partículas que no son demasiado gruesas, es decir, $d_p \leq 0.5 \text{ mm} = 500 \mu\text{m}$ (Garcia, 2008, p. 108); esto solo es el límite superior, en realidad no se conoce el límite inferior o hasta qué punto es válida la teoría, teniendo en cuenta las propiedades físico-químicas del material transportado. Esta ecuación también se emplea para el transporte de sustancias o contaminantes que viajan en un fluido, en algunos casos se adicionan los mecanismos de Reacción para los procesos químicos (Moreles y Botello, 2007, p. 23). El valor de separación a $60 \mu\text{m}$ (0.06 mm) para discriminar sedimentos cohesivos y no cohesivos es convencional (EDF-R&Dd., 2020, p. 50), este valor es diferente según el país, por ejemplo, $63 \mu\text{m}$ (0.063 mm) en los Países Bajos, $75 \mu\text{m}$ (0.075 mm) en USA, como lo señalan Winterwerp y Kesteren (2004). Además, la agregación de flóculos puede conducir a la formación de macro-flóculos mayores de $100 \mu\text{m}$ (0.1 mm). Este tema ha sido abordado por Winterwerp (2001).

5.3.3. Velocidad de caída y perfiles de la CSs en la vertical

En la Tabla 1 se reportan los valores medios de la concentración de sedimento en suspensión (\overline{CSs}) y de la magnitud de la velocidad (\overline{U}) en las doce secciones analizadas, obtenidos de la información in situ (Dominguez et al., 2021). Con respecto a la \overline{CSs} se determinó un valor medio de 86.22 mg/l y la \overline{U} fue de 0.88 m/s, en donde se identificó que las magnitudes se mantuvieron constantes a lo largo del meandro, por lo que, los siguientes análisis se sustentan con base en esta información. En el primer análisis numérico la suspensión es tratada como un trazador, ya que: 1) la concentración se mantiene prácticamente constante entre secciones, al igual que las velocidades, y 2) las \overline{CSs} más altas se localizaron en el talud cercano a la margen en donde se deposita material; margen interna antes de la mayor curvatura (punto de inflexión) y margen externa después de la mayor curvatura.

Dominguez et al. (2021) identificaron que el núcleo de concentraciones máximas no sigue el núcleo de velocidades máximas, es decir, se localizaron en diferentes zonas dentro de la sección en el tramo de medición. La velocidad máxima se localizó sobre la margen interna antes de la máxima curvatura y después cambia hacia la margen externa por efecto de la geometría del meandro y las características hidráulicas del flujo. Los autores indican que este fenómeno es característico en grandes ríos meándricos, y se asocia al flujo helicoidal y

al desarrollo de células secundarias y/o contrarrotantes identificadas en canales curvos de laboratorio descritos anteriormente, inclusive se habla de que el flujo helicoidal es la causa del meandro (Tanner, 1960). Con respecto a las mediciones in situ, la CSs máxima se localizó en la margen interna antes de la curvatura máxima y en la margen externa después de este punto; los autores indicaron claramente que la CSs máxima no sigue el punto más bajo de la sección (talweg).

Tabla 5.1: Concentración de sedimentos en suspensión media y velocidad media en las secciones definidas

| Sección | \overline{CSs} | \overline{U} |
|---------|------------------|----------------|
| [-] | mg/l | m/s |
| 1 | 87.47 | 0.90 |
| 2 | 84.47 | 0.85 |
| 3 | 80.00 | 0.87 |
| 4 | 81.96 | 0.90 |
| 5 | 83.96 | 0.90 |
| 6 | 83.21 | 0.90 |
| 7 | 87.23 | 0.86 |
| 8 | 86.67 | 0.92 |
| 9 | 91.82 | 0.90 |
| 10 | 89.90 | 0.90 |
| 11 | 93.07 | 0.82 |
| 12 | 84.84 | 0.82 |
| Medio | 86.22 | 0.88 |

Se realizó un análisis en la sección 1 de las concentraciones y velocidades reportadas por Dominguez et al. (2021), con el procedimiento descrito anteriormente. Se identificaron dos puntos importantes: el primero localizado a 50 m a partir de la margen izquierda (MI), en donde se presenta la velocidad máxima, y el segundo punto, localizado a 123 m de la MI a la MD, en donde se localizó el perfil de máxima concentración, la longitud sobre esta sección y entre estos dos puntos fue de 73 m. Los perfiles de la velocidad y la concentración de sedimento en suspensión se muestran en la Figura 5.5.

El análisis del inicio de movimiento en la sección 1 de entrada utilizando el criterio de Shields indicó un $\tau_* = 1.58$ y $\tau_* = 1.33$, en donde τ_* es el número adimensional de Shields, para los puntos de máxima velocidad y concentración, respectivamente. En la Figura 5.6 se presenta el diagrama de Shields correspondiente al inicio de movimiento de la partícula con tres criterios, el primero corresponde al criterio de Brownlie (1981) (García, 2008, p. 50), el segundo corresponde al criterio de Maza (Maza y García, 1996, Ec. 10.2.18a, p. 27), y el tercero al criterio de Maza (Maza y García, 1996, Ec. 10.2.19a, p. 27) evaluado con el Número

de Yalin (D_*), indicados como C1, C2 y C3.

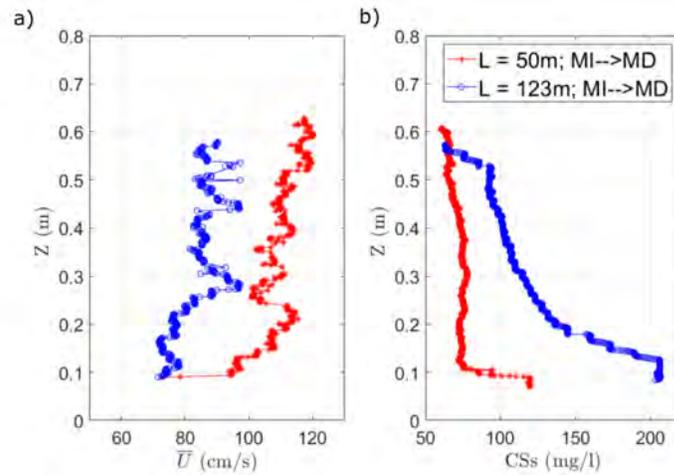


Figura 5.5. Perfiles en la profundidad en la sección 1, a) perfil de velocidades (cm/s) y b) perfil de CSs (mg/l)

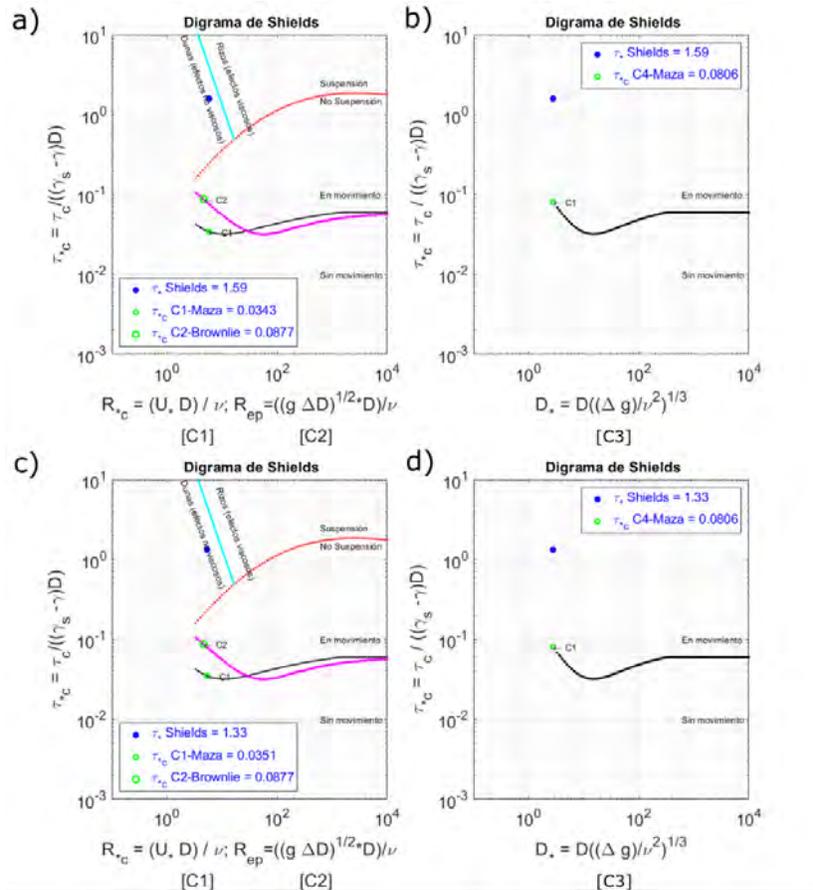


Figura 5.6. Diagramas de Shields en sección 1, a) y b) en punto de máxima velocidad, c) y d) en punto de máxima concentración de sedimento suspendido.

Con el primer criterio se determinó un esfuerzo cortante crítico de Shields (τ_{*c}) de 0.087,

por lo tanto, en ambos puntos ($L=50\text{m}$ y $L=123\text{ m}$) se presentó el movimiento de la partícula, ver Figura 5.6a) y Figura 5.6c). En estas mismas figuras se identificó que la partícula viajó en suspensión y se localizó en la zona del desarrollo de dunas, en donde los efectos viscosos no son considerables. El segundo criterio, se localizó por debajo del criterio de Brownlie (1981). En estos puntos, los valores promedios en la vertical son \bar{U} de 1.095 m/s y 0.836 m/s, mientras que la \overline{CSs} fue de 74.18 mg/l y 122.29 mg/l, en los puntos $L = 50\text{ m}$ y $L = 123\text{ m}$, respectivamente. El tercer criterio indicó un esfuerzo cortante crítico (τ_{*c}) de 0.0806, por lo tanto, en ambos puntos se presentó el movimiento de la partícula, ver Figura 5.6b) y Figura 5.6d).

El cálculo los perfiles de concentración de sedimento suspendido, se hizo con la siguiente ecuación (Mehta, 2013, p. 363):

$$\frac{C}{C_a} = e^{\left(\frac{w_s}{\overline{D_{s0}}}\right)(Z-Z_a)} \quad (5.1)$$

En donde w_s es la velocidad de caída, $\overline{D_{s0}}$ es la difusividad bajo la condición de flujo neutral (es decir, densidad de fluido uniforme), y esta depende de la estructura del flujo. En general, se conoce que las partículas no siguen el movimiento turbulento de los flujos de agua, esto indica que el movimiento de las partículas es no isocinético (Mehta, 2013, p. 363). Estas diferencias de los movimientos aumentan con la turbulencia y la falta de isocinética se ha atribuido al efecto de la fuerza centrífuga generando la eyección de las partículas a partir de los remolinos turbulentos (Mehta, 2013, p. 363). Otra característica es que algunas partículas se asientan después de ser atrapadas por los vórtices turbulentos y esto también contribuye a la diferencia de movimientos entre las fases fluido-sedimento, esto tiene un impacto en las difusividades entre las fases y generalmente no son iguales. La difusividad de masa neutral se calcula como (Mehta, 2013, p. 363):

$$\overline{D_{s0}} = Sc^{-1} \overline{\varepsilon_m} \quad (5.2)$$

En donde, $\overline{\varepsilon_m}$ es la difusividad de momentum promediado en la profundidad neutro, y Sc es el número de Schmidt, generalmente considerado igual a 1 (EDF-R&Db., 2020; Garcia, 2008, p. 29, p. 772). El comportamiento de la difusividad de momentum $\overline{\varepsilon_m}$ es en forma parabólica, el valor promediado en la vertical puede aproximarse a partir de (Mehta, 2013; Garcia, 2008, p. 52; p. 110):

$$\overline{\varepsilon_m} = \kappa u_* h \quad (5.3)$$

Por lo tanto, la Ecuación 5.1 se reduce la ecuación lineal Ecuación 5.4 y corresponde con la ecuación del perfil de concentración de Rouse (Rouse, 1938, p. 552). Es así como se determina una relación del comportamiento de la CSs en la profundidad, asociada a la velocidad de caída de la partícula de sedimento y el Número de Rouse, z , este método de ajuste es el MAI indicado en la Figura 5.7.

$$\frac{C}{C_a} = \left(\frac{z_a (h - z)}{z (h - z_a)} \right)^{\frac{w_s}{\kappa u_*}} \quad (5.4)$$

En donde w_s es la velocidad de asentamiento (constante), y las difusividades de masa (sedimento) y de momentum se igualan. La relación $w_s/\kappa u_*$ se conoce como número de

Rouse, z , (Rouse, 1939, p. 552). Al recomodar la ecuación, se realizó un análisis de regresión lineal y se calculó la velocidad de asentamiento (w_s) al asociarla con la pendiente de la recta de la regresión lineal; este procedimiento es el segundo método de ajuste, MA2, indicado en la Figura 5.7.

En la Figura 5.7, se muestran los perfiles de concentración de sedimentos y los ajustes por los métodos 1 y 2. En la Figura 5.7a) y Figura 5.7c), los perfiles se localizan en la zona de mayor velocidad dentro de la sección 1 ($L=50\text{m}$, MI a MD), y en la Figura 5.7b) y Figura 5.7d), los perfiles se localizan en la zona de mayor CSs ($L=123\text{m}$, MI a MD). Para la zona de mayor velocidad se determinó que la w_s fue de 0.004 y 0.0044 m/s con un z del orden de 0.2, por lo métodos MA1 y MA2; note que las correlaciones son del orden de 0.7 y 0.75, respectivamente. En la zona de mayor CSs la velocidad de caída fue de 0.0069 y 0.0073 m/s, con un z del orden de 0.36, por lo métodos MA1 y MA2, aquí las correlaciones son del orden de 0.95. Estos resultados indicaron que la partícula presentó una mayor velocidad de asentamiento en la zona de mayor concentración con respecto a la zona de mayor velocidad. Además, el ajuste del perfil de la CSs en la zona de mayor velocidad no presentó un buen comportamiento desde el fondo hasta cerca del 40% de la profundidad, se observó un decaimiento o colapso en el perfil de la CSs en la vertical, en donde en la proximidad del fondo la CSs incrementó.

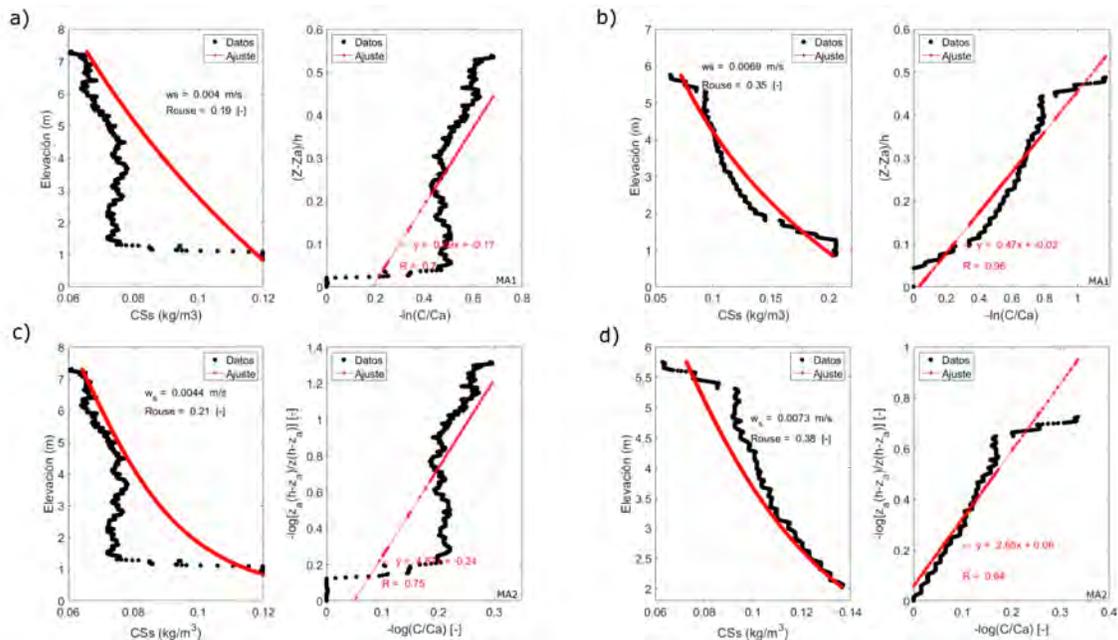


Figura 5.7. Perfil de concentración de sedimentos suspendidos, en sección 1, a) y c) en punto de máxima velocidad MA1 y MA2, b) y d) en punto de máxima concentración de sedimento suspendido MA1 y MA2.

Winterwerp (2006) indicó que los efectos de flotación en sedimentos suspendidos se observan en concentraciones bajas (del orden de unos 100 mg/l) tanto para sedimentos no cohesivos, como para los cohesivos. También definió la suspensión de lodo altamente concentrado como una suspensión de sedimento cohesivo de unos 100 a unos 1000 mg/l; y una suspensión de lodo de concentración baja es del orden de unos 10 a unos 100 mg/l. Lo anterior con base en el concepto de Concentración de saturación, C_s , que es una medida para la máxima carga de sedimento que puede ser llevada en suspensión por un flujo turbulento.

A concentraciones más allá de la C_s , el flujo comienza a sobresaturarse, por lo que, tanto el campo de flujo turbulento y el perfil de concentración, colapsan (Winterwerp, 1999, p. 2).

Según Julien (2010)[p. 188], la carga en suspensión es dominante ya que $u_*/w_s > 2.5$, en la zona de mayor velocidad ($u_*/w = 0.053/0.0044 = 12$), al igual que en la zona de mayor concentración ($u_*/w = 0.048/0.007 = 6.85$); y está en acuerdo con los diagramas de Shields mostrados, Figura 5.6. Los resultados indicaron una variabilidad en la velocidad de caída y el número de Rouse a lo ancho de la sección. La w_s es de 4 mm/s y 7 mm/s, mientras que u_* es de 53 mm/s y 48 mm/s, en las zonas de máxima velocidad y concentración dentro de la sección de entrada, lo que indica que $w_s \ll u_* \approx w'_{RMS}$ (Naot et al., 1993), y con base en el argumento de Uittenbogaard (1994) es posible tratar la mezcla de agua-sedimento como un fluido de fase única. Además, esto indica que las partículas que viajan en el seno del fluido siguen los movimientos del flujo turbulento, excepto en el proceso de velocidad de caída (Winterwerp, 2001, p. 4). Muste y Patel (1997), indican que incluso diámetros de partículas del orden de 250 μm (0.25 mm) siguen el campo turbulento en ambientes costeros y que es posible tratar la mezcla agua-sedimento como un fluido monofásico.

5.4. Modelo Numérico

5.4.1. Ecuación Advección-Difusión

Se realizó el análisis numérico con las ecuaciones de Saint-Venant, resueltas con el sistema de modelación matemática Telemac-Mascaret (EDF-R&Da., 2020). La solución de la Ecuación de Advección-Difusión (EAD) calculó el sedimento en suspensión al acoplar el módulo de hidrodinámica y transporte de sedimento (GAIA), por lo que, también fue necesario establecer las condiciones de frontera y las condiciones iniciales del problema analizado, esto debido a que el sedimento en suspensión se considera como un trazador pasivo, y es importante ya que se estableció que la concentración de sedimento o trazador no altera el campo hidrodinámico del flujo (campo de referencia).

La EAD en su versión bidimensional (2DH) es (EDF-R&Dd., 2020, p. 11):

$$\frac{\partial hC}{\partial t} + \frac{\partial hUC}{\partial x} + \frac{\partial hVC}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(h\varepsilon_s \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(h\varepsilon_s \frac{\partial C}{\partial y} \right) + E - D \quad (5.5)$$

En donde, $C = C(x, y, t)$ es la concentración de sedimento suspendido promediado en la vertical expresada en g/l , U y V los componentes de la velocidad promediados en la profundidad en las direcciones x , y y , respectivamente, ε_s es la difusividad turbulenta del sedimento, a menudo relacionada con la viscosidad de remolino (turbulenta) $\varepsilon_s = \nu_t/\sigma_c$, en donde, σ_c es el número de Schmidt, h la profundidad del agua (EDF-R&Dd., 2020, p. 11).

El cálculo de la erosión (E) y depósito (D) de sedimento no cohesivo y su tasa de cambio, se realiza con la velocidad de caída que considera el diámetro del sedimento; para el depósito, ésta es afectada por la concentración de referencia ($C_{z=a}$) localizada a una elevación a , y se evalúa entre la interfaz de la carga de fondo y la carga suspendida; mientras que la erosión considera la velocidad de caída afectada por la concentración en equilibrio (C_{eq}) cerca del fondo determinada por una formula empírica (EDF-R&Db., 2020, p. 29). En el siguiente análisis se utilizó la ecuación de Zyserman y Fredsoe (EDF-R&Dd., 2020, p. 37). Por lo tanto, la tasa neta de flujo de sedimento es determinado con base en el concepto de concentración

en equilibrio.

En los casos tridimensionales, el transporte de sedimentos en suspensión se determina resolviendo la ecuación tridimensional de Advección-Difusión, expresada como (EDF-R&Dd., 2020, p. 12):

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} + \frac{\partial wC}{\partial z} - \frac{\partial w_s C}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_s \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon_s \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\varepsilon_s \frac{\partial C}{\partial z} \right) \quad (5.6)$$

En donde, $C = C(x, y, z, t)$ es la concentración de sedimento suspendido expresada en g/l , u, v y w son los componentes de velocidad en las tres direcciones x, y, z , respectivamente, ε_s es la difusividad turbulenta del sedimento, descrita anteriormente.

5.4.2. Ecuación de transporte de fondo

El transporte de sedimento y la morfología de fondo en Sisyphe se calcula con las ecuaciones de conservación de masa para sedimento o ecuación de Exner (Garcia, 2008, p. 69), acoplado con el modelo Telemac-2DH (EDF-R&Db., 2020, p. 19):

$$1 - \lambda \frac{\partial Z_b}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{Q}_b = 0 \quad (5.7)$$

En donde, $\mathbf{Q}_b = Q_{bx}\mathbf{i} + Q_{by}\mathbf{j}$ es el vector de la tasa de transporte volumétrico unitario sin poros, en m^2/s ; λ la porosidad del material del fondo, adimensional ($\lambda=0.4$); Z_b es la elevación del fondo, en m; E y D las tasas de erosión y depósito a la elevación $z = a$, correspondiente a la interfase entre la carga de fondo y la carga suspendida. El caudal de carga de fondo se calcula como una función de capacidad de transporte de sedimento, y al ser un vector, se puede descomponer, el ángulo α entre la dirección de la carga de fondo y la dirección del flujo es definido por la pendiente del fondo y la presencia de corrientes secundarias. Por otro lado, la tasa de transporte de sedimento inducido por el flujo en forma adimensional se expresa como:

$$\Phi_b = \frac{Q_b}{\sqrt{g(S-1)d^3}} \quad (5.8)$$

En donde, S es la densidad relativa, $S = \rho_s/\rho$, adimensional; ρ_s es la densidad del sedimento, en kg/m^3 ; ρ la densidad del agua, en kg/m^3 , d el diámetro característico de grano de sedimento para arenas, en m; y g , la aceleración de la gravedad, en m/s^2 . Se calculó Φ_b con la ecuación de Meyer-Peter & Müller. Para calcular el transporte de la carga de fondo generalmente es necesario calcularlo en función del Número de Shields (τ_*), adimensional.

$$\tau_* = \frac{F_c \tau_0}{Sgd} \quad (5.9)$$

En donde, τ_0 es el esfuerzo cortante cerca del fondo ($\tau_0 = \gamma h S_h$), en N/m^2 ; F_c es un factor de corrección para la fricción de superficie del grano; γ es el peso específico del fluido, en N/m^3 ; S_h , la pendiente de energía, en m/m. La profundidad h , es ligeramente menor cuando se desarrollan formas de fondo y, por lo tanto, la resistencia aumenta.

Al considerar que predomina el transporte de sedimento en suspensión en el río Colastiné, se utilizó el módulo de GAIA (EDF-R&Dd., 2020), que presenta un gran número de mejoras con respecto a Sisyphé (Audouin et al., 2019). En donde el flujo de carga de fondo unitaria se calcula en términos de la tasa de transporte seco, sin poros, y se resuelve la ecuación de Exner en función de la tasa de flujo de transporte de masa como (EDF-R&Dd., 2020, p. 18):

$$\mathbf{Q}_{mb} = \rho Q_b \quad (5.10)$$

En donde, \mathbf{Q}_{mb} es el vector de la tasa de transporte de carga de fondo unitaria sin poros, en $kg/(ms)$, y ρ la densidad, en kg/m^3 . Las consideraciones sobre al evolución del fondo, factores de aceleración, solución de la ecuación de Exner, se indican en (EDF-R&Dd., 2020, p. 35).

5.5. Modelación numérica

En la Tabla 5.2 se presentan algunas características hidráulicas determinadas en el meandro Colastiné. En donde, $z_{bs=in}$ es la elevación de fondo localizada en la sección de entrada, en m; $z_{bs=out}$ es la elevación del fondo localizada en la sección de salida, en m; $B_{s=in}$ es el ancho del río en la sección de entrada, en m; $B_{s=out}$ es el ancho del río en la sección de salida, en m; $y_{s=out}$, es la elevación del nivel de agua localizado en la sección de salida, que corresponde a la elevación de fondo más el tirante, en msnm; Q es el caudal medio que circula por el río Colastiné, m^3/s ; S_w es la pendiente hidráulica media del río, m/m; n es el coeficiente de rugosidad de Manning, se propone un coeficiente de $0.025 \text{ s/m}^{1/3}$. Además, con esta información se determina la curva elevaciones caudal para la sección de salida, que se presenta en la Figura 5.8. En la margen derecha (MD) se consideró un muro vertical o frontera vertical para el análisis de la curva Elevación-Caudal, debido a la ausencia de información.

Tabla 5.2: Condiciones hidráulicas para la modelación numérica.

| <i>Variable</i> | <i>Magnitud</i> | <i>Unidad</i> |
|-----------------|-----------------|---------------|
| $z_{bs=in}$ | 4.569 | msnm |
| $B_{s=in}$ | 235.77 | m |
| $z_{bs=out}$ | 2.435 | msnm |
| $B_{s=out}$ | 258.83 | m |
| n | 0.025 | $s/m^{1/3}$ |
| S_w | 3.25e-5 | m/m |
| y_{sout} | 11.607 | m |
| η_{sout} | 14.04 | msnm |
| Q | 2300 | m^3/s |

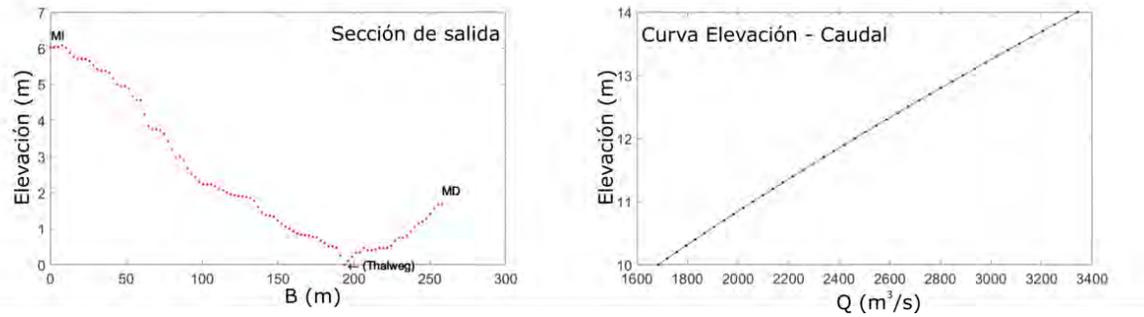


Figura 5.8. Sección de salida y curva elevación-caudal

En la Tabla 5.3, se presentan las coordenadas de los puntos correspondientes al inicio y fin de las doce secciones del análisis en cuestión, en estas secciones se reportaron las magnitudes de velocidad (U) y la concentración de sedimentos en suspensión (CSs). El punto 1 (P_1) corresponde al localizado en la margen izquierda (MI), mientras que el punto 2 (P_2) corresponde al localizado en la margen derecha (MD), en la última columna se reporta el ancho de la sección, las coordenadas corresponden a un sistema de referencia local utilizado en la modelación numérica para facilitar el análisis.

Tabla 5.3: Coordenadas de inicio-fin de secciones y anchos de secciones.

| Sección | P_1 - MI | | P_2 - MD | | Ancho de sección (m) |
|------------|------------|-----------|------------|-----------|----------------------|
| | X_1 (m) | Y_1 (m) | X_2 (m) | Y_2 (m) | |
| S1 | 5324.6 | 1614.9 | 5499.1 | 1775.1 | 236.9 |
| S2 | 4828.0 | 2004.1 | 4932.2 | 2309.9 | 323.0 |
| S3 | 4152.3 | 2045.9 | 4105.5 | 2406.5 | 363.6 |
| S4 | 3615.7 | 1740.3 | 3400.2 | 1950.1 | 300.8 |
| S5 | 3361.0 | 1183.1 | 3095.4 | 1275.0 | 281.1 |
| S6 | 3092.0 | 619.6 | 2945.2 | 798.4 | 231.4 |
| S7 | 2552.9 | 390.4 | 2564.8 | 716.8 | 326.6 |
| S8 | 1962.3 | 766.1 | 2149.5 | 912.4 | 237.6 |
| S9 | 1689.5 | 1321.4 | 1941.5 | 1430.0 | 274.5 |
| S10 | 1510.0 | 1969.6 | 1735.7 | 2068.1 | 246.3 |
| S11 | 1023.0 | 2250.7 | 1031.9 | 2607.8 | 357.2 |
| S12 | 574.5 | 2027.4 | 357.8 | 2223.3 | 292.2 |

5.5.1. Escenarios de modelación numérica 2DH

Con base en la información in situ procesada previamente, se establecieron tres escenarios de análisis de modelación numérica del campo de velocidades y la concentración de sedimentos suspendidos, que se reportan en la Tabla 5.4. El primer escenario de modelación

numérica (E1) se enfocó en determinar el mejor ajuste del campo de velocidades, aquí se analizaron dos coeficientes, el de rugosidad de Manning y cinco propuestas del coeficiente A_s , que corresponden a la producción de corrientes secundarias, manteniendo el coeficiente de disipación de corrientes secundarias constante ($D_s = 0.5$). El segundo escenario de modelación numérica (E2) se consideró acoplar el cálculo de la concentración de sedimento en suspensión (CSs) como un trazador, con base en los escenarios previos e implementando el de mejor aproximación. En el tercer escenario (E3) se resolvió el campo de velocidades y la concentración de sedimento en suspensión 3D, en donde se continuó el proceso de cálculo con mejor ajuste determinado por el E1 y E2.

Tabla 5.4: Escenarios de modelación numérica

| Escenarios | Ecuaciones | Variables de análisis |
|------------|---|--|
| E1 | Hidrodinámica 2DH | n (0.025,0.020) $A_s(3.5, 7, 10.5, 14, 17.5)$ |
| E2 | Hidrodinámica 2DH y sedimento en suspensión 2DH | n (0.025) $A_s(14)$ |
| E3 | Hidrodinámica 3D y sedimento en suspensión 3D | n (0.025) $A_s(14)$ |

Las ecuaciones de la hidrodinámica y la turbulencia se resuelven de forma modular con el método de pasos fraccionados, calculando la advección por el método de las características, la propagación, la difusión, y la turbulencia, en las ecuaciones dinámicas; se usó el modelo de turbulencia $k - \varepsilon$. El cálculo distribuido se realiza en un clúster con 32 núcleos de procesamiento, con un tiempo aproximado de 1 hora, 18 minutos y 19 segundos para un tiempo de cálculo de 10 horas, en donde se ha alcanzado la condición de flujo permanente. La geometría del modelo numérico consta de 24,745 nodos y 47,823 elementos triangulares, la longitud de los elementos fue de 10 m, el caudal y nivel de agua se establecen como condiciones de frontera aguas arriba y abajo, respectivamente, y se establece un $\Delta t = 0.05$ s. Para el proceso de análisis de la información del campo de velocidades y de la concentración de sedimento en suspensión se proponen 30 puntos distribuidos uniformemente a lo largo de cada sección, con un total de 320 puntos.

5.5.1.1. Proceso de calibración y análisis de resultados

5.5.1.2. Escenario E1- Hidrodinámica 2DH

Para calibrar el modelo numérico se compararon los resultados de la modelación con los datos in situ y se determinó el escenario con menor error relativo de ajuste. Posteriormente, se realizó el análisis de la concentración de sedimentos en suspensión al resolver las ecuaciones de Saint-Venant. El error relativo (e_{rU}) se calculó en relación a los 30 puntos distribuidos a lo ancho de cada sección, la ecuación se expresa como:

$$e_{rU} = \frac{U_n - U_m}{U_m} \quad (5.11)$$

En donde, U , es la magnitud del vector de velocidad y los subíndices n y m , se refieren a los datos numéricos y medidos (in situ). El error relativo medio ($\overline{e_{rU}}$), el error relativo mínimo ($\overline{e_{rU-}}$) y el máximo ($\overline{e_{rU+}}$), y la desviación estándar del error ($\sigma_{\overline{e_{rU-}}}$), se determinan mediante las siguientes ecuaciones:

$$\overline{e_{rU}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^N (e_{rU})_s; s \in \{1 : 12\} \quad (5.12)$$

$$e_{rU-} = \min(\overline{e_{rU}})_s; s \in \{1 : 12\} \quad (5.13)$$

$$e_{rU+} = \max(\overline{e_{rU}})_s; s \in \{1 : 12\} \quad (5.14)$$

$$\sigma_{\overline{e_{rU}}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (e_{rUj} - \overline{e_{rU}})_s^2}{n}}; j \in \{Obs.No.j\}; s \in \{1 : 12\} \quad (5.15)$$

En donde n es el número de datos delimitado por la sección de análisis o subgrupo de datos, s . El resumen de los resultados de los errores relativos de los diez escenarios de análisis correspondientes al escenario E1 se presentan en la Tabla 5.5. Los errores relativos medios ($\overline{e_{rU}}$) son menores para los escenarios con un coeficiente de Manning $n = 0.025 \text{ s/m}^{1/3}$, con respecto a los escenarios con un coeficiente de $n = 0.020 \text{ s/m}^{1/3}$, del orden del 3.5% y 12%, respectivamente. Lo que indica que el primer coeficiente de resistencia de Manning mejora la aproximación del campo de velocidades. Con respecto a los errores máximos, el primer bloque sobrestima hasta un 33% la velocidad, mientras que el segundo llega al 44%, por su parte los errores mínimos para el primer bloque son del orden de 39%, mientras que en el segundo bloque la subestimación es ligeramente menor, del orden de 34%. La desviación estándar de las velocidades para el primer bloque fue del orden de 0.16 m/s, mientras que para el segundo fue del 0.18 m/s.

También, se establece la hipótesis de que la velocidad calculada numéricamente (U_n) debe aproximarse a la velocidad medida (in situ) (U_m), $U_n \approx U_m$, de esta manera se establece una Relación Numérico-Experimental (RNE) mediante un modelo de regresión lineal simple, esta hipótesis en condición ideal establece los datos en una recta de 45°, que es la Relación-Esperada (RE), el ajuste o Regresión-Lineal (RL) de la información permite identificar la aproximación del modelo bidimensional mediante el coeficiente de correlación lineal, R . En la Tabla 5.5, las últimas tres columnas corresponden a los coeficientes de ajuste: m , b y R , siendo este último el coeficiente de correlación.

Con base en el análisis de la hipótesis anterior se identificó que las condiciones del análisis numérico E1.4 representan una aproximación del 0.65 entre las velocidades determinadas in situ y las obtenidas por el modelo numérico; observe que la influencia del coeficiente de resistencia de Manning entre el escenario E1.4 y E1.9 es del orden del 1% con base en el coeficiente de correlación R , mientras que el campo de velocidades es modificado por el coeficiente de producción de corrientes secundarias (A_s) con mejoras de hasta en un 11% con respecto a R . En la Figura 5.9, se presenta la comparación de las distribuciones de las magnitudes de velocidad (U), de las mediciones (in situ, puntos en color negro) y las calculadas numéricamente (línea con marcador en color azul). En la Figura 5.10 se presentan las comparaciones de los errores relativos de las magnitudes de velocidad (U) de las mediciones (in situ) y las calculadas numéricamente, correspondientes al escenario E1.4.

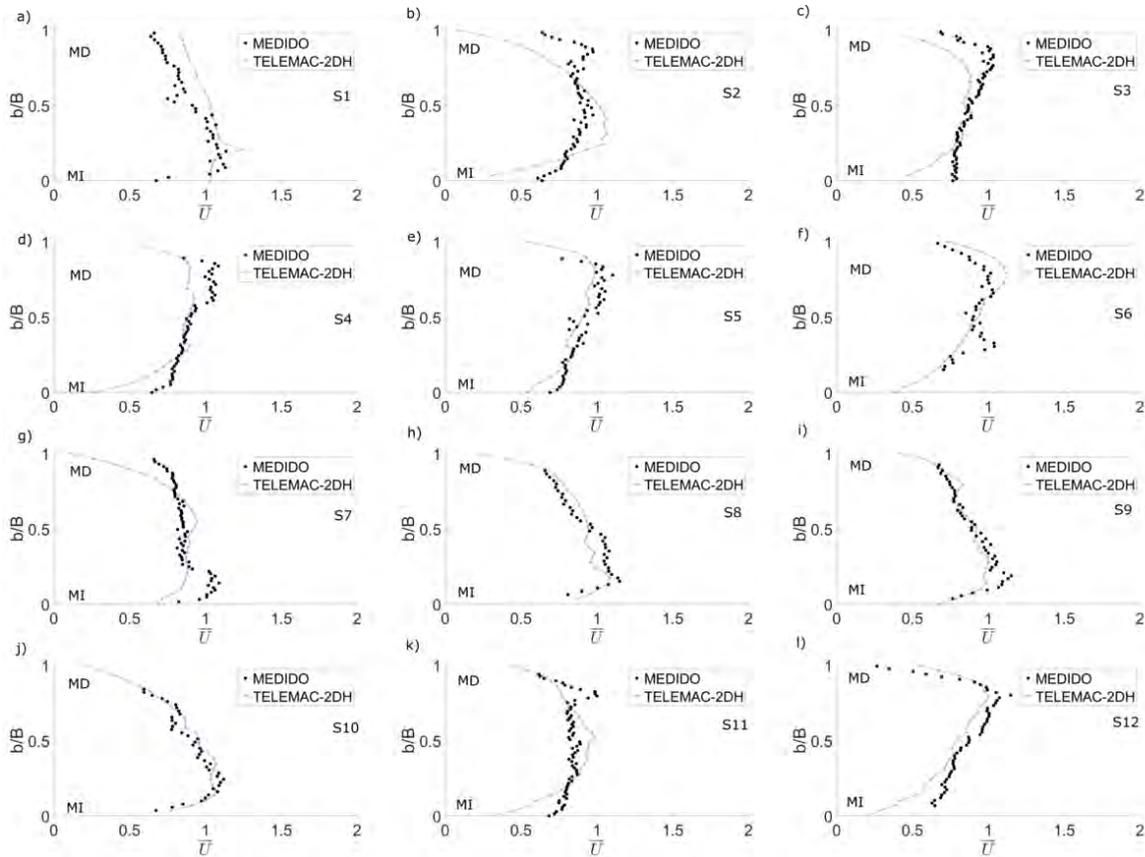


Figura 5.9. Comparación de las distribuciones de velocidad medidas (in situ) promediadas en la vertical y calculadas numéricamente, escenario de modelación numérica $E1.4 - 2DH$, unidades en m/s.

Tabla 5.5: Errores relativos generales de la velocidad media (promediada en la vertical), en secciones definidas en la Figura 5.2 para los escenarios de modelación numérica E1, indicados en la Tabla 5.4

| Escenario | A_s | n | $\overline{e_r U}$ | $e_r U-$ | $e_r U+$ | $\sigma_{\overline{e_r U}}$ | m | b | R |
|-----------|-----------|--------------|--------------------|----------------|---------------|-----------------------------|--------------|--------------|--------------|
| E1.1 | 3.5 | 0.025 | -0.0076 | -0.3797 | 0.3222 | 0.1612 | 0.729 | 0.217 | 0.533 |
| E1.2 | 7 | 0.025 | -0.0147 | -0.3732 | 0.3214 | 0.1562 | 0.748 | 0.194 | 0.55 |
| E1.3 | 10.5 | 0.025 | -0.0255 | -0.3848 | 0.2559 | 0.1398 | 0.879 | 0.073 | 0.636 |
| E1.4 | 14 | 0.025 | -0.0299 | -0.3844 | 0.2691 | 0.1397 | 0.896 | 0.054 | 0.647 |
| E1.5 | 17.5 | 0.025 | -0.0338 | -0.3825 | 0.2938 | 0.1429 | 0.903 | 0.044 | 0.648 |
| E1.6 | 3.5 | 0.02 | 0.1199 | -0.3439 | 0.4301 | 0.1863 | 0.98 | 0.114 | 0.57 |
| E1.7 | 7 | 0.02 | 0.1143 | -0.3402 | 0.4248 | 0.1781 | 1.019 | 0.075 | 0.6 |
| E1.8 | 10.5 | 0.02 | 0.1092 | -0.3364 | 0.4224 | 0.1721 | 1.05 | 0.044 | 0.622 |
| E1.9 | 14 | 0.02 | 0.1045 | -0.3333 | 0.4268 | 0.1685 | 1.072 | 0.021 | 0.638 |
| E1.10 | 17.5 | 0.02 | 0.1003 | -0.3331 | 0.4368 | 0.1677 | 1.086 | 0.005 | 0.647 |

Se encontró que los núcleos de máxima velocidad que se desarrollan cercanos a los márgenes, y que están asociados a corrientes secundarias no presentaron una buena aproximación por el análisis numérico, se identificó que las magnitudes de velocidad son subestimadas en el análisis numérico; por ejemplo, Figura 5.9b), c) y d) en margen izquierda, Figura 5.9g) margen derecha. Se debe tener en mente que este tipo de estructuras de flujos secundarios y de flujo helicoidal son tridimensionales como se ha mostrado en la Sección 2, y las consideraciones de los modelos 2DH en aproximar estas estructuras. Sin embargo, la descripción del campo de velocidades entre las mediciones in situ y las obtenidas numéricamente se consideran bastante aceptables y con aplicaciones importantes en la práctica para establecer escenarios de análisis y/o propuestas a distintos problemas.

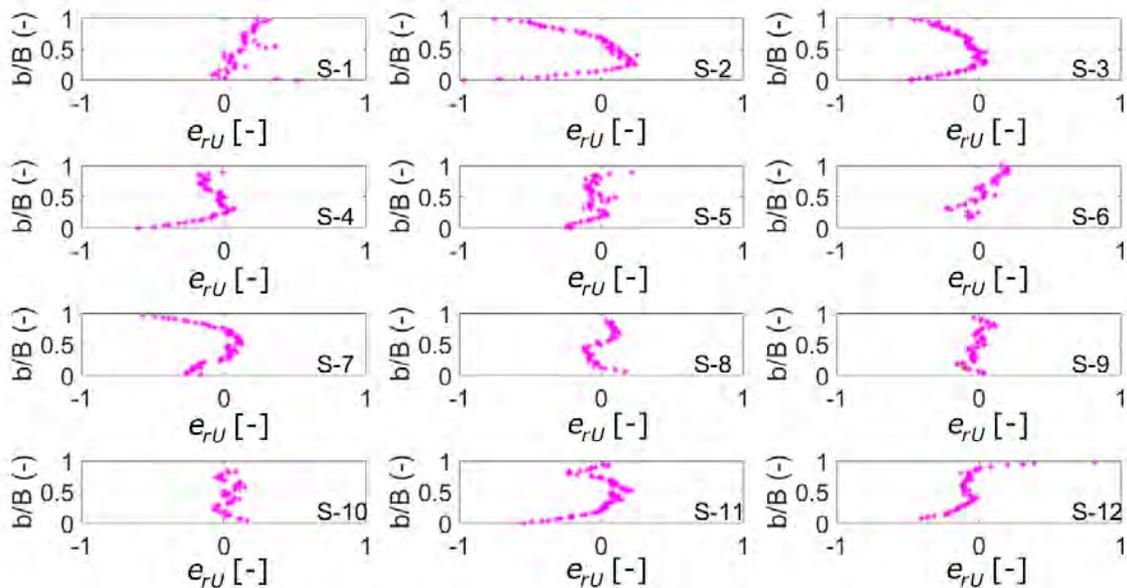


Figura 5.10. Errores relativos de la velocidad (promediada en la vertical) entre datos medidos (in situ) y calculados numéricamente, escenario de modelación numérica E1.4-2DH

En la Figura 5.10 se presentan los errores relativos del escenario E1.4-2DH, en donde se pueden identificar las zonas de mayores errores. En la Tabla 5.6 se presenta la Relación Numérico-Experimental (RNE) mediante un modelo de regresión lineal simple para cada sección de medición correspondiente al escenario E1.4-2DH. Se identificó que las secciones con menor coeficiente de correlación corresponden a las secciones 3, 6, 7 y 11, con una $R < 0.65$, estas secciones están muy cerca del ápice de la curva del meandro. En general, este escenario tiene un coeficiente de correlación de 0.65, como se indica en la Tabla 5.5 y Figura 5.11.

Tabla 5.6: Parámetros de ajuste de la Relación Numérico-Medición de la magnitud de la velocidad (promediada en la vertical), escenario de modelación numérica E1.4-2DH

| Sección | m | b | R |
|---------|------|-------|-------------|
| 1 | 0.52 | 0.53 | 0.84 |
| 2 | 2.24 | -1.12 | 0.72 |
| 3 | 0.99 | -0.11 | 0.6 |
| 4 | 1.07 | -0.16 | 0.77 |
| 5 | 0.92 | 0.02 | 0.83 |
| 6 | 0.79 | 0.21 | 0.62 |
| 7 | 0.78 | 0.13 | 0.51 |
| 8 | 0.6 | 0.36 | 0.9 |
| 9 | 0.64 | 0.3 | 0.94 |
| 10 | 0.86 | 0.16 | 0.94 |
| 11 | 1.21 | -0.19 | 0.55 |
| 12 | 0.73 | 0.17 | 0.81 |

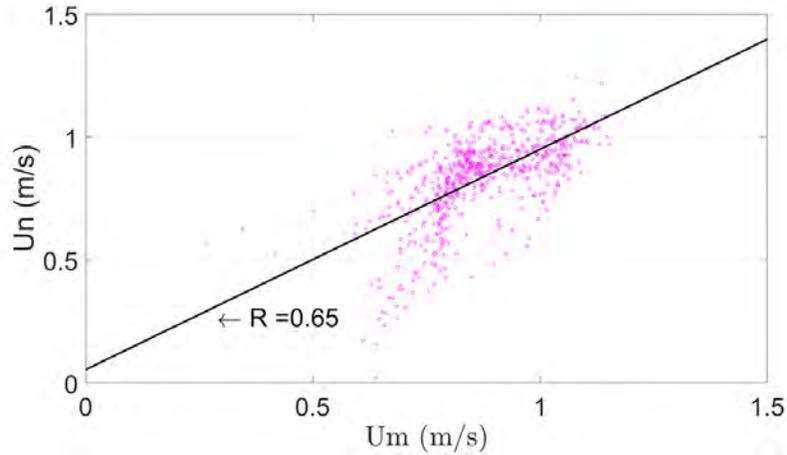


Figura 5.11. Relación Numérico-Medición (in situ) de la magnitud de la velocidad (promediada en la vertical) general, escenario de modelación numérica E1.4-2DH

5.5.1.3. Escenario ES2 - Hidrodinámica y Concentración de sedimento en suspensión

Se presentó previamente que la Ecuación de Advección-Difusión (EAD, Ecuación 5.1) describe la conservación de masa de sedimento en suspensión en Telemac-Mascaret, esto es válido para suspensiones diluidas en las que las partículas no son muy gruesas, $d_p \leq 0.5$ mm ($500\mu m$) (Garcia, 2008, p. 108). En este apartado se considera el sedimento en suspensión como un trazador. Aquí se resuelve la EAD en su versión 2DH con el módulo de la hidrodinámica acoplado con el módulo de GAIA (EDF-R&Dd., 2020), el diámetro de la partícula de la masa de sedimento suspendido utilizada en las *CSs* fue de 0.11 mm ($110\mu m$), con $\sigma_g = 1.43$ (Dominguez et al., 2021). Se utilizaron las condiciones del escenario E1.4 y se continuó el cálculo de la hidrodinámica y transporte de sedimento en suspensión. Por lo que, se estableció la distribución de concentración de sedimentos en la entrada, y la condición de salida libre. El tiempo de proceso de cálculo fue de aproximadamente 1.82 horas para un tiempo de modelado numérico de 10 horas.

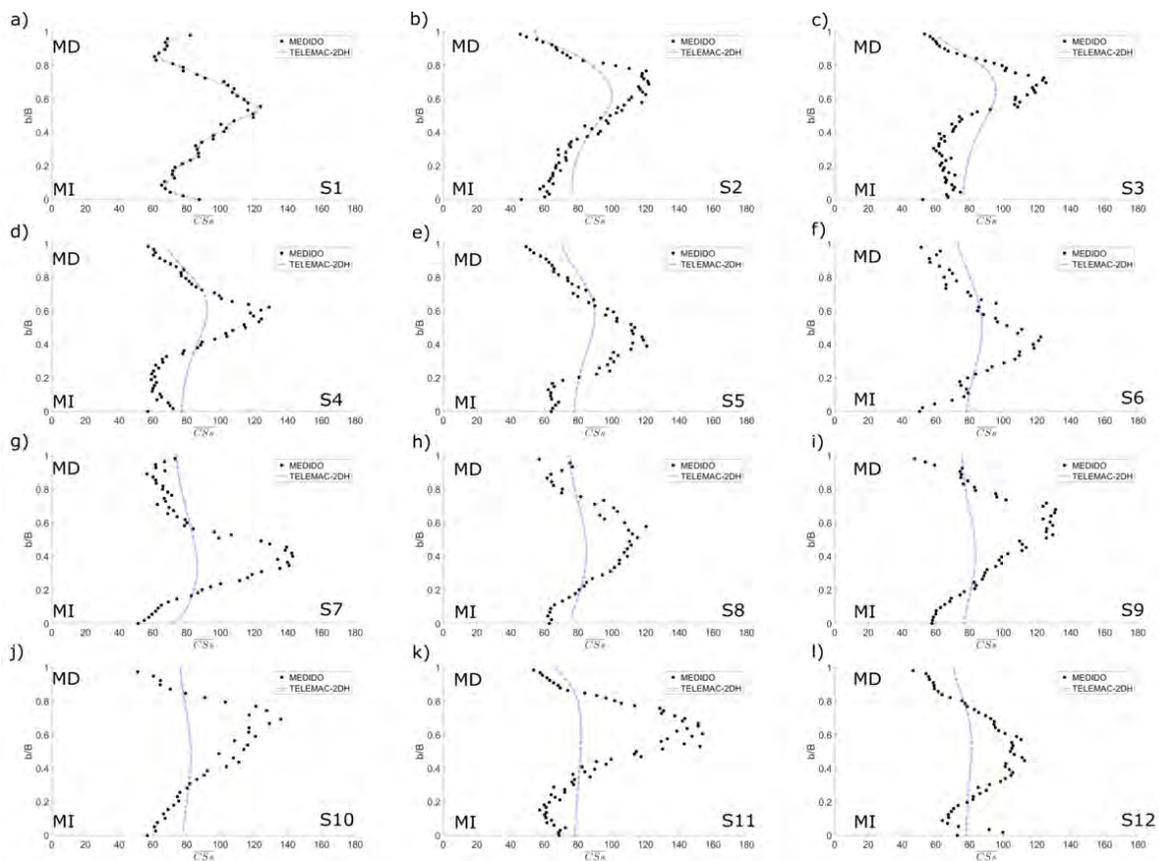


Figura 5.12. Comparación de las distribuciones de concentración de sedimento en suspensión medidas (in situ) y calculadas numéricamente, escenario de modelación numérica E2-2DH, unidades en mg/l.

En la Figura 5.12 se presenta la comparación de las concentraciones de sedimento suspendido medido (in situ, puntos en color negro) vs calculado numéricamente (línea con marcador en color azul), en las doce secciones de análisis. A partir de la sección 2 en adelante (Figura 5.12b)), se observa un amortiguamiento del núcleo de máxima concentración, hasta que la distribución de la concentración se mantiene uniforme a lo ancho de la sección,

este comportamiento se observa a partir de la sección 9 a la sección 12 (Figura 5.12i) a Figura 5.12l)). Los resultados indicaron que no se reproducen adecuadamente las distribuciones de las CSs, y que los núcleos de concentraciones máximas tienden a amortiguarse. También, se identificó con la información in situ que, el núcleo de concentraciones de sedimento suspendido se mantiene cerca del centro del ancho del meandro, y en algunas secciones la CSs se desplazó hacia la margen derecha ($b/B \rightarrow 1$), por ejemplo, S2, S3, S4, S8, S9, S10 y S11, mientras que en las restantes se desplazó hacia la margen izquierda ($b/B \rightarrow 0$).

En la Tabla 5.7, se presenta el resumen de los resultados de los errores relativos de la concentración de sedimento suspendido (CSs, promediado en la vertical) para cada sección de análisis correspondientes al escenario de modelación E2. Este escenario es una continuación del cálculo de la hidrodinámica con menor error de ajuste, E1.4-2DH.

Tabla 5.7: Errores relativos de la concentración de sedimento en suspensión promediados en la vertical para cada sección, escenario de modelación numérica E2-2DH.

| Escenario | $\overline{e_{rCSs}}$ | e_{rCSs-} | e_{rCSs+} | $\sigma_{\overline{e_{rCSs}}}$ | m | b | R |
|-----------|-----------------------|---------------|--------------|--------------------------------|----------|----------|-------------|
| E2.1 | 0.005 | -0.046 | 0.059 | 0.024 | 0.98 | 2.48 | 0.99 |
| E2.2 | 0.035 | -0.235 | 0.639 | 0.162 | 0.46 | 44.92 | 0.91 |
| E2.3 | 0.082 | -0.245 | 0.461 | 0.181 | 0.34 | 55.85 | 0.8 |
| E2.4 | 0.06 | -0.284 | 0.352 | 0.19 | 0.27 | 60.95 | 0.88 |
| E2.5 | 0.032 | -0.285 | 0.438 | 0.194 | 0.22 | 64.09 | 0.83 |
| E2.6 | 0.042 | -0.288 | 0.549 | 0.217 | 0.17 | 68.29 | 0.87 |
| E2.7 | 0.005 | -0.398 | 0.39 | 0.244 | 0.13 | 69.74 | 0.85 |
| E2.8 | -0.032 | -0.307 | 0.322 | 0.18 | 0.16 | 66.62 | 0.91 |
| E2.9 | -0.064 | -0.39 | 0.595 | 0.246 | 0.07 | 73.81 | 0.65 |
| E2.10 | -0.045 | -0.407 | 0.503 | 0.244 | 0.05 | 75.48 | 0.66 |
| E2.11 | -0.059 | -0.468 | 0.379 | 0.268 | 0.06 | 73.65 | 0.63 |
| E2.12 | -0.035 | -0.282 | 0.529 | 0.195 | 0.14 | 66.95 | 0.88 |

Los errores relativos medios ($\overline{e_{rCSs}}$) no van más allá del 8.5%, la sobreestimación de la CSs fue del 64%, reportado en la sección 2, mientras que la subestimación de la CSs fue del 47% en la sección 11 y la desviación estándar fue del orden del 20 mg/l. En la Figura 5.13 se presentan los errores relativos en las doce secciones de análisis.

También, se utilizó la misma hipótesis presentada anteriormente, en donde la concentración de sedimento suspendido calculado numéricamente (CSs_n) debe aproximarse a la concentración medida (in situ) (CSs_m), $CSs_n \approx CSs_m$, de esta manera se establecer una Relación Numérico-Experimental (RNE) mediante un modelo de regresión lineal simple, la información permite identificar la aproximación del modelo bidimensional mediante el coeficiente de correlación lineal R. La hipótesis permite determinar la aproximación entre los datos determinados in situ y los calculados numéricamente. En la Tabla 5.7, las últimas

tres columnas corresponden a los coeficientes de ajuste: m , b y R , siendo este último el coeficiente de correlación. De manera general se determinó que el ajuste para la concentración de sedimentos presentó un coeficiente de correlación de 0.59, como se indica en la Figura 5.14.

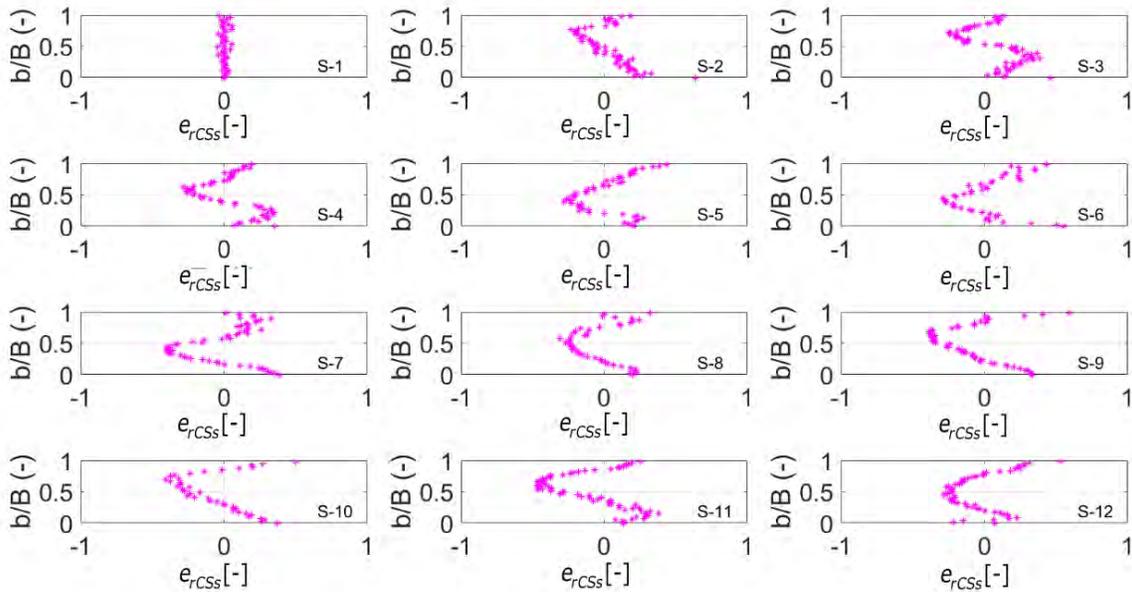


Figura 5.13. Errores relativos de la CSs (promediada en la vertical) entre datos medidos (in situ) y calculados numéricamente, escenario de modelación numérica E2-2DH

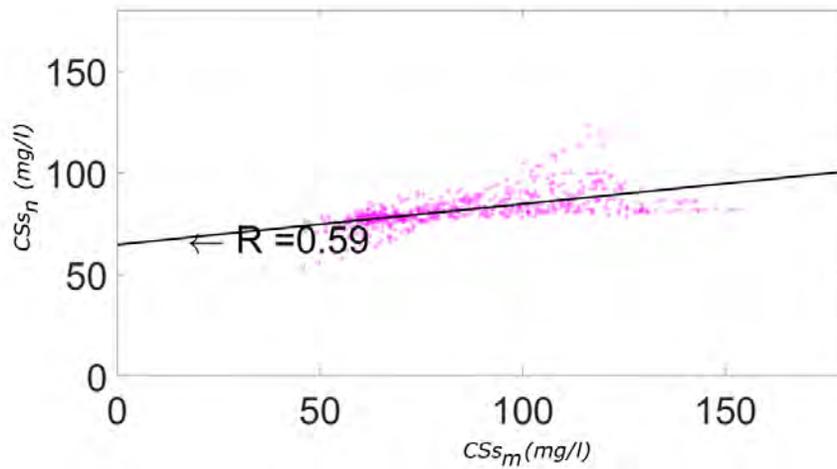


Figura 5.14. Relación Numérico-Medición (in situ) de la concentración de sedimento suspendido, escenario de modelación numérica E2-2DH.

5.5.1.4. Escenario ES3 - Concentración de sedimento en suspensión 3D

Se resolvió la ecuación de Advección-Difusión 3D (Ecuación 5.6) con el mismo enfoque descrito en el apartado anterior, en donde la partícula en la suspensión diluida no es muy gruesa, y la CSs se consideró como un trazador, se mantuvieron las mismas características del sedimento. En la Figura 5.15 se muestra la comparación de las distribuciones de velocidades calculadas con el modelo 3D y las mediciones in situ, en las doce secciones de análisis, las distribuciones indicadas como 2DH corresponden al promedio en la vertical del análisis 3D, y las distribuciones indicadas como 3D corresponden a la elevación localizada al $0.4h$, en donde h es la profundidad del flujo.

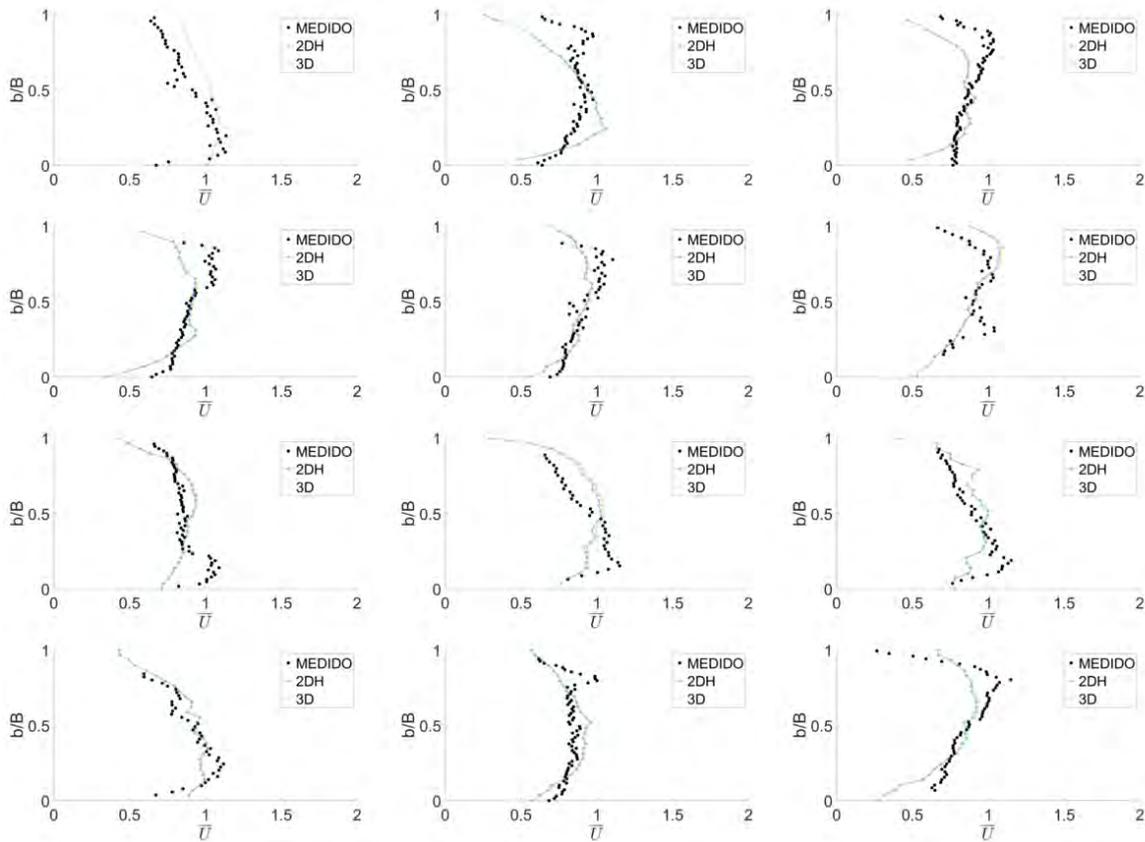


Figura 5.15. Comparación de las distribuciones de velocidad medidas (in situ) y calculadas numéricamente, escenario de modelación numérica E3-3D, unidades en m/s.

Con respecto a los errores relativos de la velocidad ($\overline{e_rU}$), el error medio fue del orden de 5.2%, la sub/sobre estimación media fue del 34% y la desviación estándar fue de 0.15 m/s. Se identificó que las secciones con menor coeficiente de correlación son la S3, S5 a S9, y la S11, con una $R < 0.5$. La correlación entre las velocidades calculadas numéricamente y las reportadas in situ fue de 0.52. Los errores relativos de la velocidad en las 12 secciones, se reportan en la Tabla 5.8. El análisis de la CSs en 3D y la comparación con los datos in situ dentro de las doce secciones se presenta en la Figura 5.16. Las distribuciones indicadas como 2DH corresponden al promedio en la vertical del análisis 3D, mientras que el 3D corresponde a la elevación localizada en $0.4h$, en donde h es la profundidad. Los errores relativos de la concentración de sedimento en suspensión en las 12 secciones, se reportan en la Tabla 5.9.

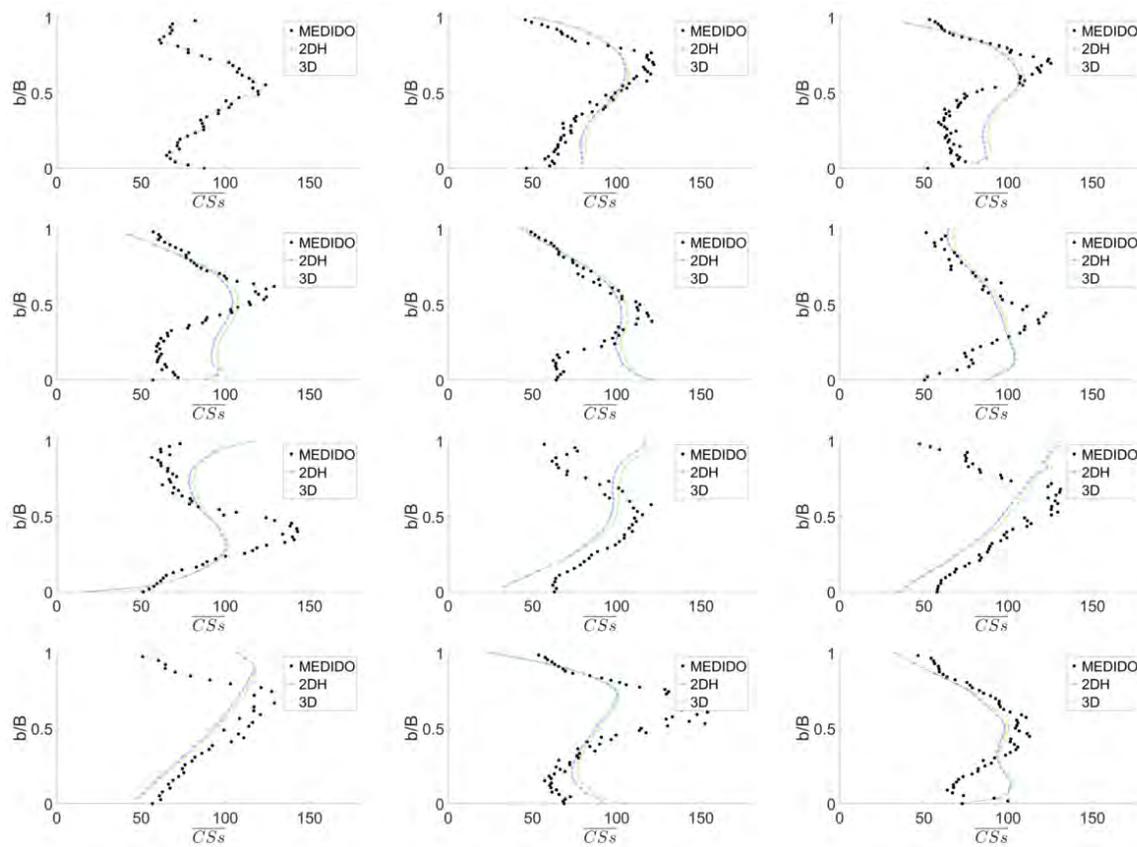


Figura 5.16. Comparación de las distribuciones de Concentración de sedimento en suspensión medidas (in situ) y calculadas numéricamente, escenario de modelación numérica 3D-E3, unidades en mg/l.

Tabla 5.8: Errores relativos generales de la velocidad 3D (elevación a 0.4h), escenarios de modelación numérica E3-3D

| Sección | $\bar{e}_r U$ | e_{rU-} | e_{rU+} | $\sigma_{\bar{e}_r U}$ | m | b | R |
|---------|---------------|-----------|-----------|------------------------|----------|----------|----------|
| S1 | 0.141 | -0.078 | 0.503 | 0.123 | 0.53 | 0.53 | 0.85 |
| S2 | -0.081 | -0.892 | 0.261 | 0.248 | 1.57 | -0.54 | 0.60 |
| S3 | -0.115 | -0.555 | 0.117 | 0.172 | 0.61 | 0.24 | 0.37 |
| S4 | -0.072 | -0.459 | 0.128 | 0.136 | 0.73 | 0.17 | 0.60 |
| S5 | -0.031 | -0.203 | 0.145 | 0.082 | 0.70 | 0.24 | 0.77 |
| S6 | 0.034 | -0.217 | 0.366 | 0.143 | 0.51 | 0.47 | 0.43 |
| S7 | -0.026 | -0.266 | 0.134 | 0.136 | 0.22 | 0.64 | 0.22 |
| S8 | 0.066 | -0.176 | 0.287 | 0.164 | 0.16 | 0.81 | 0.36 |
| S9 | 0.019 | -0.259 | 0.256 | 0.127 | 0.31 | 0.62 | 0.50 |
| S10 | 0.040 | -0.128 | 0.325 | 0.098 | 0.53 | 0.45 | 0.85 |
| S11 | 0.000 | -0.484 | 0.183 | 0.125 | 0.94 | 0.05 | 0.54 |
| S12 | 0.000 | -0.409 | 1.463 | 0.290 | 0.55 | 0.34 | 0.71 |

Tabla 5.9: Errores relativos generales de la concentración de sedimento suspendido 3D (elevación a 0.4h), escenarios de modelación numérica E3-3D

| Sección | $\overline{e_{rCSs}}$ | e_{rCSs-} | e_{rCSs+} | $\sigma_{\overline{e_{rCSs}}}$ | m | b | R |
|---------|-----------------------|-------------|-------------|--------------------------------|------|-------|------|
| S1 | 0.00 | 0.05 | 0.06 | 0.02 | 0.98 | 2.48 | 0.99 |
| S2 | 0.10 | 0.16 | 0.76 | 0.17 | 0.48 | 49.24 | 0.95 |
| S3 | 0.13 | 0.42 | 0.48 | 0.23 | 0.51 | 46.70 | 0.66 |
| S4 | 0.13 | 0.31 | 0.56 | 0.28 | 0.40 | 55.86 | 0.52 |
| S5 | 0.13 | 0.15 | 0.88 | 0.28 | 0.46 | 52.61 | 0.52 |
| S6 | 0.10 | 0.22 | 0.76 | 0.24 | 0.37 | 57.54 | 0.56 |
| S7 | 0.04 | 0.65 | 0.58 | 0.27 | 0.31 | 58.30 | 0.59 |
| S8 | 0.00 | 0.56 | 1.05 | 0.35 | 0.45 | 45.85 | 0.36 |
| S9 | 0.03 | 0.40 | 1.75 | 0.46 | 0.38 | 55.07 | 0.34 |
| S10 | 0.01 | 0.24 | 1.16 | 0.36 | 0.46 | 46.10 | 0.48 |
| S1 | 0.06 | 0.41 | 0.35 | 0.22 | 0.32 | 52.53 | 0.74 |
| S12 | 0.00 | 0.29 | 0.57 | 0.21 | 0.68 | 26.41 | 0.66 |

En la sección 2 y 3 se determinó un buen ajuste del núcleo de la CSs , aunque presentó una sobreestimación en esta última sección cerca de la margen izquierda ($0 < b/B < 0.5$). Este comportamiento prevalece entre las secciones 3 a 5, los núcleos de máxima CSs se describen bien, sin embargo, en la sección 5, se presenta un desfase del núcleo de máxima CSs , cargándose hacia la margen izquierda ($b/B \approx 0.1$). Posteriormente, el comportamiento del núcleo de máxima CSs se invierte entre las secciones 7 a 10, se observó que se localizó sobre la margen derecha ($b/B \rightarrow 1$). En la sección 11 el núcleo de máxima CSs fue menor que la reportada in situ, y en la sección 12, el núcleo se localizó sobre la margen izquierda ($b/B \rightarrow 1$), sobreestimando la CSs en esa zona. En general, se determinó una correlación de ajuste de 0.52 para las velocidades y de 0.54 para la CSs , entre los valores estimados numéricamente y los reportados in situ, como se indica en la Figura 5.17.

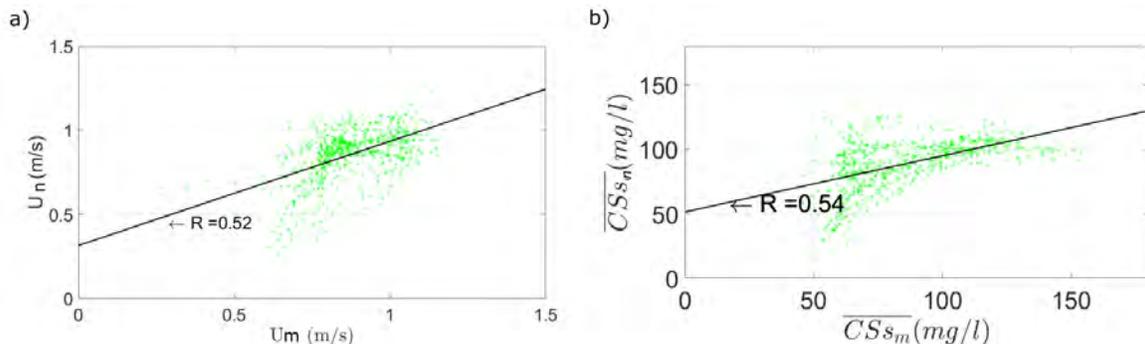


Figura 5.17. Relación Numérico-Medición (in situ), en a) distribución de velocidades en m/s, en b) concentración de sedimento suspendido en mg/l, escenario de modelación numérica E3-3D.

5.6. Discusión

El campo de velocidades tridimensional sobre el tramo de análisis del río Colastiné se muestra en la Figura 5.18. En la Figura 5.18a) se presenta el campo visto desde la superficie libre ($Z=15$), en la Figura 5.18b) el campo de velocidades a $Z=10$ m, en la Figura 5.18c) el campo de velocidades a $Z=7$ m, y en la Figura 5.18d) el campo de velocidades a $Z=5$ m, en donde Z es la elevación. Se identificó que las mayores velocidades se localizan en la parte superior (Figura 5.18a), en la Figura 5.18b) se identificó que las velocidades máximas se presentaron poco antes de los ápices de la curva, o puntos de máxima inflexión, la velocidad máxima se localizó cerca de la margen interna antes del ápice y en la margen externa después del ápice, lo que indica un flujo helicoidal; en la Figura 5.18c) se observó este comportamiento con mayor claridad, y en la Figura 5.18d) se observan las zonas en donde las velocidades son mayores con respecto al resto del campo.

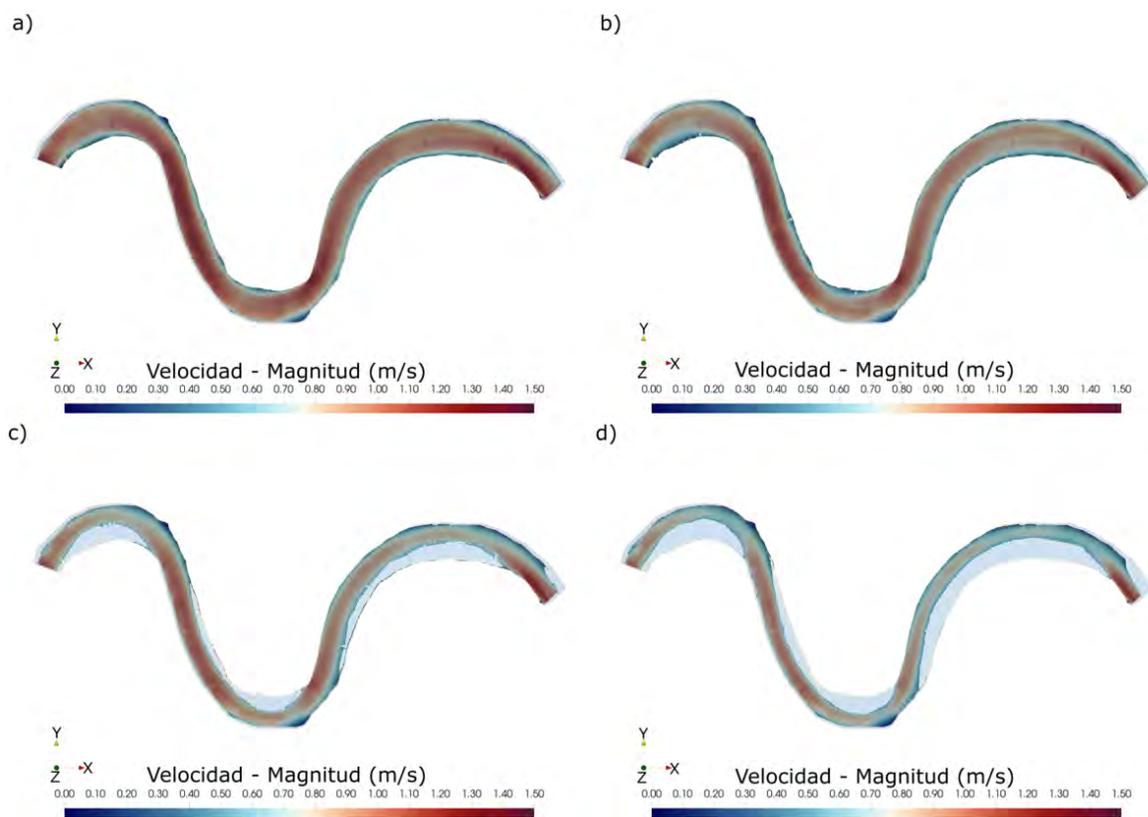


Figura 5.18. Campo de velocidades 3D (m/s) en el tramo de análisis del río Colastiné, a) $Z = 15$ m, b) $Z = 10$ m, c) $Z=7$ m y d) $Z=5$ m, escenario de modelación numérica E3-3D.

El campo de la concentración de sedimento en suspensión (CSs) se muestra en la Figura 5.19. Aquí, se presentan cuatro planos de corte en la dirección vertical, en las mismas elevaciones que se indicaron en campo de velocidades tridimensional. En la Figura 5.19a) se observó que la CSs es baja cerca de la superficie libre y la mayor CSs se localizó cerca del fondo, Figura 5.19b). Se identificó que la CSs aumentó en zonas localizados en las márgenes internas antes del ápice de las curvas, como se presenta en las Figuras 5.19c) y 5.19d). También se identificó que a la entrada del meandro existe un cambio entre la margen externa hacia el centro del canal (en dirección hacia la margen interna), incluso a pesar de que la concentración se posiciona sobre la parte central del meandro, la CSs no se desplazó

hacia la margen externa, y poco antes del ápice de la siguiente curva, (alrededor de la sección 7, ver Figura 5.2), se presentó una zona de transición en donde la concentración disminuyó en magnitud pero aumentó espacialmente y se posicionó en el centro del meandro. Después del ápice de la segunda curva, (cerca de la sección 7, ver Figura 5.2), la CSs se mantuvo en el centro del meandro, es claro que no interactuó con la margen externa (Figura 5.19d)), este comportamiento se mantuvo hasta que llega a la zona de transición (cerca de la sección 10, ver Figura 5.2). El comportamiento es similar en el plano localizado en $Z=7$ m (Figura 5.19c)), por otro lado, en $Z=10$, la CSs disminuyó considerablemente con respecto a los planos inferiores.

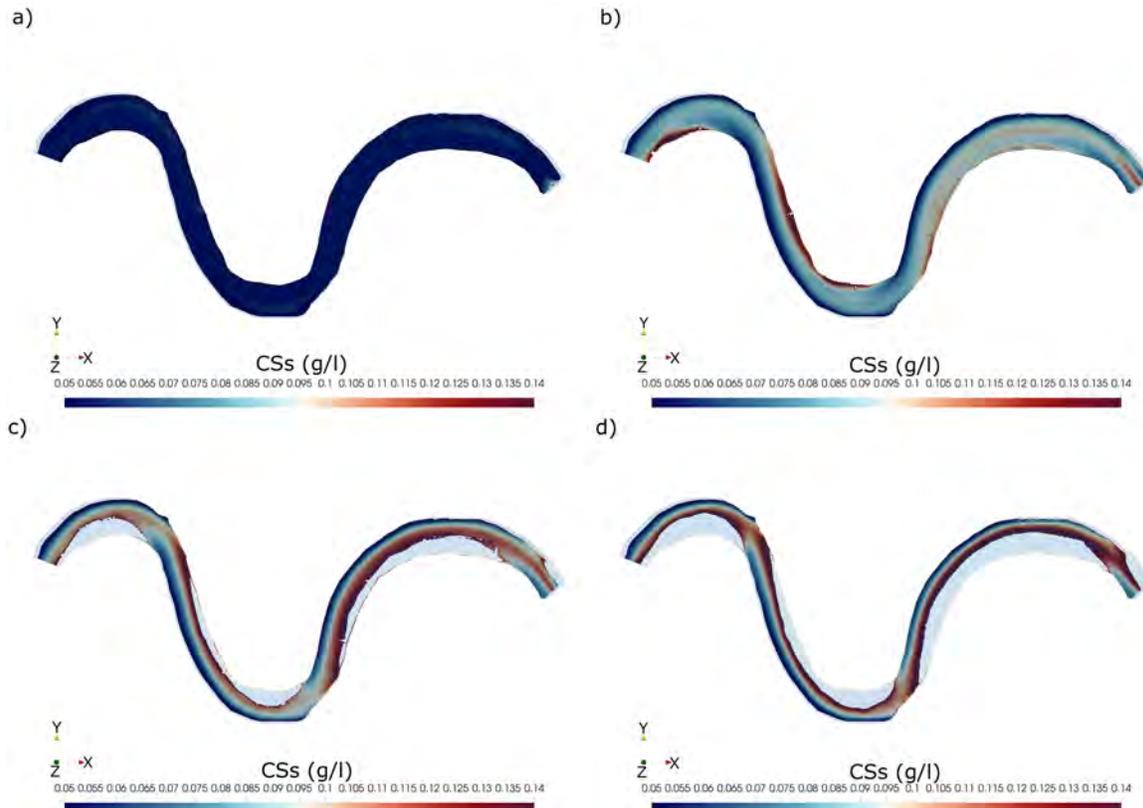


Figura 5.19. Concentración de sedimento en suspensión (CSs) 3D (g/l) en el tramo de análisis del río Colastiné, a) $Z = 15$ m, b) $Z = 10$ m, c) $Z=7$ m y d) $Z=5$ m, escenario de modelación numérica E3-3D.

En la Figura 5.20, se muestra el comportamiento de la CSs , el número de Richardson (Ri), la energía cinética de la turbulencia (k) y el Número de Reynolds (Re) en $Z=7$ m. En la Figura 5.20b) se identificó que el Ri disminuyó sobre las márgenes internas justo en donde la CSs es máxima, pero se incrementó al centro del meandro, también se presentó una ligera disminución entre la zona central y la margen externa. Las mayores magnitudes se localizaron poco antes del ápice de la curva y sobre las márgenes externas. Por su parte, la k fue mayor en la cercanía de las márgenes internas interactuando sobre el talud y no sobre el talweg, se identificó que es máxima en donde también lo es la concentración de sedimentos, y disminuyó gradualmente hacia la margen externa, como se indica en la Figura 5.20c). El Re es mayor en la entrada del meandro, y poco antes del ápice de la primera curva, entre las secciones 5 y 6, y posteriormente, entre las secciones 8 y 10, como se indica en la Figura 5.20d).

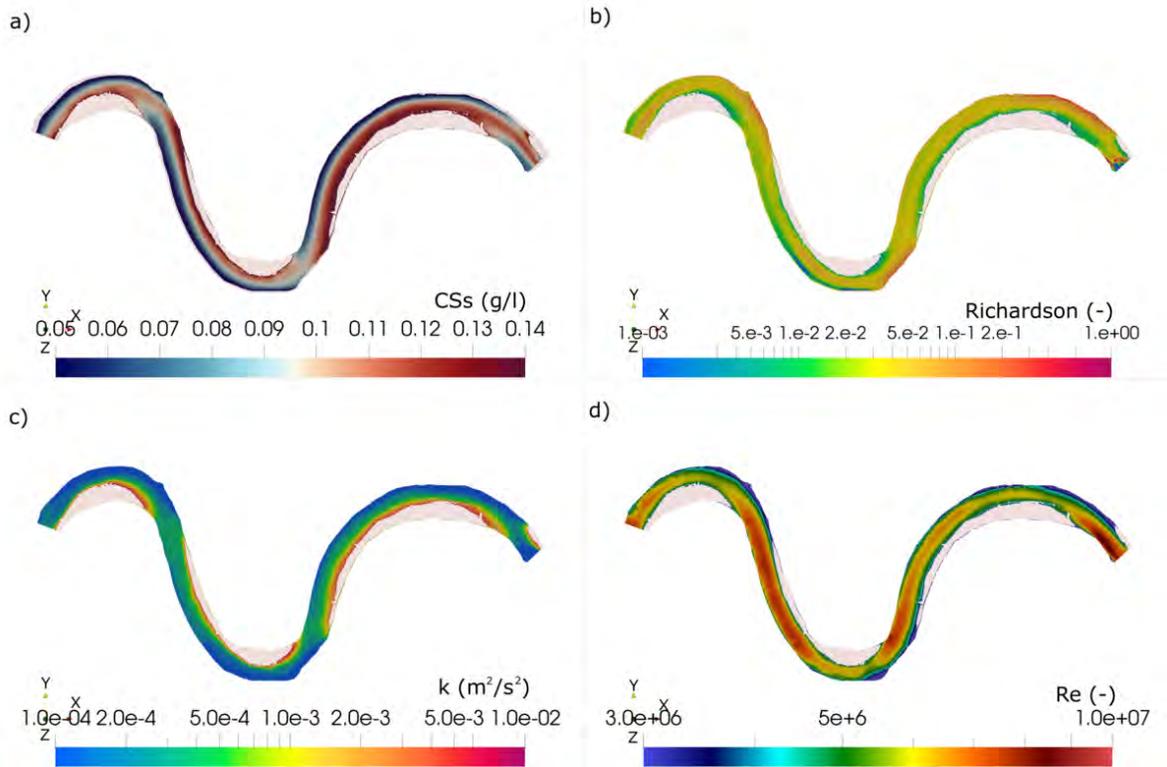


Figura 5.20. a) CSs (mg/l), b) Ri , c) k (m^2/s^2) y d) Re , $Z=7$ escenario de modelación numérica 3D-E3.

En primera instancia, la velocidad máxima difiere espacialmente del núcleo máximo de la CSs , ya que la primera presentó un máximo cerca de la superficie libre del agua, y la segunda presentó un máximo cerca del fondo; esto en acuerdo con el perfil logarítmico de velocidades y con el perfil del Rouse. Sin embargo, la formación de patrones o estructuras de flujo secundario y zonas de separación cercanos al fondo, son característicos en flujo sobre meandros o en canales curvos, por ejemplo, en Rodi et al. (2013)[p. 174] se pueden observar algunos ejemplos, estos autores también indican que se pueden desarrollar velocidades mayores cerca del fondo comparadas con las que se desarrollan a elevaciones superiores, como lo mostrado en la Sección 3, en donde el perfil de velocidades en la vertical ya no sigue una ley logarítmica de velocidades.

En la Figura 5.21 se presentan los núcleos máximos de: la CSs (0.1 g/l a 0.12 g/l), el Ri (0.03 a 0.2), y la k ($0.009 m^2/s^2$ a $0.0025 m^2/s^2$). En la Figura 5.21a), el núcleo de la CSs se muestra en color verde, se observó que en la entrada del meandro la concentración es amplia y posteriormente se reduce espacialmente, después sigue una trayectoria por el centro del meandro sobre la primera curva hasta chocar sobre la margen izquierda (cerca de la sección 6), en este punto la CSs pasó por debajo del Ri y continuó su trayectoria por la parte central del meandro. También, en esta zona se presentó una aportación de la CSs que proviene de la margen derecha del río Colastiné (cerca de la sección 6), esto es por efecto de la interacción del flujo con la barra que se desarrolla en la zona. La CSs después de la sección 6, viajó cerca del fondo y al centro del meandro, y también presentó una aportación cerca de la sección 10, se identificaron estas zonas por el incremento espacial del núcleo máximo de la CSs . También, se encontró que cerca del fondo predomina el núcleo de la energía cinética de la turbulencia, identificado en color negro, como se muestra en la Figura 5.21c), que es imperceptible en la vista superior porque se localiza por debajo del núcleo del Número de Richardson, como se

muestra en la Figura 5.21a). Una vista en perspectiva permite observar el comportamiento descrito, Figura 5.21b). El núcleo del Ri envuelve el núcleo de la CSs , desde la parte central interna hasta la zona exterior de la curva, limitado principalmente por el núcleo de la energía cinética de la turbulencia, que se localiza cerca del fondo.

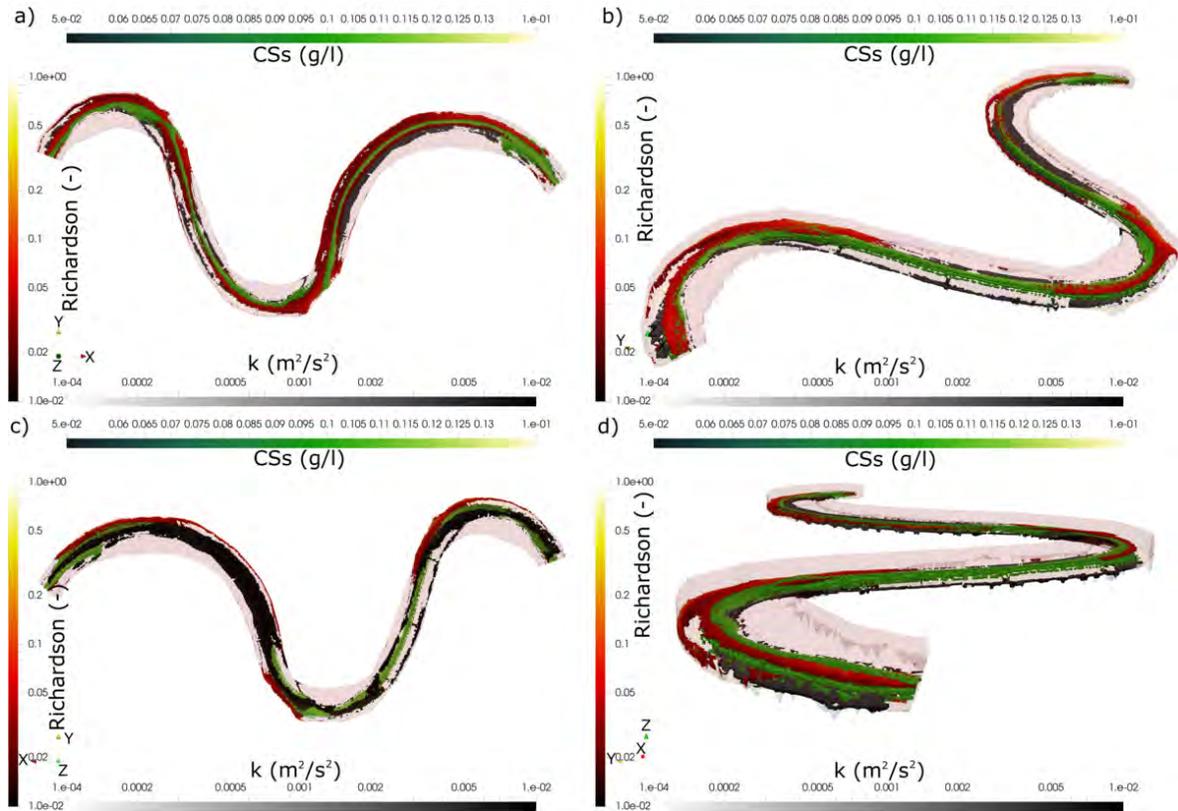


Figura 5.21. Núcleos máximos de la concentración de sedimento suspendido (0.1 g/l a 0.12 g/l), el Número de Richardson (0.03 a 0.2) y la Energía cinética de la turbulencia ($0.009 \text{ m}^2/\text{s}^2$ a $0.0025 \text{ m}^2/\text{s}^2$), análisis en $0 \text{ m} \leq Z \leq 7 \text{ m}$, en a) vista en planta (XY), b) y d) Vista en perspectiva y c) vista del fondo, escenario de modelación numérica E3-3D.

Finalmente, en la Figura 5.22a) se presenta la configuración del fondo, en la Figura 5.22b) la configuración del fondo y el núcleo de CSs (0.1 g/l a 0.12 g/l), en la Figura 5.22c) la configuración del fondo y el núcleo de velocidades (0.85 m/s a 1.4 m/s), y en la Figura 5.22d) la superposición de las tres imágenes anteriores. En la Figura 5.22b), se identificó que el núcleo de CSs se localizó entre el talweg y el talud de la margen interna del meandro, y no se localizó al centro del meandro, en realidad está limitado o confinado en esta zona, debido al flujo helicoidal que tiende a llevar el material de la margen externa hacia la margen interna cerca del fondo. También, se identificó que en la zona de transición la CSs aumentó espacialmente. En la Figura 5.22c) la velocidad disminuyó en las zonas de transición, incluso la velocidad en esta zona está por debajo del criterio del núcleo de velocidades máximas, además no siguen la trayectoria del talweg, por lo que, en estas zonas existe una desviación con respecto al gradiente del fondo.

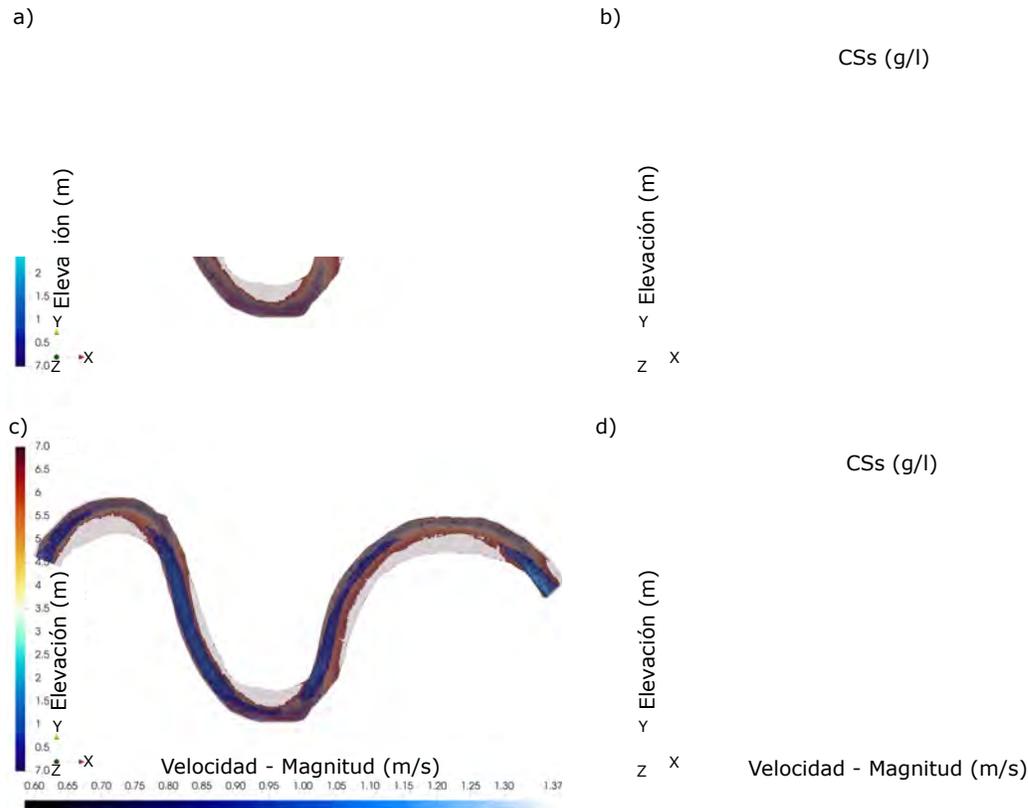


Figura 5.22. a) Configuración del fondo del cauce (CFC, m), b) CFC y núcleo máximo de la concentración de sedimentos suspendidos (NCSsM, 0.1 g/l a 0.12 g/l), c) CFC y núcleo de velocidades máximas (NVM, 0.85 m/s a 1.4 m/s), y d) CFC, NCSsM y NVM, análisis de $0 \leq Z \leq 7$ m, escenario de modelación numérica E3-3D.

En la Figura 5.23a), se presenta el campo del gradiente de velocidad (∇V), localizado a una elevación de $Z = 5$ m. En la entrada del meandro se observó un gradiente alto cerca de la margen izquierda, después sobre la curva, el mayor gradiente se localizó cerca del talweg y al final de la curva, se alojó sobre la margen derecha (parte interna de la curva). Después se identificó una región que conectó los gradientes poco antes del ápice de la segunda curva. Además, el gradiente disminuyó hacia la parte externa de la curva (indicado en color azul). Después, en la segunda curva, el gradiente se mantuvo sobre la parte central, entre el talweg y la margen derecha y poco antes de entrar en la tercera curva, el gradiente presentó una ampliación espacial, y después disminuyó poco antes del ápice e incluso fue nulo. En la tercera curva el mayor gradiente se mantuvo al centro y fue localizado sobre la margen izquierda, y disminuye hacia la margen derecha.

En la Figura 5.23b), se presenta el gradiente a $Z = 6$ m, se observó que los mayores gradientes se localizaron en la parte interna de la curva, y los menores gradientes en la parte externa de la curva, y que se alternan conforme a la curvatura del meandro. En la Figura 5.23c), el comportamiento de los gradientes persiste, se observó que en esta elevación, $Z = 8$ m, las zonas de transición de los gradientes (color naranja) desaparecieron, y las zonas de menor gradiente aumentaron, generando *canales internos* en donde la velocidad de flujo mantuvo su velocidad, desarrollando patrones de flujo serpenteantes al interior del meandro. En la Figura 5.23d), los mayores gradientes se localizaron sobre las barras cerca de los ápices del meandro, esto a $Z = 10$ m. En la Figura 5.23e), el gradiente sobre las barras fue

menor comparado con lo mostrado en la Figura 5.23d), y se muestra como estos gradientes se localizaron cerca de los ápices del meandro, además, esta zona reduce el área del meandro por donde fluye el flujo de bajo gradiente. También, se identificó que existe una variación del gradiente poco antes del ápice de la curva y la sección localizada aguas abajo del ápice (o aguas abajo de la zona de mayor gradiente, en color rojo), siendo esta última la de menor gradiente de velocidad (color azul oscuro), en $Z=11$ m. Finalmente, cerca de la superficie libre se localizaron los menores gradientes, $Z=17$ m. El gradiente de la velocidad se entiende como la tasa de cambio de la velocidad por la distancia.

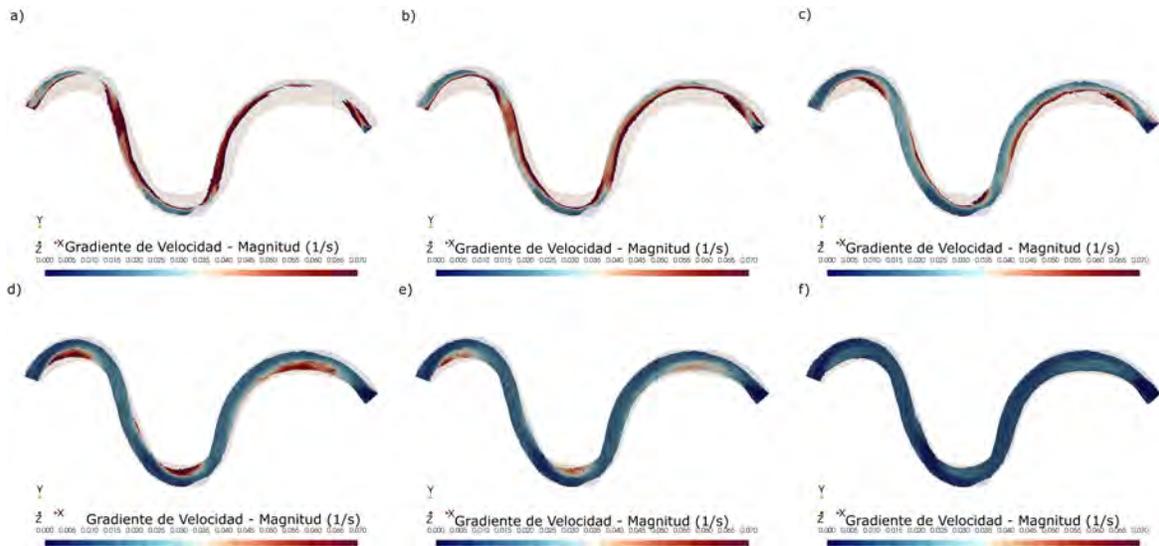


Figura 5.23. Gradiente de Velocidad (∇V), a) $Z=5$ m, b) $Z=6$ m, c) $Z=8$ m, d) $Z=10$ m, e) $Z=11$ m y f) $Z=17$ m, escenario de modelación numérica E3-3D.

5.7. Conclusiones

Con respecto a la información in situ, obtenida de Dominguez et al. (2021), se identificó que las superficies de velocidad presentan dispersión. También, se identificó la presencia de flujo helicoidal y los patrones de células secundarias desarrollados en las proximidades de las márgenes. Con respecto a la *CSs*, existen variaciones de las geometrías de las secciones procesadas a partir de la configuración en planta (*XY*) y las obtenidas en el proceso de análisis de las secciones transversales (*YZ*), aunque se buscó disminuir esta variación de la elevación mediante los factores de ajuste determinados en las gráficas, es claro que los errores están presentes, por lo que son un factor importante en la reducción de los coeficientes de correlación de ajuste entre la información in situ y los resultados numéricos.

En la condición de flujo alto, con un caudal de 2300 m³/s, se identificó una velocidad media de 0.88 m/s y una *CSs* media de 86.22 mg/l. El análisis de los perfiles de la velocidad y las *CSs* en la sección 1, permitió identificar que cerca de la margen izquierda, a 50 m, se presentó la distribución de velocidades de mayor magnitud, del orden de 1.1 a 1.2 m/s. Sin embargo, el perfil de la *CSs* en la vertical no es el máximo en este punto, dentro de esta sección de medición, el orden de la *CSs* fue de 60 a 76 mg/l. Por otro lado, el punto en donde se localizó la máxima *CSs*, fue a 123 m de la margen izquierda a la margen derecha, en donde la *CSs* fue del orden de 60 a 206 mg/l; en este punto, la *CSs* es 3 veces más que la reportada en el punto en donde la distribución de velocidades fue máxima. En ambos puntos se determinó que se presentó el movimiento de la partícula con base en el análisis de Shields y que el mecanismo principal fue la suspensión. Al utilizar la ecuación para el cálculo de los perfiles de concentración de sedimento suspendido y la ecuación del perfil de concentración de Rouse, se determinó una velocidad de caída (w_s) de 0.004 m/s y 0.007 m/s, con un Número de Rouse de 0.20 y 0.36, para la zona de mayor velocidad y la zona de mayor *CSs*, respectivamente. El análisis indicó que la partícula presentó una mayor velocidad de asentamiento en la zona de mayor concentración con respecto a la zona de mayor velocidad, fue por ello que el material se depositó en esta zona. Además, el ajuste del perfil de *CSs* en la zona de mayor velocidad presentó un decaimiento o colapso, esto también se observó por la caída en el coeficiente de correlación, $R = 0.7$, y, por lo tanto, no sigue el comportamiento del perfil de Rouse. Este colapso en el perfil de *CSs* se debe al asentamiento obstaculizado por efecto de la velocidad del flujo y los efectos del flujo secundario.

Con respecto a los escenarios de modelación numérica, el primero se enfocó en determinar el coeficiente de resistencia de Manning general, y el coeficiente de producción de corrientes secundarias (CPCS), con base en un análisis 2DH. Se encontró que los menores errores corresponden a un coeficiente $n = 0.25$ s/m^{1/3}, y CPCS = 14, los errores relativos medios fueron del orden de 3.5%, la sub/sobre estimación de la velocidad fue del orden de 33%, con una desviación estándar de 0.16 m/s. Con base en la hipótesis de que la velocidad calculada numéricamente debe aproximarse a la medida in situ, se determinó que el coeficiente de correlación fue de 0.65, correspondiente al escenario E1.4, y los mayores errores relativos de la velocidad corresponden a las secciones localizadas muy cerca de los ápices de las curvas; en general, se subestima la velocidad calculada numéricamente cerca de las márgenes.

En el segundo escenario de modelación numérica se analizó la *CSs* a partir del escenario previo (E1.4), también con base en un enfoque 2DH. El diámetro de la partícula del sedimento suspendido que se utilizó en las *CSs* fue de 0.11 mm (110 μ m), con $\sigma_g = 1.43$. El análisis se realizó al considerar la *CSs* como un trazador pasivo, por lo que, la *CSs* no altera el campo de velocidades. Los resultados del análisis de la *CSs* indicaron un amortiguamiento en las

distribuciones a lo largo de las secciones (1 a 12), aunque en las primeras cuatro secciones, el núcleo máximo de las CSs se localizó sobre las reportadas in situ, y en las secciones siguientes se identificó un amortiguamiento de la CSs , y presentó una distribución uniforme a lo ancho del meandro. El error relativo medio fue del 9%, la subestimación de la CSs fue del 47% y la sobreestimación de la CSs fue del 64%, con desviación estándar de 20 mg/l. La hipótesis de que la CSs calculada numéricamente debe aproximarse a la reportada in situ, esto es, $CSs_n \approx CSs_m$, se determinó con el coeficiente de correlación R , y fue de 0.6.

En el tercer escenario de análisis, se determinó la solución de la ecuación Advección-Difusión 3D. Los errores relativos medios de la velocidad fueron de 5.2%, la sub/sobre estimación de la velocidad fue del 34%, con desviación estándar de 0.16 m/s. El coeficiente de correlación R , entre los datos calculados numéricamente y los reportados in situ fue de 0.52. El análisis de la CSs presentó un error medio del 6.2%, la subestimación de la CSs fue del 32% y la sobrestimación fue de 74%, con una desviación estándar de 26 mg/l. El coeficiente de correlación entre las CSs calculadas y las medidas in situ fue del 0.56. Se observó que las distribuciones no son del todo uniformes como los resultados del análisis 2DH. También, se encontró que el núcleo máximo de las CSs se desplazó del centro hacia alguna margen.

El núcleo máximo de la velocidad difiere espacialmente del núcleo máximo de la CSs , ya que la primera presentó el máximo cerca de la superficie libre del agua, y la segunda, presentó un máximo cercano al fondo. Por otro lado, la formación de patrones o estructuras de flujo secundario sobre fondos móviles arenosos y/o deformables son característicos en flujo sobre meandros, y pueden desarrollar velocidades mayores cerca del fondo que incluso las localizadas a elevaciones superiores. Estas *estructuras* tienen un impacto en el desarrollo de la configuración del fondo del meandro. En el análisis de la CSs 3D se presentó el núcleo máximo de la CSs (0.1-0.12 g/l) confinado entre el talweg y el talud de la margen interna, cercano al fondo, esto se debe al efecto del flujo helicoidal que se desarrolló en esta zona, estos resultados indican que la CSs no se desarrollo al centro del meandro. El flujo helicoidal generó un transporte de sedimentos cruzado que ocasionó que la CSs se mantuviera en la zona indicada. También, se identificaron zonas de transición en donde el núcleo máximo de la CSs aumentó espacialmente, e incluso presentó un giro al pasar por *debajo* del Ri . Por su parte la mayor energía cinética de la turbulencia (k) se localizó en el fondo, y se presentó por la interacción del flujo con el sedimento, o zona de contacto. El núcleo del Ri (0.03-0.2) envuelve el núcleo máximo de la CSs , que es un indicador del proceso del mezclado vertical (agua-sedimento). La magnitud de la velocidad disminuyó en las zonas de transición indicadas en el núcleo máximo de la CSs , e incluso tampoco siguen el talweg localizado cerca de los ápices de las curvas, por lo que, los núcleos de velocidad máxima presentaron discontinuidades en esta zona y por lo tanto, disminuyen en magnitud. En estas zonas de transición, se identificó que el núcleo máximo de CSs y el núcleo máximo de la velocidad se entrelazan, esto es, la CSs poco antes del ápice se eleva, y bajó por la zona de transición hasta llegar a la parte interna de la curva, en donde quedó confinada por la k en el fondo, el Ri , y el núcleo de la velocidad. Además, la CSs fue impulsada hacia la margen interna por el efecto del flujo helicoidal en el fondo. Esto representa un desfase con respecto al núcleo de máxima velocidad. Finalmente, la parte externa de la curva cerca del ápice está gobernada por los mecanismos de células o estructuras secundarias (Blanckaert y De Vriend, 2004) y estructuras coherentes (Rodi et al., 2013; Nezu y Nakagawa, 1993) que son dependientes de la turbulencia, y que en la literatura se han identificado con un sentido de giro opuesto al flujo helicoidal, estas estructuras son las que gobiernan el mecanismo de erosión en la zona, por lo que son importantes de estudiar para comprender el fenómenos de migración de márgenes y la dinámica de meandros.

Meandros: Bifurcación y Avulsión

6.1. Introducción

La evolución de un meandro, definida como la migración lateral de un río hacia la margen externa en una curva, describe diferentes escalas espaciales y temporales. Las pequeñas escalas están relacionadas con la hidrodinámica, principalmente en cuestión de tiempo; las escalas intermedias se relacionan con la evolución del fondo del canal y el tiempo, mientras que las grandes escalas están relacionadas con la erosión y la migración de la margen. En la Figura 6.1 se presenta la evolución del meandro Padma, localizado en Bangladés, Asia. Las imágenes fueron tomadas del observatorio terrestre de la NASA, en la referencia online se encuentra una animación de la dinámica del meandro Padma a partir del año de 1988 hasta el año 2018 (NASA, Earth Observatory, 2023).

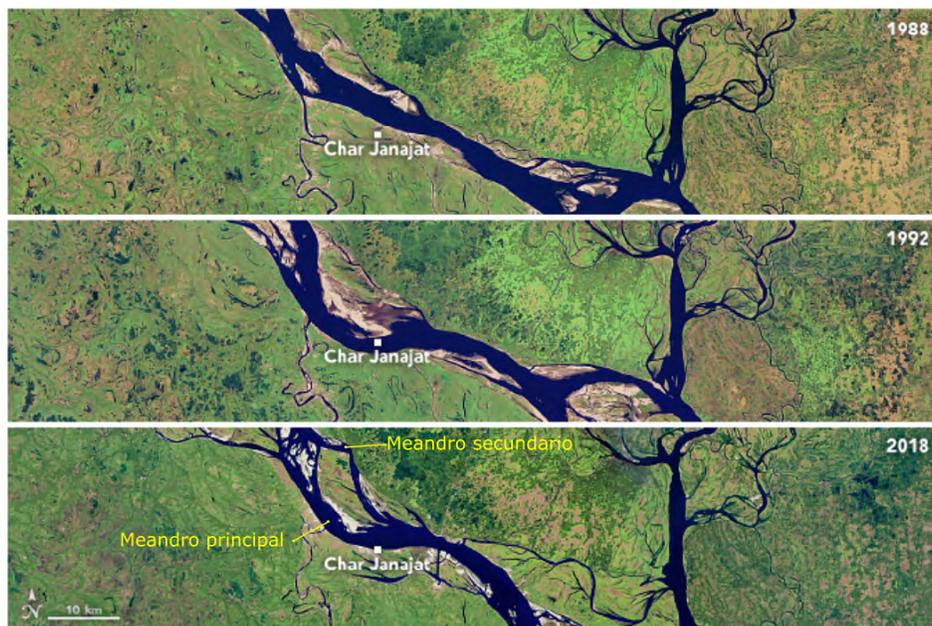


Figura 6.1. Evolución del meandro Padma parte baja, Bangladés, Asia. Fuente: NASA, Earth Observatory (2023).

En la naturaleza, los meandros presentan diferentes, características geométricas, condiciones hidráulicas e hidrológicas, características físicas y químicas de sedimentos, entre otras; por lo que, diversos estudios se han enfocado en análisis de laboratorios bajo condiciones idealizadas (Struiksmá y Crosato, 1989; Da Silva, 1995; Blanckaert y Graf, 2001b; Abad y García, 2005) y controladas para investigar los procesos subyacentes en la dinámica de meandros. Algunas de las condiciones idealizadas en los análisis en laboratorio y la modelación numérica son: caudal constante, ancho de sección constante, pendiente constante, márgenes y fondo no erosionables, isotropía de la turbulencia, geometría del meandro que sigue una ley senoidal, entre otras. Sin embargo, el análisis de la dinámica del flujo y sedimento en meandros es un fenómeno tridimensional, incluso algunos fenómenos como la interacción fluido-sedimento, la anisotropía de la turbulencia y distintas estructuras coherentes turbulentas presentan una descripción vaga en aplicaciones en meandros reales, y que solo se han realizado en modelos fluviales físicos a escala o canales de laboratorios, en donde las condiciones idealizadas fueron establecidas. Sin embargo, las investigaciones han aportado avances importantes en este campo de estudio.

En este sentido, algunas investigaciones del campo de velocidades en canales de laboratorio muestran que la velocidad máxima puede presentarse cerca de la margen interna de la curva antes del ápice, independientemente de la orientación de ésta, ver por ejemplo, Da Silva (1995)[p. 118, Fig. 6.13b)], Abad y García (2005)[Fig. 5]; este comportamiento también se ha identificado en un meandro real sin efectos de escala, ver Dominguez et al. (2021)[p. 6, Fig. 5]. Sin embargo, debido al efecto del flujo secundario y a la configuración del fondo desarrollado en el meandro, la velocidad máxima se desplaza hacia la margen externa poco antes del ápice, y esta última condición es parte fundamental de modelos de migración lateral de meandros, como el trabajo de Ikeda et al. (1981). Abad y Garcia (2009) investigaron los efectos de la resistencia al flujo en la orientación de meandros ocasionada por curvatura, e identificaron que se tienen una mayor fricción inducida en curvaturas con orientación hacia aguas abajo que hacia aguas arriba, ya que el gradiente de energía es mayor debido a esta configuración. Además, las estructuras turbulentas se ven afectadas por la orientación del meandro, recomiendan desarrollar investigación con flujos más someros con ayuda de modelos numéricos y destacan la necesidad de aportar mediciones experimentales para mejorar el conocimiento de la hidrodinámica en meandros.

Estudios del comportamiento de las formas en planta (vista XY) producto de las inestabilidades planimétricas pueden ocasionar la migración de la curva hacia aguas abajo o aguas arriba, en ingeniería de ríos se considera que la causa del meandreo en un río se atribuye a la inestabilidad del tipo de barras alternadas en canales rectos (Ikeda et al., 1981). En términos de grandes escalas de tiempo Seminara et al. (2001) y Seminara y Zolezzi (2001) proponen un régimen morfodinámico con el parámetro β_R , el cuál es la relación de ancho medio (B) a tirante o profundidad (H). Establecen que si $B > \beta_R$, el régimen es *superresonante* y si $B < \beta_R$ es *subresonante*, la condición de resonancia fue definida por Blondeaux y Seminara (1985). Para el primer régimen, las curvas se orientan hacia aguas abajo, mientras que para el segundo es hacia aguas arriba, aunque el tema continúa en investigación.

Los parámetros que influyen en la migración de un río son: la amplitud, la curvatura, la orientación, la hidrodinámica, la pendiente trasversal del meandro, la cantidad de sedimento y las características de éste, entre muchas otras; lo que conlleva un análisis que resulta bastante complejo aunado a las distintas escalas de tiempo. En algunos estudios, se opta por el desarrollo experimental y en algunos otros casos, se ha llevado a investigación de

campo, aunque es complicado tener en cuenta las distintas variables que intervienen en cada fenómeno. Algunos trabajos de investigación en modelos físicos experimentales y que proporcionan información sobre el procesos hidrodinámicos y de transporte de sedimento en meandros son: Rozovskii (1961), De Vriend (1981) Da Silva (1995), Abad y Garcia (2006), Blanckaert y De Vriend (2004), Blanckaert y Graf (2001a), Jin et al. (1990), Wei et al. (2016), Termini (2009), Baek et al. (2006), entre otros.

6.2. Teoría de ríos meandrantés

La génesis del desarrollo de meandros en ríos se ha asociado a inestabilidades que dan origen al desarrollo de barras alternadas en el fondo de canales rectos o aproximadamente rectos (Colombini et al., 1987); la perturbación que esto genera en las velocidades lleva a capacidades de erosión diferenciada en las márgenes, y la subsecuente formación de meandros. Ikeda et al. (1981) presenta el análisis lineal de un canal sinuoso en el que se estima la migración de la margen producto de inestabilidades de la curva, establece un modelo matemático que permite estimar una nueva delimitación del eje del meandro. En esta teoría de curvas se describe la erosión marginal y se establece un criterio de estabilidad, ambos en términos de la tasa de crecimiento de la amplitud lateral de la curva. Además, los autores indican que la inestabilidad de barras que se desarrolla en meandros opera en longitudes de onda similares, es decir, cuando la sinuosidad no es demasiado grande, pero no establece una métrica sobre la sinuosidad.

La sinuosidad, Ω se define como $\Omega = L/\Lambda$, en donde L es la longitud del río o longitud del thalweg y Λ es la longitud del meandro que une los puntos extremos, por lo que, en canales rectos la sinuosidad es igual a la unidad, mientras que en canales curvos y meandros puede llegar a ser de alrededor de 3.8 antes de que se presente el corte de un meandro (Julien, 2002, p. 182, Fig. 6.13). Sin embargo, evaluar este índice en curvas de arroyos o meandros puede requerir de análisis de Fourier o transformada Wavelet, pero descomponer en patrones claros u ondas regulares aunado a la falta de información puede no ser la mejor opción. Stanislawski et al. (2023) presentan una técnica para clasificar la sinuosidad en distintas escalas espaciales de meandros, por ejemplo, determinan una sinuosidad de 2.84 en un tramo del el río Cannonball de longitud de 15 km por 15 km, localizado en Dakota del Norte (USA), y presentó una clara evidencia de que para distintas geometrías idealizadas con diferentes tamaños de meandros la sinuosidad puede ser la misma.

El análisis de Ikeda et al. (1981) sobre de inestabilidad de curva se basa en las ecuaciones de Saint-Venant (2DH), con una migración lenta de un canal sinuoso y con un ancho medio que se puede considerar constante incluso en el proceso de migración, también consideran que la relación ancho (0.5) a radio de curvatura es mucho menor a la unidad y mantienen la consideración de flujo cuasi permanente (Johannesson y Parker, 1985). En el estudio, se considera un balance en el transporte de sedimento transversal, en donde las corrientes de flujo transversales, el material de sedimento de la erosión que se presenta en el fondo de una margen es depositado en el fondo de la margen opuesta. Este enfoque en las ecuaciones de Saint-Venant no permite un tratamiento de flujo secundario ni la variación lateral resultante por los cambios en la elevación del fondo. Parra esto proponer una ecuación que calcula la erosión de la margen en función de la velocidad tangencial, y justifica que solo las variaciones locales de los valores promedios de la velocidad pueden ocasionar la migración de la margen. La incisión vertical del fondo cerca de una margen se equilibra subsecuentemente. La Figura 6.2 ilustra el proceso de depósito de material en la margen interna y la erosión en la

margen externa, considerando que el sentido del flujo es de izquierda a derecha, con base en un sistema de referencia sinusoidal, (\bar{s}, \bar{n}) y la definición de los parámetros en el análisis de la hidráulica en meandros.

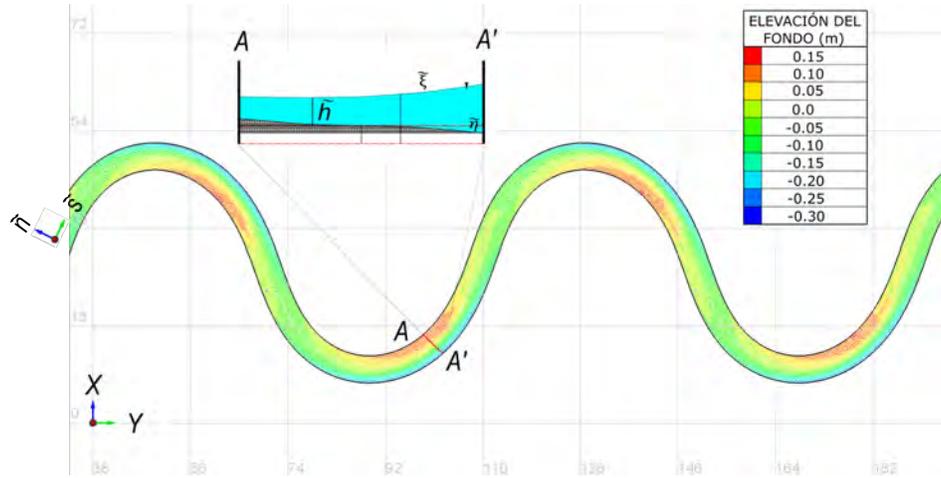


Figura 6.2. Definición de parámetros considerados en el análisis de la hidráulica en meandros, \tilde{h} es la profundidad local del flujo, definida como $\tilde{h} = \tilde{\xi} - \tilde{\eta}$, en donde $\tilde{\eta}$ es la elevación local del fondo, y $\tilde{\xi}$ es la elevación local de la superficie libre del agua (adaptado de Ikeda et al. (1981)).

Las consideraciones en la deducción de las ecuaciones de Saint Venant, en esencia no permiten un tratamiento de flujo secundario en canales con curvas, ni la variación resultante de la elevación de fondo, por lo que, Ikeda et al. (1981) presentó la teoría de curvas en ríos meandros. Actualmente, en modelos recientes como Telemac-Mascaret es posible considerar correcciones de flujo secundario en meandros en el análisis 2DH. Esto también ha sido analizado con aproximaciones tridimensionales y para casos aluviales se ha propuesto la relación al eje central y el radio de curvatura (Ikeda et al., 1981):

$$\frac{\eta}{H} = -AC' \quad (6.1)$$

En donde H es la profundidad media, C' la curvatura del meandro en la sección de análisis, A es una constante asociada a la pendiente transversal en la sección de análisis del meandro, también se puede considerarse como un factor de erosión, el resultado no cambia para un orden cuadrático de la relación ancho medio a radio de curvatura, en las ecuaciones de gobierno. Engelund (1974), consideró esta aproximación para obtener una descripción similar de la variación de velocidad tangencial (u') y la topografía de fondo, presentó una buena concordancia con los datos experimentales de Hooke (1974). Por su parte, Engelund (1974) sugirió un valor constante de A de alrededor de 4. Las teorías de Kikkawa et al. (1976) y Zimmerman y Kennedy (1978) estiman valores similares, pero ambas teorías indican que A debe incrementarse en función de la velocidad (U). En general este problema se trata de evitar al simplificar y emplear un valor constante de A ; lo mejor es contar con información de campo, pero por simplificación es aceptable considerar una estimación de la pendiente transversal de la sección. Otros autores, por ejemplo, Suga (1963), según lo indicado por Ikeda et al. (1981), realizó un análisis estadístico de 45 curvas y sugirió un valor promedio de 2.89 para A , aunque su análisis presenta dispersión.

El factor de socavación tiene que ver con la pendiente transversal de la sección y la deducción puede encontrarse en Beck (1988). Aunque, se tiene conocimiento de que este parámetro no es constante, otros autores como: Rozovskii (1961) indica un valor de 11 con base en datos experimentales, por su parte Beck (1988), presenta la discusión entre mediciones experimentales y datos obtenidos en campo en dónde se pueden alcanzar valores de A de entre 10 y 50, por ejemplo, para los datos medidos en el río Sacramento (California, USA). Langendoen et al. (2016)[p. 6] indica que se puede estimar con la siguiente expresión:

$$A = 3.8 \left(1 + \frac{B}{13.9h} \exp \left(\frac{-13.9h}{B} \right) \right) \quad (6.2)$$

En donde A es el factor de socavación y B es el ancho del canal. El parámetro A puede ser de gran ayuda en la calibración de flujos secundarios en análisis del flujos promediados en la vertical, sin embargo, se debe tener presente que los flujos secundarios son fenómenos tridimensionales.

6.3. Meandro Kinoshita

La geometría de un meandro permite comprender los procesos de migración de margen y el cambio en las condiciones ambientales (Stanislawski et al., 2023), y están relacionados con el monitoreo hidrológico y ecológico (Schumm, 1985). La caracterización adecuada de geometrías de meandros requiere de modelos matemáticos que puedan describirlas a través de patrones con ayuda de la teoría de fractales. Incluso, la generación sintética de geometrías que cumplan con ciertas características geometrías es de gran ayuda en el desarrollo de modelos prototipo o modelos a escala reducida para análisis de fenómenos hidráulicos y de transporte de sedimentos en la modelación experimental. También, estas geometrías se utilizan en la modelación matemática de estos procesos. Stanislawski et al. (2023), presenta un modelo matemático para la descripción de los patrones de curvatura de arroyos, y parametriza una curva en planta por un ángulo tangencial y la longitud de arco con la ecuación $\phi(s) = \omega \text{seno}(s)$, en donde ω es el ángulo de desviación a partir del eje central y s es la longitud medida a lo largo de la curva (Langbein y Leopold, 1966, p. H3, Ec. 10).

Otra geometría para el diseño de canales meandantes es la de *Kinoshita*. La abstracción matemática se expresa en coordenadas *intrínsecas* en la Ecuación 6.3 (Abad y Garcia, 2009, p. 2, Ec. 1), es decir, el desarrollo del meandro se desarrolla sobre el eje s , que representa la coordenada sobre el eje de las abscisas, y n la coordenada sobre el eje de las ordenadas, similar a la teoría de meandros presentad por Ikeda et al. (1981). En la curva s representa la coordenada sobre el eje horizontal del canal y n la coordenada transversal al eje central o principal del canal, esto se lleva a un sistema de coordenadas cartesianas (X, Y, Z) y su correspondiente base ortonormal $(\hat{e}_1, \hat{e}_2, \hat{e}_3)$. Similar a lo establecido en la Figura 6.3.

$$\theta(s) = \theta_0 \text{sen} \left(\frac{2\pi s}{\lambda} \right) + \theta_0^3 \left[J_s \cos \left(\frac{3\pi s}{\lambda} \right) \right] - J_f \text{sen} \left(3 \frac{2\pi s}{\lambda} \right) \quad (6.3)$$

En donde:

$$\begin{aligned}
 \theta_0 &= \text{Amplitud angular máxima} \\
 s &= \text{Coordenada sobre el eje principal} \\
 \lambda &= \text{Arco de longitud de onda} \\
 J_s &= \text{Coeficiente de sesgo (asimetría)} \\
 J_f &= \text{Coeficiente de planicie (llanura)}
 \end{aligned}$$

En los experimentos desarrollados por Abad y Garcia (2009) se consideraron tres curvas consecutivas para tener un flujo turbulento completamente desarrollado y periódico. En su trabajo se analizó el flujo en curvas considerando una estructura de flujo turbulento completamente desarrollada alrededor de la curva central (segunda curva). Otros trabajos en los que se ha utilizado esta geometría son: da Silva et al. (2006), Abad y Garcia (2006), Ottevanger et al. (2012), Abad et al. (2013), Rousseau et al. (2016), Termini (2009), entre otros.

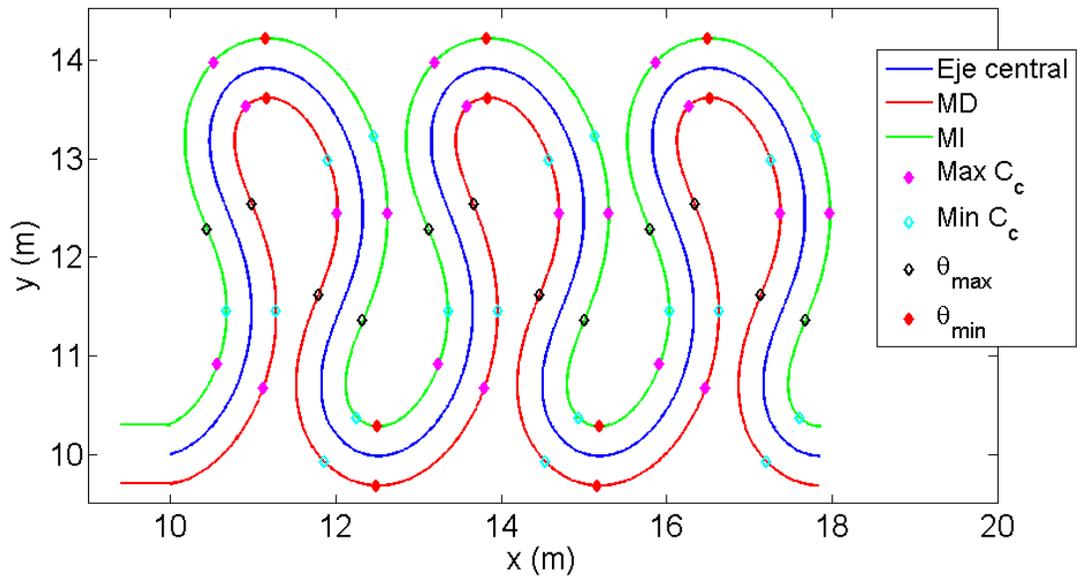
El ángulo $\theta(s)$ define la amplitud local de la orientación del valle con respecto al eje de la curva. Al reducir, la magnitud de θ_0 , la Ecuación 6.3 se reduce a curvas simétricas senoidales (Langbein y Leopold, 1966). La curvatura del canal al centro del eje se calcula como (Abad y Garcia, 2009, p. 4):

$$C_c = \frac{1}{R_c(s)} = -\frac{\partial(\theta)}{\partial(s)} \quad (6.4)$$

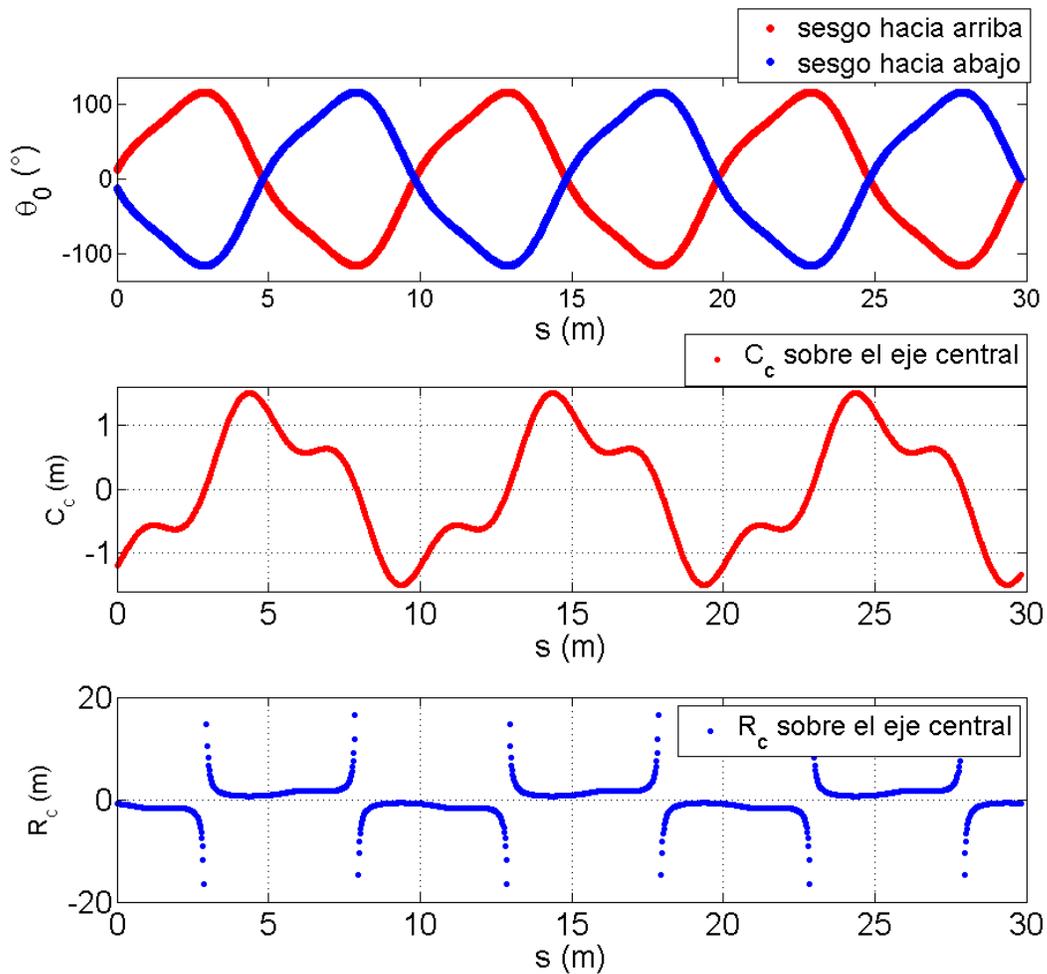
en donde θ está dado por la Ecuación 6.3 y $R_c(s)$ es el radio local de curvatura. Los puntos de inflexión (PI) están definidos especialmente por la curvatura, $C_c(s) = 0$.

El comportamiento del flujo helicoidal en el sentido del flujo principal, se identifica como: los vectores de velocidad localizados en la proximidad de la superficie libre del agua presentan un núcleo máximo cercano a la margen interna del meandro antes del ápice de la curva y poco antes de ápice cambian de margen, por lo que, el núcleo de velocidad máxima se posiciona sobre la margen externa, el comportamiento de los vectores de velocidad cercanos al fondo presentan un comportamiento cruzado al que se presenta cerca de la superficie libre, en la dirección del flujo principal.

En la Figura 6.3 se presenta la geometría del meandro *kinoshita*, las características del meandro son las reportadas por Abad y Garcia (2009) y se indican en la Tabla 6.1, estos autores realizaron mediciones del campo de velocidades sobre un dispositivo experimental con estas condiciones y presentaron el análisis numérico 3D de la hidrodinámica. En la Figura 6.3(b), se presenta el comportamiento del ángulo θ_0 , la curvatura (C_c) y el radio de curvatura (R_c), para una orientación de curva hacia aguas arriba. Además, en la Figura 6.3(a), se localizan los puntos de curvatura máxima (rombo color magenta) y mínima (rombo en color cian) que también se indican en la Figura 6.3(b), y corresponden a los extremos de la función. También, en la Figura 6.3(a), se muestra el ángulo θ máximo (rombo color negro) y mínimo (rombo color rojo), el comportamiento de esta variable se muestra en la Figura 6.3(b); y se presenta el comportamiento en ambos sentidos, con orientación de la curva hacia aguas arriba y hacia aguas abajo. En la Figura 6.3(b) se presenta el comportamiento de los radios de curvatura (R_c), y se identificaron los puntos de inflexión que tienden a $+\infty$ y $-\infty$, respectivamente.



(a) Geometría, curvas con sesgo hacia aguas arriba



(b) Ángulo θ_0 , curvatura y radio de curvatura

Figura 6.3. Detalles de la geometría del canal de kinoshita, orientación de la curva hacia aguas arriba.

Tabla 6.1: Características geométricas del canal de kinoshita

| Parámetro | Magnitud | Unidad |
|-------------|------------|--------|
| θ_0 | = 110 | |
| λ_c | = 10 | m |
| J_s | = 1/32 | |
| J_F | = 1/92 | |
| F | = 0.4113 | |
| $s1$ | = 0 | |
| NF | = 3 | |
| B | = 0.6 | m |
| m | = 1.00E-06 | |
| X_c | = 10 | m |
| Y_c | = 10 | m |
| ds | = 0.02 | m |

La ecuación de *Kinoshita* se utilizó para obtener geometrías curvas y establecer algunos parámetros de interés, con lo que se pueden desarrollar distintos análisis de la hidrodinámica que se desarrolla en canales curvos o meandros. La ecuación presenta la ventaja de poder reproducir curvas del tipo senoidales o incluso más complejas.

6.4. Pregunta de investigación

Con ayuda de un modelo numérico 2DH se investigó ¿Cuál es la influencia en el proceso de avulsión generado por la presencia de un canal secundario, con respecto al ángulo y posición de conexión con un meandro en el cauce principal? Se consideraron los mecanismos de transporte de sedimento de fondo y en suspensión.

6.5. Mecanismos de transporte de sedimento

6.5.1. Transporte de fondo y en suspensión

Las ecuaciones del transporte de sedimento y la morfología de fondo en Sisyphé se presentaron en la sección 5.4.2 (EDF-R&Db., 2020). Se desarrolló el análisis de transporte de fondo implementado la ecuación de Meyer-Peter y Müller. También, se consideró la influencia de la rugosidad en el proceso de transporte de sedimento esto es necesario ya que las formas de fondo tienen una influencia importante en la resistencia del flujo (García, 2008, p. 99). Al tener la presencia de formas de fondo en un canal rectangular, el esfuerzo cortante total de fondo (τ_b) tiene dos componentes principales que son: la fricción de superficie de grano (τ_{bs}) que, se asocia con el esfuerzo cortante local; y al arrastre de forma (τ_{bf}) debido a la presión y que depende de la forma de fondo (García, 2008, p. 99).

$$\tau_b = \tau_{bs} + \tau_{bf} \quad (6.5)$$

Únicamente el componente debido a la fricción de superficie (τ_{bs}) actúa sobre la carga de fondo (EDF-R&Db., 2020, p. 23). El esfuerzo cortante debido a la fricción de superficie (τ_{bs})

se expresa como (EDF-R&Db., 2020, p. 23):

$$\tau_{bs} = \frac{C'_f}{C_f} \tau_b = \frac{C'_f}{C_f} 0.5 \rho C_f (U^2 + V^2) \quad (6.6)$$

donde el coeficiente de fricción C_f se debe al arrastre debido a la forma de fondo más la fricción de superficie, y el coeficiente C'_f se debe únicamente a la fricción de superficie; se calcula como (EDF-R&Db., 2020, p. 23):

$$C'_f = 2 \left(\frac{\kappa}{\log\left(\frac{12h}{k's}\right)} \right)^2 \quad (6.7)$$

donde κ es la constante de Von Kármán (0.4), $k's$ la altura de rugosidad hidráulica equivalente estimada mediante $k's = \alpha_{ks} d_{50}$, y el coeficiente α_{ks} es un parámetro de calibración. Mendoza et al. (2017) presentó un análisis numérico y utilizó $\alpha_{ks} = 3.6$ para el desarrollo de barras y $\alpha_{ks} = 37$ para el desarrollo de dunas, para la calibración numérica utilizó datos reportados en la literatura. En esta sección se propone un coeficiente $\alpha_{ks} = 10$.

La corrección de la dirección del transporte de la carga de fondo, se realizó por la formulación de Koch y Flokstra (EDF-R&Db., 2020, p. 23), y la corrección de la intensidad de la velocidad de transporte de la carga de fondo se realizó mediante la formulación de Soulsby, que está asociado con el ángulo de fricción de sedimento (EDF-R&Db., 2020, p. 23). El parámetro de desviación se consideró de 1.6, ligeramente por arriba de 1.3 que es el valor recomendado (EDF-R&Db., 2020, p. 23).

El factor morfológico (FM) modifica la evolución de fondo con un factor constante, es decir, se puede acelerar el proceso de los cambios de fondo con respecto a los procesos hidrodinámicos. Esta aproximación reduce el esfuerzo computacional sin pérdida significativa en la calidad del modelo (EDF-R&Db., 2020). Knaapen y Joustra (2012) realizaron pruebas del modelo numérico Telemac-Sisyphe con distintos factores morfológicos (FMs) validando los resultados con información experimental de un modelo morfodinámico, determinaron una aproximación en la morfología del fondo con el índice $BSS = 0.94$, indicando que es excelente. También presentaron el caso de cálculo de transporte de sedimento en un estuario y la morfología del fondo con FMs de 1, 5, 10 y 20, mostrando una tendencia lineal en la reducción de los tiempos de proceso. Por su parte, (Morgan et al., 2020) utilizaron diversos FMs en la simulación de la morfología fluvial a gran escala en el río Nooksack (Washington, USA), y determinaron un gráfico de FM vs el porcentaje medio de error en los cambios de elevación, indicaron que para un FM = 5 el error fue de 8%, y para un FM = 30 el error fue de 30%.

En los siguientes análisis de la morfología de fondo se utilizó un FM = 5 que permite reducir tiempos de proceso hasta en un 80% con errores del orden del 8% en la morfología del fondo, con base en lo indicado en el párrafo anterior. El diámetro característico (d_{50}) de sedimento fue de 1 mm, asociado a una arena con densidad (ρ_s) de 2650 kg/m^3 , y porosidad de fondo de 0.4. También, se consideró la corrección del transporte de sedimento por desviación entre éste y la tensión de corte ocasionada por la pendiente transversal y el efecto de corrientes secundarias o flujo helicoidal. Además, de que la pendiente del fondo puede ser mayor al ángulo de fricción del material (θ_s), así como el efecto de la pendiente de fondo, en el cálculo de la carga de fondo.

La carga suspendida es la porción del sedimento que es transportada por el flujo, en donde las fluctuaciones de la velocidad turbulenta son lo suficientemente grandes para mantener las partículas dentro de la masa del fluido sin un contacto frecuente con el fondo del canal (Julien, 2010, p. 173). El material se mantiene la mayor parte del tiempo en suspensión debido a la turbulencia del flujo y es contrarrestado por el efecto de la velocidad de asentamiento del sedimento (Garcia, 2008, p. 108).

El análisis de este fenómeno se realiza mediante las ya indicadas ecuaciones de Advección-Difusión-Reacción (ADR), este último término permite evaluar la interacción de un contaminante con la materia contenida en el fluido, incluso procesos químicos y termodinámicos que se pueden dar en él. El proceso de reacción también se conoce como de transformación de sustancias. Además, este último término en la ecuación también se conoce como conservación de especies, y permite reproducir casi cualquier contaminante que se transporte dentro de un fluido que equivale a la diferencia de los flujos de sedimentos a través de las caras del volumen de control, es decir, el cambio de sedimento en un volumen de control (Moreles y Botello, 2007).

La deducción de la ecuación de advección-difusión (EAD) determinada a partir de un balance diferencial dentro de un volumen de fluido en tres dimensiones, en donde se consideró la hipótesis de promedios de Reynolds tanto para los componentes de velocidad (u_x, u_y, u_z) y la concentración de sedimento en suspensión (c), definidos por un valor medio y su fluctuación, en un flujo turbulento estacionario fue presentada por Rutherford (1994)[p. 22]. En donde el transporte de sedimentos en suspensión de una fase se debe a por lo menos tres mecanismos que son: los flujos advectivos, los flujos difusivos y los flujos por mezclado turbulento (Rutherford, 1994, p. 22):

$$\underbrace{\frac{\partial c}{\partial t}}_{[1]} + \underbrace{v_x \frac{\partial c}{\partial x} + v_y \frac{\partial c}{\partial y} + v_z \frac{\partial c}{\partial z}}_{[2]} = D \underbrace{\left[\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \right]}_{[3]} - \underbrace{\left[\frac{\partial \overline{u'_x c'}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{u'_y c'}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{u'_z c'}}{\partial z} \right]}_{[4]} \quad (6.8)$$

en donde, [1] es la tasa de cambio de masa de concentración de sedimentos en suspensión respecto al tiempo o derivada local, [2] son los términos advectivos, [3] los términos de difusión molecular y [4] los términos de difusión por mezclado turbulento.

Las correlaciones dobles se conocen como flujos de Reynolds o esfuerzos de Reynolds para flujos de sedimento debido a la turbulencia (Garcia, 2008, p. 108) en kg/m^2s , indicados en la Ecuación 6.8 y se calculan con (Moreles y Botello, 2007, p. 23):

$$\overline{u'_i c'} = -\varepsilon \frac{\partial c}{\partial x_i} \quad (6.9)$$

En donde ε es el coeficiente de difusión turbulenta (m^2/s). Observe que la ecuación Ecuación 6.9 es la tasa de transferencia de masa y es proporcional al gradiente de concentración, y es análoga a la tasa de transferencia de momentum que es proporcional al gradiente de velocidad, es decir, al concepto de viscosidad de remolino (propuesto por Boussinesq, 1877 (Rutherford, 1994, p. 29)), entonces $\nu_t = \varepsilon$. Sin embargo, en algunas situaciones, cuando se trata con trazadores flotantes o altas concentraciones de sedimento, esta analogía de los esfuerzos de Reynolds no se cumple del todo, y se interpreta con (Rutherford, 1994; Mehta,

2013, p. 30, p. 363):

$$S_c = \frac{\nu_t}{\varepsilon} \quad (6.10)$$

En donde, S_c es el número de Schmidt y depende de las condiciones del flujo, las propiedades de las especies o concentración de sedimento suspendido y las condiciones locales del flujo. Garcia (2008)[p. 772] indicó que generalmente se considera constante espacialmente por conveniencia e ignorancia teórica y quizás también a la poca información disponible experimental y/o de campo. Otra complicación es la anisotropía de la difusión de las partículas de sedimento ya que en general las partículas no siguen el movimiento turbulento de elementos de flujos de agua (Mehta, 2013, p. 363), así como de las estructuras turbulentas dentro del flujo.

Los términos [3] y [4] en la Ecuación 6.8 son de difusión, y se pueden identificar por el orden de escala de los respectivos coeficientes de cada uno, por ejemplo, para [3] son del orden de $10^{-9}m^2/s$ en mezclado de trazadores en donde las propiedades del solvente y del soluto permanecen casi constantes; y los términos en [4] son del orden de $10^{-3}m^2/s$ (Rutherford, 1994, p. 2). En general, el mecanismo de transporte de sedimentos en suspensión por advección corresponde a la relación de transporte de c y los componentes de velocidad [2], los flujos difusivos están relacionados con el movimiento molecular descritos por la ley de Fick (Mehta, 2013; Julien, 2010; Rutherford, 1994, p. 358, p. 176, p. 6) que son considerados a través del coeficiente de difusión molecular (D) y los flujos por mezclado turbulento están relacionados con la difusión turbulenta, que son descritos a través de los coeficientes de mezclado turbulento ($\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$) (Julien, 2010, p. 176); estos últimos coeficientes también se conocen como coeficientes de difusividad de remolino o coeficientes de difusividad turbulenta (Garcia, 2008; Rutherford, 1994, p. 109, p. 23), y está relacionados con el gradiente de c . En flujos turbulentos el coeficiente D se puede despreciar, ya que son de mucho menor orden de magnitud que los coeficientes de mezclado turbulento, esto es, $D \ll \varepsilon$ (Rutherford, 1994; Weng, 1990, p. 6, p. 164). Es de considerar que el proceso de difusión turbulenta es más efectivo que el proceso de difusión molecular.

En un meandro la anisotropía de la turbulencia es mayor cercana a las fronteras, y por lo tanto los coeficientes ε no son una cantidad escalar (Dagan, 1969), sino que debe ser considerado como un tensor de segundo orden ε_{ij} , en donde los componentes varían de un punto a otro dentro del flujo, sí se considera isotropía de la turbulencia los elementos dentro de la traza se igualan y son descritos por un escalar, y los demás son nulos (Weng, 1990, p. 164). El tensor ε_{ij} tiene un impacto en el término [4] de la Ecuación 6.8, por lo que, se tiene que desarrollar y determinar estos coeficientes se vuelve una tarea difícil (Weng, 1990, p. 164).

La Ecuación de Advección-Difusión (EAD) en su versión 2DH y 3D que resuelve el sistema de modelación matemática Telemac-Mascaret (EDF-R&Da., 2020) se ha presentado en la Sección 5.4.1. En donde se han descuidado los términos de difusión molecular.

Las suspensiones en equilibrio son aquellas que se presentan en un canal rectangular ancho de baja pendiente y que puede ser erosionado, en donde las formas de fondo no presentan curvaturas importantes, por lo que se tiene un flujo con suspensión uniforme, en donde las condiciones en equilibrio se deducen de la Ecuación 6.8 que conduce a (Garcia, 2008; Julien, 2010; Mehta, 2013, p. 109-Ec. 2-19b;p. 184-Ec. 10.16, p. 362-Ec. 6.114):

$$\varepsilon_z \frac{\partial C}{\partial z} + \omega_s C = 0 \quad (6.11)$$

donde, ε_z es el coeficiente de mezclado turbulento de sedimento (Julien, 2010, p. 184), componente en el sentido vertical. El primer término del lado izquierdo corresponde al flujo ascendente proveniente por efectos de la turbulencia y el segundo término representa la tasa de depósito de sedimento suspendido por efecto de la gravedad (Garcia, 2008, p. 109), balance en el sentido vertical de la Ecuación 6.8. El resultado del perfil de concentración para valores constantes de ω y ε_z y que ha sido integrada en la profundidad es (Julien, 2010, p. 184):

$$\omega_s C = C_0 e^{-\omega_s z / \varepsilon_z} \quad (6.12)$$

El caso general, en donde el coeficiente de mezclado turbulento de sedimento ε_z es descrito en la profundidad por analogía con el coeficiente de intercambio de *momentum* ε_m (Mehta, 2013, p. 363), es definido por el esfuerzo cortante turbulento, y con base en la hipótesis de longitud de mezclado de Prandtl (Vanoni, 1975, p. 75-76, Ec. 2.76), se tiene que:

$$\varepsilon_z = \beta_s \kappa u_* \frac{z}{h} (h - z) \quad (6.13)$$

En el que β_s es la relación del coeficiente de mezclado turbulento del sedimento al coeficiente de intercambio de *momentum*. Este coeficiente β_s es el inverso proporcional al número de Schmidt, $\beta = 1/S_c$, y permanece suficientemente cerca de la unidad para la mayoría de aplicaciones prácticas (Vanoni, 1975, p. 75-76, Ec. 2.76), aunque esta discusión se ha mostrado en párrafos anteriores, κ es la constante universal de Von Kármán, u_* la velocidad al cortante, h la profundidad del flujo y z la elevación. Generalmente, se mantiene para la derivación del perfil de concentración y con ayuda de la ley para perfiles de velocidad turbulentos, se llega a la Ecuación 6.13.

El coeficiente de mezclado resultante ε_z varía con z de forma parabólica, desde el fondo hasta la superficie. El valor máximo de ε_z es con $\beta_s = 1$ y $\kappa = 0.4$, y es igual a $\varepsilon_z = 0.1u_*h$ a media profundidad, $z = 0.5h$ (Mehta, 2013, p. 53). La expresión para ε_z en la Ecuación 6.13 es sustituida dentro de la Ecuación 6.11 y resuelta después de separar las variables C y z .

$$\frac{C}{C_a} = \left(\frac{h-z}{z} \frac{a}{h-a} \right)^{Ro} \quad (6.14)$$

$$Ro = \frac{\omega_s}{\beta_s \kappa u_*} \quad (6.15)$$

En el cual C_a representa la concentración de sedimento a un nivel de referencia a sobre la elevación del fondo. La concentración relativa C/C_a depende de la elevación z de referencia (Rouse, 1938). El exponente Ro se refiere al *número de Rouse* y refleja la relación de las propiedades del sedimento a las características hidráulicas del flujo. Por ejemplo, cuando $\beta_s = 1$ y $\kappa = 0.4$, $u_*/\omega_s = 2.5$ y $Ro = 1$. En la Figura 6.4 se ilustran los perfiles de concentración a una referencia $a/h = 0.05$. La concentración de partículas de sedimento se hace cada vez mayor cerca del fondo a medida que aumenta el tamaño del sedimento. En la Figura 6.4 se identifican los mecanismos de transporte para el sedimentos en función de u_*/ω_s y el número de Rouse, Ro .

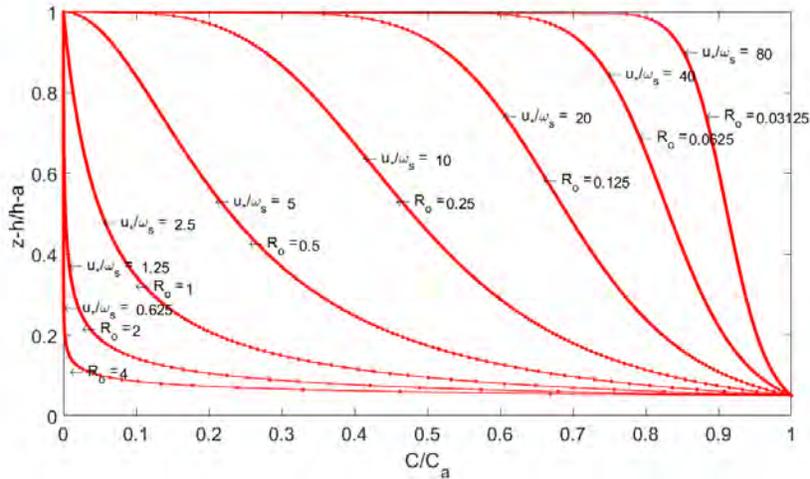


Figura 6.4. Perfiles de concentración de Rouse de sedimento en equilibrio para $a/h = 0.05$.

En la práctica el perfil de concentración de sedimento suspendido se vuelve uniforme para esto corresponde a velocidades de asentamiento $\omega_s < 0.001\text{m/s}$ asociado a tamaños de partículas de limos y arcillas. En el caso de que la carga de fondo sea dominante, el perfil de concentración de sedimento cerca del fondo se puede calcular a partir de una simplificación de la Ecuación 6.14. Sin embargo, se deben considerar las dificultades de determinar valores exactos o lo más cercano posible para: (1) la elevación de referencia (z_a) cercana al fondo; (2) el diámetro del grano representativo a caracterizar; y (3) la concentración cercana al fondo; con el objetivo de minimizar errores.

También es difícil medir la concentración de sedimentos en una capa que normalmente tendrá un tamaño de unos pocos milímetros, ya que los valores exactos de Ca son difíciles de medir (Mehta, 2013). Por ejemplo, cuando $0.2 < u_* / w_s < 0.4$, la mayor parte del transporte de sedimentos se realizará en una capa delgada muy cerca del fondo.

A medida que el número de Rouse (Ro) disminuye una mayor fracción del sedimento se transportará en suspensión. Normalmente, la suspensión se vuelve significativa cuando $Ro < 1$ (Julien, 2010, p. 187). Para un flujo uniforme y constante, la concentración del sedimento suspendido C varía con la profundidad del flujo (h) y la distancia sobre el fondo (z).

6.6. Escenarios de modelación numérica de los meandros tipo Kinoshita

En esta sección se analizan las características hidráulicas y de transporte de sedimento que permiten favorecer el proceso de migración en un meandro. El análisis se enfoca principalmente en el desarrollo del flujo helicoidal y el proceso de evolución de fondo, ya que el primer mecanismo establece que (1) la velocidad es mayor cerca de la margen interna y antes del ápice del meandro, y (2) que la velocidad es mayor en la margen externa después del ápice de la curva, comportamiento que prevalece hacia aguas abajo del meandro. El segundo mecanismo se basa en el desarrollo de la evolución del fondo por efecto del campo de velocidades que se desarrolla sobre éste; aquí se analizan los procesos de erosión, el transporte de sedimento de fondo y el transporte de sedimento en suspensión.

6.6.1. Meandro principal

Las características hidro-morfológicas y las condiciones que favorezcan el proceso de migración de un meandro no son del todo claras. Una idea fundamental, es el desarrollo del flujo helicoidal, en donde el campo de velocidad de un flujo se concentra sobre una margen, la erosiona y posteriormente se desarrolla el movimiento lateral del meandro. En esta sección se investigan las características hidro-morfológicas para identificar las condiciones que desarrollen el flujo helicoidal sobre un meandro, se busca concentrar la velocidad sobre la margen externa después del ápice del meandro, es por ello, que se establecen nueve escenarios de modelación numérica. Se utiliza la ecuación de *kinoshita* para desarrollar las geometrías (Ecuación 6.3). Las características establecidas en cada uno de los escenarios se presentan en la Tabla 6.2.

Tabla 6.2. Condiciones para los escenarios de modelación numérica

| Escenario Parámetros | Unidad | <i>A</i> | <i>B</i> | <i>C</i> | <i>D</i> | <i>E</i> | <i>F</i> | <i>G</i> | <i>H</i> | <i>I</i> |
|-------------------------|--------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| <i>Q</i> | m^3/s | 0.500 | 0.500 | 0.500 | 0.150 | 2.000 | 0.500 | 0.500 | 0.500 | 0.500 |
| <i>v</i> | m/s | 0.222 | 0.667 | 0.667 | 0.667 | 0.833 | 0.667 | 0.667 | 0.667 | 0.667 |
| <i>y</i> | <i>m</i> | 0.150 | 0.150 | 0.150 | 0.150 | 0.300 | 0.150 | 0.150 | 0.150 | 0.150 |
| <i>B</i> | <i>m</i> | 15.000 | 5.000 | 5.000 | 1.500 | 8.000 | 5.000 | 5.000 | 5.000 | 5.000 |
| <i>S</i> | m/m | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 0.001 |
| <i>A</i> | – | 27.590 | 9.805 | 9.805 | 4.481 | 8.129 | 9.805 | 9.805 | 9.805 | 9.805 |
| <i>F_r</i> | – | 0.389 | 0.673 | 0.673 | 0.673 | 0.532 | 0.673 | 0.673 | 0.673 | 0.673 |
| <i>C_f</i> | – | 0.0298 | 0.0033 | 0.0033 | 0.0033 | 0.0042 | 0.0033 | 0.0033 | 0.0033 | 0.0033 |
| <i>k</i> | $1/m$ | 1.453 | 0.095 | 0.095 | 0.062 | 0.054 | 0.095 | 0.095 | 0.095 | 0.095 |
| λ_{min} | (<i>m</i>) | 4.325 | 66.150 | 66.150 | 101.478 | 115.521 | 66.150 | 66.150 | 66.150 | 66.150 |
| θ_0 | (°) | 120 | 120 | 120 | 120 | 120 | 80 | 90 | 100 | 110 |

En donde, *Q* es el caudal, *v* la velocidad media en la sección de entrada, *y* el tirante normal en la sección de entrada, *B* el ancho del meandro, *S* la pendiente inicial del meandro, *A* es un parámetro que describe la pendiente transversal, también definido como factor de socavación y se calcula como $A = 3.8 \left(1 + \frac{B}{13.9H} \exp\left(\frac{-13.9H}{B}\right)\right)$ (Langendoen et al., 2016, p. 9-Ec. 13), *Fr* el número de Froude para las condiciones de la sección de entrada, *C_f* el factor de fricción de

fondo definido como $C_f = gHS/v^2$ (Johannesson y Parker, 1989, p. 183-Ec. 5), k es el factor de crecimiento de la curva del meandro definido con la ecuación $k = \frac{2^{0.5}C_f}{H}(A - 1 + F^2)^{0.5}$ (Langendoen et al., 2016, p. 9-Ec. 12), λ_{min} es el arco de longitud de onda y θ_0 la amplitud angular máxima; en el análisis se ha sustituido H por y , indicado en la Tabla 6.2 para cada escenario.

6.6.1.1. Resultados

En la Figura 6.5 se presenta el campo de velocidades del escenario A considerando la hidrodinámica y el transporte de sedimento. Se identificó que la velocidad es máxima cerca del ápice de la curva y se mantiene sobre la margen interna, sin embargo la velocidad máxima se mantiene al interior de la curva y no se desplaza después del ápice.

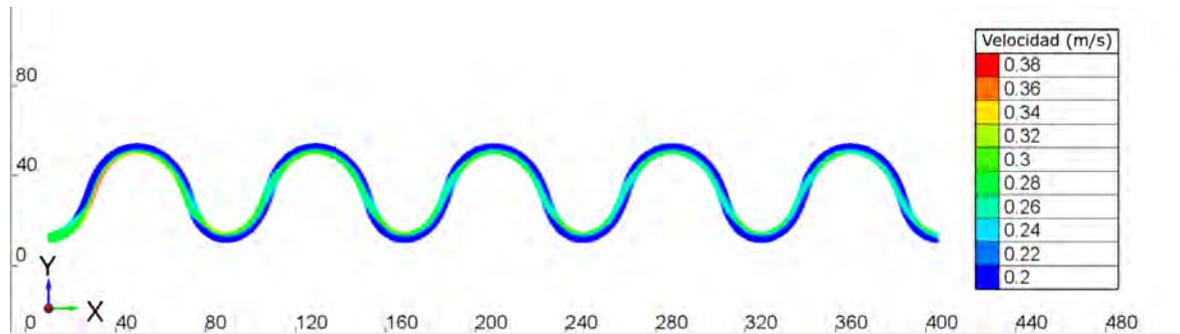


Figura 6.5. Campo de velocidades del escenario A (m/s)

En la Figura 6.6 se presenta el campo de velocidades del escenario B. En este escenario, se identificó que la velocidad máxima se localizó en la margen interna antes del ápice del meandro, y después del ápice del meandro se presentó el cambio del núcleo de velocidad máxima hacia la margen externa.

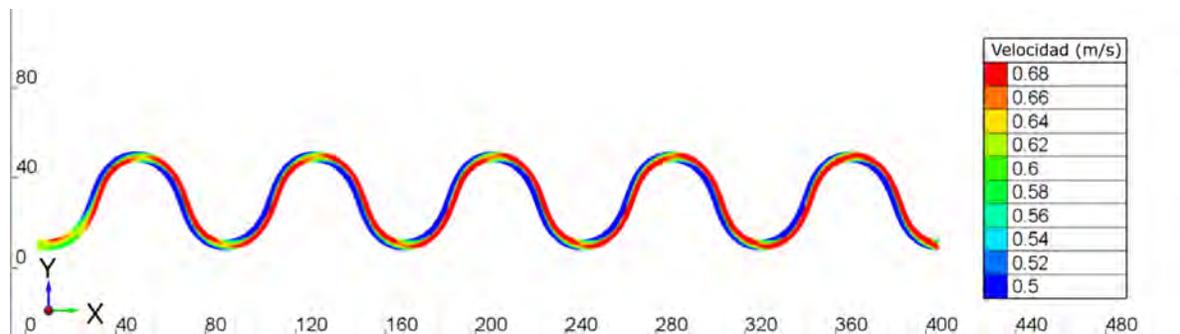


Figura 6.6. Campo de velocidades del escenario B (m/s)

En la Figura 6.7 se presenta el campo de velocidades del escenario C. En este escenario se redujo el incremento espacial ($\Delta t = 0.25s$) al 50 % con respecto al escenario anterior.

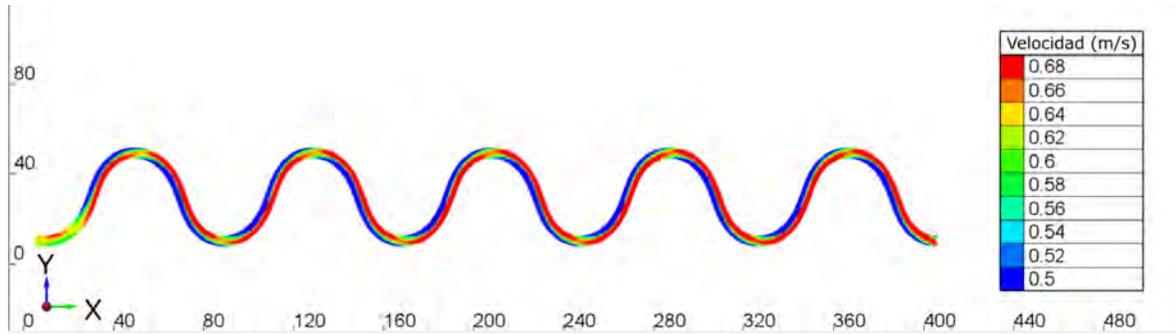


Figura 6.7. Campo de velocidades del escenario C (m/s)

En la Figura 6.8 se presenta el campo de velocidades del escenario *D*. En este escenario se redujo el ancho del meandro a $1/3$ con respecto a los escenarios previos, se identificó que la velocidad máxima se mantuvo sobre la margen interna de la curva y presentó el cambio del núcleo de velocidad máxima hacia la margen derecha después del ápice de la curva. En este escenario se identificaron inestabilidades numéricas a lo largo del meandro y cerca de la condición de salida del meandro.

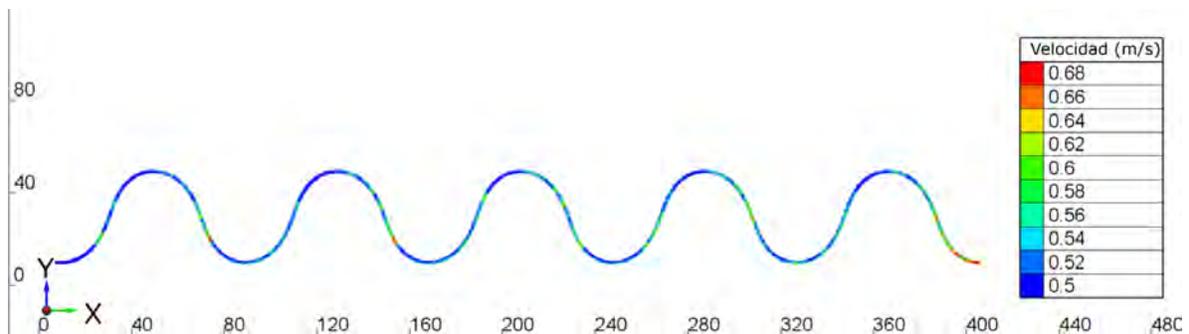


Figura 6.8. Campo de velocidades del escenario D (m/s)

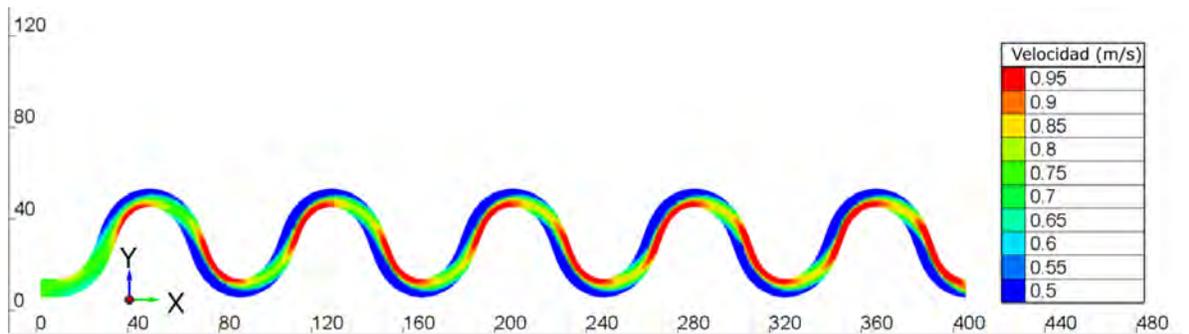


Figura 6.9. Campo de velocidades del escenario E (m/s)

En la Figura 6.9 se presenta el campo de velocidades del escenario *E*. En este escenario se incrementó el ancho del meandro con un factor de 1.6 con respecto a los escenarios *A*, *B* y *C*. Se identificó que la velocidad máxima se localizó sobre la margen interna y presentó el cambio hacia la margen externa después del ápice del meandro. Se identificó que la velocidad disminuyó considerablemente para este escenario cerca de la margen externa poco antes del

ápice del meandro, este comportamiento se relaciona con el desarrollo de la barra después del ápice de la curva del meandro.

En la Figura 6.10 se presenta el campo de velocidades del escenario F . En este escenario se modificó la amplitud angular máxima (θ_0) de 120° a 80° , y el coeficiente de planicie (J_f) fue de $1/92$. Se identificó que la velocidad máxima se concentró sobre la margen interna y presentó el cambio hacia la margen externa después del ápice del meandro. El núcleo de velocidad máxima es mayor para el escenario que considera el transporte de sedimento y se identificó que la velocidad disminuyó considerablemente en la margen externa. Además, se identificó que se desarrollaron problemas de inestabilidad en el análisis de la hidrodinámica en la condición de entrada del meandro.

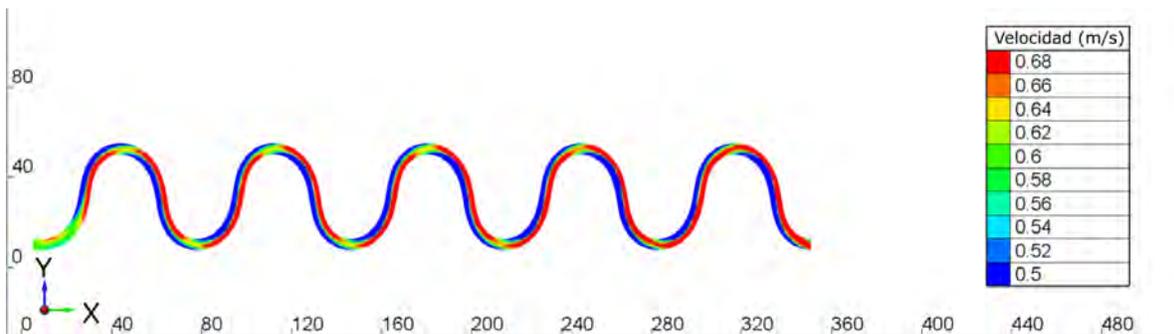


Figura 6.10. Campo de velocidades del escenario F (m/s)

En la Figura 6.11 se presenta el campo de velocidades del escenario G . En este escenario se modificó la amplitud angular máxima (θ_0) de 120° a 90° , y el coeficiente de planicie (J_f) fue de $1/92$. Se identificó que la velocidad máxima se localizó sobre la margen interna y presentó el cambio hacia la margen externa después del ápice del meandro. Se identificó que la velocidad disminuyó considerablemente en la margen externa. También, se identificaron problemas durante el proceso de transporte de sedimento con efectos cercanos en la condición de salida y que se propagaron hacia aguas arriba.

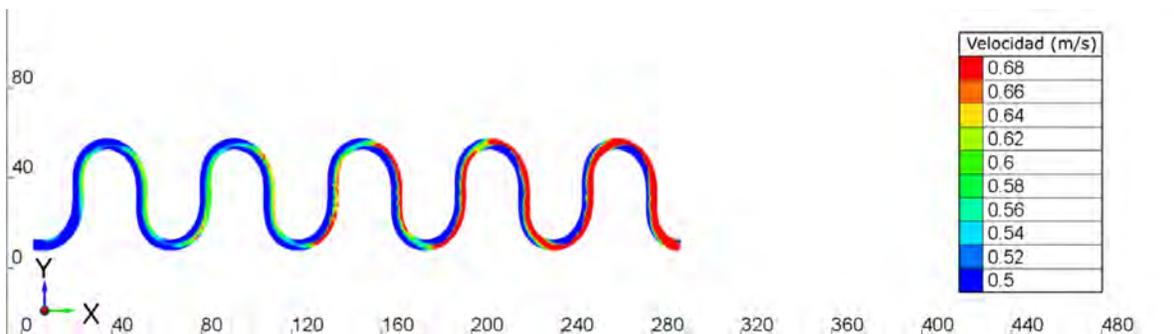


Figura 6.11. Campo de velocidades del escenario G (m/s)

En la Figura 6.12 se presenta el campo de velocidades del escenario H . En este escenario se modificó la amplitud angular máxima (θ_0) de 120° a 100° , y el coeficiente de planicie (J_f) fue de $1/92$. Se identificó que la velocidad máxima se localizó sobre la margen interna y presentó el cambio hacia la margen externa después del ápice del meandro. En el meandro se

presentó depósito de material y se desarrollaron barras después del ápice. Además, hacia la salida del meandro se presentaron velocidades mayores que no se observaron aguas arriba. En general, en este escenario se presentó sedimentación a lo largo del meandro.

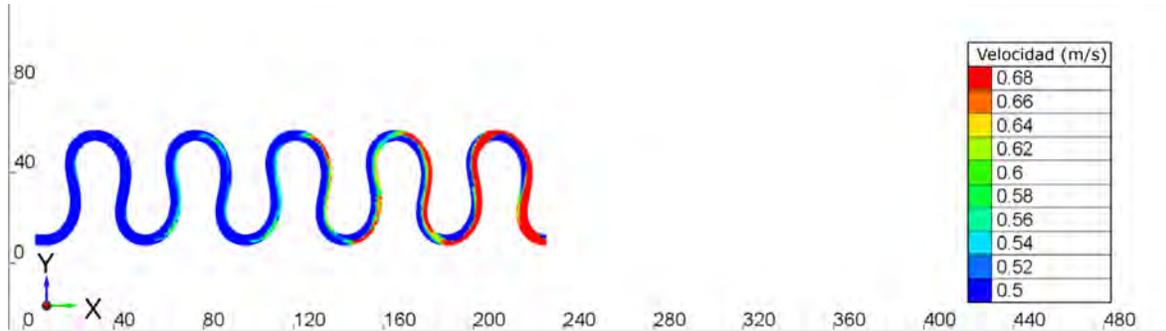


Figura 6.12. Campo de velocidades del escenario H (m/s)

En la Figura 6.13 se presenta la hidrodinámica del escenario *I*. En este escenario se modificó la amplitud angular máxima (θ_0) de 120° a 110° , y el coeficiente de planicie (J_f) fue de $1/92$. La velocidad máxima se localizó cerca de la margen interna del meandro y cambió su dirección hacia la margen externa después del ápice del meandro, en la condición de entrada se observaron inestabilidades numéricas, se presentó depósito de material en la margen interna antes del ápice del meandro y después de éste, desarrollando barras en la dirección hacia aguas abajo, lo que limitó el flujo en un canal interno, esto se puede observar en las últimas tres curvas del meandro.

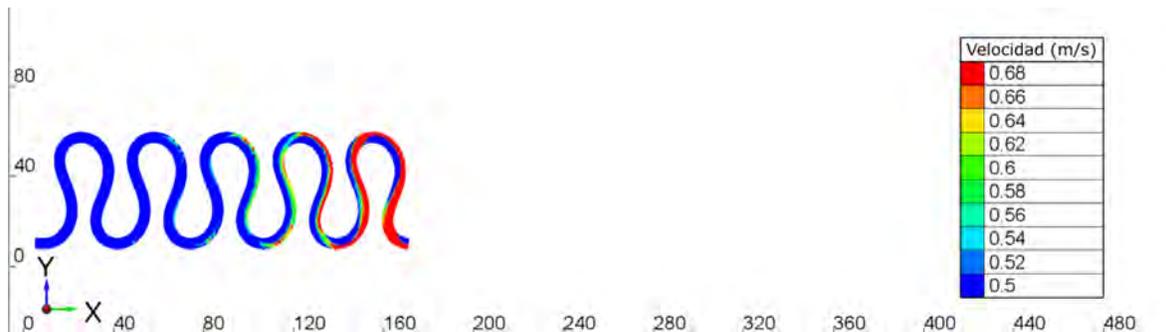


Figura 6.13. Campo de velocidades del escenario I (m/s)

Los resultados del análisis indican que el escenario *C* presentó condiciones factibles en para el análisis del flujo secundario y condiciones que favorezcan el desarrollo del proceso de migración debido a que el núcleo de velocidad pasa de la margen interna a la externa cerca o antes del ápice de la curva, por lo que, se amplía el análisis con 15 amplitudes, esto con el objetivo de alejar las inestabilidades de las fronteras y tener mayor certidumbre en el análisis.

En la Figura 6.14 se presenta el campo de velocidades del escenario *C2-15*, y se consideró el análisis de la hidrodinámica y transporte de sedimento. Se adicionaron pequeños canales rectos de 5 m de longitud, para evitar problemas de inestabilidad numérica, tanto a la entrada como a la salida del meandro. En este escenario se identificó el desarrollo del flujo helicoidal. También, se identificó que la velocidad presentó una transición suave en el ápice del meandro

y se observó que el cambio del núcleo de velocidades máximas se presentó antes del ápice del meandro, esta condición no se determinó numéricamente en los escenarios previos. Se identificaron desarrollos de barras después de los ápices del meandro. En general, la velocidad desarrollada sobre las barras fueron de baja magnitud.

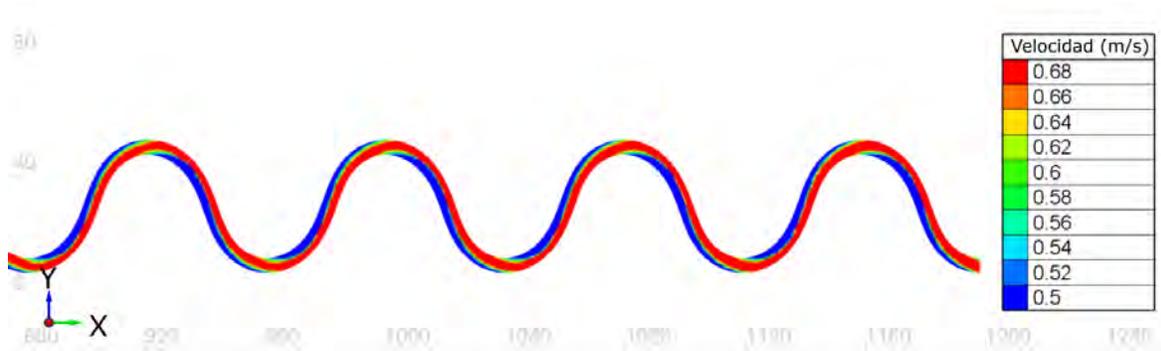


Figura 6.14. Campo de velocidades del escenario C2-15 (m/s)

6.6.2. Meandro secundario y proceso de avulsión

El proceso de avulsión de un meandro se presenta cuando el flujo abandona su cauce y forma uno nuevo, éste proceso también distribuye el transporte de sedimento, lo que ocasiona el desarrollo de distintos patrones de distribución del flujo, una definición formal fue presentada por Ramonell y Amsler (2005) y definen el proceso como “*el abandono súbito de una parte o la totalidad del flujo sobre el cauce y que se instalará en otro sitio del valle*”, indican que el término resaltado involucra una escala de tiempo considerable, que puede ir desde años a más de un siglo.

Con el objetivo de identificar el impacto del ángulo de conexión entre el canal principal y el canal secundario en el proceso de avulsión, se presenta un análisis de nueve escenarios numéricos en los que se varió el ángulo con respecto al eje central del canal secundario. Los escenarios de modelación numérica se agruparon en bloques de tres, el primero corresponde a la conexión antes del ápice, el segundo en el ápice y el tercero después del ápice del meandro. Las características del meandro principal se presentan en la Tabla 6.3.

Tabla 6.3: Características del meandro

| Características | Magnitud | Unidad |
|------------------------------------|-----------|--------|
| Elevación de entrada | 1.7398 | m |
| Elevación de salida | 0.0598 | m |
| Desnivel | 1.68 | m |
| Longitud del valle | 1109.2813 | m |
| Pendiente del valle | 0.001514 | m/m |
| Longitud del curva secundaria | 67.50 | m |
| Elevación de conexión a la entrada | 1.6198 | m |

Se identificó que el escenario de modelación numérica $C2 - 15$ presentó características hidrodinámicas que favorecen el proceso de migración del meandro, como lo es la localización de un núcleo de velocidad máxima sobre la margen interna antes del ápice de la curva y que posteriormente se desplazó hacia la margen externa después del ápice de la curva. Además, el desarrollo y la presencia de barras cerca de los ápices y el desarrollo del flujo helicoidal son mecanismos detrás del proceso de migración del meandro. Sin embargo, estas condiciones también permiten investigar el fenómeno de Avulsión y caracterizar el comportamiento de la distribución de caudales al conectar un canal secundario al meandro principal. Para analizar el fenómeno de Avulsión se propone una relación del 75% del canal principal, en la Tabla 6.4 se muestran las características hidrodinámicas y geométricas utilizadas en cada uno de los escenarios de modelación numérica, las variables se han descrito anteriormente.

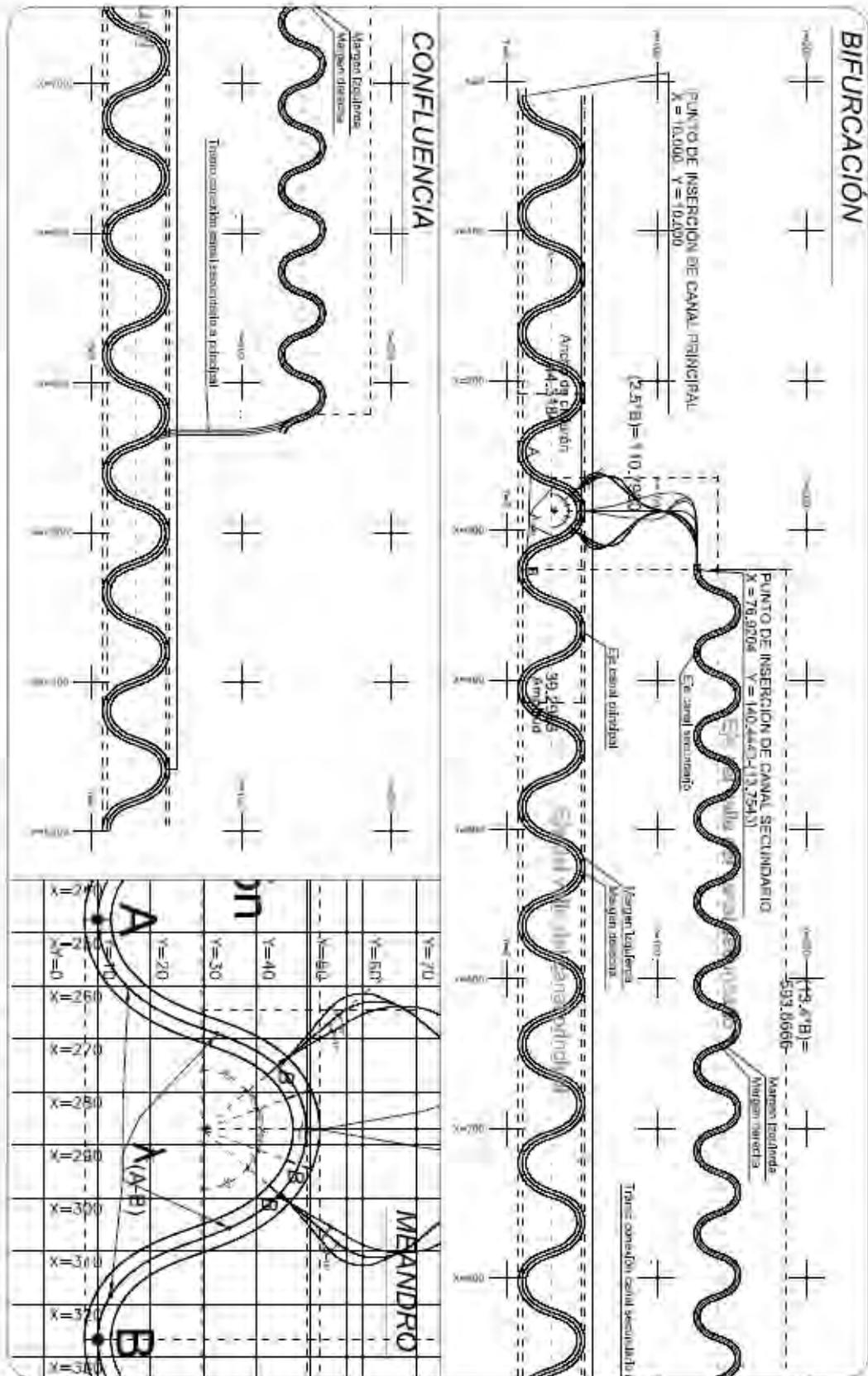
Tabla 6.4: Condiciones en escenarios de meandro principal y secundario

| Variable | Meandro principal | Meandro secundario | Unidad |
|-----------------------|--------------------|--------------------|---------|
| Q | 0.50 | 0.35 | m^3/s |
| v | 0.66 | 0.66 | m/s |
| y | 0.15 | 0.15 | m |
| B | 5.00 | 3.50 | m |
| S | 1×10^{-3} | 1×10^{-3} | m/m |
| A | 9.80 | 7.31 | – |
| Fr | 0.67 | 0.67 | – |
| C_f | 0.0033 | 0.0033 | – |
| k | 0.0950 | 0.0812 | $(1/m)$ |
| λ_{min} | 66.15 | 77.36 | m |
| $\lambda_{propuesto}$ | 120.00 | 84.00 | m |

Se investiga el comportamiento de la distribución de sedimentos tanto de fondo como en suspensión y la evolución de fondo en la confluencia. Las consideraciones para el canal secundario fueron: (1) desplazamiento de 2.5 veces el ancho del cinturón del canal, esto es $(44.31m)(2.5) = 110.79m$, (2) una longitud de 13.4 veces el ancho del mismo, es decir, $(44.31m)(13.4) = 593.86m$, el ancho del cinturón del meandro se consideró a los extremos de las márgenes, lo anterior, con base en la sugerencia de Edmonds et al. (2016), quien analizó 55 meandros y estableció que las aproximaciones anteriores se presentan en procesos de avulsión y el desarrollo de meandros reales. El canal secundario se conectó aguas abajo, se buscó favorecer la conexión del meandro secundario con el meandro principal con el objetivo de evitar grandes perturbaciones ocasionadas por cambios bruscos de dirección.

En el análisis se establecieron nueve escenarios de modelación numérica, agrupados en tres bloques: Grupo 1, Grupo 2 y Grupo 3. Además, para cada grupo se establecen tres secciones en donde se analizó la información de los resultados numéricos, estas secciones se identificaron como: U (aguas arriba), C (centro) y D (aguas abajo). También, se investigó la influencia en el ángulo de conexión del meandro secundario con el meandro principal, que está asociado a cada uno de los grupos indicados. La geometría general de los nueve escenarios a modelar se presenta en la Figura 6.15.

En la Tabla 6.5 se presentan los parámetros que permiten identificar las características geométricas de los nueve meandros secundarios propuestos. Las magnitudes y características geométricas se indican en la Tabla 6.6 y se tiene una breve descripción del cada uno de los parámetros:



(a)

Figura 6.15. Esquema general de los escenarios de simulación numérica en el proceso de avulsión entre el meandro principal y secundario

Tabla 6.5: Características geométricas de los meandros secundarios

| Parámetro | Meandro secundario |
|-----------|--|
| P1 | Longitud de la conexión entrada (m) |
| P2 | Longitud del meandro secundario (m) |
| P3 | Longitud de la conexión salida (m) |
| P4 | Longitud total del meandro secundario (m) |
| P5 | Pendiente original (-) |
| P6 | Pendiente de modelación con sedimentos del meandro principal (-) |
| P7 | Coordenada en X (Entrada) (m) |
| P8 | Coordenada en Y (Entrada) (m) |
| P9 | Coordenada en X (Salida) (m) |
| P10 | Coordenada en Y (Salida) (m) |
| P11 | Elevación original 1 (Entrada) (m) |
| P12 | Elevación original 2 (Salida) (m) |
| P13 | Diferencia de elevación (m) |
| P14 | Elevación modelación con sedimento 3 (Entrada) (m) |
| P15 | Elevación modelación con sedimento 4 (Salida) (m) |
| P16 | Erosión o Depósito (-) |
| P17 | Profundidad de erosión (m) |
| P18 | Pendiente propuesta (-) |
| P19 | Diferencia de elevación estimada para el meandro secundario (m) |
| P20 | Elevación conexión 1 (m) |
| P21 | Elevación conexión 2 (m) |

- P1 - Longitud de conexión a eje del meandro secundario desde el punto de conexión del meandro principal hasta el tramo recto del inicio de las curvas de kinoshita del meandro secundario
- P2 - Longitud del meandro secundario (del punto de conexión con 2 a 3)
- P3 - Longitud del meandro secundario (del punto de conexión con 3 a 4)
- P4 - Longitud total del meandro secundario (del punto de conexión con 1 a 4)
- P5 - $(P11 - P12)/P4$
- P6 - $(P14 - P15)/P4$
- P7 - Coordenada X a eje del meandro secundario (conexión con punto 1)

- P8 - Coordenada Y a eje del meandro secundario (conexión con punto 1)
- P9 - Coordenada X a eje del meandro secundario (conexión con punto 4)
- P10 - Coordenada Y a eje del meandro secundario (conexión con punto 4)
- P11 - Elevación original (condición inicial en conexión con punto 1)
- P12 - Elevación original (condición inicial en conexión con punto 4)
- P13 - Desnivel, (P11-P12)
- P14 - Elevación obtenida de análisis de hidrodinámica y sedimento (en conexión con punto 1)
- P15 - Elevación obtenida de análisis de hidrodinámica y sedimento (en conexión con punto 4)
- P16 - Erosión o depósito, si (P14<P11, *Erosión, Depósito*), en conexión con punto 1
- P17 - Profundidad de la erosión (en conexión con punto 1)
- P18 - Pendiente propuesta para análisis en meandro secundario
- P19 - Diferencia de elevación con pendiente propuesta, entre puntos de conexión 1 y 2, P4*P18
- P20 - Elevación en meandro secundario en punto de conexión 2
- P21 - Elevación en meandro secundario en punto de conexión 3

Tabla 6.6: Características geométricas de los meandros secundarios

| ID | MS1 | MS2 | MS3 | MS4 | MS5 | MS6 | MS7 | MS8 | MS9 |
|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | D1 | C1 | U1 | D2 | C2 | U2 | D3 | C3 | U3 |
| P1 | 123.62 | 123.62 | 123.62 | 123.62 | 123.62 | 123.62 | 123.62 | 123.62 | 123.62 |
| P2 | 906.49 | 906.49 | 906.49 | 906.49 | 906.49 | 906.49 | 906.49 | 906.49 | 906.49 |
| P3 | 97.60 | 97.60 | 97.60 | 97.60 | 97.60 | 97.60 | 97.60 | 97.60 | 97.60 |
| P4 | 1127.71 | 1127.71 | 1127.71 | 1127.71 | 1127.71 | 1127.71 | 1127.71 | 1127.71 | 1127.71 |
| P5 | 0.00088 | 0.00088 | 0.00088 | 0.00086 | 0.00086 | 0.00086 | 0.00085 | 0.00085 | 0.00085 |
| P6 | 0.00101 | 0.00101 | 0.00101 | 0.00090 | 0.00090 | 0.00090 | 0.00085 | 0.00085 | 0.00085 |
| P7 | 273.57 | 273.57 | 273.57 | 287.11 | 287.11 | 287.11 | 300.93 | 300.93 | 300.93 |
| P8 | 45.79 | 45.79 | 45.79 | 51.80 | 51.80 | 51.80 | 46.11 | 46.11 | 46.11 |
| P9 | 935.74 | 935.74 | 935.74 | 935.74 | 935.74 | 935.74 | 935.74 | 935.74 | 935.74 |
| P10 | 45.19 | 45.19 | 45.19 | 45.19 | 45.19 | 45.19 | 45.19 | 45.19 | 45.19 |
| P11 | 1.39 | 1.39 | 1.39 | 1.37 | 1.37 | 1.37 | 1.36 | 1.36 | 1.36 |
| P12 | 0.40 | 0.40 | 0.40 | 0.40 | 0.40 | 0.40 | 0.40 | 0.40 | 0.40 |
| P13 | 0.98 | 0.98 | 0.98 | 0.97 | 0.97 | 0.97 | 0.96 | 0.96 | 0.96 |
| P14 | 1.37 | 1.37 | 1.37 | 1.25 | 1.25 | 1.25 | 1.19 | 1.19 | 1.19 |
| P15 | 0.238 | 0.238 | 0.238 | 0.238 | 0.238 | 0.238 | 0.238 | 0.238 | 0.238 |
| P16 | Erosión |
| P17 | -0.020 | -0.020 | -0.020 | -0.124 | -0.124 | -0.124 | -0.175 | -0.175 | -0.175 |
| Continúa | | | | | | | | | |

Tabla 6.6 – continuación

| ID | MS1 | MS2 | MS3 | MS4 | MS5 | MS6 | MS7 | MS8 | MS9 |
|-----|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | D1 | C1 | U1 | D2 | C2 | U2 | D3 | C3 | U3 |
| P18 | 0.00086 | 0.00086 | 0.00086 | 0.00086 | 0.00086 | 0.00086 | 0.00086 | 0.00086 | 0.00086 |
| P19 | 0.96 | 0.96 | 0.96 | 0.96 | 0.96 | 0.96 | 0.96 | 0.96 | 0.96 |
| P20 | 1.28 | 1.28 | 1.28 | 1.28 | 1.28 | 1.28 | 1.27 | 1.27 | 1.27 |
| P21 | 0.48 | 0.48 | 0.48 | 0.48 | 0.48 | 0.48 | 0.48 | 0.48 | 0.48 |

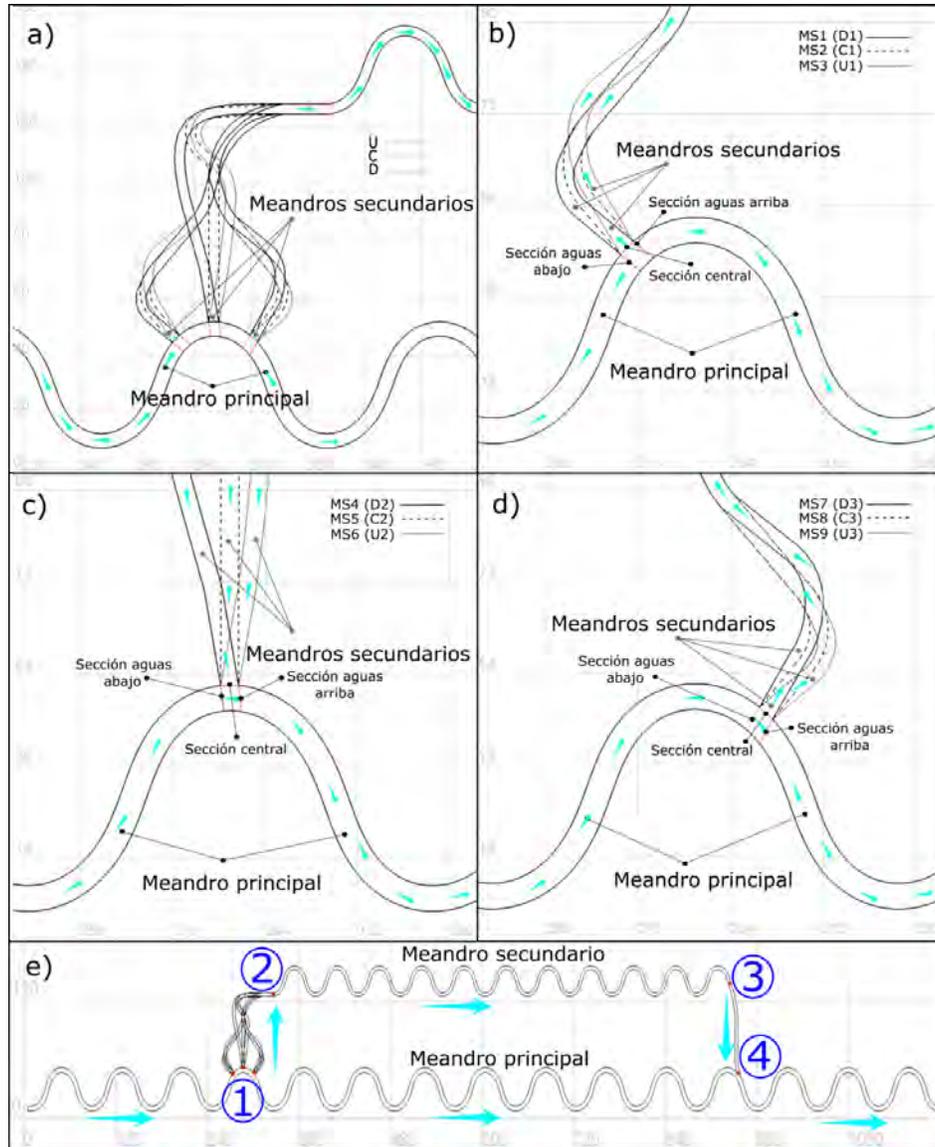


Figura 6.16. Geometrías utilizadas en los escenarios de modelación numérica.

En la Figura 6.16(a) se presentan las geometrías utilizadas en los análisis numéricos correspondientes a los nueve meandros secundarios, la numeración de los meandros es de izquierda a derecha. En la Figura 6.16(b), las geometrías del Grupo 1; en la Figura 6.16(c) las geometrías del Grupo 2; y en la Figura 6.16(d), las geometrías del Grupo 3. Los puntos de conexión de entrada y salida de los meandros se indican en color rojo en la Figura 6.16(e),

la dirección del flujo es de izquierda a derecha (MS1 a MS9). Con respecto al eje central del canal secundario, se tiene un ángulo de 10° , si es a la izquierda la clasificación es D , y si es a la derecha la clasificación es U .

6.7. Análisis y discusión de resultados

6.7.1. Distribución de caudales

La distribución de caudales se presenta en la Figura 6.17 y corresponde a los 3 grupos de análisis. En el grupo 1, el caudal para el escenario MS1 (D1), inicialmente contaba con 49 % para el meandro principal y 51 % para el meandro secundario, después de 600 horas de cálculo, se tiene una distribución de 76 % para meandro principal y 24 % para el meandro secundario, esto indica que en el meandro principal se recuperó caudal, mientras que en el meandro secundario disminuyó la capacidad. El escenario MS2 (C1), inicialmente contaba con 42 % para el meandro principal y 58 % para el meandro secundario, después de 600 horas de cálculo, se tiene una distribución de 67 % para el meandro principal y 33 % para el meandro secundario, esto indica que en el meandro principal se recuperó caudal, mientras que en el meandro secundario la capacidad de transporte disminuyó. En el escenario MS3 (U1), inicialmente se tenía una distribución del 41 % del caudal total para el meandro principal y 59 % para el meandro secundario, después de 600 horas de cálculo, se tiene una distribución de 42 % para meandro principal y 58 % para el meandro secundario, el caudal en el meandro secundario es ligeramente mayor que en el meandro principal. En la Figura 6.17 se observa que se alcanzó un estado de equilibrio en la distribución de caudales para el tiempo de 600 horas.

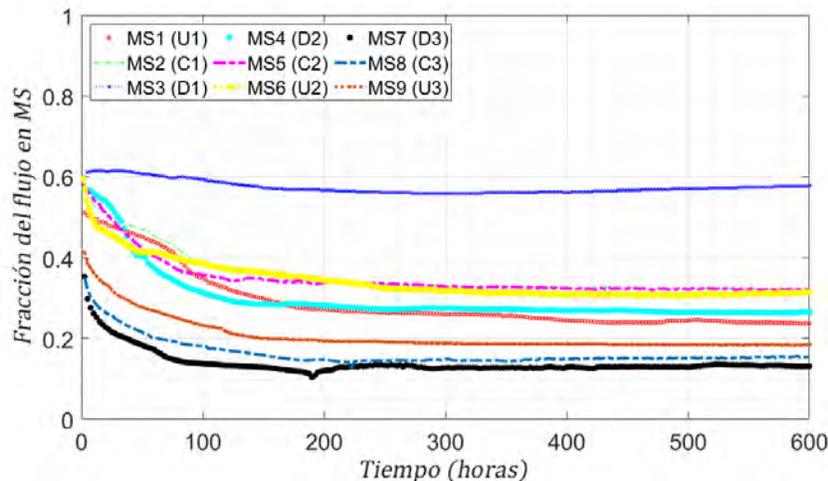


Figura 6.17. Distribución de caudales, en los meandros secundarios.

En el grupo 2, el caudal para el escenario MS4 (D2), inicialmente contaba con 43 % para meandro principal y 57 % para el meandro secundario, después de 600 horas de cálculo, se tiene una distribución de 73 % para el meandro principal y 27 % para el meandro secundario, el meandro principal se recuperó caudal, mientras que en el meandro secundario disminuyó la capacidad. En este escenario se alcanzó un estado de equilibrio en la distribución de caudales. En el escenario MS5 (C2), inicialmente se tenía un 42 % del caudal para el meandro

principal y 58 % para el meandro secundario, después de 600 horas de cálculo, se tiene una distribución de 68 % para el meandro principal y 32 % para el meandro secundario, esto indica que el meandro principal recuperó caudal, mientras que en el meandro secundario disminuyó la capacidad. En este escenario se identificó una ligera tendencia de aumento en meandro principal, y una ligera disminución del caudal para el meandro secundario. El escenario MS6 (U2), inicialmente contaba con 40 % de caudal para meandro principal y 60 % para el meandro secundario, después de 600 horas de cálculo, se tiene una distribución de 69 % para el meandro principal y 31 % para el meandro secundario, el meandro principal recuperó caudal, mientras que en el meandro secundario disminuyó la capacidad.

En el grupo 3, el caudal para el escenario MS7 (D3), inicialmente se tenía un 64 % de caudal para meandro principal y un 36 % para el meandro secundario, después de 600 horas de cálculo, se tiene una distribución de 87 % para meandro principal y 13 % para el meandro secundario, el meandro principal recuperó caudal, mientras que en el meandro secundario disminuyó la capacidad. En este escenario se alcanzó un equilibrio en la distribución de caudales. En el escenario MS8 (C3), inicialmente se tenía un 64 % de caudal para el meandro principal y 36 % para el meandro secundario, después de 600 horas de cálculo, se tiene una distribución de 83 % para el meandro principal y 17 % para el meandro secundario, el meandro principal recuperó caudal, mientras que en el meandro secundario disminuyó la capacidad. En este escenario se alcanzó un estado de equilibrio en la distribución de caudales. El escenario MS9 (U3), inicialmente tenía un 58 % de caudal para el meandro principal y un 42 % para el meandro secundario, después de 600 horas de cálculo, se tiene una distribución de 82 % para el meandro principal y 18 % para el meandro secundario, el meandro principal recuperó caudal, mientras que en el meandro secundario disminuyó la capacidad. Se alcanzó un estado de equilibrio en la distribución de caudales.

En el grupo 1, el caudal en el meandro secundario del escenario MS3 (U1) es el que presentó mayor aporte con 58 %, mientras que en el escenario MS1 (D1) se tiene un 40 % y el escenario MS2 (C1) un 33 %, esto para un tiempo de 600 horas de análisis, aunque se observa un incremento del caudal después de las 300 horas para el escenario MS3. En el grupo 2, el escenario MS5 (C2) es el que presenta mayor aporte con 32 %, mientras que en el escenario MS6 (U2) se tiene un 31 % y el escenario MS4 (D1) un 27 %, a las 600 horas de análisis, en estos escenarios se alcanzó un estado de equilibrio en la distribución de caudales. En el grupo 3, el caudal en el meandro secundario del escenario MS9 (U3) fue el que presentó mayor aporte con 18 %, mientras que en el escenario MS8 (C2) se alcanzó un 17 % y el escenario MS7 (D3) fue de 13 %, a las 600 horas de análisis, en estos escenarios la distribución de caudales alcanzó un equilibrio. Se identificó que en el escenario MS3(U1) se presentó el fenómeno de avulsión ya que, el caudal abandona el cauce principal, y el canal secundario conduce un mayor caudal que el principal.

6.7.2. Distribución de la evolución del fondo media

En la Figura 6.18, se presenta la evolución del fondo media cerca del punto de confluencia, entre el meandro principal y secundario. Las secciones de análisis son aguas arriba, aguas abajo y central (conexión del canal secundario con el principal), que se indican en la Figura 6.16.

En la Figura 6.18a)-c) se presenta la evolución media del fondo de los canales secundarios con orientación -10° con respecto al eje central, en las secciones aguas arriba, central y aguas

abajo. En la Figura 6.18a), en el escenario del MS1 (D1) se presentó un proceso de erosión sobre la sección aguas abajo de hasta 0.42 m, al final de la modelación, $t = 600$ horas; en el escenario del MS4 (D2), en general, la sección presentó un pequeño depósito de material de 0.032 m; en el escenario del MS7 (D3) se presentó un depósito de material sobre la sección aguas abajo de hasta 0.095 m, observados al final de la modelación, $t = 600$ horas.

En la Figura 6.18b), se observa que para el escenario del MS1 (D1) se presentó un proceso de erosión de hasta 0.34 m observados al final de la modelación, $t = 600$ horas; en el escenario del MS4 (D2) se presentó un depósito de material de 0.105 m; en el escenario del MS7 (D3) se presentó un depósito de material de hasta 0.055 m, al final de la modelación, $t = 600$ horas.

En la Figura 6.18c), se observó que para el escenario del MS1 (D1) se presentó un proceso de erosión sobre la sección aguas arriba de hasta 0.49 m, al final de la modelación, $t = 600$ horas; en el escenario MS4 (D2), la sección en general no presentó grandes cambios, solo un pequeño depósito de material para los primeros instantes de tiempo, pero se mantiene cerca de la configuración inicial; en el escenario del MS7 (D3) se presentó, en general, depósito de material sobre la sección aguas arriba de hasta 0.045 m, observados al final de la modelación, $t = 600$ horas.

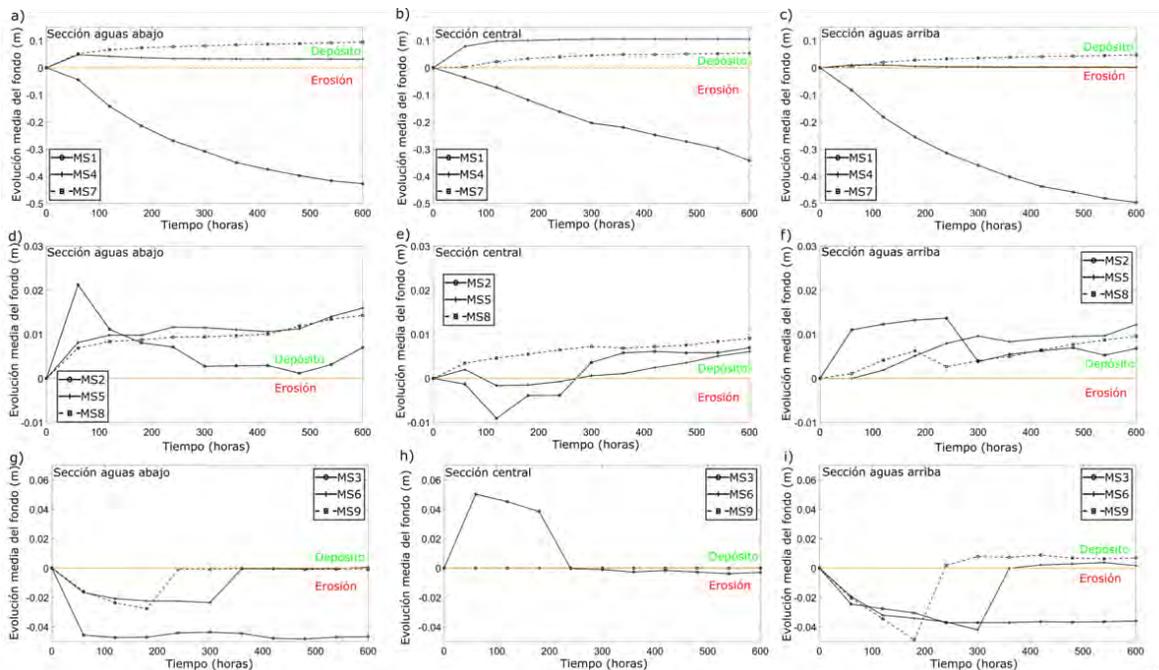


Figura 6.18. Distribución de la evolución de fondo media en secciones localizadas en la zona de bifurcación.

En la Figura 6.18d-f) se presenta la evolución media del fondo en las secciones aguas arriba, central y aguas abajo, correspondiente a los canales secundarios con eje central.

En la Figura 6.18(d), para el escenario del MS2 (C1) en la sección aguas abajo, se presentó un depósito de material de 0.021 m y después disminuye hasta 0.007 m observados al final de la modelación, $t = 600$ horas; en el escenario MS5 (C2), se presentó un pequeño depósito de material de 0.016 m; y en el escenario del MS8, se presentó un depósito de material de 0.014 m, observados al final de la modelación, $t = 600$ horas.

En la Figura 6.18(e), se observa que para el escenario del MS2 (C1), se presentó inicialmente una erosión de 0.009 m cerca de las primeras 100 horas y después presentó un depósito de material de hasta 0.007 m al final del análisis; en el escenario del MS5 (C2), se presentó un depósito de material de 0.006 m; y en el escenario del MS8 (C3) se presentó un depósito de material sobre la sección central de hasta 0.009 m, observados al final de la modelación, $t = 600$ horas.

En la Figura 6.18f), en el escenario del MS2 (C1), en la sección aguas arriba, se presentó un depósito de material de 0.013 en las primeras 250 horas, y después disminuyó a cerca de la mitad para el tiempo restante; en el escenario del MS5 (C2) la sección presentó un depósito de material de 0.012 m; y para el escenario del MS8 (C3), la sección presentó un depósito de material de 0.009 m, al final de la modelación, $t = 600$ horas.

En la Figura 6.18g)-i) se presenta la evolución media del fondo en las secciones aguas arriba, central y aguas abajo, correspondiente a los canales secundarios con orientación $+10^\circ$ (en sentido de las manecillas del reloj) con respecto al eje central.

En Figura 6.18g), para el escenario del MS3 (U1), se presentó una erosión de 0.046 m al final de la modelación, $t = 600$ horas; en el escenario del MS6 (U2), inicialmente se presentó una erosión de 0.023 m cerca de las 300 horas y después un depósito de material hasta alcanzar la elevación inicial; en el escenario del MS9 (U3), se presentó una erosión de material de 0.027 m en las primeras 180 horas y después un depósito de material, que finalmente se estableció cerca del estado inicial.

En Figura 6.18h), para el escenario del MS3 (U1) se presentó inicialmente un depósito de material que alcanzó los 0.053 m, posteriormente un proceso de erosión que estableció la elevación del fondo en la condición inicial; el escenario del MS6 (U2) y MS9 (U3) en general no presentan modificación importante.

En la Figura 6.18i), para el escenario del MS7 (U1), se presentó una erosión de 0.036 m; en el escenario del MS6 (U2) la sección presentó erosión de 0.042 m en las primeras 300 horas y después un depósito de material llegando a 0.0016 m; en el escenario del MS9 (U3), se presentó una erosión de hasta 0.048 m en las primeras 180 horas y después un depósito de material de 0.007 m.

6.7.3. Distribución de carga de fondo media (\bar{q}_b)

En la Figura 6.19, se presenta la distribución de carga de fondo media (\bar{q}_b), para los nueve escenarios de análisis y corresponde a las secciones aguas arriba, aguas abajo y central (conexión del meandro secundario con el principal), que se indican en la Figura 6.16.

En la Figura 6.19a), para el escenario MS1 (D1) se identificó una caída en la capacidad del transporte de fondo y fue de $2.10 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$, para el escenario MS4 (D2) también disminuyó a $1.98 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ y para el escenario MS7 (D3) fue de $1.35 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$, para la sección aguas abajo. En la Figura 6.19b), se presentó una caída en la capacidad de transporte de fondo para el escenario del MS1 (D1) y fue de $4.46 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$, para el escenario del MS4 (D2) también disminuyó a $2.91 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ y para el escenario del MS7 (D3) fue de $7.29 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$, y corresponde a la sección central. En la Figura 6.19c), para el escenario MS1 (D1) se

identificó una caída en la capacidad de transporte de fondo y fue de $1.8 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$, para el escenario del MS4 (D2) también disminuyó a $1.7 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$, para el escenario del MS7 (D3) fue muy similar al anterior con $1.53 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$, y corresponde a la sección aguas arriba.

En la Figura 6.19d-f), se presenta la distribución de carga de fondo media (\bar{q}_b), para los canales secundarios con ejes centrales.

En la Figura 6.19d), la capacidad de transporte de fondo para los escenarios MS2 (C1), MS5 (C2) y MS8 (C3) no presentó cambios importantes y se mantiene prácticamente bajo la condición inicial, las cargas de fondo medias fueron: $1.4 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$, $1.1 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$, y $1.2 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$, y corresponde a la sección aguas abajo. En la Figura 6.19e), se identificó una caída en la capacidad de transporte de los escenarios MS2 (C1), MS5 (C2) y MS8 (C3), las cargas de fondo medias fueron: $6.6 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$, $7.7 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ y $7.4 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$, y corresponden a la sección central. En la Figura 6.19f), se identificó una caída en la capacidad de transporte de los escenarios MS2 (C1), MS5 (C2) y MS8 (C3), que fue de $1.8 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$, $1.7 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ y $1.8 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$, y corresponden a la sección aguas arriba.

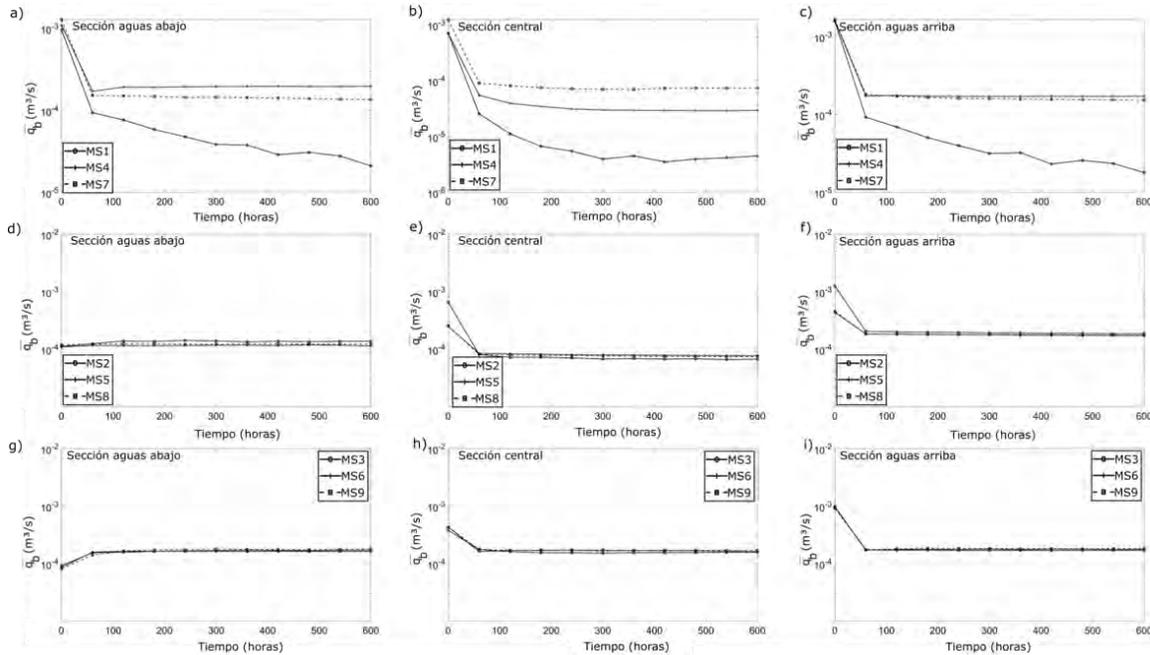


Figura 6.19. Distribución de la carga de fondo media (\bar{q}_b , m^3/s) en secciones localizadas en la zona de bifurcación.

En la Figura 6.19g-i), se presenta la distribución de carga de fondo media (\bar{q}_b), correspondiente a los canales secundarios con orientación $+10^\circ$ (en sentido de las manecillas del reloj) con respecto al eje central.

En la Figura 6.19g), se identificó un aumento en la capacidad de transporte de los escenarios MS3 (U1), MS6 (U2) y MS9 (U3), las cargas de fondo medias fueron: $1.6 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$, $1.8 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ y $1.8 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$, y corresponde a la sección aguas abajo. En la Figura 6.19h), se identificó una caída en la capacidad de transporte de los escenarios MS3 (U1), MS6 (U2) y MS9 (U3), las cargas de fondo medias fueron: $1.6 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$, $1.6 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ y $1.7 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$, y corresponde a la sección central. En la Figura 6.19i), se identificó

una caída en la capacidad de transporte de los escenarios MS3 (U1), MS6 (U2) y MS9 (U3), las cargas de fondo medias fueron: $1.7 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$, $1.7 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ y $1.8 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$, y corresponde a la sección aguas arriba.

6.7.4. Distribución de carga en suspensión media (\bar{q}_s)

En la Figura 6.20, se presenta la distribución de carga en suspensión media (\bar{q}_s , en m^3/s). El análisis se realizó sobre las secciones aguas arriba, aguas abajo y central (conexión con del meandro principal con el meandro secundario), que se indican en la Figura 6.16.

En la Figura 6.20a), para el escenario MS1 (D1) se identificó una caída en la capacidad del transporte en suspensión llegando a ser de $4.1 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$, mientras que para el escenario MS4 (D2) también disminuyó a $7.4 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$, para el escenario MS7 (D3) fue de $4.37 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$, y corresponde a la sección aguas abajo. En la Figura 6.20b), se presentó una caída en la capacidad de transporte en suspensión para el escenario del MS1 (D1) fue de $8.13 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$, mientras que para el escenario del MS4 (D2) también disminuyó a $7.9 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$, para el escenario del MS7 (D3) fue de $2.7 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$, y corresponde a la sección central. En la Figura 6.20c), para el escenario MS1 (D1) se identificó una caída en la capacidad de transporte en suspensión y fue de $3.7 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$, mientras que para el escenario del MS4 (D2) también disminuyó a $6.5 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$, para el escenario del MS7 (D3) fue muy similar al anterior con $5.5 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$, y corresponde a la sección aguas arriba.

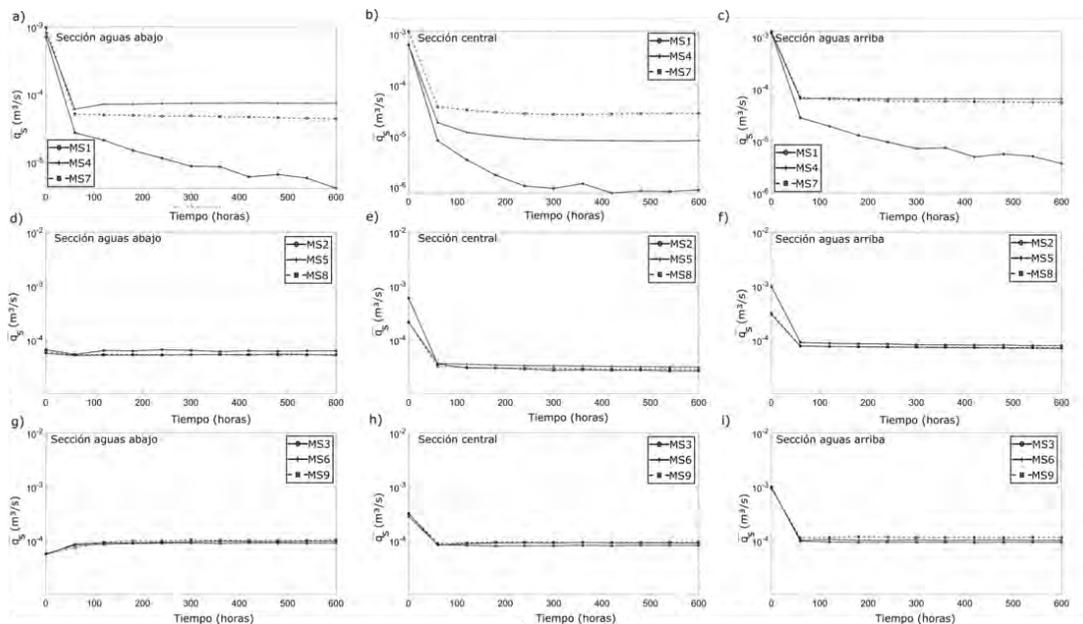


Figura 6.20. Distribución de la carga en suspensión media (\bar{q}_s , m^3/s) en secciones localizadas en la zona de bifurcación.

En la Figura 6.20d)-f), se presenta la distribución de carga en suspensión media (\bar{q}_s , en m^3/s), correspondiente a los canales secundarios orientados con el eje central.

En la Figura 6.20d), la capacidad de transporte en suspensión para los escenarios MS2 (C1), MS5 (C2) y MS8 (C3) no presentó cambios importantes y se mantiene prácticamente bajo la condición inicial, las cargas en suspensión medias fueron: $6.3 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$, 5.2×10^{-5}

m^3/s , y $5.3 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$, y corresponde a la sección aguas abajo. En la Figura 6.20e), se identificó una caída en la capacidad de transporte en suspensión de los escenarios MS2 (C1), MS5 (C2) y MS8 (C3), las cargas en suspensión medias fueron: $2.6 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$, $3.1 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ y $2.8 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$, y corresponde a la sección central. En la Figura 6.20f), se identificó una caída en la capacidad de transporte de los escenarios MS2 (C1), MS5 (C2) y MS8 (C3), que fue de $7.8 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$, $7 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ y $7.1 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$, y corresponde a la sección aguas arriba.

En la Figura 6.20g)-i), se presenta la distribución de carga de sedimento en suspensión media (\bar{q}_s , en m^3/s), correspondiente a los canales secundarios con orientación $+10^\circ$ (en sentido de las manecillas del reloj) con respecto al eje central.

En la Figura 6.20g), se identificó un pequeño incremento en la capacidad de transporte en suspensión de los escenarios MS3 (U1), MS6 (U2) y MS9 (U3), las cargas de fondo medias fueron: $9 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$, $9.7 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ y $1 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$, y corresponden a la sección aguas abajo. En la Figura 6.20h), se identificó una caída en la capacidad de transporte en suspensión de los escenarios MS3 (U1), MS6 (U2) y MS9 (U3), las cargas de fondo medias fueron: $8.1 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$, $8.9 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ y $9.2 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$, y corresponden a la sección central. En la Figura 6.20i), se identificó una caída en la capacidad de transporte en suspensión de los escenarios MS3 (U1), MS6 (U2) y MS9 (U3), las cargas en suspensión medias fueron: $9.3 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$, $1 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ y $1.1 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$, y corresponde a la sección aguas arriba.

6.7.5. Número de Einstein

En 1950, Hans Albert Einstein establece el número adimensional de transporte de la carga de fondo (Garcia, 2008, p. 70-Ec. 2-90a), expresado como:

$$q^* = \frac{q_b}{D\sqrt{gRD}} \quad (6.16)$$

En donde q_b es la tasa de transporte volumétrico de la carga de fondo, D es el diámetro de la partícula, g es la aceleración de la gravedad, y R es la gravedad específica sumergida del sedimento, y q^* el número de Einstein.

El análisis del transporte de fondo se realizó en 40 secciones localizadas a lo largo del meandro principal y 40 secciones localizadas a lo largo del meandro secundario. Las secciones iniciaron en el punto de bifurcación y terminaron en el punto de confluencia, como se muestra en la Figura 6.21. Se establecieron 10 puntos distribuidos a lo largo de cada sección, todos al interior de la malla de cálculo. El análisis del transporte de flujo y sedimento se extendió hasta las 900 horas. Para cada instante de tiempo almacenado se determinó la media sobre todas las secciones.



Figura 6.21. Secciones de análisis en meandro principal y secundario.

Para determinar el número de Einstein, q^* , se determinó el q_0^* que corresponde al meandro principal sin la conexión del canal secundario. Los resultados del q^* en porcentaje se presentan en la Figura 6.22, esta información muestra la capacidad de transporte de sedimento de fondo que se presentó en cada uno de los escenarios de análisis, y el comportamiento desarrollado en los meandros, principal y secundario.

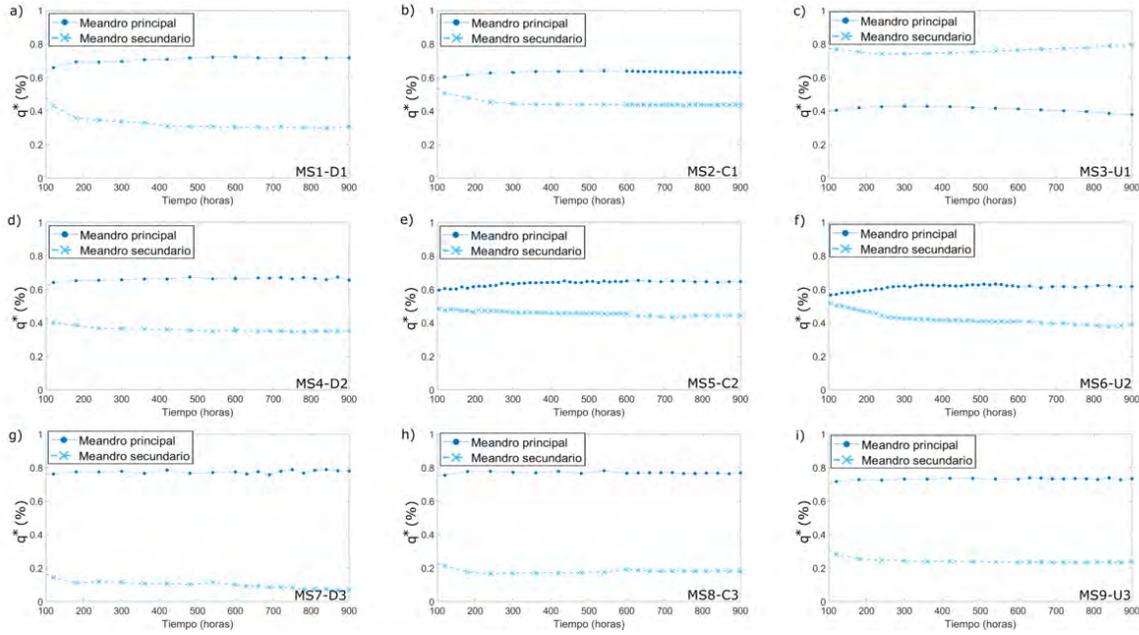


Figura 6.22. Número de Einstein, q^* (%), en meandro principal y secundario.

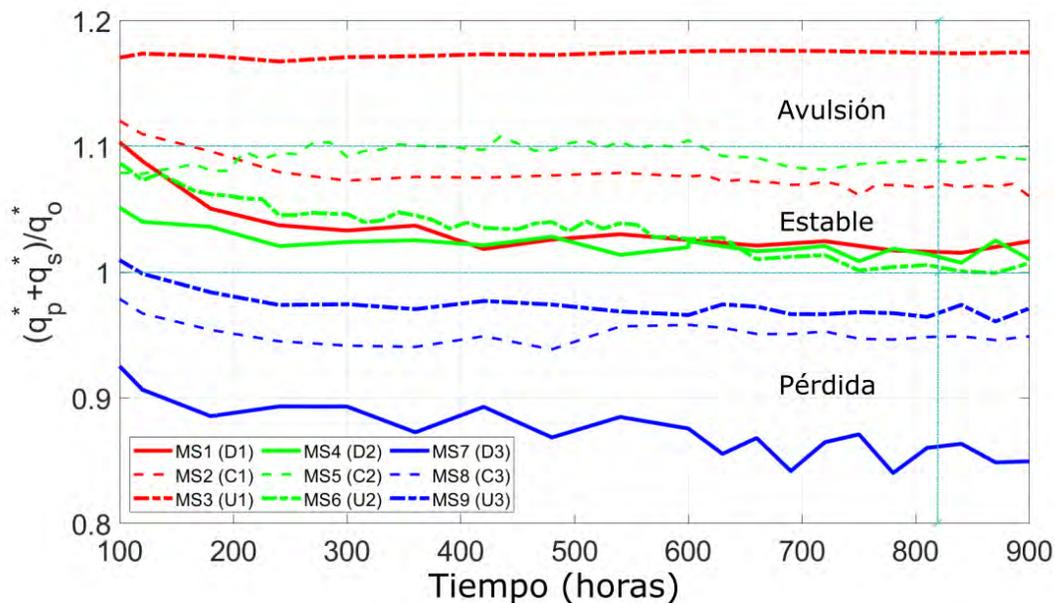


Figura 6.23. Capacidad combinada del transporte de la carga de fondo (CCTF, $\frac{q_p^* + q_s^*}{q_0^*}$, -).

El escenario MS3 (U1) fue el único en el que el q^* del canal secundario fue mayor

comparado con el q^* del meandro principal, en todos los demás escenarios el comportamiento del q^* fue mayor en el meandro principal en comparación con el q^* del meandro secundario.

Con la Ecuación 6.17 se determinó la capacidad combinada de transporte de carga de fondo (CCTF), en donde los subíndices p y s , se refieren a los números de Einstein del meandro principal y secundario, q_0^* es la referencia del transporte de la carga de fondo del meandro principal sin el canal secundario, $q_0^* = 0.35$. Los resultados se presentan en la Figura 6.23.

$$CCTF = \frac{q_p^* + q_s^*}{q_0^*} \quad (6.17)$$

En la Figura 6.23 se presenta la capacidad combinada del transporte de carga de fondo (CCTF), en donde se identificaron por lo menos tres condiciones:

- Primera, en el rango, $0 \leq (q_p^* + q_s^*)/q_0^* < 1$, en donde se identificó que la capacidad de transporte de carga de fondo disminuyó considerablemente, al igual que el caudal capturado en el meandro secundario. En general, son las configuraciones de los meandros secundarios localizadas después del ápice de la curva, MS7, MS8 y MS9. El escenario MS7 (D3) presentó una tendencia de pérdida de caudal y transporte de carga de fondo en el meandro secundario, con características próximas a desaparecer.
- Segunda, en el rango, $1 \leq (q_p^* + q_s^*)/q_0^* < 1.1$, en donde se identificó que la capacidad de transporte de carga de fondo permanece en el meandro secundario y es estable, al igual que el caudal. En esta condición se encontraron las configuraciones restantes de los meandros secundarios, a excepción del escenario MS3 (U1). En esta condición, los meandros secundarios llegan a transportar entre el 20 % y 30 % del caudal total, y entre el 19 % y 25 % del transporte de la carga de fondo.
- Tercera, en el rango, $(q_p^* + q_s^*)/q_0^* \geq 1.1$, en esta condición se desarrolló el proceso de avulsión, por lo que, la distribución del caudal debe ser mayor al 50 % para el meandro secundario, y se espera que el flujo abandoné el meandro principal o por lo menos una fracción importante de él ($Q_s/Q_t \geq 50\%$). En este sentido, la capacidad de transporte de carga de fondo también aumentó sobre el meandro secundario. Únicamente el escenario MS3 (U1) desarrolló el proceso de avulsión.

En la Figura 6.24 se presenta el número de Einstein en la zona de conexión entre el meandro principal y secundario para los nueve escenarios. En la Figura 6.24c) se identifica el escenario que capturó mayor transporte de fondo en el meandro secundario, y en el cual se presentó el proceso de avulsión. Los escenarios con menor transporte de fondo sobre el meandro secundario corresponden a las conexiones después del ápice del meandro principal, por lo que se espera que el meandro secundario desaparezca. Los demás escenarios con conexión del meandro secundario en el ápice del meandro principal son estables y presentan transporte de fondo en condición de equilibrio, similar al presentado en el meandro principal.

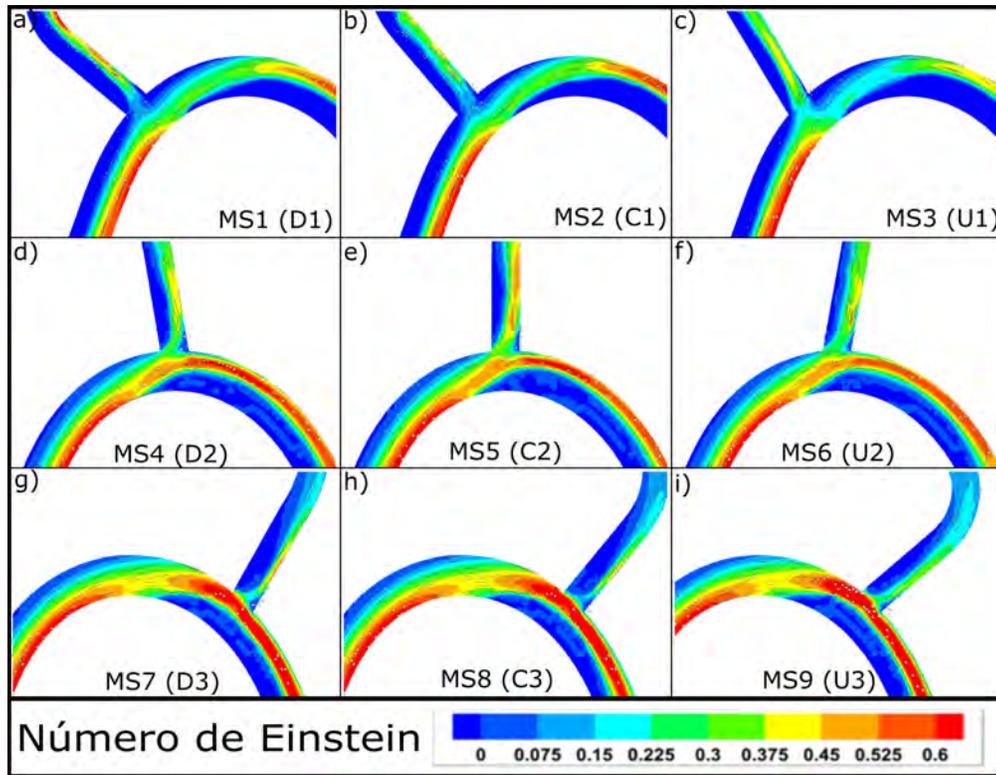


Figura 6.24. Número de Einstein (-).

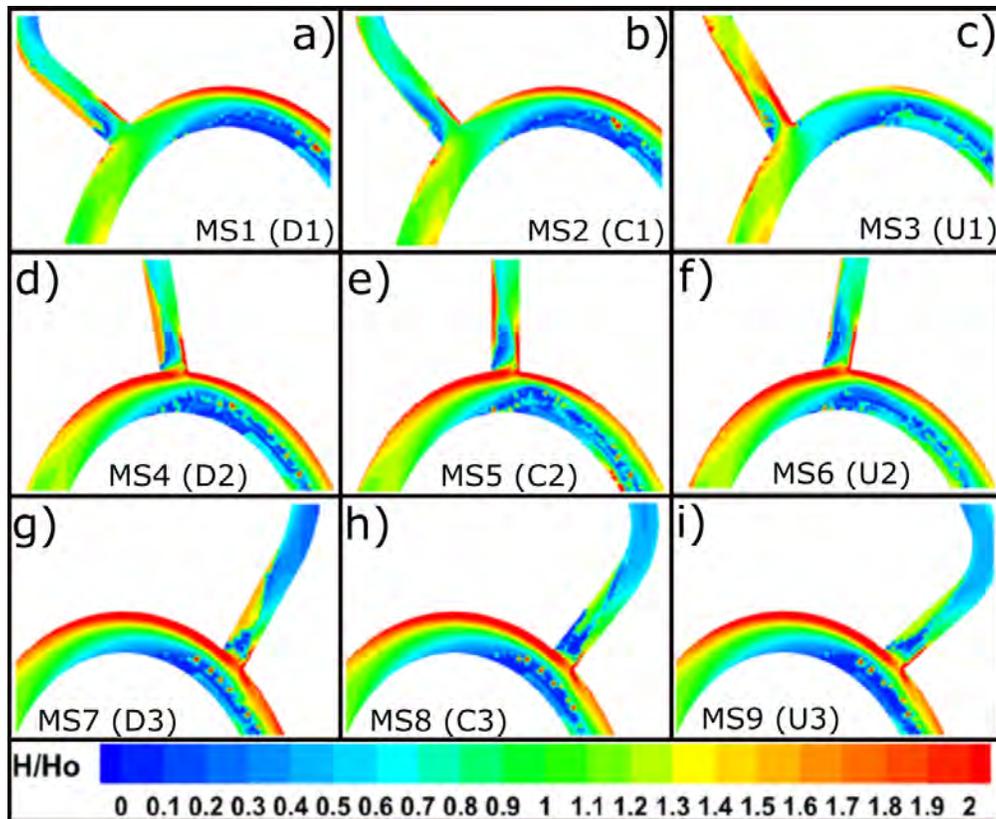


Figura 6.25. $\frac{H}{H_0}$ (-).

En la Figura 6.25 se presenta la relación H/H_0 , en donde H_0 es la profundidad de referencia. El color verde se indica poca o nula variación en la profundidad del agua, en color azul se identificaron zonas en donde se presentó depósito de material, por lo tanto, el tirante tiende a disminuir, y en color rojo se identificaron zonas de erosión en los meandros. En general en todos los escenarios se presentó el desarrollo de una barra en la cercanía del ápice del meandro sobre la margen interna, en dirección hacia aguas abajo, y en la margen externa se presentó erosión lateral.

En los escenarios MS1 y MS2, se depositó el material a la entrada del meandro secundario, sobre la margen izquierda, por lo que, el flujo se concentró sobre la margen derecha. Sin embargo, para el escenario MS3 se erosionó material sobre la margen derecha, e incluso se observó que la erosión lateral sobre la margen izquierda del meandro principal fue menor en comparación con los dos escenarios previos. También, para este escenario, el flujo sobre el meandro secundario se localizó al centro de la sección. La relación H/H_0 aguas abajo del meandro secundario fue similar a la que se presentó sobre el meandro principal antes de la conexión con meandro secundario.

En el escenario MS4, MS5 y MS6, el material se erosionó sobre la margen izquierda a la entrada del meandro secundario, y la presencia de un depósito de material al centro del meandro secundario, sobre la margen derecha el material se erosionó. El flujo se concentró entre la zona de erosión y la margen derecha del meandro secundario. También, se identificó que la erosión lateral sobre la margen izquierda del meandro principal se desarrolló antes de la conexión del meandro secundario, esta erosión no se observó con las magnitudes indicadas en los tres escenarios previos.

En los escenarios MS7, MS8 y MS9, el material se depositó a la entrada del meandro secundario, esto obstaculizó el caudal y el transporte de sedimento de fondo, se identificó que los niveles de agua después de la conexión del meandro principal con el secundario decaen considerablemente. La erosión lateral sobre la margen izquierda del meandro principal se desarrolló antes de la conexión entre los meandros. También, se identificó que la barra que se desarrolló en el ápice del meandro principal sobre la margen interna es mayor que en los seis escenarios previos.

6.8. Conclusiones

Las condiciones que favorecen el proceso de avulsión son las establecidas en el grupo 1, y corresponde a los canales secundarios antes del ápice del meandro principal. En las configuraciones de los escenarios MS1 (D1), MS2 (C1) y MS3 (U1), la capacidad de conducción del caudal en los meandros secundarios fue de 33 %, 40 % y 58 % del caudal total. Se encontró que el escenario MS3 (U1) fue el que conduce un mayor caudal por el meandro secundario lo que desencadena el proceso de avulsión y se presentó el abandono parcial del flujo sobre el meandro principal. En el grupo 2, el meandro secundario capturó un caudal del 27 %, 32 % y 31 % para los escenarios MS4 (D2), MS5 (C2) y MS6 (U2). En el grupo 3, el meandro secundario capturó un caudal del 13 %, 17 % y 18 % para los escenarios MS7 (D3), MS8 (C3) y MS9 (U3). Se identificó que los escenarios del grupo 3 son menos eficientes en la captura del flujo sobre el meandro secundario, en estos grupos no se desarrolló del proceso de avulsión y el flujo permaneció sobre el meandro principal. Por otro lado, los escenarios del grupo 1 presentan anomalías del comportamiento del caudal sobre el meandro secundario y se identificó que a las 600 horas no tienen un estado de equilibrio como los escenarios restantes.

Con respecto a la evolución media del fondo, el escenario MS1 (D1) fue el que presentó mayor erosión, con magnitudes de hasta 0.42 m, 0.34 m y 0.49 m en las secciones aguas abajo, central y aguas arriba. Sin embargo, este escenario no es el que conduce un mayor caudal sobre el meandro secundario. El escenario MS3 es el que capturó un mayor caudal en el meandro secundario y también presentó erosión en la sección aguas abajo y aguas arriba, pero en la sección central se mantuvo sin cambios. Los escenarios de las configuraciones de los meandros centrales, en general, presentan depósito de material, al igual que los escenarios con orientación hacia aguas abajo, como lo son MS4 (D2) y MS7 (D3), a excepción del escenario MS1 (D1). Los escenarios con orientación hacia aguas arriba como lo son MS3 (U1), MS6 (U2) y MS9 (U3), en general, presentaron erosión en las secciones localizadas aguas abajo y aguas arriba, y en la sección central no presentan cambios importantes.

En cuanto a la distribución del transporte de sedimento de fondo medio, se identificó que para los escenarios que tienen configuraciones hacia aguas abajo, como lo son: MS1 (D1), MS4 (D2) y MS7 (D3), presentaron una caída en la capacidad de transporte de fondo, y fue del 21 %, 15 % y 32 %, y para el meandro principal fue de 79 %, 85 % y 68 %, respectivamente.

Los escenarios con configuraciones centrales que son MS2 (C1), MS5 (C2) y MS8 (C3), también presentaron una caída en la capacidad de transporte sobre las secciones centrales y aguas arriba, pero en la sección localizada aguas abajo se identificó que no presentaron cambios, en estos escenarios la capacidad del transporte de sedimento de fondo sobre el meandro secundario fue del 28 % y para el meandro principal fue de 72 %.

Los escenarios con configuraciones hacia aguas arriba que son: MS3 (U1), MS6 (U2) y MS9 (U3), también presentaron una caída en la capacidad de transporte sobre las secciones centrales y aguas arriba, pero en la sección localizada aguas abajo se identificó un incremento en la capacidad de transporte de fondo, en estos escenarios la capacidad del transporte de sedimento de fondo sobre el meandro secundario fue del 48 % y para el meandro principal fue de 52 %.

En cuanto a la distribución del transporte de sedimento en suspensión media, se identificó que para los escenarios que presentan configuraciones hacia aguas abajo, como lo son: MS1 (D1), MS4 (D2) y MS7 (D3), presentaron una caída en la capacidad de transporte en

suspensión en las tres secciones. En estos escenarios la capacidad del transporte de sedimento en suspensión sobre el meandro secundario fue de 20 %, 11 % y 33 %, y para el meandro principal fue de 80 %, 89 % y 67 %, respectivamente.

En los escenarios centrales que son: MS2 (C1), MS5 (C2) y MS8 (C3) también presentaron una caída en la capacidad de transporte en suspensión sobre las secciones centrales y aguas arriba, y en la sección localizada aguas abajo se identificó que no se presentaron cambios. En estos escenarios la capacidad del transporte de sedimento en suspensión sobre el meandro secundario fue del 28 % y para el meandro principal fue del 72 %.

En los escenarios con configuraciones hacia aguas arriba que son: MS3 (U1), MS6 (U2) y MS9 (U3), también presentaron una caída en la capacidad de transporte sobre las secciones centrales y aguas arriba, pero en la sección localizada aguas abajo se identificó un incremento en la capacidad de transporte de fondo. En estos escenarios la capacidad del transporte de sedimento en suspensión sobre el meandro secundario fue del 47 % y para el meandro principal fue del 53 %.

El mecanismo de transporte de sedimento que predomina es el de la carga de fondo. En los escenarios con orientación hacia aguas abajo que son: MS1 (D1), MS4 (D2) y MS7 (D3) se determinó que en el meandro principal se tiene una capacidad de transporte de sedimento de fondo de 67 %, 63 % y 50 %, y sobre el meandro secundario una capacidad de 14 %, 24 % y 18 %, respectivamente. Con respecto a la carga en suspensión se determinó una capacidad de transporte de 17 %, 11 % y 24 %, en el meandro principal y 3 %, 3 % y 9 % en el meandro secundario.

Los escenarios centrales que son: MS2 (C1), MS5 (C2) y MS8 (C3) la capacidad de transporte de la carga de fondo fue del 50 % en el meandro principal y del 20 % en el meandro secundario. Con respecto a la carga en suspensión se tiene un 20 % en general en el meandro principal y un 8 % en general en el meandro secundario.

Los escenarios con orientación hacia aguas arriba que son: MS3 (U1), MS6 (U2) y MS9 (U3), se determinó que el meandro principal presentó una capacidad de transporte de sedimento de fondo de 33 %, en general; y en el meandro secundario una capacidad del 19 %, en general. Con respecto a la carga en suspensión en el meandro principal se determinó una capacidad del 31 %, en general, en el meandro principal; y una capacidad del 17 % en general, en el meandro secundario.

Se encontró que los mecanismos que desarrollaron el proceso de avulsión corresponden al escenario MS3 (U1), en donde, se identificó un equilibrio del transporte de sedimento de fondo de 34 % para el meandro principal, 18 % para el meandro secundario, y con respecto al transporte de sedimento en suspensión presentó un 32 % para el meandro principal y 16 % para el meandro secundario. Además, se identificó un balance en los mecanismos de transporte de fondo y suspensión en el meandro principal y secundario, y que son aproximadamente del 50 %. Otros escenarios con características similares son los que presentan orientación del meandro secundario hacia aguas arriba que son MS6 (U2) y MS9 (U3), y solo se ven afectados por la influencia en la posición sobre el meandro principal, con lo que se reduce la capacidad del transporte de caudal sobre el meandro secundario en un 50 % para el escenario MS6 (U2) y, el 75 % del caudal para el escenario MS9 (U3), con respecto al escenario MS1 (U1).

Conclusiones generales

7.1. Sección 2: Caracterización tridimensional Numérico-Experimental de la dinámica del flujo en un canal curvo de ancho variable en condiciones de laboratorio

En los modelos numéricos 3D utilizados para calcular el flujo en condiciones donde se desarrolla flujo secundario y una zona de separación, se determinó una precisión del 90 % para el componente \bar{u} de la velocidad y del 97 % para los componentes restantes (\bar{v} , \bar{w}). También, se determinó una desviación del 15 % para el componente \bar{u} y del 5 % para los dos componentes restantes. La aproximación para calcular el campo de velocidades con la relación numérico-experimental fue del 91 % y 76 % para el componente \bar{u} , 99 % y 97 % para el componente \bar{v} y del 41 % y 36 % para el componente \bar{w} , con el modelo TELEMAC-3D y FLOW-3D, respectivamente. En general la aproximación del campo de velocidades fue del 93 % con TELEMAC-3D y 76 % con FLOW-3D. Se identificó que FLOW-3D presentó una disminución en la aproximación de la velocidad debido a que la velocidad calculada numéricamente es menor a la encontrada experimentalmente, y los mayores errores se localizan dentro de la zona de separación, en ambos modelos.

La precisión de los modelos numéricos para determinar la orientación del vector de velocidad en relación a cada uno de los ejes (X, Y, Z) asociados a los cosenos directores (α, β, γ), se determinó una desviación angular media para el ángulo α y $\beta \leq 4^\circ$, sin embargo, en la sección 3 se encontró que la desviación fue $\leq 10^\circ$, lo que indica un flujo helicoidal con mayor desviación con respecto al encontrado experimentalmente. Entre las secciones 2 y 5 la desviación máxima de los ángulos α y β fue de 30° , en la sección 7 la desviación del ángulo β fue mayor que la del ángulo α , en 10° . La desviación del ángulo γ fue $\leq 4^\circ$, y presentó un incremento del orden de 2.5 veces para las secciones 2 y 4, es decir, antes y después de la sección de menor área, y después de la curva, la desviación del ángulo γ fue $\leq 2^\circ$, sin embargo, por efecto del flujo helicoidal no se representa correctamente la dirección del flujo, y se encontraron diferencias en la comparación numérico-experimental, para el plano de análisis ($Z = 40\%$ de la profundidad). La aproximación para describir la desviación angular de los vectores de velocidad se realizó con la relación Numérico-Experimental (RNE) y se determinó que el ángulo α tiene un coeficiente de correlación (R) de 0.98 y 0.97, el ángulo β de 0.98 y 0.98, y el ángulo γ de 0.47 y 0.37, para los modelos TELEMAC-3D y FLOW-3D, respectivamente. Se identificó que la aproximación disminuyó para el ángulo γ .

7.2. Sección 3: Caracterización de la turbulencia dentro de zonas de separación e interacción con el flujo secundario

Los resultados de la modelación física del campo de velocidades del flujo que se presentó dentro del canal curvo con ancho variable indican que se desarrolló una estructura de flujo helicoidal como flujo principal, esta estructura se debe principalmente a la geometría del canal. Después de la sección de mayor contracción se tiene una expansión gradual sobre la cual se desarrolló la zona de separación. Esta zona abarcó hasta en un 20 % del ancho del canal a partir de la margen izquierda. Dentro de la zona de separación se presentó una estructura coherente turbulenta que se desarrolló cerca del fondo y que permitió al flujo ir en sentido opuesto a la dirección del flujo principal, la forma de la estructura turbulenta tiene una geometría del tipo cono con una desviación hacia la margen derecha del canal curvo. Dentro de la zona de separación las magnitudes de los componentes de la velocidad disminuyeron, con respecto a la velocidad media del flujo. Sobre la superficie libre del agua se presentaron pequeños vórtices que viajaron en dirección hacia aguas abajo.

La zona de separación y las estructuras coherentes turbulentas, al interior de esta zona no pueden ser aproximadas correctamente por los modelos matemáticos 3D, por la turbulencia que se presentó en la zona. Dentro de la zona de separación se determinó un incremento de la energía cinética de la turbulencia (k). Las tensiones principales aumentaron y predominó el componente $\overline{u'}$ sobre los dos componentes restantes. Los componentes transversales ($\overline{u'v'}$) también aumentaron en la zona de contacto, entre el flujo principal y la zona de separación. Estas tensiones transversales son los mecanismos de giro y vorticidad en la zona de separación y de contacto, y tienen una implicación importante en el comportamiento del flujo principal (helicoidal), este movimiento del flujo fue el mecanismo que desvió el flujo principal localizado cerca del fondo hacia la margen derecha, mientras que el flujo principal localizado cerca de la superficie libre no tiene la interacción con la estructura coherente turbulenta y su movimiento fue en dirección hacia la margen izquierda.

La zona de separación redujo el área efectiva del flujo principal e interacciona con éste, esto genera un mecanismo de desviación sobre partículas de sedimento y las partículas-trazadores (esferas de hidrogel) que se desplazaron cerca del fondo del canal, mientras que las que viajaron en la superficie libre no fueron afectadas por la influencia de la estructura coherente turbulenta.

La zona de separación se identificó por el desarrollo de vórtices en la superficie libre que se desprendían a partir del punto de máxima curvatura en dirección hacia aguas abajo. También, se identificó que las características de la turbulencia como la intensidad, la energía cinética y los esfuerzos de Reynolds presentaron comportamientos diferentes en la zona de transición a lo largo de la profundidad del flujo. Esto se debe a que el flujo dentro de la zona de separación fue más turbulento comparado con el que se presentó fuera de la zona de separación o en la parte superior de la estructura coherente turbulenta. El incremento de la energía cinética de la turbulencia no se debe a la interacción directa del flujo con la frontera del canal, sino a la interacción entre las estructuras internas del flujo.

7.3. Sección 4: Dinámica del flujo en un canal curvo como mecanismo en el desarrollo de la socavación

En el análisis numérico 2DH se determinó que un coeficiente de producción en el modelo de flujo secundario $\alpha = 3.5$ mejoró los resultados numéricos al reducir los errores en más de un orden de magnitud para el componente \bar{u} , y en un factor de 2 para el componente \bar{v} , esto con respecto a los resultados que no consideran la corrección de flujo secundario, por lo que, es importante que se considere en diseños ingenieriles cuando se aplican modelos numéricos 2DH. Para este escenario, se determinó una aproximación del 91% para el componente \bar{u} y de un 70% para el componente \bar{v} , aquí la aproximación de este último componente disminuyó por efecto de la zona de separación que se desarrolló a la salida del canal del la margen izquierda. Por otro lado, se calculó una socavación máxima aguas abajo de la estructura de control El Macayo de 8.4 cm con el modelo numérico 2DH, y experimentalmente se midió una socavación de 9.4 cm, con un 1 cm de error, la aproximación del modelo para reproducir la socavación máxima fue del 90%. Además, se comparó la configuración del fondo después de 4.5 horas, esto es, la calculada numéricamente con la experimental, y se determinó un error relativo medio de -3.6%, los resultados indican un calculo de erosión mayor a la medición experimental; sin embargo, no se presentó un buen ajuste de la configuración final del fondo calculada numéricamente con respecto a la información experimental (en $t = 4.5$ horas). Los mayores errores se localizaron en la zona de máxima socavación y en la duna desarrollada aguas abajo de la fosa generada por la socavación. Los resultados del análisis numérico posicionan la erosión máxima directamente en la cercanía de la estructura del canal izquierdo, y es del orden de 4.6 veces más profundo que la socavación máxima experimental reportada, por lo que se tiene un caso de sobre estimación.

Se calculó la socavación máxima con ecuaciones empíricas y se comparó con la información experimental, se encontró que el método de Breusers tiene una precisión del 81.3%. Sin embargo, al utilizar una modificación (M1) de la intensidad turbulenta media local (\bar{v}_b^t) y cercana al fondo (elevación de 1 mm sobre el fondo plano original), el ajuste mejoró considerablemente, con un 98.6% de precisión, una segunda modificación (M2) con el exponente β de ajuste, el modelo mejoró a una precisión del 99.5%, pero demanda el conocimiento de la velocidad y la turbulencia sobre este punto, es decir, contar con mediciones experimentales. La aplicación con el modelo de Breusers original y la modificación a este método (M1) no reproducen el comportamiento de la socavación máxima en el tiempo, pero la modificación M2 describió mejor el fenómeno. El método de Farhoudi y Smith es complicado debido a que requiere utilizar gráficas y no cuenta con una ecuación para el cálculo de la escala de tiempo necesario para el desarrollo de la socavación máxima, aquí se determinó una precisión de 62.4%, pero presentó una tendencia similar de la descripción de la socavación en el tiempo, solo que se observó desplazado en la vertical (de menor magnitud). El método de Negm para el experimento analizado tiene una precisión de 48%. La precisión con el modelo de Dietz fue del 69%.

La descripción de la dinámica de la evolución del fondo en el punto de máxima socavación experimental no se aproxima correctamente con el modelo matemático, los mayores errores se localizaron al inicio de la prueba, en donde la tasa de erosión es máxima en un periodo de tiempo relativamente corto. Además, la modelación numérica sitúa el punto de erosión máxima en la cercanía inmediata a la estructura.

Con el modelo 2DH se presentó el proceso de calibración del campo de velocidades, modificando el coeficiente de producción de corrientes secundarias (α) de 14 a 3.5. Las

distribuciones de velocidad en la sección 3 mejoraron la caracterización del campo de flujo. De forma general, los errores relativos disminuyeron considerablemente para el escenario en el que se consideró la corrección de corrientes secundarias con respecto al que no la considera, y fueron de 8.5% y 30% para los componentes \bar{u} y \bar{v} , respectivamente. En la distribución de velocidades que se presentó en la sección 3, se identificó la presencia de una zona de separación del flujo, en donde el movimiento del flujo fue en reversa, esta zona de separación generó la redistribución del campo de velocidades y ocasionó un núcleo de la velocidad concentrada que aumentó y se orientó hacia la margen izquierda, este núcleo de velocidades fue el mecanismo principal en el desarrollo del proceso de socavación. La modelación de la zona de separación y las estructuras coherentes turbulentas que se desarrollaron dentro de la zona no pueden aproximarse correctamente por el modelo 3D, que generó una distribución de velocidades uniforme a lo ancho de la sección, estos errores se deben principalmente a que no se representan correctamente las estructuras coherentes turbulentas. Una explicación más detallada de los resultados pueden encontrarse en Caballero et al. (2023) y sobre estructuras coherentes turbulentas en Rodi et al. (2013).

7.4. Sección 5: Caracterización Numérico - Datos in situ del transporte de sedimento en suspensión en un meandro

El primer escenario de modelación numérica se enfocó en determinar el coeficiente de resistencia de Manning general, y el Coeficiente de Producción de Corrientes Secundarias (CPCS), con base en un análisis 2DH. Se encontró que los menores errores corresponden a un coeficiente $n = 0.25 \text{ s/m}^{1/3}$, y $\text{CPCS} = 14$, los errores relativos medios fueron del orden de 3.5%, la sub/sobre estimación de la velocidad fue del orden de 33%, con una desviación estándar de 0.16 m/s, y una velocidad medida del flujo de 0.88 m/s. En la hipótesis de que la velocidad calculada numéricamente debe aproximarse a la medición in situ, esto es, $U_n \approx U_m$, se determinó que el coeficiente de correlación fue de 0.65, correspondiente al escenario E1.4, y los mayores errores relativos de la velocidad corresponden a las secciones localizadas muy cerca de los ápices del meandro. En general, se subestima la velocidad calculada numéricamente cercana a las márgenes.

En el segundo escenario de modelación numérica, se analizó la Concentración de Sedimento en suspensión (CSs) a partir del escenario previo (E1.4), también con base en un enfoque 2DH. El diámetro de la partícula del sedimento suspendido que se utilizó en las CSs fue de 0.11 mm (110 μm), con una $\sigma_g = 1.43$. El análisis se realizó al considerar la CSs como un trazador pasivo, por lo que, la CSs no modificó el campo de velocidades. Los resultados del análisis de la CSs indicaron un amortiguamiento en las distribuciones a lo largo de las secciones de análisis (1 a 12), aunque en las primeras cuatro secciones, el núcleo de las CSs máximas se localizó en acuerdo con las reportadas in situ, y en las secciones siguientes se observa un amortiguamiento de la CSs . Además, las distribuciones fueron más uniformes a lo ancho del meandro. El error relativo medio fue del 9%, la subestimación de la CSs fue del 47% y la sobreestimación de la CSs fue del 64%, la desviación estándar fue de 20 mg/l. En la hipótesis de que la CSs calculada numéricamente debe aproximarse a la reportada in situ, esto es, $CSs_n \approx CSs_m$, se determinó con el coeficiente de correlación $R = 0.6$.

En el tercer escenario de análisis, se determinó la solución de la ecuación Advección-Difusión 3D. Los errores relativos medios de la velocidad fueron de 5.2%, la sub/sobre estimación de la velocidad fue del 34%, la desviación estándar fue de 0.16 m/s. El coeficiente de correlación

R, entre los datos calculados numéricamente y las reportadas in situ fue de 0.52. El análisis de la *CSs* presentó un error medio del 6.2%, la subestimación de la *CSs* fue del 32% y la sobrestimación fue de 74%, con una desviación estándar de 26 mg/l, con una *CSs* media de 86.2 mg/l. El coeficiente de correlación entre las *CSs* calculadas y las medidas in situ fue del 0.56. Se observó que las distribuciones no son del todo uniformes como los resultados del análisis 2DH. También, se encontró que el núcleo máximo de las *CSs* se desplazó del centro hacia alguna de las márgenes.

En primera instancia, es claro que el núcleo de la velocidad máxima difiere espacialmente del núcleo de la *CSs* máximo, ya que la primera presentó un máximo cerca de la superficie libre del agua con base en el perfil logarítmico de velocidades, y la segunda presentó un máximo cerca del fondo en acuerdo con el perfil del Rouse. Aunque, se ha presentado la discusión sobre esto. Sin embargo, la formación de estructuras de flujo secundario y estructuras coherentes turbulentas que se desarrollan en la proximidad del fondo son estructuras características en flujos sobre meandros, y que pueden desarrollar velocidades mayores cercanas al fondo o incluso a las localizadas a elevaciones superiores. Estas *estructuras* tienen un impacto en el desarrollo de la configuración del fondo del meandro y en la redistribución del campo de velocidades.

En el análisis de la *CSs* 3D se presentó el núcleo máximo de la *CSs* (0.1-0.12 g/l), y está confinado entre el talweg y el talud de la margen interna, cercano al fondo, esto se debe al efecto del flujo helicoidal que se desarrolló en el fondo. El flujo helicoidal generó un transporte de sedimentos cruzado que ocasionó que la *CSs* se mantuviera en la zona indicada. Aunque, pareciera que la *CSs* se mantuvo al centro del meandro, esto no es así. También, se identificaron zonas de transición en donde el núcleo máximo de la *CSs* aumentó espacialmente, e incluso presentó un giro al pasar por debajo del **Ri**. Por otro lado, la mayor energía cinética de la turbulencia (k) se localizó en el fondo, y se presentó por la interacción del flujo con el sedimento, en la zona de contacto o interacción. El núcleo del **Ri** (0.03-0.2) envuelve el núcleo máximo de la *CSs*, que es un indicador del proceso del mezclado vertical (agua-sedimento). La magnitud de la velocidad disminuyó en las zonas de transición indicadas en la *CSs*, e incluso tampoco siguen el talweg localizado cerca de los ápices de las curvas, los núcleos de velocidad máxima presentaron discontinuidades en esta zona, lo que indicó que en esas zonas las velocidades fueron de menor magnitud. En estas zonas de transición, se identificó que el núcleo máximo de *CSs* y el núcleo de la velocidad máxima se entrelazan, esto es, la *CSs* poco antes del ápice se eleva, y bajó por la zona de transición hasta llegar a la parte interna de la curva, en donde quedó confinada por la k cercana en el fondo, el **Ri**, y el núcleo de la velocidad. Además, la *CSs* es impulsada hacia la margen interna por el efecto del flujo helicoidal en el fondo. Esto representa un desfase con respecto al núcleo de máxima velocidad. Finalmente, la parte externa del meandro cercana al ápice está gobernada por los mecanismos de estructuras coherentes turbulentas que en la literatura se han identificado con un sentido de giro opuesto al flujo helicoidal, estas estructuras son las que gobiernan el mecanismo de erosión en la zona, por lo que son importantes de estudiar.

7.5. Sección 6: Procesos hidráulicos y morfológicos en ríos meándricos con canales secundarios

Se analizó la distribución de caudales, el transporte de sólidos, y la morfología del fondo en un canal méandrico secundario conectado a uno principal. Se investigó cómo se afecta el flujo y la carga de sedimentos que captura el canal secundario, así como la influencia en la posición de la conexión del canal secundario con el principal. Se encontró que en todos los casos analizados no se desarrolló un proceso completo de avulsión. Sin embargo, el caudal capturado por los canales secundarios alcanzó un equilibrio estable, el caudal capturado está determinado por la posición de conexión con el canal principal. El escenario numérico en el que se capturó el mayor caudal en el canal secundario corresponde a la conexión aguas abajo del ápice del meandro con el canal principal, con un ángulo de desviación de $+10^\circ$, esto es, orientado a favor de la dirección del flujo principal. Al final, el canal secundario captura el 58 % del flujo. El escenario opuesto, en donde el canal secundario pierde gradualmente capacidad hasta llegar al 18 % del caudal total, corresponde a la conexión aguas arriba del ápice del meandro principal con un ángulo de desviación de $+10^\circ$, también orientado en la dirección del flujo principal. En general, los canales secundarios conectados antes del ápice de la curva capturan más flujo que los conectados después del ápice.

Con respecto a la evolución media del fondo, el escenario con conexión del canal secundario aguas arriba del ápice, y con ángulo orientado -10° , opuesto a la dirección del flujo, fue el que presentó mayor erosión en las secciones localizadas en la bifurcación, con magnitudes de hasta 0.42 m, 0.34 m y 0.49 m en las secciones aguas abajo, central y aguas arriba. El escenario que capturó mayor caudal en el meandro secundario presentó erosión en la sección aguas abajo y aguas arriba, pero en la sección central al inicio presentó un depósito de material y luego se mantuvo sin cambios. Los escenarios de las configuraciones de los meandros centrales, en general, presentaron depósito de material, al igual que los escenarios con orientación hacia aguas abajo (-10°), a excepción del primer escenario localizado antes del ápice. Los escenarios con orientación hacia aguas arriba, presentaron erosión en las secciones localizadas aguas abajo y aguas arriba, y en la sección central no presentan cambios importantes.

En cuanto a la distribución del transporte de sedimento de fondo medio, se identificó que para los escenarios que tienen configuraciones hacia aguas abajo (-10°), la capacidad del transporte de sedimento de fondo sobre el meandro secundario fue del 21 %, 15 % y 32 %, y para el meandro principal fue de 79 %, 85 % y 68 %, respectivamente. Los escenarios con configuraciones centrales (0°), la capacidad del transporte de sedimento de fondo sobre el meandro secundario fue del 28 % y para el meandro principal fue de 72 %. Los escenarios con configuraciones hacia aguas arriba ($+10^\circ$), la capacidad del transporte de sedimento de fondo sobre el meandro secundario fue del 48 % y para el meandro principal fue de 52 %. Todos los escenarios presentan una caída en el transporte de la carga de fondo. En los escenarios centrales, la sección aguas abajo antes de la bifurcación no presentó cambios, y en los escenarios con orientación del meandro secundario hacia aguas arriba se identificó un incremento en la capacidad de transporte de fondo. En la distribución del transporte de sedimento en suspensión media, se identificó que los escenarios con configuraciones hacia aguas abajo (-10°), la capacidad del transporte de sedimento en suspensión sobre el meandro secundario fue de 20 %, 11 % y 33 %, y para el meandro principal fue de 80 %, 89 % y 67 %, respectivamente. En los escenarios centrales (0°) la capacidad del transporte de sedimento en suspensión sobre el meandro secundario fue del 28 % y para el meandro principal fue del 72 %.

Agradecimientos

A la Universidad Nacional Autónoma de México por los profesores, sus instalaciones y la formación proporcionada.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por los recursos económicos otorgados durante este tiempo.

Al Instituto de Ingeniería de la UNAM por brindarme un espacio de trabajo, recursos computacionales, y por permitirme experimentar en los laboratorios de hidráulica, así como conocer a muchas personas que desarrollan investigación.

A la dirección General de Cómputo y Tecnologías de la Información y Comunicación (DGTIC) de la UNAM, quien brindó los recursos de supercómputo para realizar los cálculos numéricos, asignados bajo el proyecto LANDCAD-UNAM-DGTIC-389.

Al Dr. Moisés Berezowsky Verduzco, por la invitación a trabajar en estos temas tan apasionantes de hidráulica de ríos y fenómenos de transporte de sedimento, por compartir su conocimiento y su amistad, e incluso llevarme a navegar en ríos.

Al Dr. Alejandro Mendoza Reséndiz por compartir su conocimiento, pero sobre todo las dudas en torno a distintos fenómenos en ingeniería de ríos e hidráulica fluvial y permitirme colaborar y aprender sobre hidráulica computacional y adentrarme en el uso y manejo de equipos de supercómputo de alto desempeño, por su amistad y su paciencia en mi proceso de aprendizaje.

Al Dr. Amado Abel Jiménez Castañeda por sus enseñanzas en los laboratorios de hidráulica y modelos fluviales, por la asesoría y la supervisión en la modelación física, por su dedicación en disipar dudas en temas de hidrodinámica, obras hidráulicas y turbulencia, pero más allá de todo esto, por su amistad.

Al Dr. Lucas Domínguez, el Dr. Ricardo Szupiany y el Dr. Jorge Abad, que son expertos en ingeniería de grandes ríos y cuyas mediciones de campo fueron fuentes de datos valiosas para el desarrollo de esta investigación. Además, proporcionaron su punto de vista y sugerencias para la comprensión de los complejos procesos morfológicos que se desarrollan en los ríos.

A los investigadores Dr. Ramón Domínguez, Dr. Oscar Fuentes y Dr. Aparicio Mijares, por sus sugerencias, comentarios y revisiones de este trabajo.

A la Dr. Lilia Reyes Chávez, la M. en I. Sixta Hinndi Mendoza Pérez y el M. en I. Armando Robles Valverde, por su apoyo para usar el canal del laboratorio de Hidráulica del Posgrado y realizar distintas pruebas experimentales para revisión de los equipos ultrasónicos de medición, y por su amistad.

Al Dr. José Luis Aragón Hernández por su ayuda en las campañas de medición y colaboraciones sobre temas de hidrodinámica, transporte de sedimento y modelación numérica.

Al Ing. Armando Martínez Arriaga, experto en modelación física de procesos fluviales y fenómenos de transporte de sedimentos, por sus asesorías y un sinnúmero de pláticas sobre estos temas, por sus meticulosas puestas a punto de los modelos físicos, así como las revisiones, por la gran calidad de persona que es y por su amistad.

Al M. en I. Víctor Manuel Ortiz Martínez, Jefe del Laboratorio de Hidráulica del IIUNAM, quien siempre nos brindó asesorías en los distintos modelos hidráulicos y su apoyo para habilitarlos y utilizarlos.

A la Licenciadas Josefina Elizabeth Plata García, María Guillermina Sánchez Nahuacatl y Suria Noemí Bustos Venegas, de la Unidad de Servicios de Información (USI) del Instituto de Ingeniería de la UNAM, por el apoyo en la búsqueda de numerosas referencias bibliográficas que enriquecen el material presentado, y la organización de diversos talleres enfocados en la búsqueda de referencias bibliográficas y tecnologías de la información.

A la M. en I. Yolanda Flores Salgado y al Ing. Irving Carlos Álvarez Castillo del Área de Administración de Sistemas UNIX y GNU/Linux de la Coordinación de Supercomputo, DGTIC UNAM, por su ayuda, asesorías y uso en la supercomputadora Miztli, así como en la instalación de software.

Al Ing. Fernando Maldonado Salgado Jefe de Sistemas Linux y Super Cómputo de la Secretaría de Telecomunicaciones e informática del IIUNAM, por su ayuda en el uso del clúster de alto rendimiento Tonatiuh e instalación de software para cálculo numérico intensivo.

A la M. en I. Zaira Hernández Flores, el Sr. Javier Hernández Lemus y Norma Negrete Martínez, de la coordinación de Geotecnia del IIUNAM, por su ayuda en la caracterización y clasificación, así como el cálculo de algunas características físicas de la arena utilizada en la modelación física.

Al Sr. Martín Rodríguez Valencia, por su trabajo en realizar las configuraciones de la arena utilizada en el modelo fluvial, por sus trabajos en construcción de modelos físicos, y su apoyo en las distintas etapas de las campañas de medición. También, al Sr. David, jubilado del IIUNAM, que desarrolló parte de la instrumentación sobre los modelos físicos y mejoró el proceso de medición.

Desde luego son más las personas que tienen que ver con este trabajo, tengan presente que recibirán un agradecimiento de mi parte.

A mi familia por su apoyo incondicional, especialmente a Isaac.

Nomenclatura

Lista de abreviaciones

- 2DH** Flujo Bidimensional Horizontal
- 2D** Dos dimensiones
- 3D** Tres dimensiones
- ADCP** Perfilador de Corriente Doppler Acústico
- ADR** Ecuación de Advección-Difusión-Reacción
- ADV** Velocímetro Doppler Acústico
- AMD** Micro Dispositivos Avanzados
- CCTF** Capacidad combinada del transporte de la carga de fondo
- CFD** Dinámica de Fluidos Computacional
- CFF** Configuración de fondo final
- CFL** Courant-Friedrich-Levy, Número de Courant
- CFS** Corrección de Flujo Secundario
- CHC** Canadian Hydraulics Centre
- CMD** Canal de la Margen Derecha
- CMI** Canal de la Margen Izquierda
- COR** Correlación
- CSs** Concentración de sedimento en suspensión
- DNS** Simulación numérica directa
- EAD** Ecuación Advección-Difusión
- EHCEM** Estructura Hidráulica de Control El Macayo
- FM** Factor Morfológico
- GPS** Sistemas de Posicionamiento Global
- HP** Caballos de fuerza

| | |
|-------------------------|--|
| IIUNAM | Instituto de Ingeniería de la UNAM |
| LES | Simulación de grandes remolinos |
| MATLAB | MATrix LABoratory |
| MDE | Modelo Digital de Elevaciones |
| MD | Margen Derecha |
| MF | Modelación Física |
| MI | Margen Izquierda |
| MPI | Interfaz de Paso de Mensajes |
| MSFPI | Medidos sobre el fondo plano inicial |
| msnm | metros sobre el nivel del mar |
| MS | Meandro secundario |
| NASA | Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio |
| NF | Número de frecuencias |
| NM-2DH | Modelo Numérico morfo-hidráulico de superficie libre 2D |
| NSEs | Ecuaciones de Navier-Stokes |
| RANS | Ecuaciones de Navier-Stokes promediadas por Reynolds |
| RE | Relación Esperada |
| RL | Regresión Lineal |
| RNE | Relación Numérico-Experimental |
| SM | Socavación Máxima |
| SNR | Relación señal-ruido |
| SWE | Shallow Water Equations, Ecuaciones de aguas someras o de Saint Venant |
| UNAM | Universidad Nacional Autónoma de México |
| USB | Bus Universal en Serie |
| UTM | Universal Transversal de Mercator, sistema de coordenadas |
| VOF | Volumen de Fluido |
| Letras Griegas | |
| α, β, γ | Ángulos directores |
| α_{ks} | Coficiente para formas de fondo |
| β | Coficiente de ajuste |
| β_R | Régimen morfodinámico |

| | |
|--------------------------------|--|
| Δt | Incremento en el tiempo |
| $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ | Incremento espaciales en direcciones X,Y,Z |
| ϵ | Disipación |
| η | Elevación de la superficie libre del agua, TELEMAC |
| γ | Peso específico del fluido |
| κ | Constante de von Kármán |
| Λ | Longitud del meandro |
| λ | Porosidad del material del fondo, TELEMAC |
| λ_{min} | Arco de longitud de onda mínimo para el proceso de migración |
| ∇ | Gradiente |
| ν | Viscosidad cinemática |
| ν_t | Coefficiente de viscosidad turbulenta |
| ν_t | Viscosidad turbulenta |
| Ω | Sinuosidad |
| Ω_s | Velocidad de asentamiento |
| ω_s | Velocidad de caída de la partícula |
| $\bar{\eta}$ | Elevación local del fondo |
| $\bar{\xi}$ | Elevación local de la superficie libre del agua |
| Φ_b | Transporte de sedimento adimensional, TELEMAC |
| ρ_s | Densidad del sedimento |
| σ_c | Número de Schmidt |
| σ_g | Desviación estándar geométrica |
| $\sigma_{\bar{\epsilon}_r U}$ | Desviación estándar del error relativo |
| τ_* | Shields |
| τ_0, τ_b | Esfuerzo cortante cercano al fondo |
| τ_{bs} | Arrastre de forma de grano |
| τ_{bs} | Fricción de superficie de grano |
| τ_{*c} | Shields crítico |
| θ | Amplitud angular máxima |
| θ_s | Ángulo de fricción del material |
| ϵ | Coefficiente de difusión turbulenta |

| | |
|---|--|
| ε_m | Coficiente de transferencia de momentum |
| ε_s | Coficiente de difusividad turbulenta del sedimento |
| $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_x$ | Componentes normales de difusión turbulenta |
| ε_{ij} | Tensor de difusión turbulenta |
| $\vec{\Omega}$ | Vector vorticidad |

Lista de símbolos

| | |
|---|---|
| $\overline{D_{s0}}$ | Difusividad bajo condición de flujo neutral |
| \overline{FSU} | Vector de Flujo Secundario |
| $\overline{q_0^*}$ | Número de Einstein de referencia |
| $\overline{q^*}$ | Número de Einstein |
| $\overline{q_b}$ | Distribución de carga de fondo media |
| $\overline{q_s}$ | Distribución de carga en suspensión media |
| $\overline{u'^2}, \overline{v'^2}, \overline{w'^2}$ | Esfuerzos normales de Reynoldls |
| $\overline{u'v'}, \overline{u'w'}, \overline{v'w'}$ | Esfuerzos tangenciales de Reynoldls |
| $\overline{u'_i u'_i}$ | Esfuerzos de Reynoldls |
| \overline{V} | Vector normal |
| \mathbf{x} | Vector de posición |
| E_r | Error relativo |
| h_0 | Profundidad sobre coraza o protección de fondo |
| $u(\mathbf{x}, t)$ | Vector de velocidad |
| Y_{smax} | Socavación máxima |
| o | grado sexagesimal |
| $\frac{\sqrt{\overline{(u')^2}}}{\overline{u}}; \frac{\sqrt{\overline{(v')^2}}}{\overline{u}}; \frac{\sqrt{\overline{(w')^2}}}{\overline{u}}$ | Intensidad turbulenta de los componentes de velocidad |
| \overline{h} | Profundidad local del flujo |
| $\overline{u(\mathbf{x}, t)}, \overline{u}$ | Velocidad media del registro |
| $\overline{u'_x c'}, \overline{u'_y c'}, \overline{u'_z c'}$ | Esfuerzos de Reynolds para flujo de sedimentos |
| $\overline{u}/U, \overline{v}/U, \overline{w}/U$ | Componentes adimensionales del vector velocidad |
| ρ | Densidad de referencia |
| $\theta(s)$ | Amplitud angular |
| $\vec{e}_1, \vec{e}_2, \vec{e}_3$ | Base ortonormal |

| | |
|--------------------------|---|
| \vec{Q}_b | Vector de la tasa de transporte volumétrico, TELEMAC |
| A_s | Coefficiente de producción de corrientes secundarias, TELEMAC |
| A | Factor de socavación, Constante de pendiente transversal |
| b/B | Ancho de sección adimensional |
| B | Ancho de sección |
| b | Ancho del canal de llegada |
| C' | Curvatura del meandro |
| C_c | Curvatura de eje central |
| C_d | Coefficiente de descarga |
| C'_f | Coefficiente de fricción por fricción de superficie |
| C_f | Coefficiente de fricción por forma de fondo |
| C_f | Coefficiente o factor de fricción |
| C_s, c_s | Concentración de saturación |
| C_z, C_a | Concentración de referencia |
| C_{eq} | Concentración de equilibrio |
| D_* | Número de Yalin |
| d_0 | Longitud característica |
| D_s | Coefficiente de disipación de corrientes secundarias, TELEMAC |
| D_{50}, D_{16}, D_{84} | Diámetro característico: 50, 16, 84 |
| dB | Decibelio |
| ds | Diferencial espacial en un sistema curvilíneo |
| D | Coefficiente de difusión molecular |
| D | Depósito |
| e_{ru}, e_{rv}, e_{rw} | Errores relativos a los componentes de velocidad |
| E | Erosión |
| f_x, f_y, f_z | Aceleraciones viscosas, FLOW3D |
| F_x, F_y | Términos fuente |
| Fr | Número de Froude |
| G_x, G_y, G_z | Aceleraciones de cuerpo, FLOW3D |
| G | Abertura de compuerta |
| g | Aceleración de la gravedad |

| | |
|-----------|---|
| h_e | Carga sobre el vertedor |
| H_o | Profundidad de referencia local del flujo |
| H_u | Carga aguas arriba de la compuerta |
| Hz | Hertz o hercio |
| H | Profundidad local del flujo |
| J_f | Coefficiente de planicie (llanura) |
| J_s | Coefficiente de sesgo (asimetría) |
| k_s | Rugosidad hidráulica equivalente |
| k | Energía cinética de la turbulencia |
| k | Factor de crecimiento de curva |
| n | Coefficiente de fricción de Manning |
| P_{atm} | Presión atmosférica |
| P_d | Presión dinámica |
| p | Presión |
| Q_p | Caudal en el meandro principal |
| Q_s | Caudal en el meandro secundario |
| Q_t | Caudal total, en meandro principal y secundario |
| Q | Caudal |
| R_c | Radio de curvatura |
| R_{DIF} | Término de difusión turbulenta, FLOW3D |
| R_{SOR} | Término fuente, FLOW3D |
| Re | Número de Reynodls |
| Ri_c | Número de Richardson crítico |
| Ri | Número de Richardson |
| Ro | Número de Rouse |
| R | Coefficiente de correlación lineal |
| s, n, z | Sistema de coordenadas curvilíneo |
| S_c | Recíproco del Número de Schmidt, FLOW3D |
| s_h | Fuente o sumidero, TELEMAC |
| S_w | Pendiente hidráulica |
| Sc | Número de Schmidt |

| | |
|-------------------------|--|
| S | Densidad relativa |
| t_0 | Tiempo inicial |
| t_f | Tiempo final |
| T | Escala de tiempo |
| t | Tiempo |
| $u'(\mathbf{x}, t), u'$ | Velocidad fluctuante del registro |
| u, v, w | Componentes del vector velocidad |
| u_* | Velocidad al cortante |
| u_e, v_e, w_e | Componentes de velocidad calculados experimentalmente |
| u_i | Componentes de velocidad asociado a cada dirección i, Notación de Einstein |
| u_n, v_n, w_n | Componentes de velocidad calculados numéricamente |
| u_s, v_s, w_s | Componentes de la velocidad en la superficie de la fuente, FLOW3D |
| u_w, v_w, w_w | Componentes de la velocidad del termino fuente, FLOW3D |
| UT_c | Velocidad crítica para inicio de movimiento |
| U | Vector de velocidad |
| V_F | Volumen de Fluido, FLOW3D |
| V_{cri} | Velocidad crítica |
| X, Y, Z | Sistema de coordenadas cartesiano |
| x_c | Coordenada central x del radio de curvatura |
| $x_{c=0}$ | Coordenada x de curvatura nula |
| y_c | Coordenada central y del radio de curvatura |
| $y_{c=0}$ | Coordenada y de curvatura nula |
| y | Tirante |
| Z_f | Elevación del fondo |
| Z_m | Elevación de medición o plano de medición |
| Z_s | Elevación de la superficie libre del agua |
| n | Eje de las ordenadas, sistema curvilíneo (s,n,z) |
| s | Eje vertical, sistema curvilíneo (s,n,z) |

Bibliografía

- Abad, J., y Garcia, M. (2006). “Hydrodynamics in kinoshita-generated meandering bends: Importance for river-planform evolution.” In *River, Coastal and Estuarine Morphodynamics*, River, Coastal and Estuarine Morphodynamics: RCEM 2005 - Proceedings of the 4th IAHR Symposium on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics, 761–771.
- Abad, J. D., Frias, C. E., Buscaglia, G. C., y Garcia, M. H. (2013). “Modulation of the flow structure by progressive bedforms in the kinoshita meandering channel.” *Earth Surface Processes and Landforms*, 38(13), 1612–1622.
- Abad, J. D., y García, M. H. (2005). “Hydrodynamics in kinoshita-generated meandering bends: importance for river-planform evolution.” Int. Assoc. of Hydraulic Res., 4-7 Oct.
- Abad, J. D., y Garcia, M. H. (2009). “Experiments in a high-amplitude kinoshita meandering channel: 1. implications of bend orientation on mean and turbulent flow structure.” *Water Resources Research*, 45(2).
- Alarcón, J. J., Ricardo, N. S., Monagnini, M. D., Gaudin, H., Prendes, H. H., y Amsler, M. L. (2003). “Evaluación del transporte de sedimentos en el tramo medio del río paraná.” Proc., Primer Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos, INA, Bs. As., Argentina.
- Anderson, S., y Lohrmann, A. (1995). “Open water test of the sontek acoustic doppler velocimeter.” In *Proceedings of the IEEE Fifth Working Conference on Current Measurement*, 188–192.
- Aragón, H. J. L., Caballero, C. C., Jiménez, C. A., y Berezowsky, V. M. (2022). “Estudio numérico-experimental del campo de velocidades en un canal rectangular con curvatura compuesta y ancho variable en 2DH.” *Tecnología y ciencias del agua*, 13, 01–35.
- ASTM (2006). *C778-13*. Standard Specification for Standard Sand, ASTM international: West Conshohocken, PA, USA.
- Audouin, Y., Benson, T., Delinares, M., Fontaine, J., Glander, B., Huybrechts, N., Kopmann, R., Leroy, A., Pavan, S., Pham, C.-T., Taccone, F., Tassi, P., y Walther, R. (2019). “Introducing gaia, the brand new sediment transport module of the telemac-mascaret system.”
- Baek, K. O., Seo, I. W., y Jeong, S. J. (2006). “Evaluation of dispersion coefficients in meandering channels from transient tracer tests.” *Journal of Hydraulic Engineering*, 132(10), 1021–1032.
- Beck, S. (1988). *Computer-simulated deformation of meandering river patterns*. Ph.D. thesis, University of Minnesota.

- Blanchet, G., y Charbit, M. (2013). *Digital Signal and Image Processing using MATLAB*. ISTE Ltd and John Wiley Sons, Inc.
- Blanckaert, K. (2009). "Saturation of curvature-induced secondary flow, energy losses, and turbulence in sharp open-channel bends: Laboratory experiments, analysis, and modeling." *Journal of Geophysical Research*, 114.
- Blanckaert, K. (2010). "Topographic steering, flow recirculation, velocity redistribution, and bed topography in sharp meander bends." *Water Resources Research*, 46(9).
- Blanckaert, K. (2011). "Hydrodynamic processes in sharp meander bends and their morphological implications." *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 116.
- Blanckaert, K., y De Vriend, H. J. (2004). "Secondary flow in sharp open-channel bends." *Journal of Fluid Mechanics*, 498, 353-380.
- Blanckaert, K., y Graf, W. H. (2001a). "Mean flow and turbulence in open-channel bend." *Journal of Hydraulic Engineering*, 127(10), 835-847.
- Blanckaert, K., y Graf, W. H. (2001b). "Mean flow and turbulence in open-channel bend." *Journal of Hydraulic Engineering*, 127.
- Blondeaux, P., y Seminara, G. (1985). "A unified bar-bend theory of river meanders." *Journal of Fluid Mechanics*, 157, 449-470.
- Bombardelli, F. A., Palermo, M., y Pagliara, S. (2018). "Temporal evolution of jet induced scour depth in cohesionless granular beds and the phenomenological theory of turbulence." *Physics of Fluids*, 30.
- Boussinesq, M. J. (1868). "Mémoire sur l'influence de frottement dans les mouvements réguliers des fluides." *Journal de mathématiques pures et appliquées 2e série*, 13.
- Breusers, H. C. (1967). "Time scale of two dimensional local scour." In *Proc. 12th Congress IAHR, vol 3, paper C32*, vol. 3, IAHR.
- Breusers, H. N., y Raudkivi, A. J. (1991). *Scouring. Hydraulic Structures Design Manual Series, Vol. 2 (IAHR Design Manual)*.
- Caballero, C., Mendoza, A., Berezowsky, M., y Jiménez, A. (2023). "Numerical-Experimental Study of Scour in the Discharge of a Channel: Case of the Carrizal River Hydraulic Control Structure, Tabasco, México." *Water*, 15(15).
- Cao, Z., Day, R., y Egashira, S. (2002). "Coupled and decoupled numerical modeling of flow and morphological evolution in alluvial rivers." *Journal of Hydraulic Engineering*, 128, 306-321.
- Castillo, L. G., Castro, M., Carrillo, J. M., Hermosa, D., Hidalgo, X., y Ortega, P. (2016). In *Experimental and numerical study of scour downstream Toachi Dam*, Sustainable Hydraulics in the Era of Global Change - Proceedings of the 4th European Congress of the International Association of Hydroenvironment engineering and Research, IAHR 2016.
- Chanson, H. (2004). *Environmental Hydraulics for Open Channel Flows*. Elsevier Ltd.
- CHC, C. (2011). *Blue Kenue: Software tool for hydraulic modellers*. National Research Council, Ottawa, Ontario, Canadá.

- Chien, N., y Einstein, H. (1955). *Effects of Heavy Sediment Concentration Near the Bed on Velocity and Sediment Distribution*. M.R.D. sediment series, Missouri River Division, Corps of Engineers, U.S. Army.
- Coleman, N. L. (1981). "Velocity profiles with suspended sediment." *Journal of Hydraulic Research*, 19.
- Colombini, M., G., S., y Tubino, M. (1987). "Finite-amplitude alternate bars." *Journal of Fluid Mechanics*, 181, 213–232.
- Da Silva, A. A. M. F. (1995). *Turbulent flow in sine-generated meandering channels*. Ph.D. thesis, Queen's University, Kingston, Ontario, Canada.
- da Silva, A. M. F., El-Tahawy, T., y Tape, W. D. (2006). "Variation of flow pattern with sinuosity in sine-generated meandering streams." *Journal of Hydraulic Engineering*, 132(10), 1003–1014.
- Dagan, G. (1969). "Dispersivity tensor for turbulent uniform channel flow." *Journal of the Hydraulics Division*, 95(5), 1699–1712.
- D'Áubuisson, d. V. J. F. (1840). *Traité D'Hydraulique, A L'usage Des Ingénieurs*. Academic Press, Inc., seconde édition edn.
- De Vriend, H. J. (1981). "Velocity redistribution in curved rectangular channels." *Journal of Fluid Mechanics*, 107, 423–439.
- Dietz, J. W., y Wittke, W. (1969). "Kolkbildung in feinen oder leichten sohlmaterialien bei strömendem abfluß." 1–156, bachelor's Thesis. Versuchsanstalt für Wasserbau und Kulturtechnik, Theodor-Rehbock-Flu, Universität Fridericiana Karlsruhe. Karlsruhe, Berenz.
- Dominguez, L., Szupiany, R. N., Tassi, P., y Vionnet, C. A. (2021). "Large meandering bends with high width-to-depth ratios: Insights from hydro-sedimentological processes." *Geomorphology*, 374.
- Drago, E. C., y Amsler, M. L. (1998). "Bed sediment characteristics in the paraná and paraguay rivers." *Water International*, 23.
- Dutta, S., Wang, D., Tassi, P., y Garcia, M. H. (2017). "Three-dimensional numerical modeling of the bulle effect: the nonlinear distribution of near-bed sediment at fluvial diversions." *Earth Surface Processes and Landforms*, 42(14), 2322–2337.
- EDF-R&Da. (2020). "Telemac-2d. user manual. version v8p2."
- EDF-R&Db. (2020). "Sisyphe. user manual. version v8p2."
- EDF-R&Dc. (2020). "Telemac-3d. user manual. version v8p2."
- EDF-R&Dd. (2020). "Gaia. user manual. version v8p2."
- Edmonds, D., Hajek, E., Downton, N., y Bryk, A. (2016). "Avulsion flow-path selection on rivers in foreland basins." *Geology*, 44, G38082.1.
- Engelund, F. (1974). "Flow and bed topography in channel bends." *Journal of the Hydraulics Division*, 100(Proc. Paper 10963).

- Ettema, R., Constantinescu, G., y Melville, B. W. (2017). “Flow-Field Complexity and Design Estimation of Pier-Scour Depth: Sixty Years since Laursen and Toch.” *Journal of Hydraulic Engineering*, 143.
- Farhoudi, J., y Smith, K. V. (1982). “Time scale for scour downstream of hydraulic jump.” *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, 108.
- Fennema, R. J., y Chaudhry, M. H. (1990). “Explicit methods for 2-d transient free surface flows.” *Journal of Hydraulic Engineering*, 116(8), 1013–1034.
- Finnie, J., Donnell, B., Letter, J., y Bernard, R. S. (1996). “Secondary flow correction for depth-averaged flow calculations.” vol. 1.
- Flow-Science, I. (2017a). “Flow3d. computer software.”
- Flow-Science, I. (2017b). “Flow3d. users manual.”
- Franzetti, S., Radice, A., Rebai, D., y Ballio, F. (2022). “Clear water scour at circular piers: A new formula fitting laboratory data with less than 25 % deviation.” *Journal of Hydraulic Engineering*, 148.
- Freeman, J. R. (1929). “Hydraulic laboratory practice.” Published by the American Society of Mechanical Engineers, ASME. New York. USA.
- Garcia, M. (2008). *Sedimentation Engineering*. American Society of Civil Engineers (ASCE), Manuals and Reports on Engineering Practice No. 110, Reston, VA, USA.
- Garcia, R., y Kahawita, R. A. (1986). “Numerical solution of the St. Venant equations with the MacCormack finite-difference scheme.” *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 6(5), 259–274.
- García F., M., y Maza A., J. A. (1997). *Inicio de Movimiento y Acorazamiento. Capítulo 8 del Manual de Ingeniería de Ríos*. Instituto de Ingeniería, Univesidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México.
- Garde, R., y Ranga, R. K. (2015). *Mechanics of sediment transportation and alluvial stream problems / R.J. Garde, K.G. Ranga Raju*. Daryaganj, third edition edn.
- Gibson, A. F., y Petavel, J. E. (1909). “On the depression of the filament of maximum velocity in a stream flowing through an open channel.” *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, 82(553), 149–159.
- Gonzalez, R., Woods, R., y Eddins, S. (2009). *Digital Image Processing using MATLAB, Second Edition*. Pearson Education, Inc.
- Graf, W. (1984). *Hydraulics of Sediment Transport*. McGraw-Hill Series in Walter Resource, Water Resources Publications.
- Graf, W. (1998). *Fluvial Hydraulics: Flow and Transport Processes in Channels of Simple Geometry*. John Wiley & Sons, Water Resources Publications.
- Gropp, W., Lusk, E., y Skjellum, A. (2019). *Using MPI - 2nd Edition Portable Parallel Programming with the Message Passing Interface (Scientific and Engineering Computation)*.
- Hamdan, R. K., Al-Adili, A., y Mohammed, T. A. (2022). “Physical modeling of the scour volume upstream of a slit weir using uniform and non-uniform mobile beds.” *Water*, 14(20).

- Hervouet, J.-M. (2007). *Hydrodynamics of Free Surface Flows: Modelling with the Finite Element Method*. John Wiley & Sons.
- Hinze, J. O. (1959). "Turbulence: An introduction to its mechanism and theory." *McGraw-Hill Series in Mechanical Engineering*.
- Hirt, C., y Nichols, B. (1981). "Volume of fluid (vof) method for the dynamics of free boundaries." *Journal of Computational Physics*, 39(1), 201–225.
- Hoffmans, G., y Verheij, H. (1997). *Scour Manual*. A A Balkema Publishers, Netherlands.
- Hooke, R. L. (1974). *Shear-Stress and Sediment Distribution in a Meander Bend*. No. Rapport 30 in (c) 1974 Uppsala Universitet, Department of Physical Geography UNGI Rapport 30.
- Hooke, R. L. B. (1975). "Distribution of sediment transport and shear stress in a meander bend." *The Journal of Geology*, 83(5), 543–565.
- Huang, S. l., Jia, Y. f., Chan, H. C., y Wang, S. S. (2009). "Three-dimensional numerical modeling of secondary flows in a wide curved channel." *Journal of Hydrodynamics*, 21.
- Huybrechts, N., Villaret, C., y Hervouet, J. M. (2010). "Comparison between 2d and 3d modelling of sediment transport: Application to the dune evolution." 887–893.
- Ikeda, S., Parker, G., y Sawai, K. (1981). "Bend theory of river meanders. part 1. linear development." *Journal of Fluid Mechanics*, 112, 363–377.
- ISO 1438 (2017). "Hydrometry — open channel flow measurement using thin-plate weirs." *Technical Committee : ISO/TC 113/SC 2*.
- Jamieson, E., Post, G., y Rennie, C. (2010). "Spatial variability of three-dimensional reynolds stresses in a developing channel bend." *Earth Surface Processes and Landforms*, 35(9), 1029–1043.
- Ji, Z. G. (2017). *Hydrodynamics and water quality: Modeling rivers, lakes, and estuaries*. John Wiley Sons, Inc.
- Jiménez, A. (2017). *Calibración y verificación de las leyes de descarga de una estructura de control*. Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Facultad de Ingeniería. Ciudad de México.
- Jiménez, C., y Berezowsky, V. (2004). "Modelación del flujo bidimensional horizontal con coordenadas curvilíneas generales." Tech. rep., Instituto de ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), México, D.F.
- Jiménez, C., Martínez, A., y Caballero, C. (2023). *Reseña histórica de los estudios referidos al flujo helicoidal en canales*. Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Facultad de Ingeniería. Ciudad de México.
- Jin, Y. C., Steffler, P. M., y Hicks, F. E. (1990). "Roughness effects on flow and shear stress near outside bank of curved channel." *Journal of Hydraulic Engineering*, 116(4), 563–577.
- Johannesson, H., y Parker, G. (1985). *Computer Simulated Migration of Meandering Rivers in Minnesota*. Legislative Commision on Minnesota Resources State of Minnesota, St. Anthony Falls Laboratory Project Reports 242.

- Johannesson, H., y Parker, G. (1989). *Linear Theory of River Meanders*, chap. 7, 181–213. American Geophysical Union (AGU).
- Julien, P. Y. (2002). *River Mechanics*. Cambridge University Press.
- Julien, P. Y. (2010). *Erosion and Sedimentation*. Cambridge University Press.
- Kalkwijk, J. P. T., y De Vriend, H. J. (1980). “Computation of the flow in shallow river bends.” *Journal of Hydraulic Research*, 18(4), 327–342.
- Karypis, G., y Kumar, V. (1997). “Metis.: A software package for partitioning unstructured graphs and computing fill-reduced orderings of sparse matrices.” Obtenido de la biblioteca digital de la Universidad de Minnesota, <https://hdl.handle.net/11299/215346>.
- Kikkawa, H., Kitagawa, A., y Ikeda, S. (1976). “Flow and bed topography in curved open channels.” *Journal of the Hydraulics Division*, 102(Issue 9), 1327–1342.
- Knaapen, M. A. F., y Joustra, R. (2012). “Morphological acceleration factor: usability, accuracy and run time reductions.” En: TELEMAC-MASCARET Conferencia de Usuarios, 18-19 Octubre 2012, Oxford.
- Lai, Y. G., Liu, X., Bombardelli, F. A., y Song, Y. (2022). “Three-dimensional numerical modeling of local scour: A state-of-the-art review and perspective.” *Journal of Hydraulic Engineering*, 148.
- Langbein, W. B., y Leopold, L. B. (1966). *River meanders - Theory of minimum variance*. Paper 422H, Geological Survey Professional, Physiographic and Hydraulic Studies of Rivers.
- Langendoen, E., Mendoza, A., Abad, J. D., Tassi, P., Wang, D., Ata, R., El kadi Abderrezzak, K., y Hervouet, J.-M. (2016). “Improved numerical modeling of morphodynamics of rivers with steep banks.” *Advances in Water Resources*, 93, 4 – 14, numerical modelling of river morphodynamics.
- Latosinski, F. G., Szupiany, R. N., García, C. M., Guerrero, M., y Amsler, M. L. (2014). “Estimation of concentration and load of suspended bed sediment in a large river by means of acoustic doppler technology.” *Journal of Hydraulic Engineering*, 140.
- Leschziner, M. A., y Rodi, W. (1979). “Calculation of strongly curved open channel flow.” *Journal of the Hydraulics Division*, 105(10), 1297–1314.
- Luque, R. F. (1980). “Mechanics of sediment transportation and alluvial stream problems.” *Sedimentary Geology*, 25.
- MathWorks (2000). “Matlab using matlab graphics.” *Matlab*.
- Maza, Á., y García, F. (1996). *Transporte de sedimentos*. Manual de Ingeniería de Ríos, Capítulo 10, Comisión Nacional del Agua; Instituto de Ingeniería, UNAM.
- Mehta, A. J. (2013). *An introduction to hydraulics of fine sediment transport, Advanced Series on Ocean Engineering, Vol. 38*. World Scientific Publishing.
- Mendoza, A., Abad, J. D., Langendoen, E. J., Wang, D., Tassi, P., y Abderrezzak, K. E. K. (2017). “Effect of sediment transport boundary conditions on the numerical modeling of bed morphodynamics.” *Journal of Hydraulic Engineering*, 143(4), 04016099.

- Möller, M. (1883). "Studien über die bewegung des wassers in flüssen mit bezugname auf die ausbildung des flussprofiles." *Zeitschrift für Bauwesen*, Ernst and Korn.
- Möller, M., y Freeman, J. R. (1929). *IV. The hydraulic laboratory of the technical University at Brunswick, Hydraulic Laboratory Practice*. The American Society of Mechanical Engineers, ASME.
- Molls, T. R. (1992). *A general two-dimensional free-surface flow model for solving the depth -averaged equations using an implicit ADI scheme*. Ph.D. thesis, Washington State University. Pullman, USA.
- Moreles, V., y Botello, R. (2007). *La ecuación de advección-difusión-reacción en problemas hidrológicos*. Centro de Investigación en Matemáticas (CIMAT), Guanajuato, México.
- Morgan, J. A., Kumar, N., Horner-Devine, A. R., Ahrendt, S., Istanbuloglu, E., y Bandaragoda, C. (2020). "The use of a morphological acceleration factor in the simulation of large-scale fluvial morphodynamics." *Geomorphology*, 356, 107088.
- Muste, M., y Patel, V. C. (1997). "Velocity profiles for particles and liquid in open-channel flow with suspended sediment." *Journal of Hydraulic Engineering*, 123(9), 742–751.
- Naot, D., Nezu, I., y Nakagawa, H. (1993). "Hydrodynamic behavior of compound rectangular open channels." *Journal of Hydraulic Engineering*, 119, 390–408.
- NASA, Earth Observatroy (2023). "Earth observatory, world of change: Padma river." <https://earthobservatory.nasa.gov/world-of-change/PadmaRiver>, consultado: 2023-10-11.
- Negm, A., Saleh, O., Abdel-Aal, G., y Sauda, M. (2002). "Investigating scour characteristics downstream of abruptly enlarged stilling basins." 1–1283, Balkema.
- Nezu, I., y Nakagawa, H. (1993). *Turbulence in Open-Channel Flows*. Monograph Serie, International Association for Hydraulic Research.
- Nezu, I., Nakagawa, H., y Tominaga, A. (1985). "Secondary currents in a straight channel flow and the relation to its aspect ratio." In L. J. S. Bradbury, F. Durst, B. E. Launder, F. W. Schmidt, y J. H. Whitelaw (Eds.), *Turbulent Shear Flows 4*, 246–260, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Nortek (2022). *The Comprehensive Manual for Velocimeters*. Vectrino Profiler.
- Ottevanger, W., Blanckaert, K., y Uijttewaal, W. (2012). "Processes governing the flow redistribution in sharp river bends." *Geomorphology*, 163-164, 45 – 55, meandering Channels.
- Parker, G., Sawai, K., y Ikeda, S. (1982). "Bend theory of river meanders. part 2. nonlinear deformation of finite-amplitude bends." *Journal of Fluid Mechanics*, 115, 303–314.
- Pope, S. B. (2000). *Turbulent Flows*. Cambridge University Press.
- Prandtl, L. (1904). "Über flüssigkeitsbewegung bei sehr kleiner reibung." *Verhandl , Intern. Math. Kongr.*, 42, 484–491.
- Prandtl, L. (1952). *Essentials of Fluid Dynamics*. Hafner Publications, traducción por Royal Society of London.
- Puri, A. N., y Kuo, C. Y. (1985). "Numerical modelling of subcritical open channel flow using the k-epsilon turbulence model and the penalty function finite element technique." *Applied Mathematics Mechanics English Edition*, 9, 82–88.

- Rajaratnam, N., y Nwachukwu, B. A. (1983). "Flow near groin-like structures." *Journal of Hydraulic Engineering*, 109(3), 463–480.
- Ramonell, C., y Amsler, M. (2005). "Avulsión y rectificación de meandros en planicies de bajo gradiente: consideraciones para su predicción." *Ingeniería del Agua*, 12(3).
- Rodi, W. (1984). *Turbulence models and their application in hydraulics*. International Association for Hydraulic Research, Delft, Cambridge University Press.
- Rodi, W., Constantinescu, G., y Stoesser, T. (2013). *Large-Eddy Simulation in Hydraulics*. CRC Press/Balkema, 1ra. edn., International Association for Hydro-Environment Engineering and Research, IAHR Monograph.
- Rouse, H. (1938). "Experiments on the mechanics of sediment suspension." *Proc., 5th Int. Congress of Applied Mech.*, 3, 550–554.
- Rouse, H. (1939). "Experiments on the mechanics of sediment suspension." *International congress for Applied Mechanics*, LXV.
- Rousseau, Y. Y., Biron, P. M., y Van de Wiel, M. J. (2016). "Sensitivity of simulated flow fields and bathymetries in meandering channels to the choice of a morphodynamic model." *Earth Surface Processes and Landforms*, 41(9), 1169–1184.
- Rozovskii, I. L. (1961). *Flow of water in bends of open channels*. Academy of Sciences of the Ukrainian SSR, Kiev, Ukraine; Publicado por The National Science Foundation, Washington, D.C, The Department of the Interior, USA, y The Israel Program For Scientific Translations, Jerusalem.
- Rutherford, J. C. (1994). *River mixing*. John Wiley & Sons Ltd.
- Schumm, S. A. (1985). "Patterns of alluvial rivers." *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 13, 5–27.
- Seminara, G., y Zolezzi, G. (2001). "Downstream and upstream influence in river meandering. part 1. general theory and application to overdeepening." *Journal of Fluid Mechanics*, 438, 183–211.
- Seminara, G., Zolezzi, G., Turbino, M., y Zardi, D. (2001). "Downstream and upstream influence in river meandering. part 2. planimetric development." *Journal of Fluid Mechanics*, 438, 213–230.
- Shaheed, R., Mohammadian, A., y Yan, X. (2021). "A review of numerical simulations of secondary flows in river bends." *Water (Switzerland)*, 13.
- Silva, A. M. F. D., y Ebrahimi, M. (2017). "Meandering morphodynamics: Insights from laboratory and numerical experiments and beyond." *Journal of Hydraulic Engineering*, 143(9), 03117005.
- Sotelo, A. (2007). *Hidráulica General 1; Fundamentos*. Limusa/Noriega., 1a edn.
- Sousa, A. M., y Ribeiro, T. P. (2021). "Local scour at complex bridge piers-experimental validation of current prediction methods." *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 27.
- Stanislawski, L. V., Kronenfeld, B. J., Battenfield, B. P., y Shavers, E. J. (2023). "At what scales does a river meander? scale-specific sinuosity (s3) metric for quantifying stream meander size distribution." *Geomorphology*, 436, 108734.

- Struiksma, N., y Crosato, A. (1989). *Analysis of a 2-D Bed Topography Model for Rivers*, chap. 6, 153–180. American Geophysical Union (AGU).
- Tanner, W. F. (1960). “Helicoidal flow, a possible cause of meandering.” *Journal of Geophysical Research (1896-1977)*, 65(3), 993–995.
- Termini, D. (2009). “Experimental observations of flow and bed processes in large-amplitude meandering flume.” *Journal of Hydraulic Engineering*, 135(7), 575–587.
- Termini, D., y Piraino, M. (2011). “Experimental analysis of cross-sectional flow motion in a large amplitude meandering bend.” *Earth Surface Processes and Landforms*, 36(2), 244–256.
- The MathWorks Inc. (2020). “Matlab versión: 9.9.0.1467703 (r2020b).”
- Thomson, J. (1876). “V. on the origin of windings of rivers in alluvial plains, with remarks on the flow of water round bends in pipes.” *Proceedings of the Royal Society of London*, 25.
- Thomson, J. (1877). “Experimental demonstration in respect to the origin of windings of rivers in alluvial plains, and to the mode of flow of water round bends of pipe.” *Proceedings of the Royal Society of London*.
- Thomson, J. (1878). “On the flow of water in uniform régime in rivers and other open channels.” *Proceedings of the Royal Society of London*.
- Thomson, J. (1879). “On the flow of water round river bends.” *Proceedings Institution of Mechanical Engineers*, 6.
- Vanoni, V., y Brooks, N. (1957). “Laboratory studies of the roughness and suspended load of alluvial streams.” *California Institute of Technology, E-68*.
- Vanoni, V. A. (1940). *Experiments on the transportation of suspended sediment by water. Dissertation (Ph.D.)*. Ph.D. thesis, California Institute of Technology, USA.
- Vanoni, V. A. (1946). “Transportation of suspended sediment by water.” *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 111.
- Vanoni, V. A. (1975). *Sedimentation Engineering, ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice-No.54*. American Society of Civil Engineers.
- Wahl, L. (2000). *Analyzing ADV Data Using WinADV*, 1–10.
- Wei, M., Blanckaert, K., Heyman, J., Li, D., y Schleiss, A. J. (2016). “A parametrical study on secondary flow in sharp open-channel bends: experiments and theoretical modelling.” *Journal of Hydro-environment Research*, 13, 1 – 13.
- Weng, G. J. (1990). “The theoretical connection between Mori-Tanaka’s theory and the Hashin-Shtrikman-Walpole bounds.” *International Journal of Engineering Science*, 28(11), 1111–1120.
- Wilcox, D. (2004). *Turbulence modeling for CFD*. DCW Industries, 2da. edn.
- Winterwerp, J. (1999). *On the dynamics of high-concentrated mud suspensions*. Ph.D. thesis, Delft University of Technology.
- Winterwerp, J. C. (2001). “Stratification effects by cohesive and noncohesive sediment.” *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 106.

- Winterwerp, J. C. (2006). "Stratification effects by fine suspended sediment at low, medium, and very high concentrations." *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 111.
- Winterwerp, J. C., y Kesteren, W. G. M. V. (2004). *Introduction to the Physics of Cohesive Sediment Dynamics in the Marine Environment*, vol. 56.
- Zhao, P., Yu, G., y Zhang, M. (2019). "Local scour on noncohesive beds by a submerged horizontal circular wall jet." *Journal of Hydraulic Engineering*, 145.
- Zimmerman, C., y Kennedy, J. F. (1978). "Transverse bed slopes in curved alluvial streams." *Journal of the Hydraulics Division*, 104 (Issue HY1), 33–48.