

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL LITORAL



MAESTRÍA EN INGENIERÍA  
DE LOS RECURSOS HÍDRICOS

# **Implementación de Modelos Digitales de Elevación (MDE) para la simulación hidrodinámica bidimensional del escurrimiento en un tramo del río Salado (Santa Fe). Caso: crecida del año 2003**

Matias Imhoff

**FICH**

FACULTAD DE INGENIERIA  
Y CIENCIAS HIDRICAS

Tesis de Maestría 2020

**Maestría en Ingeniería  
de los Recursos Hídricos**

Título de la obra:

**Implementación de Modelos Digitales de Elevación (MDE) para la simulación hidrodinámica bidimensional del escurrimiento en un tramo del río Salado (Santa Fe). Caso: crecida del año 2003.**

Autor: Matias Imhoff

Lugar: Santa Fe, Argentina

Palabras Claves:

MDE

Planicie

Río Salado

Crecida

Simulación hidrodinámica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL LITORAL  
Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas

**IMPLEMENTACIÓN DE MODELOS DIGITALES DE  
ELEVACIÓN (MDE) PARA LA SIMULACIÓN  
HIDRODINÁMICA BIDIMENSIONAL DEL  
ESCURRIMIENTO EN UN TRAMO DEL RÍO SALADO  
(SANTA FE). CASO: CRECIDA DEL AÑO 2003.**

**Matias Imhoff**

Tesis remitida al Comité Académico de la Maestría  
como parte de los requisitos para la obtención  
del grado de  
MAGÍSTER EN INGENIERÍA  
DE LOS RECURSOS HÍDRICOS  
de la  
UNIVERSIDAD NACIONAL DEL LITORAL

**2020**

Comisión de Posgrado, Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, Ciudad Universitaria, Paraje "El Pozo",  
S3000, Santa Fe, Argentina



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL LITORAL  
Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas

**IMPLEMENTACIÓN DE MODELOS DIGITALES DE  
ELEVACIÓN (MDE) PARA LA SIMULACIÓN  
HIDRODINÁMICA BIDIMENSIONAL DEL  
ESCURRIMIENTO EN UN TRAMO DEL RÍO SALADO  
(SANTA FE). CASO: CRECIDA DEL AÑO 2003.**

**Matias Imhoff**

**Lugar de Trabajo:**

Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas (FICH)  
Universidad Nacional del Litoral (UNL)

**Director:**

Alfredo Emilio Trento                      Facultad de Ingeniería y Ciencias  
Hídricas, Universidad Nacional del Litoral (FICH – UNL)

**Co-director:**

Marcos Gallo                                      Área de Ingeniería Costera, Programa de  
Ingeniería Oceánica (COPPE, UFRJ, Brasil)

**Jurado Evaluador:**

**Dr. Ing. Hernán Stenta** Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y  
Agrimensura. Universidad Nacional de Rosario (FCEIA-UNR)

**Mg. Ing. Mariano Re** Instituto Nacional del Agua (INA)-  
Ezeiza, Buenos Aires

**Dr. Ing. Pablo Santoro** Facultad de Ingeniería. Universidad de la  
República. Montevideo, Uruguay.

**2020**



**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL LITORAL**

**Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas**

Santa Fe, 24 de junio de 2021.

Como miembros del Jurado Evaluador de la Tesis de Maestría titulada ***“Implementación de Modelos Digitales de Elevación (MDE) para la simulación hidrodinámica bidimensional del escurrimiento en un tramo del río Salado (Santa Fe). Caso: crecida del año 2003”***, desarrollada por el Ing. Matías IMHOFF, certificamos que hemos evaluado la Tesis y recomendamos que sea aceptada como parte de los requisitos para la obtención del título de Magister en Ingeniería de los Recursos Hídricos. La aprobación final de esta disertación está condicionada a la presentación de dos copias encuadernadas de la versión final de la Tesis ante el Comité Académico de la Maestría en Ingeniería de los Recursos Hídricos.

-----  
Mag. Mariano Re

-----  
Dr. Pablo Santoro

-----  
Dr. Hernán Stenta

Santa Fe, 24 de junio de 2021.

Certifico haber leído esta Tesis preparada bajo mi dirección y recomiendo que sea aceptada como parte de los requisitos para la obtención del título de Magister en Ingeniería de los Recursos Hídricos.

-----  
Dr. Marcos Gallo  
Codirector de Tesis

-----  
Dr. Alfredo Trento  
Director de Tesis

  
JOSÉ LUIS MACOR  
ARJ. DE POSGRADO  
Ingeniería y Cs. Hídricas

Universidad Nacional del Litoral  
Facultad de Ingeniería y  
Ciencias Hídricas

Secretaría de Posgrado

Ciudad Universitaria  
C.C. 217  
Ruta Nacional Nº 168 - Km. 472,4  
(3000) Santa Fe  
Tel: (54) (0342) 4575 229  
Fax: (54) (0342) 4575 224  
E-mail: posgrado@fich.unl.edu.ar

*A mi familia, mi novia, mis seres queridos...  
En fin, a todos los que se alegran con este logro...*

## AGRADECIMIENTOS

- *A la educación pública en todos sus niveles por darme la oportunidad de formarme desde la escuela hasta el nivel de grado y posgrado.*
- *A mi Director y Co-Director, Alfredo y Marcos por su tiempo y dedicación para guiarme en el desarrollo de esta tesis.*
- *A Tere y Lucas por sus aportes y su dedicación desinteresada en los comienzos y en el transcurso de la tesis.*
- *A los jurados, por sus valiosos aportes para complementar el trabajo realizado.*
- *A mi novia, Mayra que me acompaña y me banca en todo.*
- *A mi familia, que fue mi sostén y me apoyó siempre para que pudiera estudiar.*
- *A mis amigos, que son siempre importantes en la vida de toda persona.*
- *A todos los integrantes que pasaron por el proyecto de investigación con quienes se discute y comparte la labor académica.*
- *A la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas por los cursos dictados y darme la posibilidad de obtener este título de posgrado.*

*A todos, muchas gracias...*

# ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE FIGURAS.....	X
ÍNDICE DE TABLAS.....	XIV
RESUMEN .....	XV
ABSTRACT .....	XVI
1 INTRODUCCIÓN.....	1
2 OBJETIVOS.....	9
2.1 Objetivo general.....	9
2.2 Objetivos específicos .....	9
3 ESTADO DEL ARTE .....	9
3.1 Modelos para la simulación de inundaciones .....	10
3.2 Modelos Digitales de Elevación .....	13
3.3 El uso de los MDE para la simulación de inundaciones.....	17
3.4 Parametrización de la rugosidad superficial para la simulación de inundaciones .....	20
4 METODOLOGÍA.....	23
4.1 Determinación del dominio de simulación .....	23
4.2 Desarrollo de los Modelos de Elevación .....	24
4.2.1 Datos de elevación disponibles en la zona de estudio .....	25
4.2.2 Elaboración de los MDE para la zona de estudio .....	29
4.3 Implementación del modelo matemático HEC RAS 5.0 .....	33
4.3.1 Características de HEC RAS 5.0 .....	33
4.3.2 Creación de los Modelos de Terreno en HEC RAS 5.0 .....	36
4.3.3 Área de simulación 2D y generación de la malla computacional.....	38
4.3.4 Definición del coeficiente de rugosidad en HEC RAS 5.0.....	43
4.3.5 Condiciones y método de simulación en HEC RAS 5.0 .....	46
4.4 Implementación del modelo matemático SisBaHiA.....	47
4.4.1 Características de SisBaHiA.....	47
4.4.2 Confección de la malla de elementos finitos en SisBaHiA .....	48
4.4.3 Batimetría del dominio de la simulación.....	49
4.4.4 Determinación del coeficiente de rugosidad en SisBaHiA .....	50

4.4.5	Condiciones para la simulación.....	51
4.5	Condiciones iniciales y de borde utilizadas en los modelos .....	52
4.6	Información disponible para calibrar el modelo .....	54
4.7	Simulaciones realizadas .....	58
5	RESULTADOS .....	59
5.1	MDE generados para el dominio de modelación.....	59
5.2	Resultados de las simulaciones con HEC RAS 5.0 .....	66
5.2.1	Calibración del modelo.....	66
5.2.2	Comparación entre los distintos MDE.....	69
5.2.3	Comparación para diferentes resoluciones de malla .....	85
5.2.4	Comparación entre los métodos de solución .....	94
5.3	Resultados del modelo SisBaHiA.....	96
5.3.1	Malla de elementos finitos.....	96
5.3.2	Cálculo de las variables hidráulicas.....	97
5.4	Cuantificación del caudal transportado por el cauce y la planicie.....	107
5.5	Análisis de sensibilidad de los coeficientes de rugosidad .....	109
5.5.1	Influencia de la variación del $n$ de Manning en HEC-RAS .....	109
5.5.2	Influencia de la variación de la altura de rugosidad total $k$ en SisBaHiA .....	114
6	CONCLUSIONES.....	115
7	RECOMENDACIONES .....	120
8	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	121

## ÍNDICE FIGURAS

Figura 1.1: Factores que afectan a la gestión del agua en Argentina, impacto de las inundaciones. Fuente: OECD (2020), “Gobernanza del Agua en Argentina” .....	1
Figura 1.2: Reporte de lluvias e inundaciones con gran cantidad de pérdidas entre 1980 y 2006. Fuente: García, L (2010) (EIRD) Marco internacional y discusión de los conceptos del riesgo. The OFDA/CRED International Disaster Database. ....	2
Figura 1.3: Eventos de desastres totales por tipo. 1980-1999 vs. 2000-2019. ....	2
Figura 1.4: Ocurrencia por tipo de desastres. Comparación entre 2020 y promedio anual entre 2000-2019. Fuente: CRED, 2021. ....	3
Figura 1.5: Ubicación del área de estudio. A la derecha, cauces principales del río Salado y del arroyo Cululú en la zona de estudio. ....	5
Figura 1.6: Hidrogramas de crecidas máximas históricas del río Salado en la sección RP 70. Fuente: “Estudio de delimitación de áreas de riesgo hídrico en Santa Fe”, INA (2006).....	6
Figura 3.1:Diferencias entre las denominaciones de los modelos para representar las alturas del terreno.....	14
Figura 4.1: Dominio de modelación sobre imagen radar de la zona de estudio. ....	24
Figura 4.2: En color verde, cobertura del MDE 5m del IGN sobre el territorio nacional. Fuente: página web del IGN. ....	27
Figura 4.3: En color verde, cobertura del MDT 30m del IGN sobre el territorio nacional. Fuente: página web del IGN. ....	28
Figura 4.4: Ubicación de los perfiles transversales utilizados para elaborar el MDT-Perfiles. ....	29
Figura 4.5: Recorte del dominio de simulación del MDE-Ar v2.0 (30 m).....	30
Figura 4.6: Recorte del dominio de simulación del MDE-5m.....	31
Figura 4.7: Recorte del dominio de simulación del MDT-30m.....	31
Figura 4.8: MDT-Perfiles elaborado a partir de perfiles transversales, puntos acotados y datos de la carta topográfica del IGN. Resolución 30m. ....	33
Figura 4.9: Creación del modelo de terreno en la ventana de trabajo de RAS Mapper. ....	37
Figura 4.10: Modelos de terreno generados en RAS Mapper. ....	38
Figura 4.11: Delimitación del área de simulación 2D en HEC RAS.....	39
Figura 4.12: Terminología de los elementos de la malla computacional en HEC RAS. Fuente: Hydraulic Reference Manual Version 5.0 (USACE a, 2016).....	39
Figura 4.13: Comandos para la elaboración de la malla en HEC RAS. ....	40
Figura 4.14: Ejemplo de relaciones calculadas en los contornos de celdas. Fuente: Hydraulic Reference Manual Version 5.0 (USACE a, 2016).....	41
Figura 4.15: Malla computacional generada en HEC-RAS. Resolución 50m x 50m. ....	42
Figura 4.16: Mapa de cobertura de suelo. Extraído de Bodoira et. al. (2009).....	43
Figura 4.17: Carta temática de coeficiente de rugosidad n de Manning para el dominio de modelación, extraída de Imhoff y Trento, 2011. ....	44
Figura 4.18: Mapa de cobertura de n de Manning utilizado en HEC RAS. ....	45

Figura 4.19: Geometría de elementos recomendables (izquierda) y no recomendables (derecha) en una malla de elementos finitos. Fuente: Manual de SisBaHiA. ....	49
Figura 4.20: Mapa de coeficiente de rugosidad k utilizado en SisBaHiA. ....	51
Figura 4.21: Hidrograma en la sección RP 70. Fuente: Ferreira (2005). ....	53
Figura 4.22: Curva Altura - Caudal en la sección RP 70. Fuente: Ferreira (2005). ....	53
Figura 4.23: Metodología para ingresar los caudales en la frontera aguas arriba. Fuente: Referência Técnica do SisBaHiA (Rosman, 2008). ....	54
Figura 4.24: Puntos de cota conocida del nivel de agua para el pico de la crecida. ....	55
Figura 4.25: Mapas de profundidades de agua en zona RP6 (a la izquierda) y zona RP 70 (a la derecha). Fuente: Municipalidad de Esperanza. ....	56
Figura 4.26: : Fotografía tomada desde la calzada de la RP6 (zona del punto N2 en Figura 4.24). Fecha: 29-04-2003. Fuente: Municipalidad de Esperanza. ....	57
Figura 4.27: Fotografía tomada desde sobre camino rural continuación de calle 1° de Mayo (zona del punto N1 en Figura 4.24). Fecha: 29-04-2003. Fuente: Municipalidad de Esperanza. ....	57
Figura 5.1: MDE-Ar v2.0 elaborado para el dominio de la simulación, con perfiles transversales P1, P2, P3, P4, P5 y P6. ....	59
Figura 5.2: MDE-5m elaborado para el dominio de la simulación. ....	60
Figura 5.3: MDT-30m elaborado para el dominio de la simulación. ....	60
Figura 5.4: MDT-Perfiles elaborado para el dominio de la simulación. ....	61
Figura 5.5: Detalle de la zona RP6 de los cuatro MDE generados. ....	62
Figura 5.6: Comparación de perfiles transversales P1 (arriba), P2 (medio) y P3 (abajo). ....	63
Figura 5.7: Comparación de perfiles transversales P4 (arriba), P5 (medio) y P6 (abajo). ....	64
Figura 5.8: Mapa de profundidades máximas calculadas. MDT-30m, malla 30m x 30m. ....	68
Figura 5.9: Profundidades calculadas comparadas con las mapeadas por la Municipalidad. ....	68
Figura 5.10: Mapa de velocidades máximas calculadas. MDT-30m, malla 30m x 30m. ....	69
Figura 5.11: Comparación de mapas de profundidades máximas calculadas. Arriba a la izquierda, MDT-30m, arriba a la derecha MDE-5m, abajo a la izquierda MDE-Ar y abajo a la derecha MDT-Perfiles. Malla 80m x 80m. ....	71
Figura 5.12: Comparación de mapas de velocidades máximas calculadas. Arriba a la izquierda, MDT-30m, arriba a la derecha MDE-5m, abajo a la izquierda MDE-Ar y abajo a la derecha MDT-Perfiles. Malla 80m x 80m. ....	72
Figura 5.13: : Comparación de mapas de profundidades máximas calculadas en zona RP 6. Arriba a la izquierda, MDE-Ar, arriba a la derecha MDE-5m, abajo a la izquierda MDT-30m y abajo a la derecha MDT-Perfiles. Malla 80m x 80m. ....	73
Figura 5.14: Comparación de mapas de velocidades máximas calculadas en zona RP6. Arriba a la izquierda, MDT-30m, arriba a la derecha MDE-5m, abajo a la izquierda MDE-Ar y abajo a la derecha MDT-Perfiles. Malla 80m x 80m. ....	74
Figura 5.15: Comparación de mapas de profundidades máximas calculadas en zona Rincón del Pintado. Arriba a la izquierda, MDT-30m, arriba a la derecha MDE-5m, abajo a la izquierda MDE-Ar y abajo a la derecha MDT-Perfiles. Malla 80m x 80m. ....	75

Figura 5.16: Comparación de mapa de velocidades máximas calculadas en zona Rincón del Pintado. Arriba a la izquierda, MDT-30m, arriba a la derecha MDE-5m, abajo a la izquierda MDE-Ar y abajo a la derecha MDT-Perfiles. Malla 80m x 80m. ....	76
Figura 5.17: Perfil transversal y niveles de pelo de agua calculados en la sección del punto N1. ....	78
Figura 5.18: Perfil transversal y niveles de pelo de agua calculados en la sección del punto N2. ....	78
Figura 5.19: Perfil transversal y niveles de pelo de agua calculados en la sección del punto N3. ....	79
Figura 5.20: Perfil transversal y niveles de pelo de agua calculados en la sección del punto N4. ....	79
Figura 5.21: Perfil transversal y niveles de pelo de agua calculados en la sección del punto N5. ....	80
Figura 5.22: Perfil transversal y niveles de pelo de agua calculados en la sección del punto N6. ....	80
Figura 5.23: Perfiles transversales de velocidades máximas calculadas en sección punto N1. ....	81
Figura 5.24: Perfiles transversales de velocidades máximas calculadas en sección punto N2. ....	82
Figura 5.25: Perfiles transversales de velocidades máximas calculadas en sección punto N3. ....	82
Figura 5.26: Perfiles transversales de velocidades máximas calculadas en sección punto N4. ....	83
Figura 5.27: Perfiles transversales de velocidades máximas calculadas en sección punto N5. ....	83
Figura 5.28: Perfiles transversales de velocidades máximas calculadas en sección punto N6. ....	84
Figura 5.29: Cálculo de áreas anegadas. ....	84
Figura 5.30: Niveles de agua máximos calculados en la sección transversal del punto N1 (medido sobre MD) para cada uno de los tamaños de malla utilizados. MDT-30m. ....	86
Figura 5.31: Niveles de agua máximos calculados en la sección transversal del punto N2 (medido en el cauce) para cada uno de los tamaños de malla utilizados. MDT-30m. ....	87
Figura 5.32: Niveles de agua máximos calculados en la sección transversal del punto N3 (medido sobre MD) para cada uno de los tamaños de malla utilizados. MDT-30m. ....	87
Figura 5.33: Niveles de agua máximos calculados en la sección transversal del punto N4 (medido sobre MI) para cada uno de los tamaños de malla utilizados. MDT-30m. ....	88
Figura 5.34: Niveles de agua máximos calculados en la sección transversal del punto N5 (medido sobre MD) para cada uno de los tamaños de malla utilizados. MDT-30m. ....	88
Figura 5.35: Niveles de agua máximos calculados en la sección transversal del punto N6 (medido sobre MD) para cada uno de los tamaños de malla utilizados. MDT-30m. ....	89
Figura 5.36: Perfiles de velocidades máximas calculadas en la sección transversal del punto N1 para cada uno de los tamaños de malla utilizados. MDT-30m. ....	90
Figura 5.37: Perfiles de velocidades máximas calculadas en la sección transversal del punto N2 para cada uno de los tamaños de malla utilizados. MDT-30m. ....	90
Figura 5.38: Perfiles de velocidades máximas calculadas en la sección transversal del punto N3 para cada uno de los tamaños de malla utilizados. MDT-30m. ....	91
Figura 5.39: Perfiles de velocidades máximas calculadas en la sección transversal del punto N4 para cada uno de los tamaños de malla utilizados. MDT-30m. ....	91
Figura 5.40: Perfiles de velocidades máximas calculadas en la sección transversal del punto N5 para cada uno de los tamaños de malla utilizados. MDT-30m. ....	92
Figura 5.41: Perfiles de velocidades máximas calculadas en la sección transversal del punto N6 para cada uno de los tamaños de malla utilizados. MDT-30m. ....	92

Figura 5.42: Ubicación de la sección definida en HEC-RAS y ubicación del punto N3 sobre imagen satelital de Google Earth. Fecha 10/10/2005. ....	93
Figura 5.43: Detalle del mapa de velocidades máximas en la sección del punto N3. MDT-30m....	94
Figura 5.44: Detalles de la malla utilizada en SisBaHiA. ....	97
Figura 5.45: Mapa de profundidades máximas calculadas con SisBaHiA. MDT-30m.....	99
Figura 5.46: Mapa de vectores de velocidades máximas calculadas con SisBaHiA. ....	100
Figura 5.47: Detalle del mapa de vectores de velocidad calculados con SisBaHiA en la zona de la RP6. ....	101
Figura 5.48: Detalle del mapa de vectores de velocidad calculados con SisBaHiA en la zona del punto N3. ....	101
Figura 5.49: Detalle del mapa de vectores de velocidad calculados con SisBaHiA en la zona de Rincón del Pintado punto N4.....	102
Figura 5.50: Perfil transversal de velocidades máximas calculadas con SisBaHiA y HEC-RAS en la sección N1.....	103
Figura 5.51: Perfil transversal de velocidades máximas calculadas con SisBaHiA y HEC-RAS en la sección N2.....	103
Figura 5.52: Perfil transversal de velocidades máximas calculadas con SisBaHiA y HEC-RAS en la sección N3.....	104
Figura 5.53: Perfil transversal de velocidades máximas calculadas con SisBaHiA y HEC-RAS en la sección N4.....	104
Figura 5.54: Perfil transversal de velocidades máximas calculadas con SisBaHiA y HEC-RAS en la sección N5.....	105
Figura 5.55: Perfil transversal de velocidades máximas calculadas con SisBaHiA y HEC-RAS en la sección N6.....	105
Figura 5.56: Comparación de perfiles transversales de HEC-RAS y SisBaHiA en la ubicación del punto N1 con niveles de agua calculados y medido. ....	107
Figura 5.57: Perfiles transversales de velocidades máximas en la sección N1 con n calibración, n incrementado 25% y n disminuido 25%. MDT-30m, malla de 80m x 80m.....	111
Figura 5.58: Perfiles transversales de velocidades máximas en la sección N2 con n calibración, n incrementado 25% y n disminuido 25%. MDT-30m, malla de 80m x 80m.....	111
Figura 5.59: Perfiles transversales de velocidades máximas en la sección N3 con n calibración, n incrementado 25% y n disminuido 25%. MDT-30m, malla de 80m x 80m.....	112
Figura 5.60: Perfiles transversales de velocidades máximas en la sección N4 con n calibración, n incrementado 25% y n disminuido 25%. MDT-30m, malla de 80m x 80m.....	112
Figura 5.61: Perfiles transversales de velocidades máximas en la sección N5 con n calibración, n incrementado 25% y n disminuido 25%. MDT-30m, malla de 80m x 80m.....	113
Figura 5.62: Perfiles transversales de velocidades máximas en la sección N6 con n calibración, n incrementado 25% y n disminuido 25%. MDT-30m, malla de 80m x 80m.....	113

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4.1: Características de los MDE utilizados en las simulaciones. ....	25
Tabla 4.2: Características de las mallas utilizadas en HEC-RAS 5.0.....	42
Tabla 4.3: Valores de $n$ de Manning asociados a cada clase. ....	45
Tabla 4.4: Características de los puntos acotados. ....	55
Tabla 4.5: Simulaciones realizadas con HEC-RAS 5.0.....	58
Tabla 5.1: Cálculo del estimador ECM. ....	65
Tabla 5.2: Valores de $n$ de Manning utilizados para la calibración de HEC-RAS 5.0.....	66
Tabla 5.3: Comparación niveles medidos y calculados con HEC-RAS. MDT-30m. Malla 30m .....	66
Tabla 5.4: : Cotas de nivel de agua medidas y máximas calculadas con HEC-RAS para los diferentes MDE. Tamaño de malla 80m x 80m.....	70
Tabla 5.5: Cotas de nivel de agua medidas y máximas calculadas con HEC-RAS. ....	85
Tabla 5.6: Cotas máximas de nivel de agua calculadas con la onda difusiva y con la onda dinámica. MDT-30m, malla de 80m x 80m. ....	95
Tabla 5.7: Diferencias de niveles entre la onda difusiva y la onda dinámica en relación a la profundidad de agua. ....	95
Tabla 5.8: Altura de rugosidad total $k$ utilizada en SisBaHiA para cada clase, comparada con el coeficiente de rugosidad $n$ de Manning usado en HEC-RAS.....	97
Tabla 5.9: Cotas de nivel de agua medidas y calculadas con SisBaHiA. MDT-30m. ....	98
Tabla 5.10: Cotas de nivel de agua medidas y calculadas con HEC-RAS y SisBaHiA.....	98
Tabla 5.11: Porcentajes de caudal pico trasportado por el cauce, por la margen izquierda de la planicie (%Q MI), por la margen derecha de la planicie (%Q MD) y por la planicie total, calculados con HEC-RAS para el MDT-30m y malla de 80m x 80m. ....	108
Tabla 5.12: Porcentajes de caudal pico trasportado por el cauce, por la margen izquierda de la planicie (%Q MI), por la margen derecha de la planicie (%Q MD) y por la planicie total, calculados con SisBaHiA. ....	108
Tabla 5.13: : Valores de $n$ de Manning de calibración e incrementado y disminuido un 25%. .....	109
Tabla 5.14: : Comparación entre cotas máximas de nivel de agua calculadas con $n$ de calibración, incrementado un 25% y disminuido 25%. MDT-30m, tamaño de malla 80m x 80m .....	110
Tabla 5.15: Valores de $k$ equivalente e incrementado y disminuido un 25%.....	114
Tabla 5.16: : Comparación entre cotas de nivel de agua calculadas en SisBaHiA con $k$ equivalente, incrementado un 25% y disminuido 25%. ....	114

## RESUMEN

Las inundaciones por desbordes de ríos representan una de las amenazas naturales más frecuentes y que mayor impacto causan en los últimos años en todo el mundo. Por esta razón, y dados los grandes avances tecnológicos, existe un creciente interés en la simulación de crecidas con modelos numéricos. La fuente fundamental de información para la aplicación de los modelos es la información altimétrica para definir la topografía del dominio, la cual puede ser obtenida de los Modelos Digitales de Elevación (MDE).

En la presente tesis se abordó el estudio de la crecida histórica del río Salado (Santa Fe) en el año 2003. Para definir la topografía se utilizaron tres MDE del Instituto Geográfico Nacional (IGN) y adicionalmente se generó un MDT a partir de perfiles transversales medidos en campo, denominado MDT-Perfiles. De los productos del IGN, el MDT-30m fue el que presentó mayor similitud con los perfiles medidos en campo, con un Error Cuadrático Medio (ECM) respecto los mismos de 0.68m. El MDE-Ar y el MDE-5m presentaron un ECM de 1.85 y 1.90m respectivamente con sobrestimaciones de cotas del terreno natural de hasta 2.5m.

Se realizó la simulación hidrodinámica de la mencionada crecida en el tramo de río comprendido entre la Ruta Provincial N° 70 y la confluencia con el Arroyo Cululú. Fueron implementados dos modelos bidimensionales 2DH, HEC-RAS y SisBaHiA, y la calibración se realizó con datos de cotas observadas por organismos públicos locales para el pico de la crecida.

Se calibró la simulación para el MDT-30m, y se calcularon cotas de nivel de agua que estuvieron entre 0.03-0.22m por debajo de las observadas, mientras que con el MDE-Ar y el MDE-5m los niveles calculados fueron superiores a los observados en los rangos 0.71-0.99m y 0.46-1.18m respectivamente. Los resultados de los modelos hidrodinámicos demostraron que, en zonas de llanura, resulta imprescindible complementar los datos de los MDE con información batimétrica del cauce e información de campo para identificar errores, como ser la sobreestimación de cotas debido a la vegetación, o la falta de representación de estructuras viales.

Se determinó la importancia hidro-ambiental de la planicie de inundación, la cual llegó a transportar aproximadamente el 80% del caudal pico total de la crecida, con velocidades que en algunos sectores alcanzaron el 1.5m/s, superando las velocidades en el cauce. Esta situación en un río como el Salado, que recibe aporte de efluentes industriales y cloacales, podría generar un grave impacto ambiental en momentos de crecidas, dado que los efluentes podrían ser transportados a zonas de la planicie dedicados a la industria agrícola-ganadera.

## **ABSTRACT**

Floods due to overflowing rivers represent one of the most frequent natural disasters and that have caused the greatest impact in recent years worldwide. For this reason, and given the great technological advances, there is a growing interest in simulating river floods with numerical models. The fundamental source of information for the application of hydrodynamic models is the altimetric data information to define the topography of the simulation domain, which can be obtained from Digital Elevation Models (DEM).

In this thesis the study of the historical flood of the Salado River (Santa Fe) in 2003 was approached. Three DEMs from the National Geographic Institute (IGN in Spanish) were used to define the topography of the simulation domain. Additionally, a DEM contained measured cross-sectional profiles (called MDT-Profiles) was generated. Of the IGN products, the MDT-30m was the one that presented the greatest similarity with the profiles measured, with a Mean Square Error (RMSE) of 0.68m. The MDR-Ar and the MDE-5m presented an RSME of 1.85 and 1.90m respectively with overestimations of the natural terrain of up to 2.5m.

The hydrodynamic simulation of the mentioned flood was carried out in the stretch of river between Provincial Route No. 70 and the confluence with the Arroyo Cululú. Two 2DH models were performed, HEC-RAS and SisBaHiA. These models were calibrated with elevation data, observed by local public organizations during the peak of the flood

The simulation was calibrated for the MDT-30m, and water level levels were calculated that were between 0.03-0.22m below those observed, while with the MDE-Ar and MDE-5m the calculated levels were higher than those observed in the ranges 0.71-0.99m and 0.46-1.18m respectively. The results showed that, in plain areas with abundant vegetation, it is essential to complement the DEM data with bathymetric information on the channel and field information to identify errors, such as the overestimation of the natural terrain levels due to the existing vegetation, or the lack of representation of road structures.

The hydro-environmental importance of the floodplain was determined, which transported approximately 80% of the total peak flow of the flood, with velocities that in some sectors reached 1.5m/s, exceeding the velocity in the channel. This situation in a river such as the Salado, which receives input from industrial and sewage effluents, could generate a serious environmental impact in times of floods, since the effluents could be transported to areas of the plain dedicated to the agricultural-livestock industry.

# 1 INTRODUCCIÓN

Las pérdidas humanas y materiales ocasionadas por las grandes inundaciones constituyen un serio problema tanto en nuestro país como en el resto del mundo, por lo tanto, su análisis y prevención es un factor clave para las autoridades y organismos relacionados a los recursos hídricos. En el informe “*Gobernanza del Agua en Argentina (OECD, 2020)*” se destaca que el 60% de los desastres naturales en nuestro país son debidos a inundaciones, y éstos representan el 95% de los costos de daños económicos referidos a catástrofes de origen natural (ver Figura 1.1). Por otra parte, el [Banco Mundial \(2014\)](#), señala que las inundaciones resultan el fenómeno natural más caro para la Argentina.

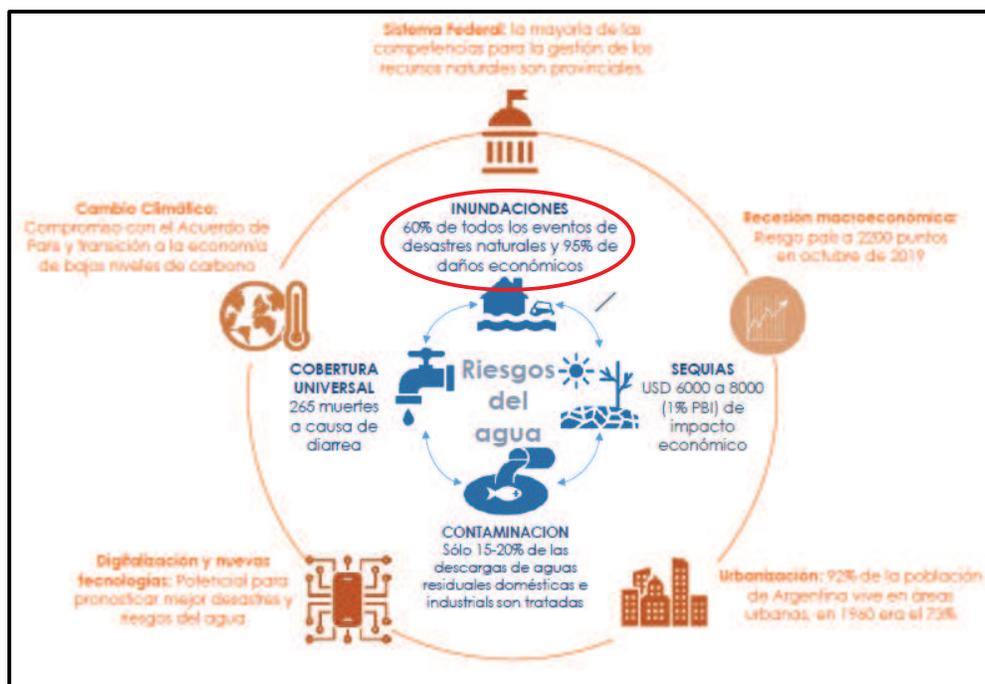


Figura 1.1: Factores que afectan a la gestión del agua en Argentina, impacto de las inundaciones. Fuente: [OECD \(2020\)](#), “Gobernanza del Agua en Argentina”.

Sumado a esto, distintos estudios [García \(2010\)](#), [Paoli \(2015\)](#), y más recientemente los informes del [CRED \(2020\)](#) y [CRED \(2021\)](#) indican que ha existido en los últimos años un aumento de los eventos de inundación por sobre otras catástrofes naturales en todo el mundo (ver Figuras 1.2, 1.3 y 1.4).

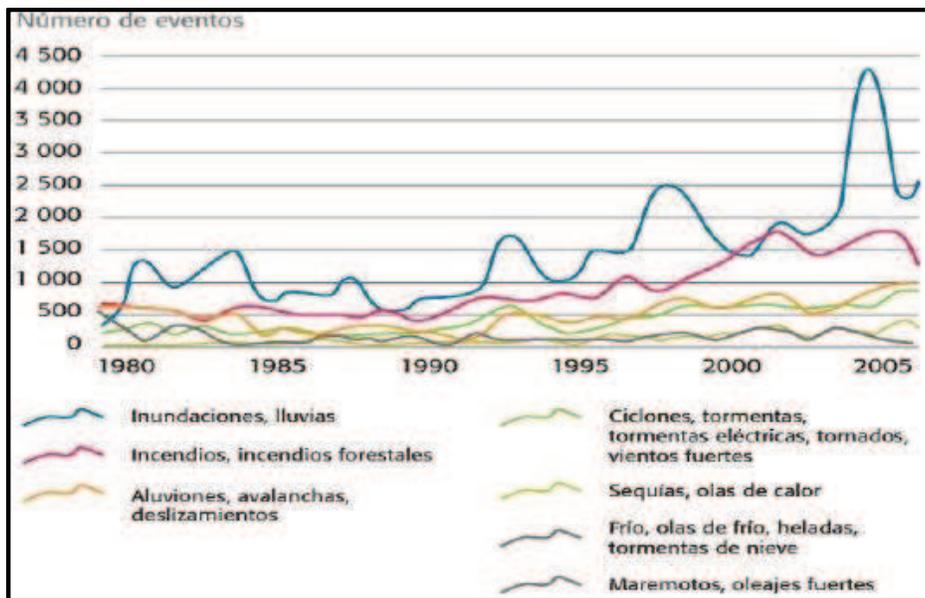


Figura 1.2: Reporte de lluvias e inundaciones con gran cantidad de pérdidas entre 1980 y 2006. Fuente: [García, L \(2010\)](#) (EIRD) Marco internacional y discusión de los conceptos del riesgo. The OFDA/CRED International Disaster Database.

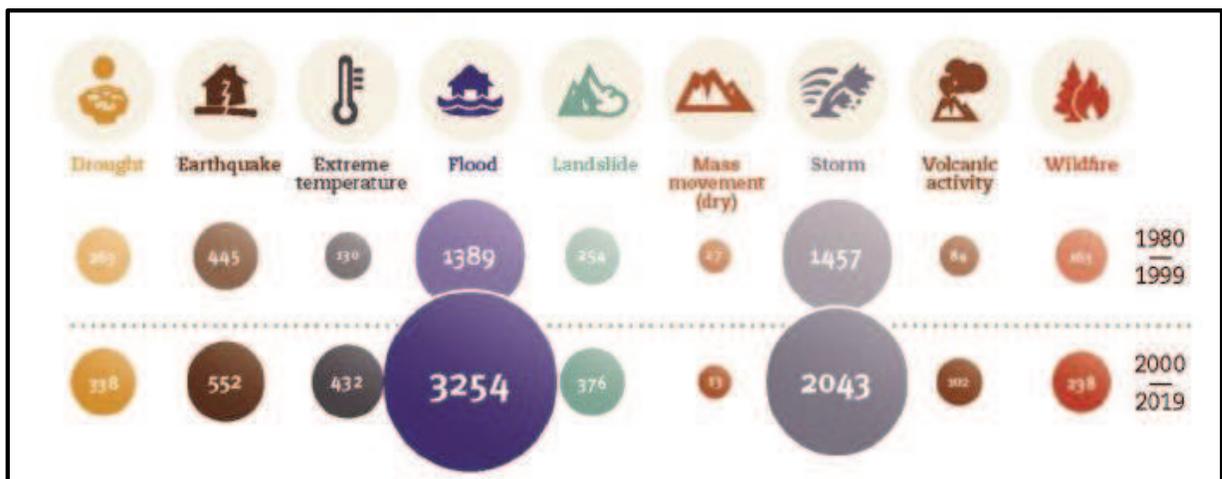


Figura 1.3: Eventos de desastres totales por tipo. 1980-1999 vs. 2000-2019. Fuente: [CRED, 2020](#).

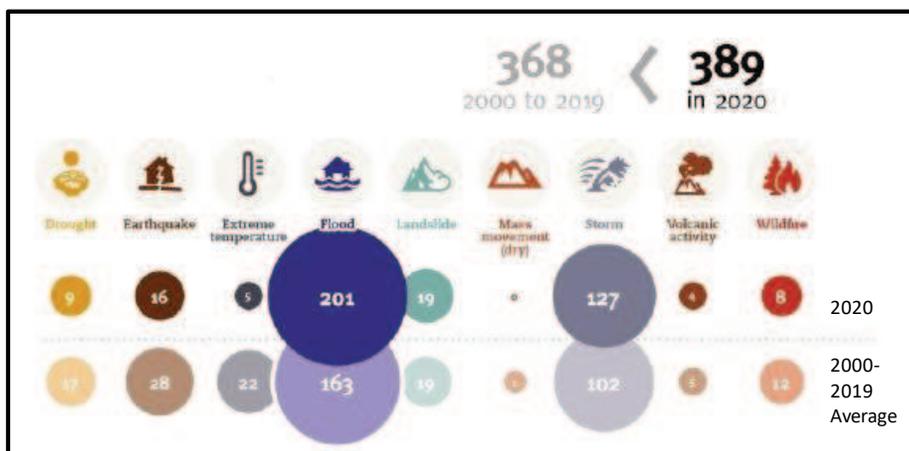


Figura 1.4: Ocurrencia por tipo de desastres. Comparación entre 2020 y promedio anual entre 2000-2019. Fuente: [CRED, 2021](#).

Por ejemplo las inundaciones de los estados de Chiapas y Tabasco (México) en el año 2007, a causa de las crecidas históricas de los ríos Usumacinta y Grijalva, que representaron el segundo siniestro más costoso de la historia para dicho país. También las inundaciones en Europa en junio de 2013 provocadas por los desbordes de los ríos Danubio, Elba y Necker afectaron a importantes ciudades de Hungría, República Checa, Alemania y Austria, provocando miles de evacuados, e incluso muertos y desaparecidos. En Sudamérica, el desborde de los ríos Arauca y Sarare en el occidente de Venezuela afectó a más de 40 mil personas en julio de 2015 y fue calificada como la peor catástrofe natural de los últimos 50 años. En Costa Rica, en junio de 2015 las intensas precipitaciones generaron el desbordamiento de ríos e inundaciones en 216 comunidades de 18 cantones de las zonas Norte y Caribe.

En nuestro país, algunas de las catástrofes de mayor impacto de los últimos años fueron la crecida del río Luján en noviembre de 2011 que causó la inundación de gran parte de la ciudad homónima, y las inundaciones de la ciudad de La Plata en abril de 2013, que provocaron la muerte de 89 personas y 350000 damnificados según las cifras oficiales. Otro evento de magnitud fue la crecida del Arroyo Ludueña en el año 2007, que ocasionó más de 800 evacuados, campos, calles y viviendas inundadas y la interrupción de servicios básicos como energía eléctrica y agua potable en la zona del gran Rosario. Más cerca en el tiempo, en febrero del año 2015 se produjeron intensas precipitaciones en la provincia de Córdoba que provocaron el desborde de los ríos y arroyos de las sierras chicas, con un saldo de 6 víctimas fatales y graves

daños materiales en las localidades de Villa Allende y Río Ceballos. En la provincia de Santa Fe, se produjo en el año 2003 la crecida histórica del río Salado, causante de los mayores daños materiales y humanos desde que se tienen registros, con un saldo oficial de 23 víctimas fatales. Esta última será abordada como objeto de estudio en la presente tesis.

El conocimiento técnico adecuado del posible alcance de la amenaza por inundaciones a la cual está expuesta una determinada región, constituye una herramienta imprescindible para enfrentar este problema y desarrollar medidas estructurales y no estructurales para la gestión integral del riesgo. Es por esto que existe un creciente interés en la modelación de crecidas de ríos, debido a la necesidad de analizar estos fenómenos naturales a fin de adoptar medidas preventivas y correctivas sobre las zonas afectadas.

En este sentido, el caso de las crecidas históricas de los ríos Usumacinta y Grijalva dio origen a la tesis de maestría en ingeniería de [Paredes \(2013\)](#), quien simuló crecidas del río Usumacinta con el sistema HEC-RAS en sus versiones 1D y 2D a los efectos de determinar áreas de inundación y cuantificar los impactos de las mismas. Por su parte, [López Ramirez y Gómez Borja \(2019\)](#) realizaron una simulación hidrodinámica bidimensional con el sistema HEC-RAS en su versión 5.0.6 para determinar la cota máxima de inundación para un período de retorno de 100 años en un tramo del río Arauca, a los fines de evaluar medidas que permitan mitigar el efecto de dicha crecida.

En el estudio de las crecidas históricas de ríos ocurridas en nuestro país, [Reyna et. al. \(2007\)](#) aplicaron el modelo hidrodinámico MIKE 11 ([DHI, 2003](#)) en la cuenca del río Luján para calcular niveles del río y elaborar mapas de peligro de inundación, en combinación con herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG). Por su parte [Scuderi et. al \(2015\)](#) utilizaron un modelo matemático hidrológico-hidráulico cuasi bidimensional denominado CTSS8 ([Riccardi, 2001](#)) para la predicción de niveles en la cuenca del Arroyo Ludueña. En tanto, las inundaciones de febrero de 2015 en la provincia de Córdoba motivaron el estudio de [Ochoa et. al. \(2016\)](#), en el cual utilizaron los modelos HEC-RAS ([USACE a, 2016](#)) e IBER ([CEDEX, GEAMA, FLUMEN y CIMNE, 2010](#)) para determinar posibles zonas de inundación en un tramo del río Tercero (Córdoba).

Este trabajo centra su análisis en la crecida del río Salado en el año 2003, particularmente en un tramo del río en la provincia de Santa Fe comprendido entre la Ruta Provincial N° 70 (RP 70) y la confluencia del Salado con el arroyo Cululú (ver Figura 1.5), el cual viene siendo estudiado desde hace años por el grupo de investigación, y además se cuenta con perfiles transversales medidos. Este río tiene su origen en el norte argentino y recorre varias provincias a lo largo de 1500 km aproximadamente, hasta desaguar en el sistema aluvial del río Paraná, entre las ciudades de Santo Tomé y Santa Fe. Dentro del territorio santafesino se reconocen en el recorrido del río Salado dos sectores bien diferenciados en cuanto a su orientación y caudal: el tramo superior, que escurre por un cauce de escasa capacidad de conducción con dirección NO-SE y hace de límite Noreste del departamento San Cristóbal. En dicho tramo, el caudal del río se compone principalmente por la descarga de los acuíferos superficiales en períodos secos, y por el exceso de precipitaciones en períodos húmedos. En el tramo inferior, a esta última componente de escorrentía superficial, se suma el aporte del río Calchaquí que transporta el excedente hídrico de la zona de los Bajos Submeridionales del norte santafesino. Aguas abajo de la confluencia con el río Calchaquí, el río Salado escurre con dirección N-S (hace de límite entre los departamentos San Cristóbal y San Justo) recibiendo el aporte de importantes arroyos (por margen derecha: los arroyos Las Conchas, San Antonio y Cululú, entre otros y el arroyo Pantanoso por margen izquierda) en su camino hasta su desembocadura (Ferreira, 2005).

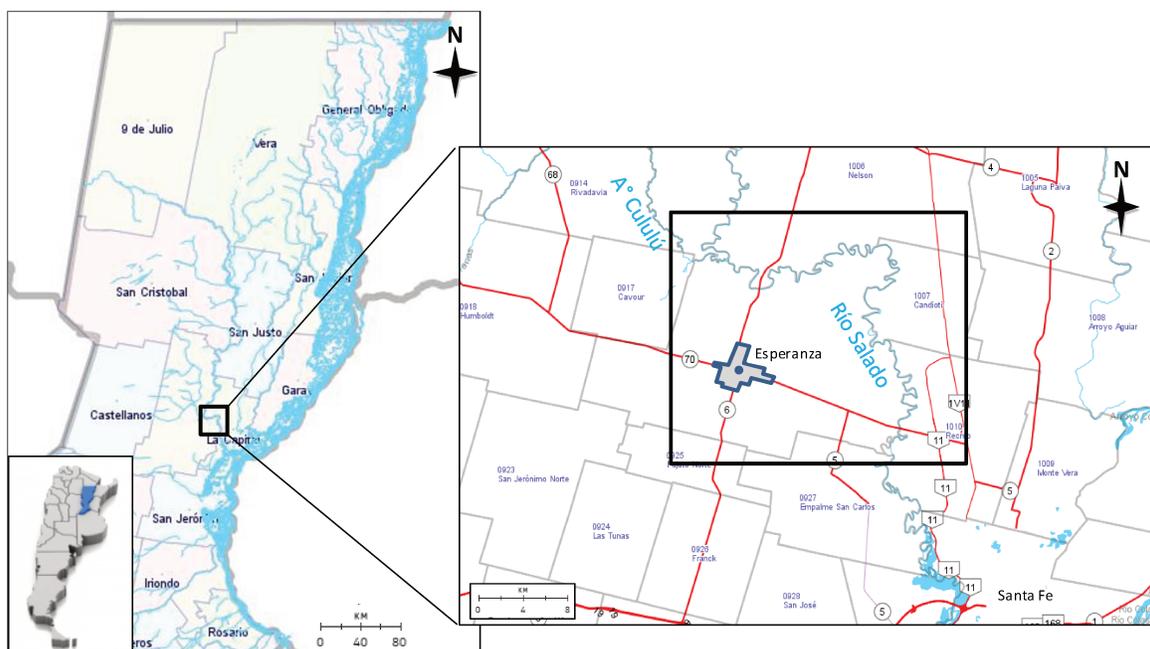


Figura 1.5: Ubicación del área de estudio. A la derecha, cauces principales del río Salado y del arroyo Cululú en la zona de estudio.

Durante los meses de abril y mayo de 2003 ocurrieron intensas precipitaciones pluviales en la cuenca santafesina de aporte del río Salado, que causaron la inundación de extensas áreas de las planicies. De acuerdo a [Ferreira \(2005\)](#), ésta fue la crecida de mayor magnitud registrada en cuanto a caudal pico y nivel de agua en la RP 70. Otros eventos importantes fueron los ocurridos en los años 1973 y 1998, donde se registraron caudales en RP 70 por encima de los 2000 m<sup>3</sup>/s con permanencias mayores a 7 días. En la Figura 1.6, tomada del “Estudio de delimitación de áreas de riesgo hídrico en Santa Fe” realizado por el Instituto Nacional del Agua ([INA, 2006](#)) se muestran los hidrogramas registrados en RP 70 para las crecidas históricas.

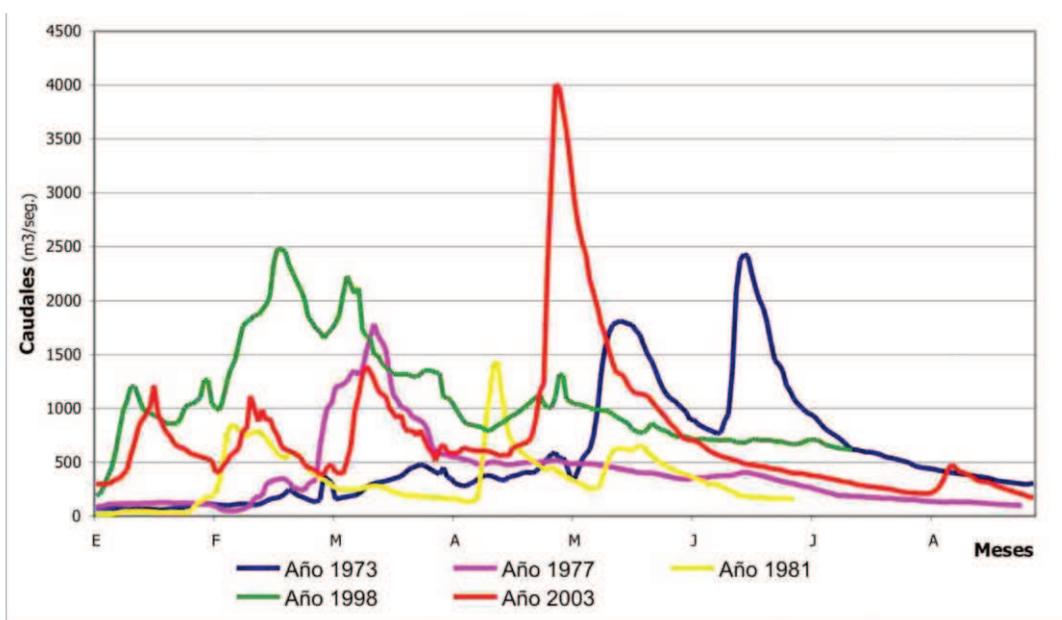


Figura 1.6: Hidrogramas de crecidas máximas históricas del río Salado en la sección RP 70. Fuente: “Estudio de delimitación de áreas de riesgo hídrico en Santa Fe”, [INA \(2006\)](#).

El impacto de la crecida en la ciudad de Santa Fe, dejó un número oficial de 23 víctimas fatales, aunque organizaciones no gubernamentales y familiares elevan la cifra a 160 víctimas. El Ministerio de Salud provincial informó que, en Santa Fe, Recreo y Monte Vera, había 475 centros de evacuados que alojaban a 62500 personas en total. La Asociación Trabajadores del Estado (ATE) daba cuenta de que en la ciudad capital había 53312 auto evacuados, pero que los afectados sumaban más de 130000 (un tercio del total de población que en ese momento tenía la ciudad). Se contabilizaron 28000 viviendas afectadas, 5000 establecimientos agropecuarios fuera de servicio, 2 millones de hectáreas afectadas en zona rural y 1500 millones de dólares para reconstruir la infraestructura de la ciudad, las viviendas y las pérdidas agropecuarias.

En el área de estudio, que ocupa un lugar de jerarquía en la economía provincial, las zonas afectadas estaban dedicadas principalmente a la ganadería, ya sea tanto para la producción de carne como de leche. Según las estimaciones de la Comisión Económica para América Latina (CEPAL, 2003) acerca del impacto de las inundaciones del río Salado en la provincia de Santa Fe para la crecida de 2003, la cantidad de hectáreas afectadas en dos de los departamentos más perjudicados, La Capital y Las Colonias, fueron de 93900 y 187640 respectivamente, para la producción ganadera de carne, mientras que para la producción de leche fueron de 18900 y 109360, respectivamente. Estas cifras representan un 6.2 % y un 36.4 % del total de la superficie afectada a la producción de carne y leche en toda la provincia. En términos económicos, de acuerdo con [CEPAL \(2003\)](#), el monto total de los daños y pérdidas ocasionadas por las inundaciones de 2003 en la Provincia de Santa Fe ascendió a los 2878 millones de pesos o su equivalente en ese momento, de 1028 millones de dólares. De la cifra anterior, un 35 % representa daños directos, en tanto que el 65 % corresponde a pérdidas indirectas.

Además de la importancia de las actividades agrícolas-ganaderas, se recalca que la cuenca del tramo de río bajo estudio se encuentra en una región con un acentuado desarrollo agroindustrial en las últimas décadas. Este crecimiento desde el punto de vista económico ha traído como consecuencia el deterioro progresivo de la calidad de las aguas superficiales del río, receptor de efluentes industriales, domiciliarios, sanitarios y otras descargas de distinta índole, en muchos casos sin tratamiento. Existen antecedentes donde se verificó la existencia de metales pesados en elevadas concentraciones como cromo disuelto y particulado asociados a la fracción cohesiva de los sedimentos finos ([Gallo et al., 2006](#); [Trento y Alvarez, 2011](#)). Esta problemática ambiental motivó el abordaje del tema en diferentes aspectos que van desde estudios de campo ([Zenclusen et al., 2014](#)) y laboratorio ([Filippa y Trento, 2013](#)), hasta la implementación de modelos numéricos que ayuden a comprender el comportamiento temporal y espacial de los sedimentos y constituyentes asociados ([Trento y Alvarez, 2011](#)). Todos estos estudios han sido realizados para situaciones de aguas bajas, es decir, en condiciones donde el escurrimiento era exclusivamente en el cauce del río.

Es en este contexto que se destaca la importancia hidro-ambiental de las planicies de inundación, las cuales fueron el espacio dominante de conducción del escurrimiento en la crecida del 2003.

Los modelos hidrodinámicos que describen apropiadamente los procesos hidráulicos en sistemas cauce-planicie de inundación pueden ser utilizados para representar otros subprocesos, tales como el transporte de sedimentos, el transporte de contaminantes y el escurrimiento superficial en la planicie ([Alvarez, 2012](#)). El grado de detalle en la representación de procesos hidráulicos es función del tipo y exactitud de las predicciones requeridas, de la calidad de los datos disponibles para parametrizar el modelo y de las escalas espaciales y temporales en las cuales el modelo debe operar.

Debido al gran interés en el tema de las inundaciones y al avance de nuevas tecnologías, se han desarrollado en los últimos años una gran cantidad de modelos para simular estos fenómenos desde el enfoque bidimensional. LISFLOOD-FP ([Bates and De Roo, 2000](#)), IBER ([CEDEX, GEAMA, FLUMEN y CIMNE, 2010](#)), HEC-RAS ([USACE a, 2016](#)), SisBaHiA (Rosman, 2008) y DELFT ([Deltares, 2012](#)), entre otros, son ejemplos de modelos utilizados frecuentemente para simular eventos de crecidas, los cuales requieren como fuente fundamental de información, los datos de elevación del terreno para representar adecuadamente la topografía. Esta información puede ser obtenida a partir de los modelos de representación visual y matemática de los valores de altura con respecto al nivel medio del mar, denominados Modelos Digitales de Elevación (MDE). Los MDE disponibles se obtienen con procedimientos que pueden ser muy variados en cuanto a su técnica y exactitud. En términos generales, los datos para la conformación de un MDE pueden provenir de: a) relevamientos de campo, b) fotografías e imágenes de satélite, c) radar con antena de apertura sintética (SAR), d) datos LIDAR, del inglés *Light Detection and Ranging*, e) mapas topográficos existentes y digitalización cartográfica. Para su utilización en zonas de llanuras se requiere de adecuados ajustes altimétricos que permitan representar correctamente las variaciones del relieve y los cauces.

En esta tesis se pretende utilizar los Modelos Digitales de Elevación (MDE) disponibles en la zona de estudio para representar la hidrodinámica de la crecida del año 2003 en el tramo de río mencionado, con dos sistemas computacionales: HEC-RAS 5.0.5 ([USACE a, 2016](#)) y SisBaHiA ([Rosman, 2008](#)). Los MDE serán obtenidos de la base de datos del Instituto Geográfico Nacional (IGN), que cuenta con tres diferentes productos que cubren el área de estudio (MDE-Arv2.0, MDE-5m y MDT-30m), y adicionalmente se elaborará un cuarto MDE a partir de datos de relevamientos topográficos y puntos acotados.

En suma, los resultados del trabajo contribuirán a incrementar el nivel de conocimiento sobre el uso de modelos digitales de elevación para simular el comportamiento de las crecidas en una región especializada en la producción de alimentos y de elevada importancia económica para Santa Fe y Argentina, y podrán ser aprovechados posteriormente para la simulación de otros fenómenos, como por ejemplo los procesos de transporte de escalares.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo general**

- Contribuir al conocimiento de la utilidad de los MDE para la simulación hidrodinámica 2DH de crecidas en ríos de llanura.

### **2.2 Objetivos específicos**

- Desarrollar Modelos Digitales de Elevación combinando datos topográficos del cauce y la planicie, que representen adecuadamente el relieve de la zona de estudio;
- Representar la hidrodinámica de la crecida del año 2003 en un tramo de la planicie del Río Salado utilizando modelos bidimensionales (2DH);
- Comparar los resultados para los diferentes MDE disponibles en la zona de estudio;
- Comparar resultados para diferentes resoluciones horizontales de tamaño de malla de los modelos hidrodinámicos;
- Analizar los resultados de dos sistemas computacionales distintos;
- Analizar la importancia de la rugosidad de la planicie en la determinación de niveles, velocidades y caudales;
- Cuantificar el caudal transportado por la planicie de inundación del tramo de río en estudio al momento de la ocurrencia del pico de la crecida.

## **3 ESTADO DEL ARTE**

En este capítulo se realizó en primer lugar una revisión de los modelos utilizados para representar los fenómenos de inundaciones. Luego se describen las características generales de

los MDE con las técnicas de obtención de datos para su elaboración, y se resumen los detalles salientes de trabajos antecedentes donde se utilizaron MDE para la simulación de crecidas. Finalmente se aborda la temática de la parametrización de la rugosidad superficial, mencionando estudios existentes en la bibliografía relacionados con los objetivos del presente trabajo.

### **3.1 Modelos para la simulación de inundaciones**

Como se describió en la introducción, las inundaciones provocadas por el desborde de ríos y embalses son, en general, las catástrofes naturales que mayor cantidad de daños humanos y materiales producen, por lo que se destaca la importancia de poder predecir con cierta precisión los potenciales alcances de dichas afectaciones. Estos fenómenos son extremadamente complejos de representar debido a la cantidad de variables y condicionantes que intervienen en el movimiento del flujo. En la actualidad, se han desarrollado distintas metodologías para resolver los problemas hidráulicos, a saber:

*a. Modelos físicos:* son representaciones físicas o conceptuales a escala del fenómeno que se pretende estudiar. La metodología de la modelación física en la hidráulica se basa en el análisis dimensional y en el principio de semejanza mecánica.

*b. Modelos matemáticos:* se definen como aquellos modelos en los que se utilizan ecuaciones o expresiones matemáticas, que representan de manera simplificada el fenómeno en estudio. Dentro de éstos, se pueden clasificar tres diferentes tipos:

i. *Modelos determinísticos:* se pueden definir como aquellos en que los procesos físicos involucrados se expresan mediante relaciones fundamentales determinísticas y en el cual no se tiene en cuenta la probabilidad de ocurrencia del fenómeno.

ii. *Modelos estocásticos:* en este tipo de modelos, los procesos físicos se representan haciendo uso de variables aleatorias y probabilísticas que involucran el fenómeno en estudio.

iii. *Modelos de simulación numérica:* son modelos en los que se emplean generalmente ecuaciones diferenciales en derivadas parciales (EDDP) con sus correspondientes condiciones iniciales y de borde diferenciales y condiciones iniciales en los contornos para

representar los fenómenos físicos bajo estudio. Estas ecuaciones son resueltas generalmente utilizando técnicas de análisis numéricas como los métodos basados en diferencias finitas, elementos finitos o bien volúmenes finitos, entre los más usuales.

Existen en la actualidad gran cantidad de sistemas computacionales para modelar y realizar simulaciones hidráulicas. Algunos permiten ejecutar cálculos en 1 dimensión (1D), otros en 2 dimensiones (2D), y algunos otros hasta en 3 dimensiones (3D). También existen los que permiten combinar una zona 1D con otra zona 2D. Estos últimos están pensados para estudiar el tramo relativo al cauce del río mediante un modelo 1D y la planicie de inundación utilizando un modelo 2D. Adicionalmente, ciertos modelos permiten incluir submodelos para el cálculo de variables hidrológicas en el mismo programa. Dentro del gran abanico de opciones, aquí se describen los 2 modelos utilizados en este trabajo para efectuar simulaciones hidrodinámicas:

- HEC-RAS ([USACE a, 2016](#)): acrónimo de *Hydrologic Engineering Center y River Analysis System* es un sistema computacional desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos, y desde su presentación en 1995 ha tenido amplia difusión en todo el mundo, a tal punto que hoy en día es uno de los programas más conocidos y su uso está ampliamente extendido ya que se trata de un software de uso libre, muy completo y de fácil manejo. A partir de la versión 5.0 (2016), permite realizar cálculos en base a sistemas de ecuaciones 1D y 2D. Comprende los siguientes módulos:

- Modelo Hidrodinámico para realizar simulaciones tanto en régimen permanente como en régimen impermanente.
- Modelo de transporte de sedimentos.
- Modelo de calidad de agua.

- SisBAHIA (Rosman, 2008): es un sistema de modelos computacionales desarrollado en el Instituto Aberto Luiz Coinbra de Posgrado e Investigación de Ingeniería (COPPE) en la Universidad Federal de Río de Janeiro (UFRJ). Desde 1987 viene siendo perfeccionado a través de tesis de maestría y doctorado, además de proyectos de investigación. Cuenta con los siguientes módulos:

- > Modelo Hidrodinámico: modelo de circulación hidrodinámica 2DH o cuasi 3D, usado

para representar escurrimientos en dominios naturales con geometría compleja.

- > Modelo de Transporte Euleriano.
- > Modelo de Transporte Lagrangeano – Determinístico y Lagrangeano - Probabilístico
- > Modelos de Transporte de Sedimentos y Evolución Morfológica del Fondo.
- > Modelos de Calidad del agua y Eutrofización.
- > Modelo de generación y propagación de olas.

Los modelos de transporte son dependientes de los modelos hidrodinámicos, es decir, solo pueden ser aplicados sobre la base de un modelo hidrodinámico en funcionamiento.

Los modelos numéricos 1D, son aquellos que simulan los procesos considerando una dimensión en el espacio. Para el caso de ríos y canales, esta dimensión en general se trata de la dirección predominante del escurrimiento. Son los más extensamente utilizados por su sencillez y amplia difusión, ya que pueden ser una herramienta suficiente para estudios donde la evolución espacial en los sentidos transversal y perpendicular a la dirección principal del flujo no sea un factor a tener en cuenta y el flujo sea predominantemente unidireccional. Se basan en esquemas numéricos relativamente simples para la resolución de las ecuaciones de Saint-Venant. Una de las grandes ventajas de la modelización unidimensional es que, debido a las simplificaciones adoptadas, se reducen considerablemente los tiempos computacionales para la resolución de las ecuaciones.

Su aplicación resulta apropiada en aquellos casos donde el escurrimiento se da en canales o cauces del río bien definidos, pero presentan limitantes en determinados escenarios, como ser los sistemas cauce-planicie en ríos de llanura donde el valle aluvial presenta una morfología compleja, frecuentemente surcado por una densa red de cursos secundarios, con presencia de abundante vegetación y con albardones costeros a lo largo de la unión cauce-planicie. En estos casos, para simulaciones numéricas a gran escala espacial y temporal, los modelos 1D resultan inapropiados ya que la unidimensionalidad no es representativa del patrón de flujo real. Es así que, en este trabajo, para determinar con precisión el comportamiento de determinadas variables hidráulicas se justifica el interés en la aplicación de modelos bidimensionales (2D).

Los modelos 2DH (integrados en la vertical), simulan los procesos utilizando las ecuaciones de conservación de masa y *momentum* expresadas en dos dimensiones. Los resultados son calculados en cada punto de una malla que se genera de la zona de estudio, con lo cual presentan la desventaja de contar con un elevado tiempo de simulación, que ha sido mitigada en los últimos años a partir del desarrollo procesadores computacionales de cada vez mayor velocidad de cálculo.

Otro condicionante de los modelos 2D (y de los modelos en general) es la necesidad de una buena información topográfica para la representación de la batimetría del terreno, sobre todo en zonas de llanura donde pequeñas alteraciones pueden implicar grandes diferencias en la determinación de la extensión de áreas inundadas. Esta información puede ser obtenida a partir de los distintos MDE disponibles, que en algunos casos cubren gran parte de los territorios nacionales, y son de acceso gratuito.

### **3.2 Modelos Digitales de Elevación**

De acuerdo a la definición de [Felicísimo \(1994\)](#) se denomina Modelo Digital de Elevaciones a un modelo simbólico, de estructura numérica y digital que pretende representar la distribución espacial de la elevación del terreno, siendo la altura una variable escalar (sobre un nivel de referencia) que se distribuye en un espacio bi-dimensional.

No obstante, existen algunas ambigüedades relacionadas con los términos empleados para denotar los modelos que contienen información topográfica del terreno. En este sentido, pueden encontrarse en la bibliografía diferentes términos, como Modelos Digitales de Superficie (MDS, o DSM por el inglés Digital Surface Model), Modelos Digitales de Elevación (MDE o DEM, por el inglés Digital Elevation Model) o Modelos Digitales de Terreno (MDT o DTM, por el inglés Digital Terrain Model).

El MDS representa las elevaciones sobre un nivel de referencia de las superficies reflectantes del suelo; árboles, edificios y otras características elevadas sobre la “tierra desnuda”. El término MDS es usualmente utilizado como sinónimo de MDE. Cuando se anula la vegetación y las

características creadas por el hombre, se genera un MDT, el cual es particularmente útil en estudios hidrológicos e hidráulicos, estudios de suelos y planificación territorial. El MDT puede contener además información sobre otros elementos geográficos y características naturales como ríos, lagos, dorsales, etc. En la Figura 3.1 se muestra un esquema de estas definiciones.

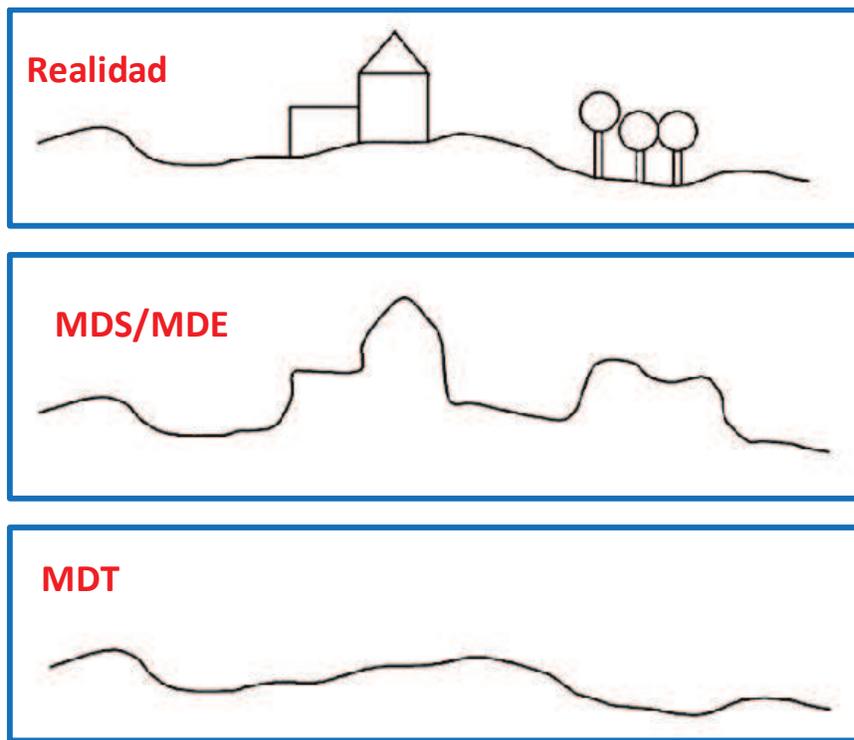


Figura 3.1: Diferencias entre las denominaciones de los modelos para representar las alturas del terreno.

En la presente tesis, se utilizará la denominación MDE para referirse de manera general a los modelos de topografía generados para representar el relieve del terreno. No obstante, cuando se refiera de manera específica a los productos utilizados en este trabajo, se mantendrán las denominaciones definidas por el IGN (MDE-Arv2.0, MDE-5m y MDT-30m), mientras que el modelo elaborado a partir de perfiles transversales relevados y puntos acotados se denominará MDT-Perfiles.

Los MDE se obtienen con métodos que pueden ser muy variados en cuanto a su técnica y exactitud y que deben ser seleccionadas según un criterio técnico y económico para cada estudio particular. A continuación, se describen brevemente los procedimientos utilizados para la generación de los MDE:

- a) Relevamientos de campo usando receptores GPS o estaciones totales: siempre y cuando se realice un uso correcto del instrumental y de las herramientas informáticas de post proceso, los MDE que se generen con estos datos tendrán alta exactitud.
- b) Fotografías aéreas e imágenes de satélites: el uso de este tipo de imágenes, es una de las maneras más efectivas para producir y actualizar mapas topográficos en regiones de tamaño medio y grande, dando la mejor relación costo/beneficio. Los MDE obtenidos en base a fotografías aéreas, pueden presentar una enorme variedad en la exactitud del mismo, dependiendo de la altura de vuelo y la distancia focal de la cámara, la exactitud en el apoyo de campo, el método de aerotriangulación utilizado, la resolución al escanear las fotos, así como la experiencia del operador y el instrumental utilizado. Para las imágenes obtenidas por satélites, la variedad es menor ([Burgos y Salcedo., 2014](#)).
- c) Radar con antena de apertura sintética (SAR): esta técnica es ampliamente utilizada, ya que es muy sensible a las variaciones del terreno. La imagen radar es producida por un sensor activo que emite microondas, recibiendo y registrando los ecos reflejados por el objetivo. La ventaja sobre sistemas infrarrojos y ópticos, es que las imágenes radar siempre son nítidas independientemente de que se capten de día, de noche, o bajo cualquier condición climática. Es la base para 3 tipos de técnicas: radargrametría, interferometría y radarclinometría. La radargrametría adquiere datos a través de medidas de paralaje. La interferometría SAR (InSAR) capta los datos a través de la determinación de desfase entre dos ecos. Imágenes de la misma área tomadas desde posiciones distintas, pueden usarse para formar un interferograma, y la diferencia de fases registradas en el interferograma se utilizan para generar un mapa topográfico. La radarclinometría no tiene una exactitud suficiente para la generación de un MDE. La relación costo/beneficio es similar a la de otras imágenes de satélite, aunque en contrapartida la frecuencia de las observaciones es menor ([Burgos y Salcedo., 2014](#)).
- d) LIDAR (Light Detection and Ranging): el LIDAR es un sistema activo, por lo que envía energía electromagnética y registra la reflejada por la superficie del terreno y los objetos sobre el mismo. El sistema fue mejorando la resolución y el scanner láser aerotransportado (ALS) se convirtió en una importante herramienta opcional para sensores remotos, fotogrametría, y mapeo ([Ackermann, 1996](#)). Este sistema es de gran

ayuda cuando la fotogrametría falla o se torna demasiado costosa, como por ejemplo en áreas con vegetación muy densa ([Estornell y Ruiz., 2007](#)). El costo de producir un MDE con esta tecnología es generalmente alto.

- e) Mapas topográficos existentes y digitalización cartográfica: en general, los países tienen cartografiados sus territorios, y dependiendo de los recursos invertidos en esta tarea, la calidad de los mapas topográficos suele ser variable. Argentina dispone de cobertura completa a escala 1:250.000, con curvas de nivel con 50 m de equidistancia. Si bien existen cartas a escala 1:50.000 con curvas cada 5m, no cubren la totalidad del área nacional. Claramente, la escala de la carta topográfica, condicionará la equidistancia de las curvas, y en consecuencia la exactitud y resolución del MDE a realizar. En general, se espera que la exactitud de un punto aislado esté entre 1/2 y 1/3 del intervalo de la curva ([Méndez y López, 2010](#)).

Los MDE pueden ser vectoriales o raster. En los primeros se encuentran las curvas de nivel, los perfiles y la Red de Triángulos Irregulares (TIN, por su acrónimo en inglés). En tanto que, en los del segundo tipo, se encuentran las matrices de celdas regulares, con cotas sobre una grilla de filas y columnas equidistantes. Las principales características para diferenciarlos entre sí son la resolución y la exactitud:

#### Resolución

La Resolución especifica la unidad de medida más pequeña que se adopta para registrar datos. El tamaño escogido para una celda o píxel de una grilla de un área de estudio, depende de la resolución de datos requerida para el análisis más detallado. El píxel debe ser bastante pequeño para capturar el detalle requerido, pero bastante grande de modo que el almacenaje y el análisis puedan ser realizados de manera eficiente.

#### Exactitud

Todo MDE está sujeto a dos fuentes de error. La primera se denomina aleatoria y representa una sobre o sub estimación de los valores reales de elevación como resultado del azar. Estos errores no muestran un patrón determinado, en promedio su valor es igual a cero y los errores positivos y negativos tienen una frecuencia similar. El segundo tipo se denomina sistemático y tiene un patrón determinado y su promedio no es igual a cero ([Maling, 1989](#)).

De la definición de Exactitud, también deviene el concepto de *Precisión*, que alude específicamente a la dispersión que se pueda obtener mediante el instrumento de medición (por ejemplo, GPS diferencial o sensor radar) en torno al valor esperado de la estimación, por lo cual cada fuente de dato tiene su precisión.

### **3.3 El uso de los MDE para la simulación de inundaciones**

En el análisis del uso de los MDE para simulación de inundaciones, [Horrit and Bates \(2001\)](#) realizaron un estudio sobre el efecto en el cambio de la resolución espacial de los mismos. El MDE original utilizado fue obtenido de cartografía LIDAR (*Light Detection and Ranging*) con una resolución horizontal de 10 m, a partir del cual se obtuvieron submodelos con resoluciones variables entre 10 y 1000 m, y con los cuales se realizaron simulaciones con el modelo LISFLOOD-FP para un tramo de 60 km del río Severn, en Reino Unido. Las áreas de inundación calculadas con el modelo hidrodinámico fueron comparadas con mediciones sobre imágenes de satélite. Los resultados de este estudio demostraron que el mejor funcionamiento del modelo se obtuvo con una resolución de 100 m, después de la cual no se observó mejoría con el aumento de la resolución. Adicionalmente se concluyó que las predicciones en cuanto a los niveles de agua fueron aceptables hasta una resolución de 500m.

El trabajo realizado por Horritt y Bates en 2001, sólo consideró el cambio en la resolución espacial y no la fuente de obtención de los datos, como sí lo hicieron estudios posteriores. Tal es el caso de [Sanders \(2007\)](#), quien comparó diferentes MDE obtenidos por Radar Interferométrico de Apertura Sintética (ifSAR por sus siglas en inglés), la Misión Topográfica del Radar Shuttle (SRTM por sus siglas en inglés), la técnica LIDAR y MDE elaborados a partir de datos de elevaciones nacionales. La finalidad fue de determinar cuál de ellos presentaba las mejores características para la simulación de inundaciones, utilizando un modelo hidrodinámico bidimensional y mapas existentes de inundaciones observadas para su comparación. Las simulaciones fueron realizadas para el río Santa Clara en California, y el río Búfalo en Houston, Texas. Los resultados reflejaron que la cartografía LIDAR fue la que representó más adecuadamente los datos observados debido a su precisión vertical y horizontal, lo que se traduce en una ventaja para detectar pequeños obstáculos en el terreno y la vegetación.

Adicionalmente [Sanders \(2007\)](#) determinó que los MDE basados en datos de elevación nacionales fueron notablemente uniformes en comparación con IfSAR y SRTM. Estos últimos presentaban mucho “ruido” en los datos, pero al utilizarlos, las predicciones sobreestimaron la extensión de la inundación en comparación con todos los demás MDE. Finalmente, el estudio destaca la utilidad de los modelos basados en la misión SRTM como fuente global de datos de terreno para la simulación de inundaciones

Al igual que [Sanders \(2007\)](#), [Cook y Merwade \(2009\)](#) realizaron un análisis comparativo entre los resultados del cálculo de inundaciones obtenidos con cartografía LIDAR y las resultantes de otras seis diferentes topografías, para lo cual cada conjunto de datos topográficos se utilizó para crear mapas de inundación utilizando los modelos 1D HEC-RAS 4.0 y FESWMS-2DH 3.1.5 ([FHWA, 2002](#)) para dos áreas de estudio; el arroyo Strouds en el norte de California y el río Brazos en Texas. Los resultados obtenidos indicaron que los mejores resultados se obtuvieron a partir de los MDE determinados con cartografía LIDAR de baja resolución horizontal (6 m), y que la precisión mejoraba aún más si se introducían datos de batimetría fluvial.

En el mismo sentido, [De Gonzalo \(2011\)](#) analizó la influencia de la calidad y resolución de la geometría de entrada en la obtención de áreas de inundación mediante la utilización de los modelos hidrodinámicos HEC-RAS 3.1.1 e IBER 2D v1.06 aplicados a la cuenca del río Pejibaye en Costa Rica. Concluyó que el efecto de la resolución de los MDE puede llevar a producir resultados con un nivel considerable de error, sobre todo para los caudales bajos, convirtiendo a la topografía en el factor más determinante en la modelación hidrodinámica 2D de inundaciones. Para caudales del orden de  $75 \text{ m}^3/\text{s}$ , la diferencia relativa entre el área de inundación medida y calculada fue de de 7-10% y 30-45% para las resoluciones de 10m y 30m respectivamente. Para caudales altos, del orden de  $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ , esas diferencias disminuyen a 6-7% y 18-20% para cada resolución.

En zonas como la llanura pampeana Argentina, la aplicación de modelos para simular crecidas presenta dificultades que generan cierta incertidumbre en la obtención de resultados. La más importante radica en la correcta representación de la topografía, ya que el poco desnivel de este tipo de regiones ocasiona que las pequeñas alteraciones en el terreno se comporten como grandes

obstáculos, como es el caso de la vegetación existente o los terraplenes de caminos. En la mayoría de los trabajos realizados la topografía ha sido generada a partir de cartografía del Instituto Geográfico Nacional (IGN), que principalmente está disponible en una escala de 1:50000 y con equidistancia entre curvas de nivel de 2.5 metros.

[Eulliaides et. al. \(2002\)](#) realizaron la simulación de una crecida en una región de llanura de 10.000 km<sup>2</sup> en la provincia de Buenos Aires, Argentina, utilizando dos MDE diferentes. Por un lado, un MDE construido a partir de cartografía con escala 1:50.000 empleando la técnica TIN (*Triangulated Irregular Network*) para interpolar la cota a todo el dominio, y por el otro un MDE generado a partir de interferometría sobre pares de imágenes radar tomadas de satélite. En ambos, el tamaño de pixel fue de 20 metros de lado. Determinaron que, si bien a gran escala el aspecto de ambas topografías es similar, el modelo generado por interferometría consigue capturar mayores detalles; también demostraron que los mismos cumplen un rol importante en el escurrimiento superficial y no pueden ser ignorados sin alterar en gran medida la dinámica de estos procesos. De esta manera, los autores evidenciaron que la calidad y precisión del modelo de elevación cumple un rol preponderante en la simulación del escurrimiento superficial cuando se trata de problemas de inundaciones en llanuras.

[Collazos et. al. \(2018\)](#) simularon la crecida del arroyo Azul del año 2012, que causó la inundación de la ciudad homónima, utilizando el software IBER y un MDT construido a partir de relevamientos de secciones transversales representativos del cauce del arroyo, puntos acotados con GPS diferencial en la zona urbana, y las curvas de nivel del IGN para estimar cotas en la zona no urbanizada. El MDT utilizado para la simulación fue de resolución horizontal de 1m x 1m y resultó de una combinación de los tres MDT mencionados. El mismo se comparó con el MDE de SRTM disponible gratuitamente para la zona de estudio, y se calcularon diferencias de cotas de +3-4 m, siendo siempre las cotas superiores las del MDE SRTM. Los autores concluyeron que la obtención de un MDT preciso implica un considerable esfuerzo y tiempo (y por ende costo), pero resulta imprescindible para realizar simulaciones hidrodinámicas 2D en zonas planas o de muy baja pendiente.

[Meza \(2020\)](#) realizó una comparación entre el MDE SRTM y el MDE-Ar 2.0 en la provincia del Chaco (Argentina), con el objetivo de identificar potenciales áreas inundables y anegadizas

en la ciudad de General San Martín. El autor realizó un análisis visual y estadístico a escala municipal y urbana, tomando 65 puntos de control sobre el terreno con cota IGN, y evaluó la calidad de los MDE mediante el cálculo del Error Medio Cuadrático (EMC). Los resultados indicaron que estadísticamente ambos MDE no presentan diferencias significativas, y que los errores registrados respecto a los 65 puntos de control se encuentran entre 2 y 5 metros, siendo mejor la precisión vertical del MDE-Ar-2.0.

### **3.4 Parametrización de la rugosidad superficial para la simulación de inundaciones**

Otro elemento a tener en cuenta en la simulación de crecidas en ríos de llanura es la determinación de la rugosidad superficial, sobre todo en aquellos casos donde las planicies poseen abundante vegetación de diferentes alturas y densidad, que para situaciones de desborde se convierten en elementos relevantes para evaluar la distribución de caudales. Es importante considerar que esos cambios de la vegetación según la estación del año, inciden notablemente en la rugosidad superficial con la que se parametrizan las ecuaciones del escurrimiento medio.

En este sentido, [Trento et. al. \(2009\)](#) analizaron la influencia de la vegetación en la planicie del río Salado por medio de simulaciones de la crecida del año 2003, en donde se estimó el coeficiente de rugosidad teniendo en cuenta la vegetación existente tanto en verano como en invierno. Los resultados determinaron que los niveles de agua calculados para la vegetación de verano fueron mayores en hasta 0.30m que cuando se utilizó la configuración de rugosidad para invierno. Por su parte, [Imhoff y Trento \(2011\)](#) realizaron una comparación en la misma zona de estudio entre una configuración de rugosidad variable para todo el dominio de simulación, con la cual se calibró el modelo HEC-RAS 1D, versus una configuración de rugosidad constante en toda la planicie. Con valores de rugosidad constante se calcularon niveles de agua que variaron en  $\pm 45$  centímetros respecto a los valores determinados en la calibración, mientras que la diferencia entre los anchos de inundación medidos sobre una imagen radar y los calculados con el modelo pasó del rango 2-6% con rugosidad variable a 10-45% con rugosidad constante.

Los modelos matemáticos que representan la hidrodinámica en planicies requieren de la especificación de la resistencia al flujo, es decir los parámetros de “rugosidad” que, en teoría, pueden especificarse por separado para cada celda computacional. Estos valores pueden ser estimados en el campo con aceptable precisión ([Chow, 1959](#); [Arcement y Schneider, 1989](#)). La relevancia de la determinación del coeficiente de rugosidad superficial en planicies ha conducido a diferentes formas de abordar ese problema, ya sea mediante la utilización de modelos numéricos de turbulencia ([López y García, 2001](#)), de métodos analíticos ([Järvelä, 2004](#)), de una combinación de pruebas de laboratorio con modelos numéricos ([Wu and Shen, 1999](#)), de ensayos de laboratorio y mediciones de campo con trazadores ([Nepf, 1999](#)), entre otros.

Los coeficientes de rugosidad representan una gama de diferentes fuentes de pérdida de energía, cuyo tratamiento explícito varía con la dimensionalidad del modelo ([Hunter et al., 2007](#)). Modelos simplificados de base conceptual, tales como LISFLOOD-PF, contienen parámetros que están relacionados con representaciones de procesos hidráulicos, que no pueden ser determinados a partir de las características físicas del curso de agua bajo estudio. En algoritmos más elaborados, como el empleado en TELEMAC-2D ([Brière et al., 2007](#)) y TUFLOW ([Syme, 1991](#)), los parámetros de rugosidad, en principio, deben ser evaluados a partir de datos de campo. En SisBaHiA se parametriza la rugosidad indicando la altura de rugosidad total ( $k$ ) en cada uno de los nodos de la malla, mientras que en HEC-RAS versión 2D se debe elaborar un mapa de cobertura de suelo del dominio de modelación, y asociar a cada uso de suelo un valor de  $n$  de Manning a partir del cual se determina para cada celda de la malla la relación elevación-rugosidad.

En la práctica, sin embargo, la predeterminación de los parámetros del modelo rara vez es posible debido a problemas de escala (es decir, diferencias entre la escala de medición, escala de la grilla del modelo, y la escala de la cual se derivan los algoritmos que describen los procesos básicos). Por lo tanto, una forma de calibración es, por lo general, asignar valores empíricos de los parámetros de rugosidad tal que el modelo sea capaz de reproducir las variables hidrodinámicas observadas.

El análisis complementario de datos de teledetección ha demostrado un gran potencial para proporcionar las mediciones cuantitativas de rugosidad en los entornos fluviales. Por ejemplo, [Butler et al. \(1998\)](#) han utilizado MDE obtenidos por técnicas fotogramétricas para extraer información del tamaño de grano en el lecho y caracterizar la rugosidad del mismo, mientras que la altura de la vegetación fue estimada a partir de la información contenida en la base de datos elaborada con LiDAR, lo cual permitió a [Mason et al. \(2003\)](#) y [Verwey \(2003\)](#) generar aproximaciones de primer orden de las variaciones espacio-temporales de la resistencia al escurrimiento sobre la planicie de inundación.

Por su parte, [Bodoira et al. \(2009\)](#) desarrollaron una metodología de base empírica para representar la rugosidad de parcelas del terreno mediante imágenes satelitales Landsat 7 ETM provistas por la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE), y mediciones de campo complementarias. En este trabajo se establecieron 6 diferentes clases (*i*) de vegetación presentes en el valle de aluvial del río Salado, a partir de mediciones realizadas en trabajos de campo, sobre 17 parcelas de muestreo distribuidas en la planicie de inundación. Estos relevamientos se relacionaron con las imágenes de satélite Landsat 7 ETM en fechas próximas a las de los días en que se realizaron los trabajos de campo, y a cada grupo de nueve píxeles de 30 m de lado, se le asignó una altura *li* de la vegetación predominante en el rango de 4-300cm, representativa de cada clase. Las parcelas, de forma cuadrada, fueron representadas por píxeles de 30 m de lado. Se procesaron las imágenes satelitales para obtener una clasificación de la cobertura del terreno, y en campo se midió la altura de la vegetación. La combinación de ambas determinaciones permitió obtener una carta temática de la rugosidad superficial del terreno.

Posteriormente, tomando como base el trabajo de [Bodoira et al. \(2009\)](#), Imhoff y Trento (2011) desarrollaron una metodología para calcular el coeficiente de rugosidad de *n* Manning con la ecuación de Cowan (Arcement y Schneider, 1989), en la cual para la determinación del componente que tiene en cuenta la vegetación se utilizó la clasificación elaborada por [Bodoira et al. \(2009\)](#). Esto permitió obtener un mapa de coeficientes de rugosidad *n* de Manning para la zona del río Salado contemplada en la presente tesis, el cual será utilizado para calcular los parámetros de rugosidad de los modelos HEC-RAS y SisBaHiA.

## **4 METODOLOGÍA**

En este capítulo se desarrolla la metodología empleada para simular la hidrodinámica de la crecida del año 2003 en el tramo de río bajo estudio con los sistemas HEC-RAS 5.0.5 y SisBaHiA v9.2.

Se utilizó HEC-RAS debido a que es uno de los sistemas más usados a nivel mundial para simular la hidrodinámica de cursos fluviales, y es de uso libre. Adicionalmente se constató en la bibliografía y en el uso del mismo la buena estabilidad del esquema numérico, para un rango amplio de pasos de tiempo de cálculo y de diferentes tamaños de malla. Por otro lado, la elección de SisBaHiA se basó en la versatilidad de su grilla de elementos finitos para representar una geometría compleja con dos escalas espaciales (cauce-planicie) muy distintas, en la disponibilidad de submodelos de transporte para escalares y para variables hidráulicas no estacionarias, todas acopladas y en la experiencia de su uso por parte del grupo de investigación. Los datos de elevación del terreno fueron generados a partir de los MDE disponibles en la zona de estudio, elaborados por el Instituto Geográfico Nacional (IGN), y a partir de perfiles transversales relevados en el tramo de estudio por el método convencional (nivel óptico), que cubren una extensión de entre 3-4 km de la planicie de inundación. Para la estimación de la rugosidad superficial, se utilizó el mapa antecedente de Imhoff y Trento (2011).

### **4.1 Determinación del dominio de simulación**

El dominio de la modelación, comprendido entre la RP 70 y la confluencia del río Salado con el arroyo Cululú, se estableció en base al área máxima afectada por la crecida en el tramo de río bajo estudio. Esta área se determinó a partir de una imagen radar obtenida 7 días después del paso del pico de la crecida por el puente de la RP70 (ver Figura 4.1).

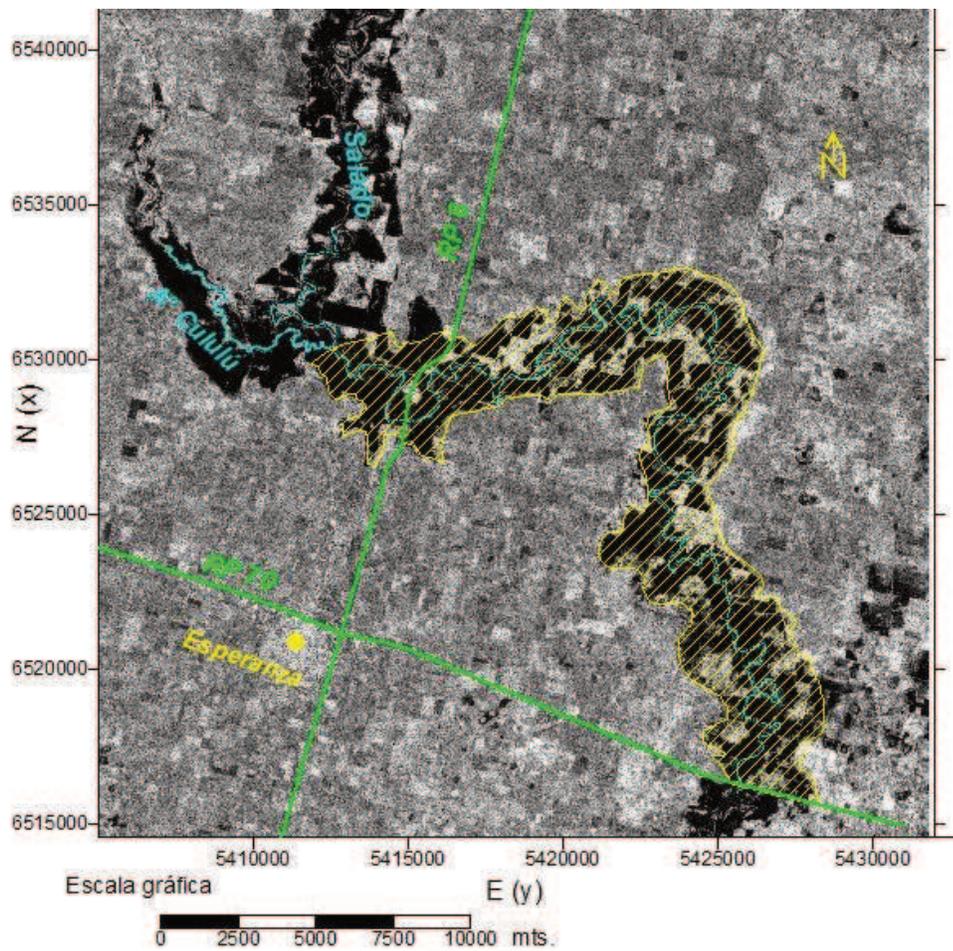


Figura 4.1: Dominio de modelación sobre imagen radar de la zona de estudio.  
Fecha 06-05-2003

El área total es de aproximadamente 85 km<sup>2</sup>, en donde el ancho promedio de la planicie de inundación es de 3 km, y la longitud del cauce de aproximadamente 60 km. La zona es exclusivamente de tipo rural, con existencia de sectores con gran crecimiento de vegetación, tipo bosques.

## 4.2 Desarrollo de los Modelos de Elevación

En este capítulo se describen las fuentes de obtención de los datos y los procesamientos realizados para generar los MDE que sirven de base para la elaboración de la topografía en los modelos computacionales. A modo de resumen se presentan en la Tabla 4.1 los modelos utilizados y sus características principales:

	<b>MDE-Arv2.0</b>	<b>MDE-5m</b>	<b>MDT-30m</b>	<b>MDT-Perfiles</b>
Fuente	IGN	IGN	IGN	Elaboración propia
Resolución	30m	5m	30m	30m
Precisión	2m aprox.	Submétrica	Submétrica	Submétrica
Escala	1:50.000	1:50.000	1:50.000	

Tabla 4.1: Características de los MDE utilizados en las simulaciones.

#### 4.2.1 Datos de elevación disponibles en la zona de estudio

En el presente trabajo se utilizarán dos fuentes de datos para la elaboración de los modelos digitales de elevación del dominio de modelación; por un lado, los MDE disponibles gratuitamente en el sitio web del IGN (<http://www.ign.gov.ar/NuestrasActividades/Geodesia/ModeloDigitalElevaciones/Busqueda>), y por otro lado los datos de topografía de perfiles transversales relevados en campo. A continuación, se describen las características principales de cada uno:

**a) MDE-Ar v2.0 30m:** a partir de una combinación de datos capturados por las misiones satelitales SRTM y ALOS, el IGN llevó adelante el desarrollo del modelo MDE-Ar v2.0, que cubre la totalidad del territorio continental nacional, y cuya referencia vertical coincide con el Sistema de Referencia Vertical Nacional (SRVN16).

La misión SRTM fue llevada a cabo en cooperación entre la National Aeronautics and Space Administration (NASA), el German Aerospace Center (DLR), la Agencia Espacial Italiana (ASI) y la U.S. National Geospatial Intelligence Agency (NGA). El objetivo principal de la misión SRTM fue obtener un modelo digital de elevaciones global de alta resolución y calidad uniforme, a partir de datos recolectados con la técnica de interferometría radar de apertura sintética. El MDE generado a partir de la misión SRTM fue distribuido públicamente con una resolución espacial de 1" de arco (aproximadamente 30 m) para Estados Unidos y una resolución de 3" (aproximadamente 90 m) para el resto del mundo. Mediante un convenio con la NGA, el IGN logró obtener el modelo de Argentina con resolución aproximada de 30 m por pixel.

La misión ALOS, llevada adelante por la Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA), permitió el desarrollo de un modelo digital de elevaciones a escala global a partir de la utilización de aproximadamente 3 millones de imágenes adquiridas mediante un instrumento pancromático de teledetección para mapeo estéreo (PRISM, por sus siglas en inglés) instalado en el satélite japonés de observación terrestre “DAICHI”.

A partir de la combinación de ambos modelos, aplicando tareas de relleno de vacíos, inclusión de datos en zonas de lagos, filtrado espacial y enmascarado de límites, se generó el MDE-Ar de aproximadamente 30 m por píxel, que se encuentra disponible en escala 1:50.000 de acuerdo con las cartas topográficas del IGN.

**b) MDE aerofotogramétrico 5m (MDE-5m):** a partir de vuelos aerofotogramétricos llevados a cabo con el siguiente equipamiento: a) una cámara digital Vexcel UltraCamXp; b) un sistema de navegación GNSS; y c) un sistema inercial IMU, el IGN ha desarrollado una línea de producción que le permite la determinación precisa de los parámetros de orientación externa de los fotogramas, la aerotriangulación por haces de rayos, y finalmente, la generación de un MDE. Los MDE aerofotogramétricos refinados que distribuye el IGN tienen una resolución espacial de 5m y una precisión vertical submétrica. En la Figura 4.2 se muestra la cobertura sobre el territorio nacional de este modelo:

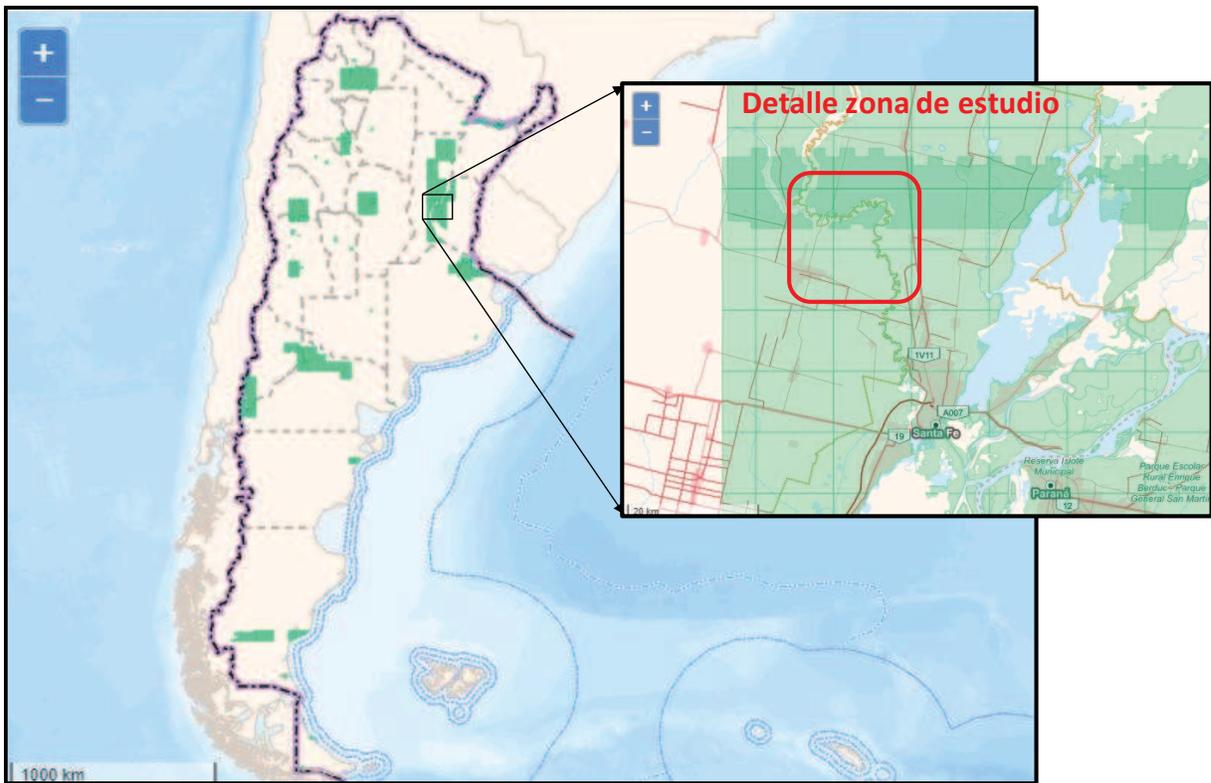


Figura 4.2: En color verde, cobertura del MDE 5m del IGN sobre el territorio nacional.  
Fuente: página web del IGN.

c) **MDT 30m:** A partir de procesos de restitución fotogramétrica digital, el IGN ha capturado información espacial de elementos geográficos representativos de la superficie terrestre, tales como puntos sobre el terreno natural, barrancas, líneas de quiebre del terreno, ríos, lagos, bañados y esteros. Luego, esta información geográfica ha sido utilizada para desarrollar MDT, que (a diferencia de los MDE) no incorpora a la vegetación u otros elementos antrópicos ubicados sobre la superficie terrestre. Los MDT que distribuye el IGN tienen una resolución espacial de 30m y una precisión vertical submétrica. Este tipo de modelo cubre una porción muy pequeña del territorio nacional, dentro de la cual se encuentra el área de estudio (ver Figura 4.3).

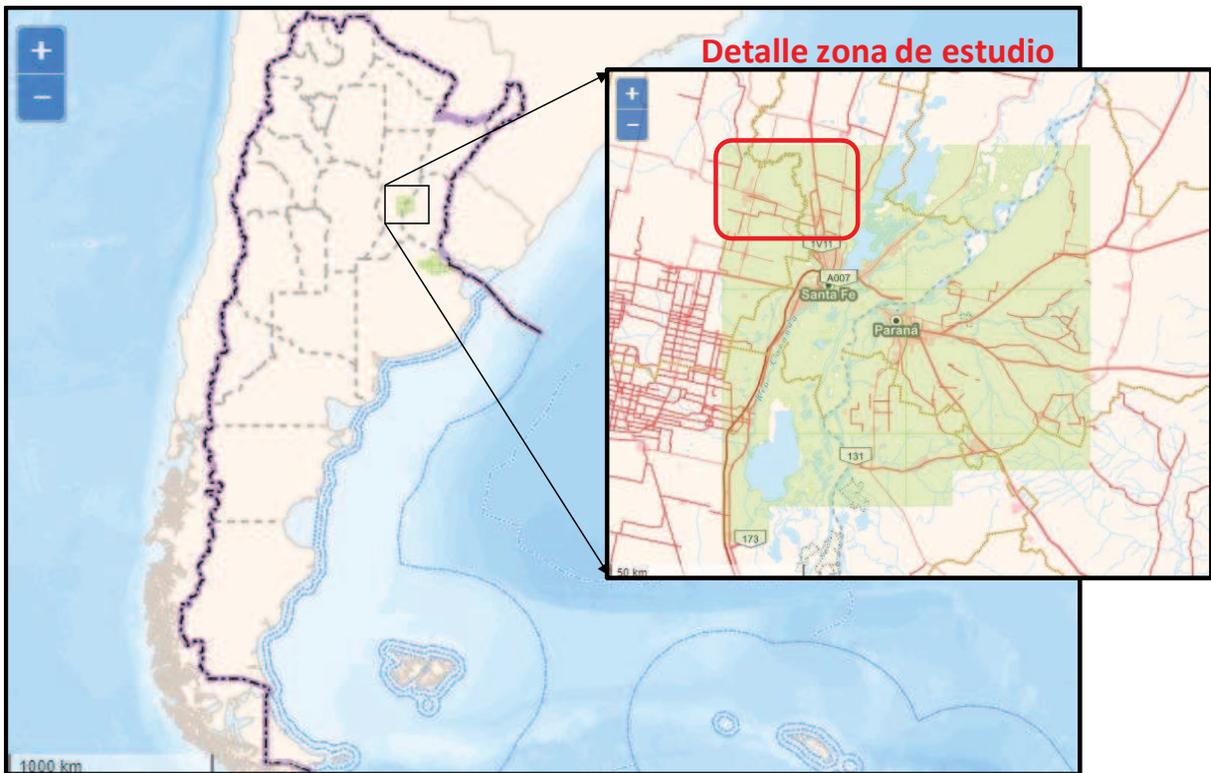


Figura 4.3: En color verde, cobertura del MDT 30m del IGN sobre el territorio nacional.  
Fuente: página web del IGN.

**d) MDT-Perfiles:** se contó con 20 perfiles transversales relevados en el tramo de estudio (Figura 4.4) mediante levantamiento tradicional (nivel óptico), con una longitud aproximada de 4000 m cada uno, que incluyen el detalle del cauce y la planicie de inundación. Dichos relevamientos fueron realizados durante los años 2001-2002.

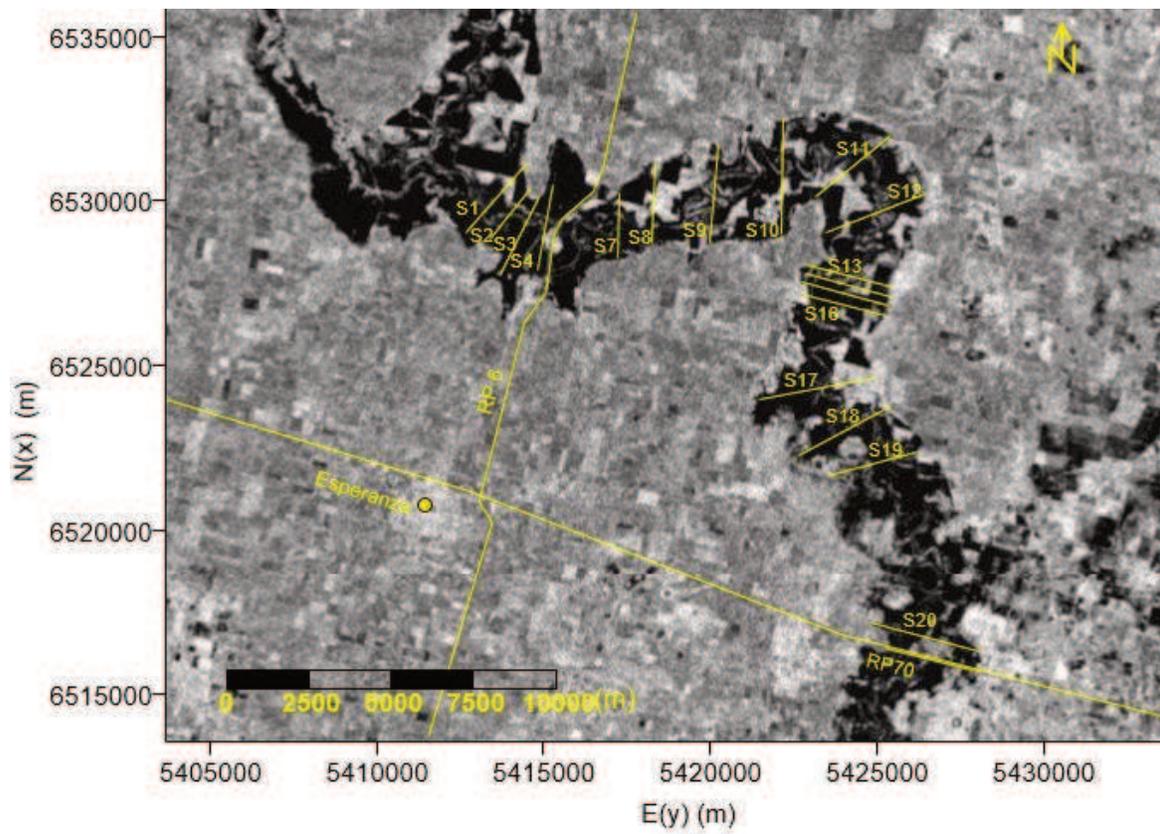


Figura 4.4: Ubicación de los perfiles transversales utilizados para elaborar el MDT-Perfiles.

## 4.2.2 Elaboración de los MDE para la zona de estudio

Los MDE que se utilizaron para definir la topografía del área de estudio se obtuvieron de la combinación de los MDE de la planicie, elaborados a partir de las fuentes de información descritas en el punto 4.2.1, y un MDE del cauce del río, elaborado principalmente a partir de la información topobatimétrica del cauce principal disponible en los perfiles transversales relevados. A continuación, se describen los procesos realizados para la determinación de cada uno de los MDE.

### 4.2.2.1 Modelo Digital de Elevación del cauce (MDE-cauce)

Para definirlo se utilizó como información de base los perfiles transversales relevados. Como se mostró en la Figura 4.4, se contó con un total de 20 perfiles transversales con un promedio de 12 puntos acotados para definir adecuadamente la sección transversal del cauce. El ancho promedio determinado fue de 120m. A partir de estos datos, se interpolaron con el método de

Kriging perfiles transversales a lo largo de los aproximadamente 60km de longitud del cauce y luego se elaboró el MDE-cauce con una resolución de 5m.

#### 4.2.2.2 Modelos Digitales de Elevación de la planicie con datos del IGN

Para elaborar los MDE que se utilizaron para interpolar la batimetría del área de estudio, en primer lugar, se descargaron y se georreferenciaron al sistema de proyección Gauss Kruger-Faja 5, los MDE disponibles en la página web del IGN. Dada la escala espacial en la que se encuentran los MDE, se procedió a “recortar” de cada uno de ellos la zona del dominio de la simulación (ver Figuras 4.5, 4.6 y 4.7).

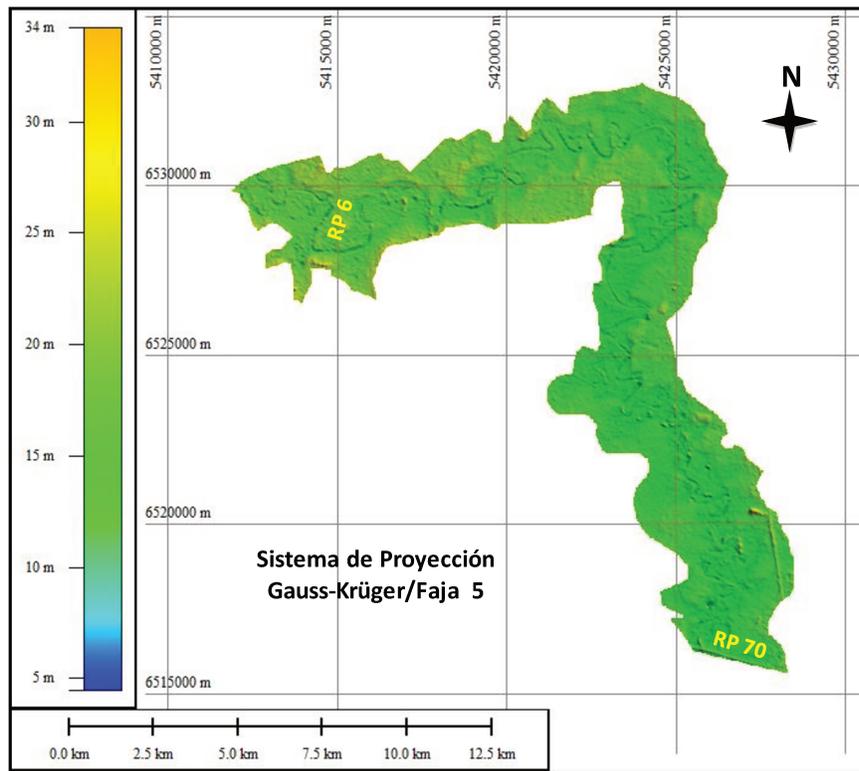


Figura 4.5: Recorte del dominio de simulación del MDE-Ar v2.0 (30 m).

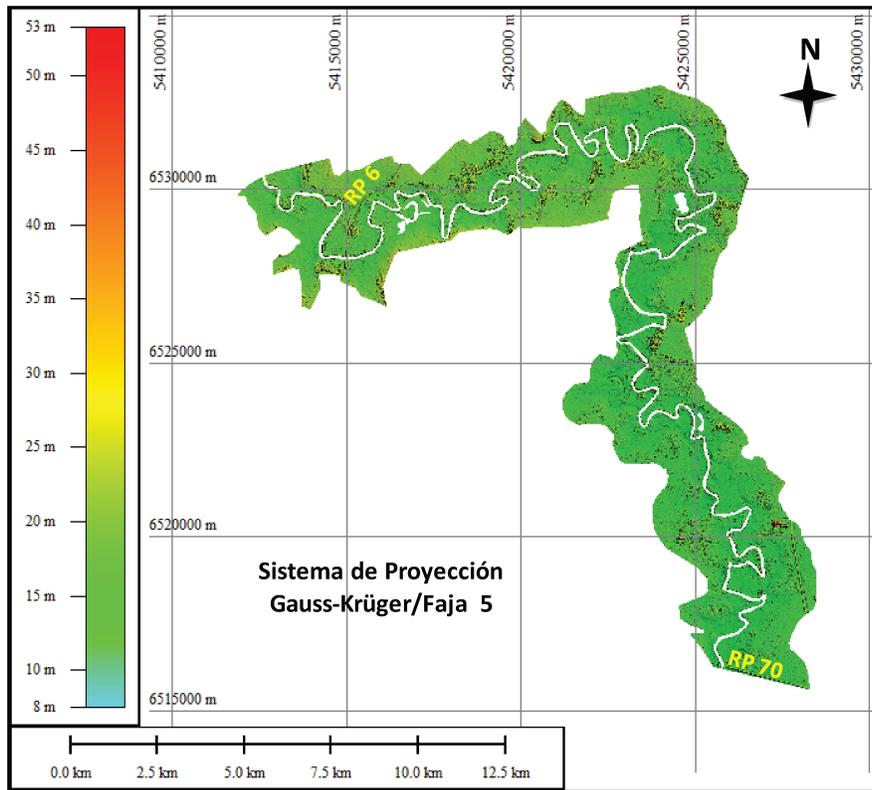


Figura 4.6: Recorte del dominio de simulación del MDE-5m.

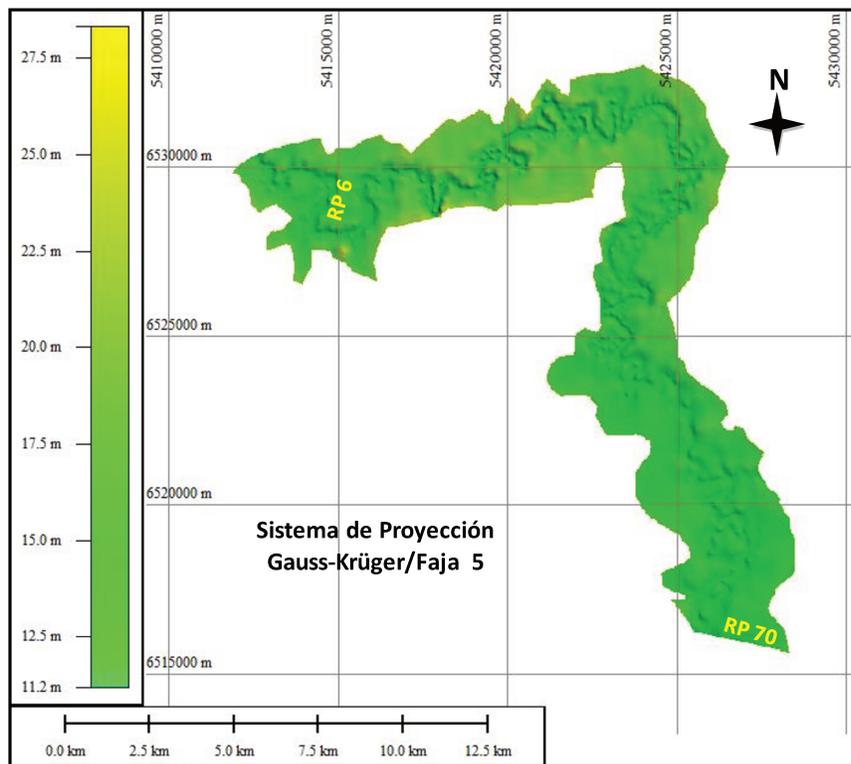


Figura 4.7: Recorte del dominio de simulación del MDT-30m.

De un primer análisis visual se identificó que en el MDE-5m, a diferencia de los dos restantes se encuentra bien representado el terraplén de la RP6. Sin embargo, tanto el cauce principal del río Salado como algunas zonas bajas se presentan vacíos (sin datos). A consecuencia de esto, mediante las herramientas de SIG como superposición de archivos raster y relleno de datos, se realizó el procesamiento de los MDE de la siguiente manera:

- El MDE-5m se rellenó sólo en las zonas vacías, con datos del MDE-Ar v2.0, por medio de superposición. Posteriormente, los datos del cauce se reemplazaron por el MDE-cauce. Adicionalmente, se recortó la zona correspondiente al terraplén de la RP6 para complementar los datos de los otros modelos.
- En el MDE-Ar v2.0 y en el MDT-30m se adicionó por medio de superposición los datos del terraplén de la RP6 extraídos del MDE-5m, y posteriormente se reemplazaron los datos dentro del cauce por el MDE-cauce.

#### **4.2.2.3 Modelo Digital de Terreno con datos de perfiles transversales y cartas del IGN**

Se contó con 20 perfiles transversales relevados en el tramo de río bajo estudio, que incluyen el cauce y la planicie de inundación. La longitud de los perfiles medidos estuvo en el rango de 3800-6000 metros, y se relevaron un promedio de 100 puntos por perfiles transversal, de modo de definir correctamente la topografía de la planicie y la sección del cauce. Estos datos fueron complementados con puntos acotados sobre la planicie en diversos trabajos de campo realizados por personal de la Municipalidad de Esperanza, y por la información disponible en la carta IGN correspondiente a la localidad de Esperanza, Hoja n° 3160-26-1, escala 1:50.000.

Con los puntos acotados y georeferenciados se realizó una primera interpolación con un software adecuado utilizando el método de Kriging, para asignar datos de elevación a toda la zona del dominio de estudio, y generar un archivo raster con un tamaño de pixel de 30m x 30m (ver Figura 4.8). Posteriormente, este modelo fue procesado por medio de superposición para representar de manera adecuada el terraplén de la RP6, y los valores del cauce se reemplazaron por el MDE-Cauce. El producto final obtenido, de resolución 30m, se denomina MDT-Perfiles.

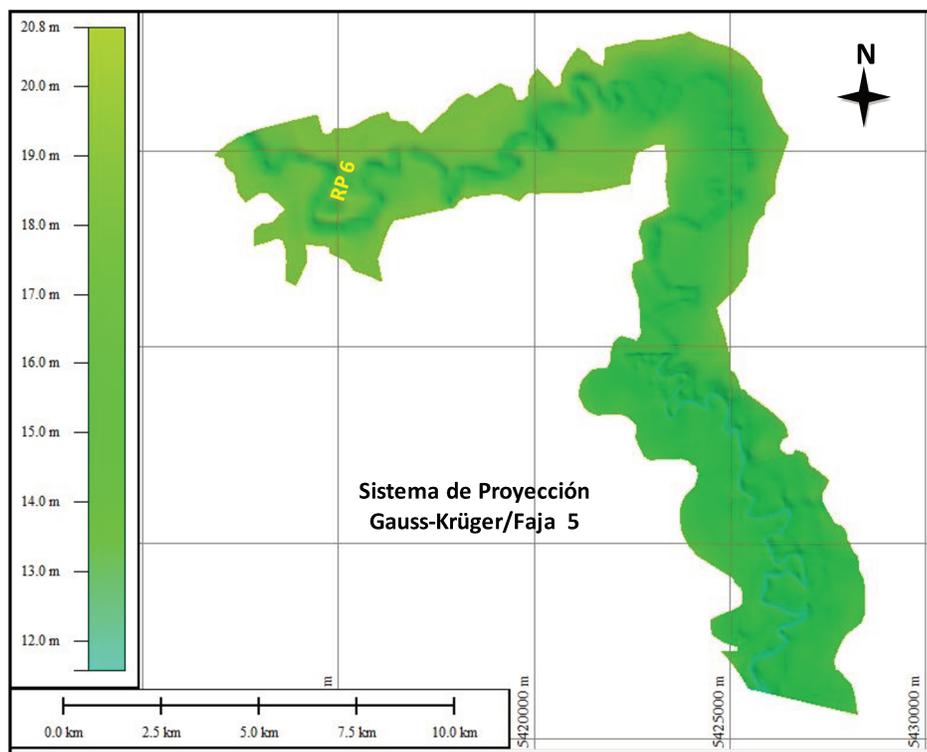


Figura 4.8: MDT-Perfiles elaborado a partir de perfiles transversales, puntos acotados y datos de la carta topográfica del IGN. Resolución 30m.

### 4.3 Implementación del modelo matemático HEC RAS 5.0

#### 4.3.1 Características de HEC RAS 5.0

En su nueva versión, el sistema HEC-RAS 5.0, mantiene todas las funciones de las versiones anteriores (1D) y además incorpora como novedad la capacidad de desarrollar cálculos bidimensionales y cálculos cuasi bidimensionales mediante la combinación de zonas 1D y zonas 2D. A continuación, se resumen las principales características de esta nueva versión, detalladas en el *Hydraulic Reference Manual Version 5.0* (USACE b, 2016):

- Resuelve las ecuaciones de Saint-Venant y Onda Difusiva para dos dimensiones mediante un esquema híbrido que combina diferencias finitas y volúmenes finitos implícitos.
- Incorpora un algoritmo para resolver el acoplamiento de modelos 1D y 2D. Este algoritmo permite la retroalimentación directa en cada paso de tiempo entre los

elementos de flujo 1D y 2D. La capacidad de ejecutar modelos combinados, permite al usuario trabajar en amplios sistemas de ríos, así por ejemplo, se puede usar el modelo 1D para simular el cauce de un río y el modelo 2D para representar las zonas adyacentes al mismo, en donde se requiere mayor detalle de los resultados hidráulicos.

- Permite modelar mallas estructuradas y no estructuradas de hasta 8 lados.
- Mejora en los tiempos de cálculo debido al aprovechamiento de varios procesadores en ordenadores de 32 y 64 bits.
- La interfaz de RAS Mapper permite la visualización detallada de los resultados. RAS Mapper es una herramienta implementada desde la versión 4.1 de HEC-RAS, y surge como una versión básica de SIG para mostrar principalmente los resultados en las planicies de inundación.

Dentro de las limitaciones actuales que posee el sistema, en el manual de referencia ([USACE a, 2016](#)), se listan las siguientes:

- Ofrece poca flexibilidad para añadir estructuras hidráulicas dentro de un área 2D
- No se puede ejecutar simulación de transportes de sedimentos producto de la erosión o deposición dentro de un área 2D.
- No se puede ejecutar simulación de calidad de agua dentro de un área 2D.
- No se puede conectar centrales de bombeo dentro de un área 2D.
- No se puede utilizar las capacidades de modelización de puentes de HEC-RAS dentro de un área 2D.

En cuanto a la resolución de las ecuaciones de continuidad y conservación de cantidad de movimiento, como se indicó anteriormente, HEC-RAS 5.0 permite realizar las simulaciones mediante las ecuaciones 2D de Saint Venant completas y de onda difusiva, de acuerdo a la elección del usuario. La opción por defecto utiliza las ecuaciones de onda difusiva. Estas ecuaciones permiten resolver el modelo con un menor tiempo de cálculo computacional y de manera más estable. Por otro lado, las ecuaciones de Saint Venant permiten resolver un rango mayor de problemas a pesar de que su resolución implica mayor cantidad de tiempo y tienen una menor estabilidad. A continuación, se presenta la ecuación de conservación de masa (4.1) y de cantidad de movimiento (4.2) y (4.3):

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} + q = 0 \quad (4.1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial x} + v_t \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - c_f u + f_v \quad (4.2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial y} + v_t \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - c_f v + f_u \quad (4.3)$$

Donde  $t$  es el tiempo,  $x$  e  $y$  son las direcciones principales en el sentido longitudinal y transversal, respectivamente;  $u$  y  $v$  son las componentes de las velocidades promediadas en la vertical en las direcciones  $x$  e  $y$  respectivamente;  $H$ , es la elevación por encima de un nivel de referencia;  $h$ , es el tirante de agua;  $q$ , representa un aporte de caudal externo;  $g$  es la aceleración de la gravedad;  $v_t$  es el coeficiente de viscosidad turbulenta;  $c_f$  es el coeficiente de fricción de fondo y  $f$  es un coeficiente para considerar el efecto de Coriolis.

A su vez el coeficiente de fricción se calcula a partir de la siguiente ecuación (4.4)

$$c_f = \frac{n^2 g |V|}{R^{4/3}} \quad (4.4)$$

Donde  $n$  es el coeficiente de rugosidad de Manning,  $g$  es la aceleración de la gravedad,  $|V|$  es la velocidad módulo y  $R$  el radio hidráulico.

Por su parte el coeficiente de viscosidad turbulenta se determina de acuerdo a la ecuación (4.5):

$$v_t = D h u_* \quad (4.5)$$

Donde  $D$  es un coeficiente empírico adimensional,  $u_*$  es la velocidad de corte y  $h$  la profundidad del flujo.

El coeficiente  $f$  se determina de acuerdo a la ecuación 4.6:

$$f = 2\omega \operatorname{sen} \varphi \quad (4.6)$$

Donde  $\omega$  es la velocidad angular sideral de la tierra y  $\varphi$  es la latitud terrestre.

El esquema numérico que se utiliza para la resolución de problemas en flujo no permanente es un esquema híbrido que combina diferencias finitas y volúmenes finitos implícitos. El algoritmo de solución implícita permite mayores intervalos de tiempo de computación que los métodos explícitos por lo que es más sencillo realizar los cálculos. La solución de volúmenes finitos tiene una mayor estabilidad y robustez que las tradicionales técnicas de diferencias finitas. Se destaca además que el algoritmo es muy estable en cualquier tipo de régimen, tanto en régimen supercrítico, subcrítico o mixto ([USACE a, 2016](#)). Los detalles de los métodos numéricos empleados para la resolución de las ecuaciones no constituyen el tema de la presente tesis. Los mismos pueden ser consultados en el capítulo 2 del *Hydraulic Reference Manual*, versión 5.0 ([USACE b, 2016](#)).

Resumidamente, las acciones que se deben llevar a cabo para ejecutar una implementación 2D en HEC RAS son las siguientes:

- Generación del modelo de terreno (*Terrain Model*) a partir de datos de elevación de una fuente externa.
- Determinación del área de simulación 2D y de la malla computacional.
- Determinación de los coeficientes de rugosidad.
- Determinación de las condiciones de contorno y condiciones iniciales.
- Selección del método de solución y ejecución de la simulación.

En los capítulos siguientes, se describe el desarrollo de cada una de estas acciones.

### **4.3.2 Creación de los Modelos de Terreno en HEC RAS 5.0**

Para realizar una simulación 2D en HEC RAS, es necesario como primer paso confeccionar el modelo de terreno, que posteriormente será asociado con una determinada malla para calcular las relaciones geométricas de esta última.

Los modelos de terreno son elaborados con la herramienta RAS Mapper, que permite la importación de archivos tipo *raster* en una gran cantidad de formatos diferentes, que contengan datos de coordenadas y elevación del terreno. Una vez importado el archivo de origen, RAS

Mapper convierte el mismo al formato GeoTIFF (\*.tif) que permite una manera más eficiente de almacenamiento de los datos. Una vez creado el modelo de terreno, el mismo puede ser visualizado y editado en la ventana de trabajo de RAS Mapper. En la Figura 4.9 se muestra el proceso de creación del modelo de terreno:

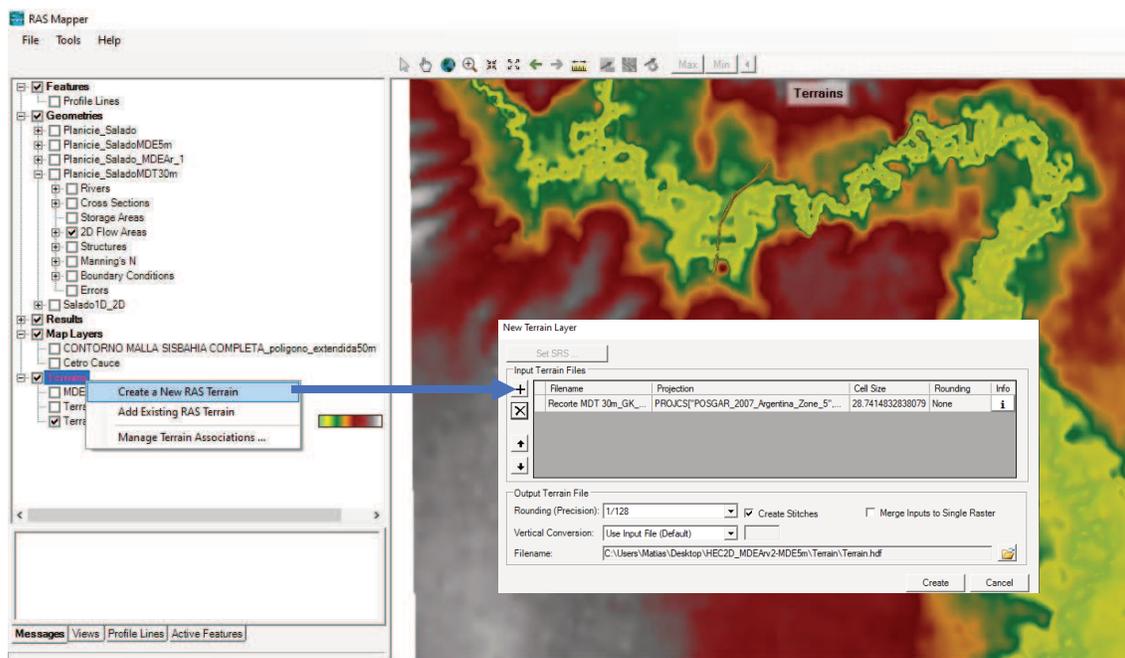


Figura 4.9: Creación del modelo de terreno en la ventana de trabajo de RAS Mapper.

En el presente trabajo, se utilizaron como archivos de entrada los cuatro modelos digitales de elevación mencionados en el punto 4.2.3 (MDE-ArV2.0, MDE-5m, MDT-30 y MDT-Perfiles). En la Figura 4.10 se muestran los 4 modelos generados:

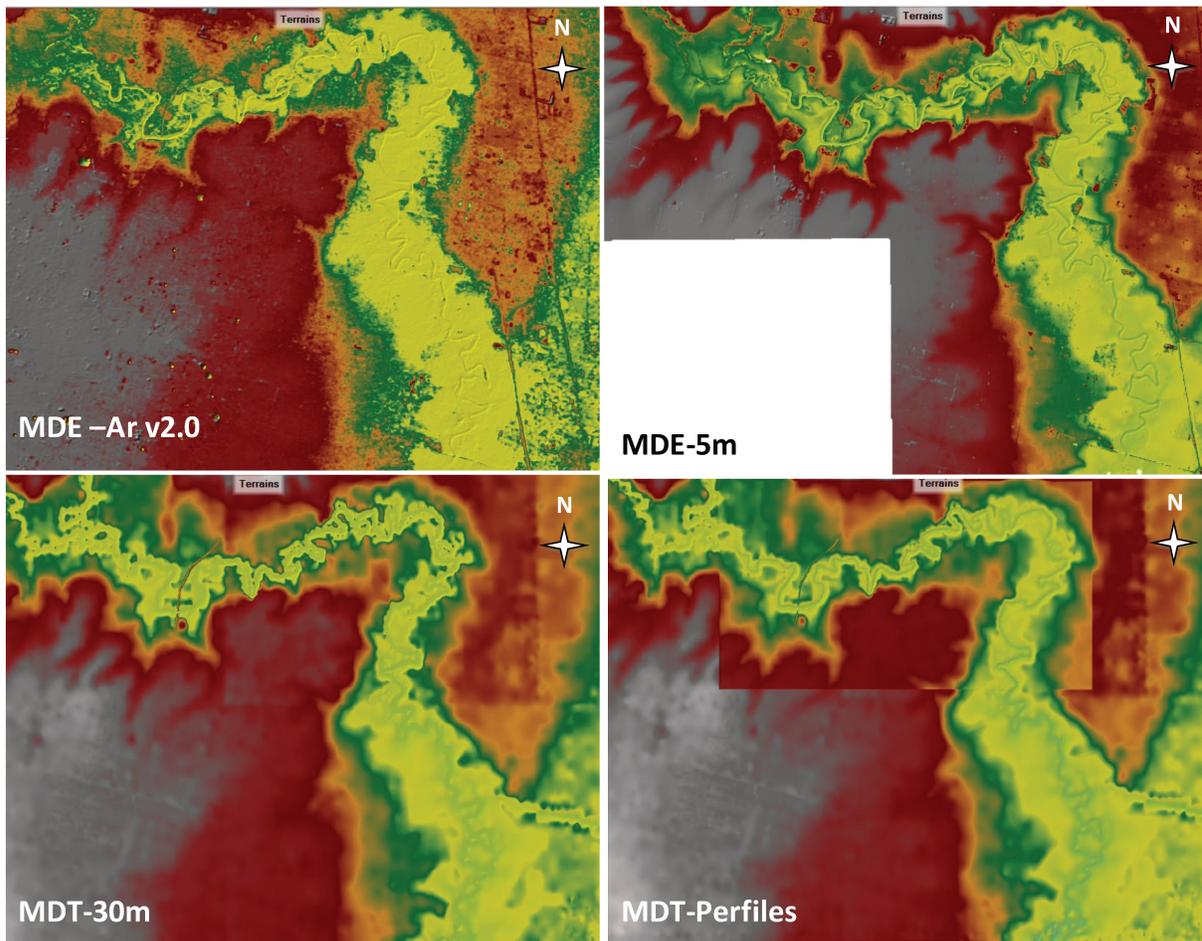


Figura 4.10: Modelos de terreno generados en RAS Mapper.

### 4.3.3 Área de simulación 2D y generación de la malla computacional

El primero paso para confeccionar la malla computacional es delimitar el área de simulación. Para tal fin, se utilizaron los contornos del dominio de simulación determinados en el punto 4.1, y se delimitó el dominio de modelación tal como se muestra en la Figura 4.11:

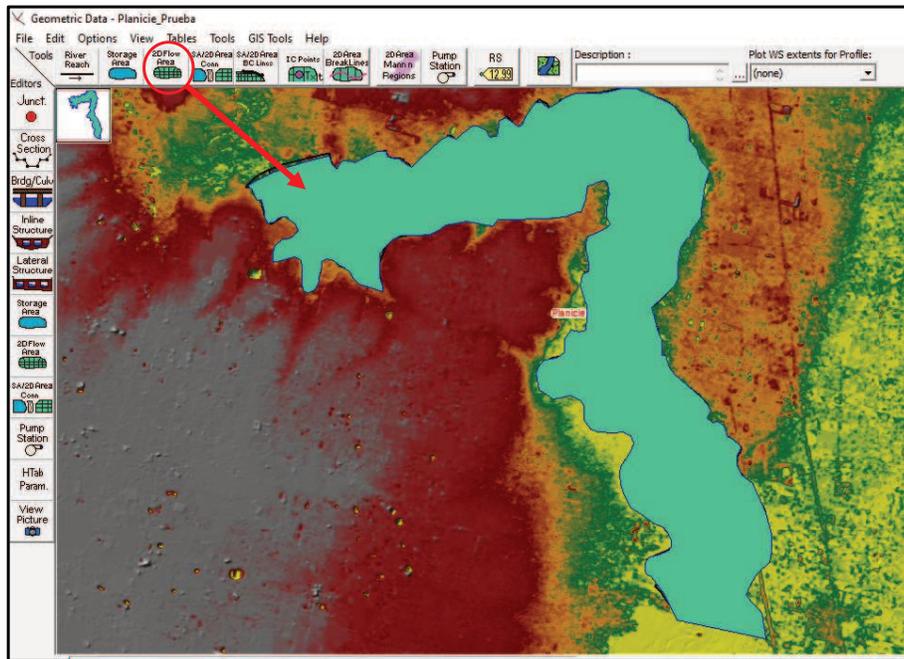


Figura 4.11: Delimitación del área de simulación 2D en HEC RAS.

HEC-RAS 5.0 permite trabajar con mallas estructuradas y no estructuradas. Las celdas computacionales pueden ser triángulos, cuadrados, rectángulos o polígonos de hasta 8 lados como máximo. La malla computacional no necesita ser ortogonal, sin embargo, si fuera así la discretización numérica es más simplificada y eficiente. Cada celda que compone una malla tiene las siguientes propiedades: Centro de Celda, Contorno de Celda y Puntos en Contorno de Celda (ver Figura 4.12):

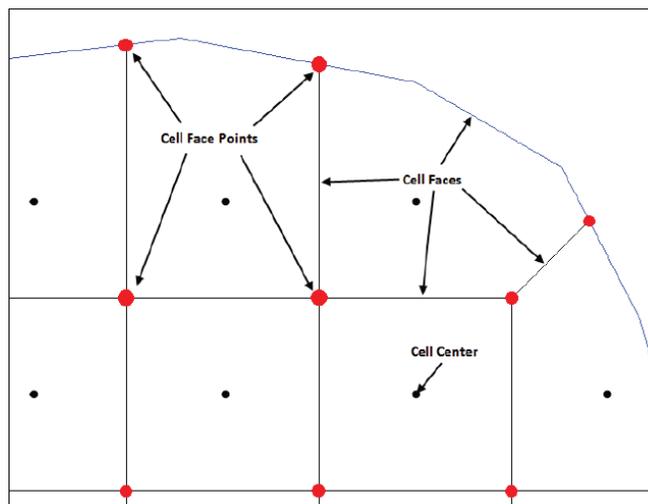


Figura 4.12: Terminología de los elementos de la malla computacional en HEC RAS. Fuente: Hydraulic Reference Manual Version 5.0 (USACE a, 2016).

El proceso de mallado computacional se realiza siguiendo la técnica de triangulación de Delaunay y luego construyendo un diagrama de Voronoi (USACE a, 2016). El proceso es análogo a cuando se construye el polígono de Thiessen para atribuir un área de cuenca a un pluviómetro específico. Para proceder a la elaboración de la malla, se debe realizar la edición del área de simulación 2D, indicando la distancia requerida entre los centros de las celdas,  $D_x$  y  $D_y$  (ver Figura 4.13). Estos tamaños serán respetados en toda la malla, excepto en los contornos y en los alrededores de la “líneas de quiebre” (“*break lines*”, en inglés, cuyo uso para la edición de la malla se explica más adelante). En esos sectores, las celdas generadas tendrán un área nominal similar al tamaño de la celda tipo seleccionada, pero serán de forma irregular.

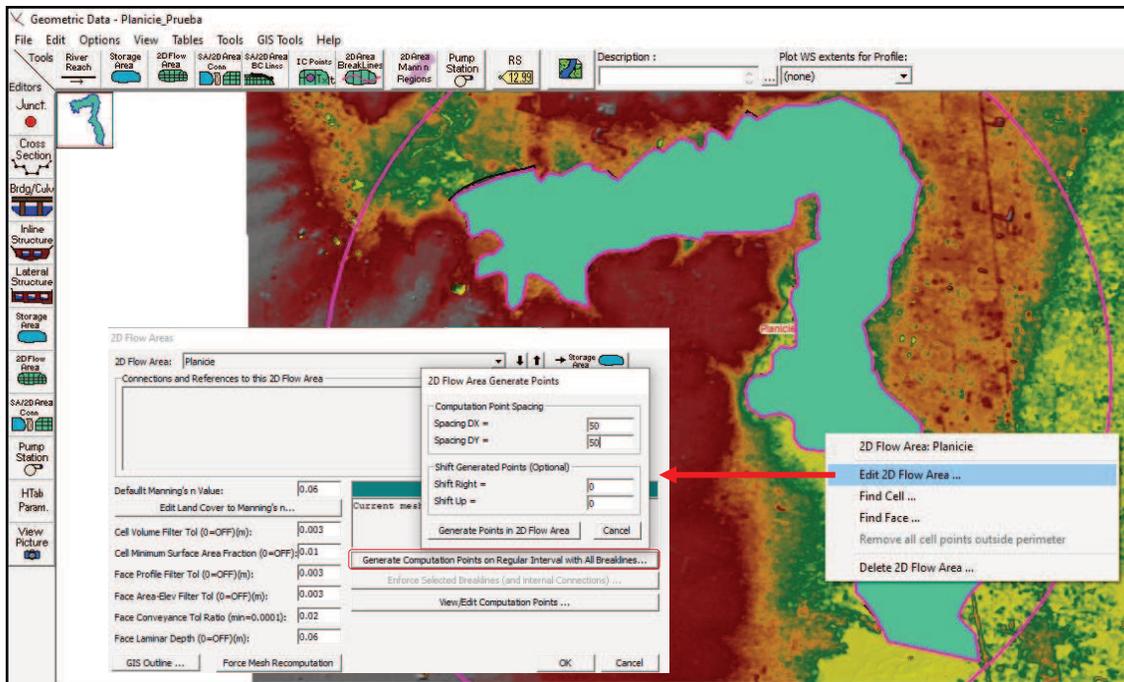


Figura 4.13: Comandos para la elaboración de la malla en HEC RAS.

Para mejorar el detalle en zonas donde se considere necesario, se puede utilizar la herramienta de creación de “*break lines*”, alrededor de las cuales se puede definir un tamaño de celdas diferentes respecto a las celdas de la malla. Esta herramienta, se puede utilizar por ejemplo para definir el cauce del río, albardones o terraplenes. Las caras de las celdas generadas alrededor de las “*break lines*” estarán alineadas en la dirección de la misma.

Mediante la ejecución del comando de mallado, cada celda y contorno de celda es pre-procesada con la finalidad de calcular relaciones de propiedades geométricas e hidráulicas a partir de los datos del modelo de terreno subyacente generado a partir de los MDE. Básicamente el pre-proceso calcula una relación de Elevación-Volumen para cada celda; y para cada contorno de celda calcula la relación Elevación-Perímetro Mojado, Elevación-Área, Elevación-Rugosidad, y Elevación-Transporte. En la Figura 4.14 se muestra un ejemplo de las relaciones calculadas a partir del pre procesamiento de las celdas:

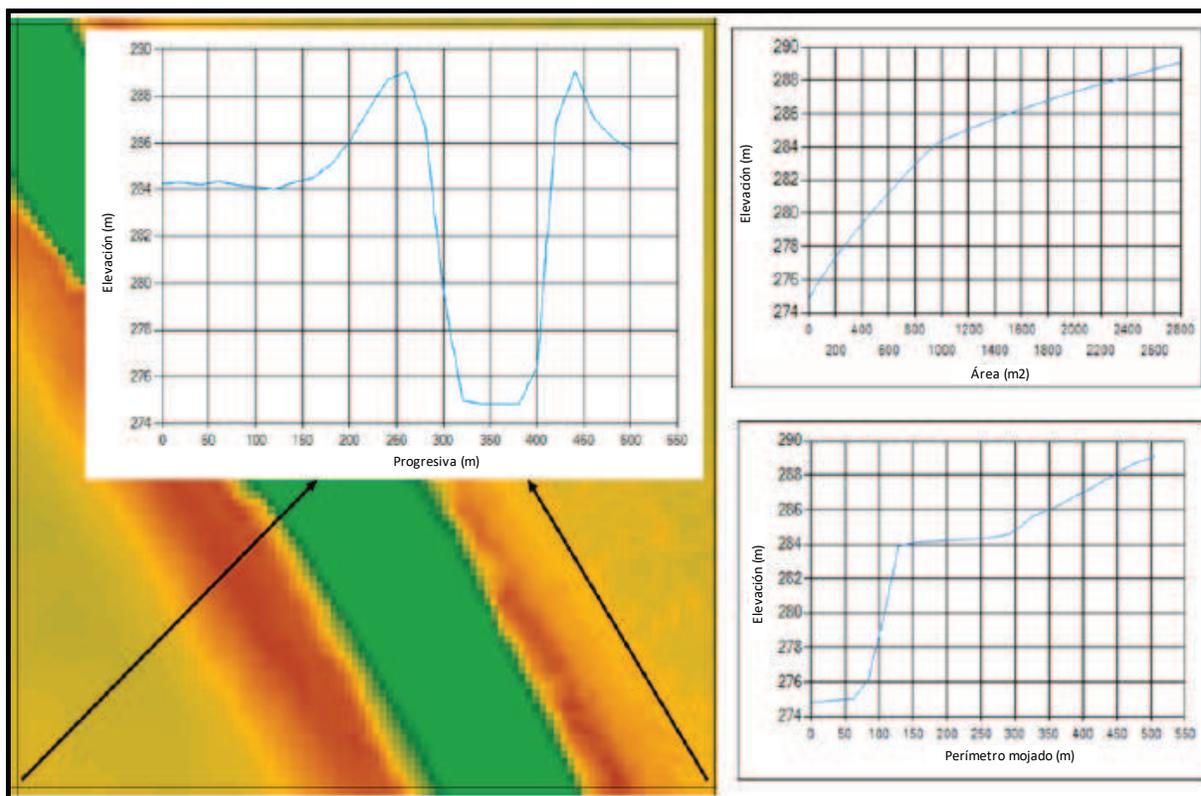


Figura 4.14: Ejemplo de relaciones calculadas en los contornos de celdas. Fuente: Hydraulic Reference Manual Version 5.0 (USACE a, 2016).

Como se muestra en esta figura, cada contorno de la celda es como una sección transversal detallada. Entonces el flujo de agua de entrada y salida y el almacenamiento de una celda está controlada por las características de estas propiedades de los contornos de las celdas y la relación elevación-volumen de celda. Estas relaciones que crea el programa permiten al usuario crear celdas computacionales de mayor tamaño conservando los detalles del terreno; lo cual resulta ventajoso porque hace más rápido los tiempos de cálculo. Adicionalmente, para un determinado tamaño de celda, se generan resultados con mayor detalle que en otros modelos que consideran

un nivel de terreno constante para toda la celda y los lados de la misma (USACE a, 2016). La elección del tamaño de celda se basa en el nivel de detalle que se quiere obtener.

En el presente trabajo, se adoptaron diferentes resoluciones de malla, a saber: 30m x 30m, 50m x 50m, 80m x 80m y 150m x 150m, y en todos los casos se utilizó un *break line* para aumentar el detalle en el cauce, definiendo un tamaño de 20 metros. En la Tabla 4.2 se muestran las características de las mallas utilizadas:

Resolución	n° de celdas	Tamaño medio de celda (m <sup>2</sup> )
30m x 30m	102524	858.89
50m x 50m	40443	2177.31
80m x 80m	16108	5466.67
150m x 150m	5702	15443.19

Tabla 4.2: Características de las mallas utilizadas en HEC-RAS 5.0.

En la Figura 4.15 se muestra la malla de 50m x 50m, y un detalle en una curva del cauce.

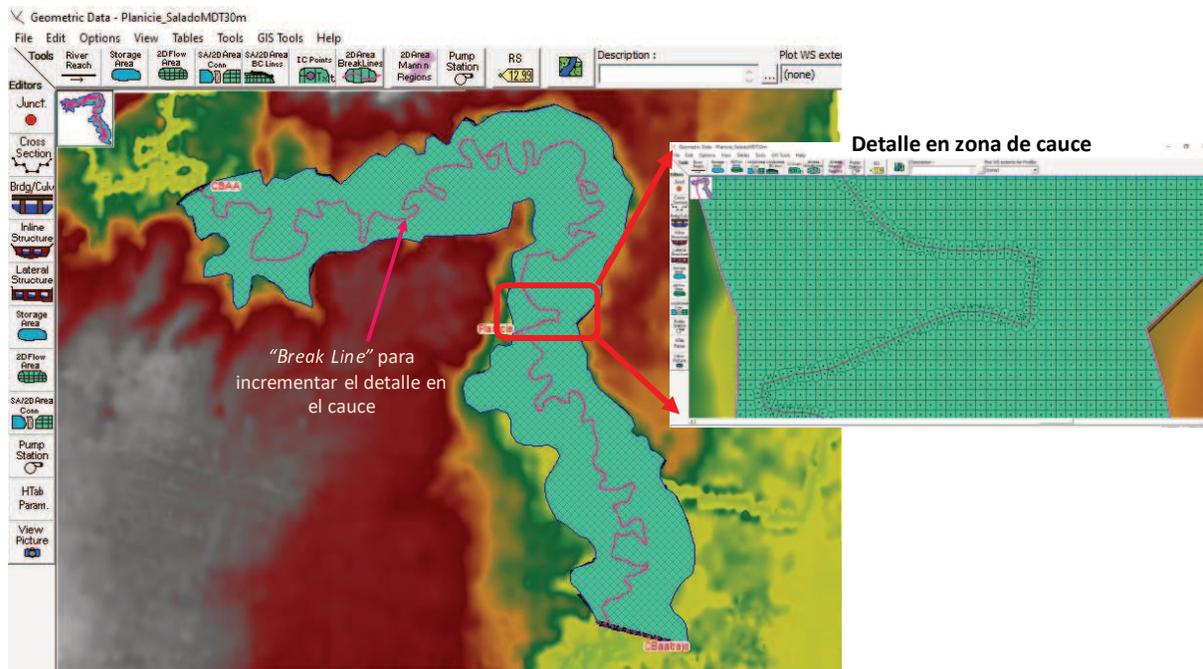


Figura 4.15: Malla computacional generada en HEC-RAS. Resolución 50m x 50m.

#### 4.3.4 Definición del coeficiente de rugosidad en HEC RAS 5.0

HEC RAS 5.0 permite asignar un valor constante de  $n$  de Manning para todo el dominio o bien asignar valores variables para cada celda. Para esta última opción, es necesario contar con un mapa de cobertura de suelo, y luego en Ras Mapper se debe asignar a cada cobertura un valor de  $n$  de Manning. Posteriormente, el mapa de rugosidad variable, puede ser asociado a cada geometría que se genere.

En el área de estudio, la clasificación de la cobertura de suelo fue realizada por [Bodoira et al. \(2009\)](#) a partir de mediciones realizadas en trabajos de campo, sobre parcelas de muestreo distribuidas en la planicie de inundación. A partir de una imagen satelital obtenida en fecha cercana a los trabajos de campo, se realizó una clasificación supervisada y se determinó una vegetación y una altura representativa de la misma a cada pixel de la imagen (ver Figura 4.16).

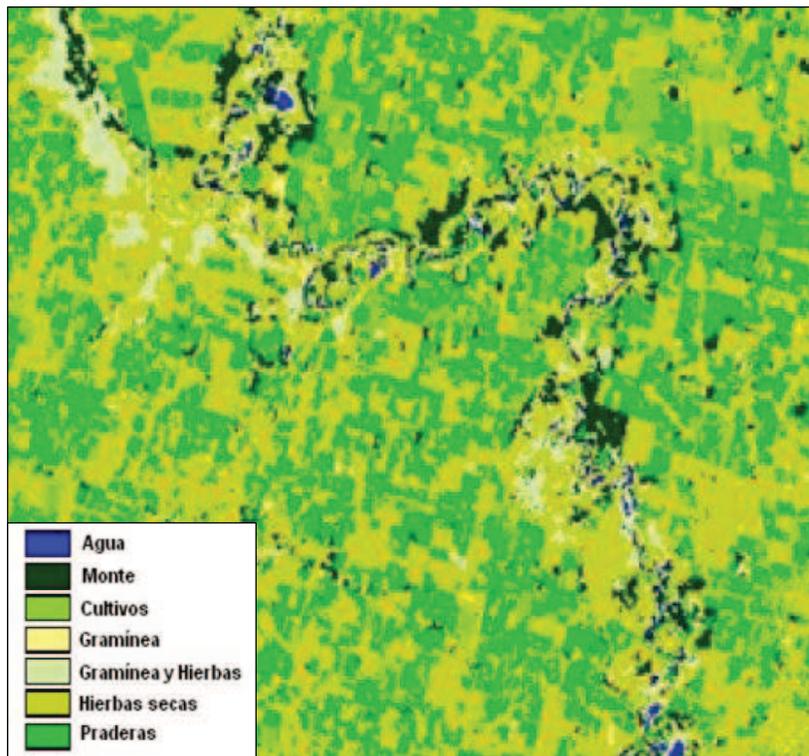


Figura 4.16: Mapa de cobertura de suelo. Extraído de [Bodoira et al. \(2009\)](#).

Este mapa asociado a una altura de vegetación para cada cobertura, permitió a [Imhoff y Trento \(2011\)](#) realizar el mapa de rugosidad que se muestra en la Figura 4.17, en donde se calculó mediante la fórmula de Cowan un valor de  $n$  de Manning para cada celda.

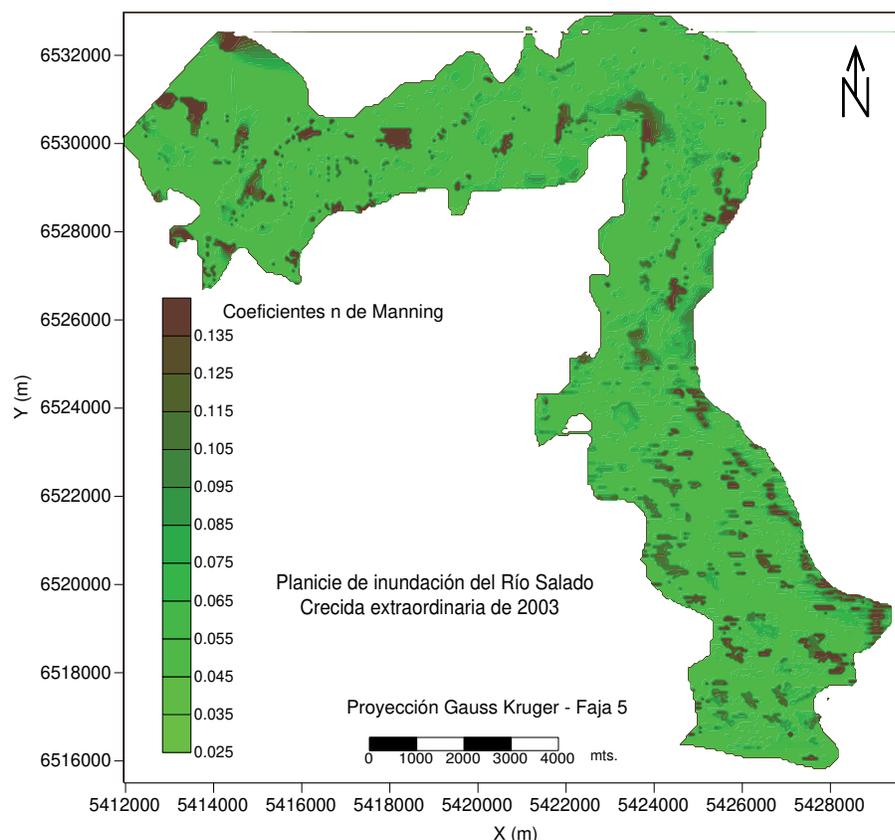


Figura 4.17: Carta temática de coeficiente de rugosidad  $n$  de Manning para el dominio de modelación, extraída de [Imhoff y Trento, 2011](#).

El mismo, contiene un valor de  $n$  de Manning variable para cada celda de 30m x 30m, por lo que fue necesario realizar una reclasificación por intervalos mediante un sistema de información geográfica, para agrupar las celdas de acuerdo a las 7 clases (con su correspondiente valor de  $n$  de Manning) pre establecidas. Así, por ejemplo, a cada celda que contenía un valor de  $n$  entre 0.035-0.042 se le asignó el valor de  $n=0.04$ , correspondiente a la clase “suelo desnudo”. En la Tabla 4.3 se muestran los valores de  $n$  asociados a cada cobertura definida.

Clase	Cobertura	$n$ (sm <sup>-1/3</sup> )
1	Cauce	0.030
2	Suelo desnudo	0.040
3	Gramínea	0.045
4	Pasturas	0.050
5	Cultivos	0.060
6	Praderas	0.080
7	Monte	0.100

Tabla 4.3: Valores de  $n$  de Manning asociados a cada clase.

Como resultado se obtuvo un mapa de cobertura de  $n$  de Manning (ver Figura 4.18) que se asoció a cada una de las 4 geometrías generadas en HEC RAS. Estos fueron los valores utilizados como base para la calibración del modelo hidrodinámico.

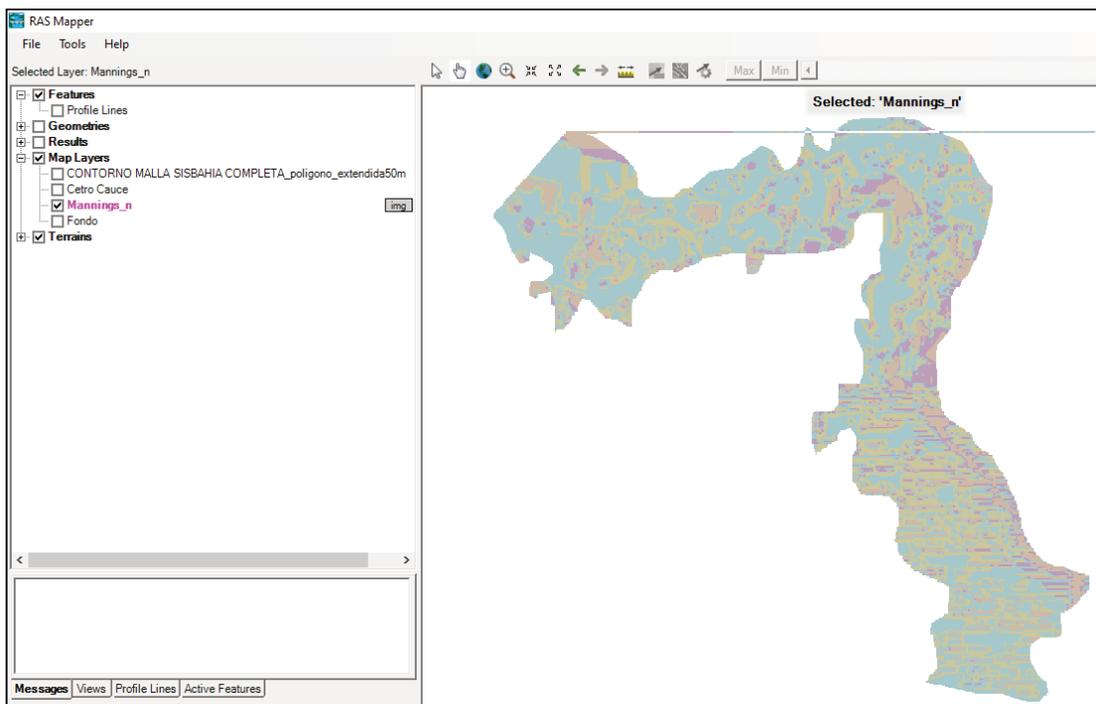


Figura 4.18: Mapa de cobertura de  $n$  de Manning utilizado en HEC RAS.

#### 4.3.5 Condiciones y método de simulación en HEC RAS 5.0

Para ejecutar las simulaciones HEC-RAS 5.0 permite al usuario optar entre las ecuaciones 2D de Saint-Venant completas (onda dinámica) y las ecuaciones de onda difusiva (es decir, despreciando los términos inerciales en las ecuaciones de conservación de *momentum*). En este trabajo se realizaron simulaciones preliminares para comparar los resultados, y se determinó que los niveles de agua calculados con las ecuaciones completas fueron en general unos 0.13-0.22m mayores que los niveles calculados con las ecuaciones de la onda difusiva.

Teniendo en cuenta que en el presente trabajo se simuló una onda de crecida, donde adicionalmente se generó un efecto de embalse debido a la existencia del terraplén de la RP 6, y que la onda dinámica se considera como el modelo de tránsito distribuido más completo, ya que tienen en cuenta todas las fuerzas que interactúan en el tránsito de la crecida, se optó por seleccionar en todas las simulaciones el método de solución de las ecuaciones completas de Saint-Venant.

Otro parámetro importante a establecer, es el intervalo de tiempo de cálculo ( $\Delta t$ ) para realizar la simulación, el cual está relacionado con el tamaño de celda. De acuerdo al manual de HEC RAS, para que no se generen problemas de inestabilidad numérica este intervalo debe calcularse a partir del número de Courant. Según se utilicen las ecuaciones completas de Saint Venant o la ecuación de la onda difusiva, las siguientes condiciones se han de satisfacer para que la simulación sea estable:

Para la ecuación de la onda difusiva:

$$C = \frac{V \Delta t}{\Delta x} \leq 2.0 \text{ (con un valor máximo de } C = 5.0)$$

Donde:

*C*: Número de Courant

*V*: Velocidad del flujo [m/s]

$\Delta t$ : Intervalo de tiempo de cálculo [s]

$\Delta x$ : Tamaño de celda promedio [m]

Para la ecuación de la onda dinámica:

$$C = \frac{V \Delta t}{\Delta x} \leq 1.0 \text{ (con un valor máximo de } C = 3.0)$$

En el presente trabajo, en todas las simulaciones realizadas para representar la crecida del año 2003 se adoptó un  $\Delta t = 5$  segundos. Con una velocidad de referencia de 2 m/s y para la malla de menor tamaño (30m), se obtiene un valor de  $C= 0.5$ , dentro del rango recomendado.

## **4.4 Implementación del modelo matemático SisBaHiA**

### **4.4.1 Características de SisBaHiA**

SisBaHiA, acrónimo de Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental (Rosman, 2008) es un sistema de modelos computacionales desarrollado en el Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, de la Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ) con el cual se puede representar tanto el flujo o movimiento del agua como el transporte de escalares en cuerpos naturales de agua. Los modelos para predecir el movimiento del agua se denominan modelos hidrodinámicos y los modelos de transporte de escalares (calidad) son los modelos de advección-dispersión, que pueden ser eulerianos o lagrangeanos.

La interfaz de SisBaHiA produce mapas y gráficos de resultados directa y automáticamente con softwares específicos para la visualización de mapas de isolíneas, vectores y gráficos, que son tratados como subrutinas por SisBaHiA.

En la presente tesis, se utilizó el módulo hidrodinámico para representar el paso de la crecida. El cálculo de la circulación hidrodinámica en un flujo bidimensional presenta tres incógnitas a resolver: las velocidades verticales medias ( $U$  y  $V$  en las direcciones  $x$  e  $y$ , respectivamente) y el nivel de la superficie libre. Para solucionar estas incógnitas el modelo matemático de SisBaHiA resuelve la ecuación de conservación de masa integrada a lo largo de la vertical (4.7), y las dos ecuaciones de conservación de cantidad de movimiento con la aproximación de aguas someras, para escurrimientos homogéneos integrados en la vertical, ecuaciones (4.8) y (4.9) respectivamente:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial U(H + \zeta)}{\partial x} + \frac{\partial V(H + \zeta)}{\partial y} = 0 \quad (4.7)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{1}{\rho_o(H+\zeta)} \left( \frac{\partial((H+\zeta)\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial((H+\zeta)\tau_{xy})}{\partial y} + (\tau_x^S + \tau_x^B) \right) \quad (4.8)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{1}{\rho_o(H+\zeta)} \left( \frac{\partial((H+\zeta)\tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial((H+\zeta)\tau_{yy})}{\partial y} + (\tau_y^S + \tau_y^B) \right) \quad (4.9)$$

Donde  $t$  es el tiempo,  $x$  e  $y$  son las direcciones principales en el sentido longitudinal y transversal, respectivamente;  $U$  y  $V$  son las componentes de las velocidades promediadas en la vertical en las direcciones  $x$  e  $y$  respectivamente;  $\zeta(x,y,t)$ , es la elevación por encima de un nivel de referencia,  $H(x,y)$  representa la batimetría relativa a la cota de un plano horizontal de referencia;  $g$  es la aceleración de la gravedad;  $\rho_o$  es la densidad del agua;  $\tau_{xx}$ ,  $\tau_{yy}$  y  $\tau_{xy}$  son las tensiones turbulentas promediadas en la vertical;  $\tau_x^B$  y  $\tau_y^B$  son las tensiones resistivas en el lecho;  $\tau_x^S$  y  $\tau_y^S$  las tensiones resistivas en la superficie del agua, todas ellas en las direcciones indicadas por los subíndices. El tratamiento de la turbulencia está basado en la técnica de filtrado ([Rosman, 1987](#)) y es auto-ajustable en la escala de sub-grilla.

#### 4.4.2 Confección de la malla de elementos finitos en SisBaHiA

Al trabajar con elementos finitos, se debe definir una malla que representa el grado de aproximación del modelo con la realidad. Así, cuanto más densa sea la malla, más se acercará a la realidad, pero demandará mayor tiempo de resolución. Además de la cantidad de elementos que componen la malla, otro parámetro importante es la geometría de los mismos. En general los elementos triangulares se adaptan mejor a las zonas de curvas que los cuadrangulares, pero aumentan los tiempos de simulación. Independientemente de la geometría adoptada, es recomendable que la relación entre las dimensiones no sea muy desproporcionada, es decir que el aspecto de ratio sea lo más próximo posible a 1 (ver Figura 4.19).



Figura 4.19: Geometría de elementos recomendables (izquierda) y no recomendables (derecha) en una malla de elementos finitos. Fuente: Manual de SisBaHiA.

En SisBaHiA se pueden utilizar mallas con elementos finitos tanto cuadrangulares como triangulares y además acepta mallas generadas en el programa Argus One, de Argus Holding Ltda. Este programa lee el archivo que indica los contornos a ser modelados y, a partir de estos contornos, genera mallas de un determinado tamaño y geometría de elemento. No obstante, para el presente trabajo, debido a la necesidad de representar dos escalas espaciales bien diferentes como son la del cauce y la planicie, la malla se confeccionó de manera manual, dibujando uno por uno cada uno de elementos que la componen.

Se utilizaron elementos triangulares de 6 nodos cada uno en las zonas de las curvas, y elementos cuadrangulares de 9 nodos cada uno en el cauce y en las zonas rectas de la planicie. Para el cauce se emplearon 4 elementos, de un ancho promedio de 20 m, de modo de contar con 9 nodos de cálculo en la dirección transversal a la corriente. En la planicie se utilizaron tamaños de elementos más grandes que en el cauce (entre 60 y 150 m).

#### 4.4.3 Batimetría del dominio de la simulación

El modelado digital del terreno se compone de la malla, donde se definen las coordenadas  $(x, y)$  de los nodos, y además es necesario determinar para cada nodo la posición del fondo, dada por la elevación batimétrica  $(h)$ , definida como la elevación de elevación negativa  $(z)$ . De esta manera, la posición inferior de cada nodo de la malla viene dada por  $(x, y, h)$ , donde  $h = -z$ .

Se debe contar con información de base de la topografía del terreno (MDE de la planicie y batimetría del cauce) a los fines de asignar un valor de  $h$  a cada uno de los nodos. Para ello, SisBaHiA permite utilizar los siguientes métodos de interpolación: Kriging, vecino más próximo, triangulación linear, distancia inversa cuadrática, vecino natural y curvatura mínima. La interpolación se efectuó a partir de los datos de base  $x,y,z$  extraídos de los MDE generados en el punto 4.2.

Se utilizaron todos los métodos de interpolación mencionados, encontrándose diferencias insignificantes (menores al 5%) entre todos ellos, excepto para el método de curvatura mínima, donde se subestiman considerablemente las cotas interpoladas respecto al archivo de origen. Finalmente se adoptó la interpolación con el método de Kriging para todas las implementaciones, con un radio de búsqueda de 30m.

Cabe aclarar que no se tuvieron en cuenta las formas de fondo en el armado de la malla ya que se determinó, en base a información batimétrica disponible, que las mismas no presentan un patrón bidimensional, lo cual dificulta su representación mediante una malla de dimensiones como la aplicada en el presente trabajo.

#### 4.4.4 Determinación del coeficiente de rugosidad en SisBaHiA

Para determinar la rugosidad superficial de la planicie de inundación se utilizó al igual que en HEC-RAS el trabajo antecedente de [Imhoff y Trento, \(2011\)](#), donde se elaboró una carta temática del coeficiente de rugosidad  $n$  de Manning mostrado en la Figura 4.17.

Para relacionar el coeficiente  $n$  de Manning (utilizado en el modelo HEC-RAS) con el coeficiente  $k$  (altura de rugosidad, utilizado en el modelo SisBaHiA), se partió de la ecuación (4.10) para el cálculo del coeficiente de Chezy ([Abbot and Basco, 1989](#)):

$$C_h = 18 \log_{10} \left( \frac{6H}{\varepsilon} \right) = \frac{H^{1/6}}{n} \quad (4.10)$$

Siendo  $H(m)$ = altura de agua en;  $n$  ( $\text{sm}^{-1/3}$ ) el coeficiente de rugosidad de Manning y  $\varepsilon(m) = k(m)$ : altura de rugosidad total.

De la ecuación 4.10 se obtienen las ecuaciones 4.11 y 4.12:

$$n = \frac{H^{1/6}}{18 \log_{10} \left( \frac{6H}{\varepsilon} \right)} \quad (4.11)$$

$$\varepsilon = k = \frac{6H}{10^{18n}} \quad (4.12)$$

Con esta relación se calculan los valores de rugosidad, para cada elemento del dominio de modelación, obteniendo el mapa de rugosidad que se muestra en la Figura 4.20:

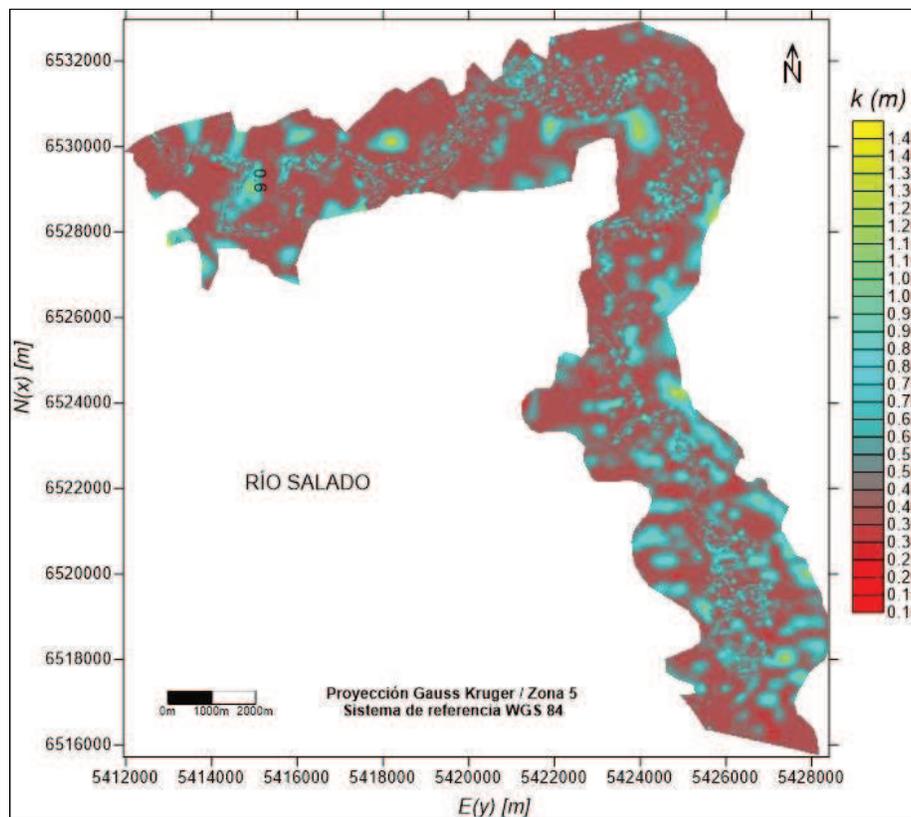


Figura 4.20: Mapa de coeficiente de rugosidad k utilizado en SisBaHiA.

#### 4.4.5 Condiciones para la simulación

Todas las simulaciones se ejecutaron en régimen permanente para el caudal pico de la crecida, de  $4000 \text{ m}^3/\text{s}$ . El tiempo de simulación establecido fue de 18 hs, tiempo para el cual se verificó la estabilidad de los resultados, con un intervalo de tiempo de cálculo  $\Delta t = 1$  segundo.

## 4.5 Condiciones iniciales y de borde utilizadas en los modelos

Para el caso de SisBaHiA, las condiciones iniciales que se deben definir para comenzar la simulación, refieren a valores de la elevación de la superficie libre y los componentes de la velocidad en las dos direcciones para todos los nodos de la malla. En el presente trabajo, todas las simulaciones se iniciaron con nivel inicial = 19.10m, y velocidades nulas. En HEC RAS 5.0 se debe indicar un valor de elevación inicial de la superficie de agua para toda el área 2D, y puede indicarse además un caudal inicial. En este caso, las simulaciones si iniciaron “en frío”, es decir con nivel inicial 0m y caudal nulo.

En cuanto a las condiciones de borde, HEC RAS 5.0 permite realizar simulaciones 2D solamente en flujo no permanente, por lo tanto, se requiere indicar como condición de borde aguas arriba (donde el flujo ingresa al área 2D) un hidrograma o bien un limnigrama, mientras que aguas abajo, donde el flujo sale del área 2D, se debe ingresar una curva Altura-Caudal o bien la pendiente para el tirante normal. En caso de utilizar un hidrograma aguas arriba se debe indicar además una pendiente de energía que será utilizada para calcular el tirante normal en cada celda donde se introdujo la condición de borde. Luego, basado en este tirante normal calculado y en la capacidad conducción de cada celda, se computa la distribución del caudal de ingreso a lo largo de toda la sección donde se introdujo la condición de borde.

Para el presente trabajo se contó con un hidrograma (ver Figura 4.21) y una curva altura-caudal (ver Figura 4.22) obtenidos de [Ferreira \(2005\)](#), que corresponden a la sección de RP70 (límite inferior del dominio de simulación del presente trabajo). En las simulaciones realizadas con HEC-RAS se introdujo aguas arriba un tramo de dicho hidrograma que va desde 3 días anteriores a 3 días posteriores al pico, mientras que la curva altura-caudal fue utilizada como condición de borde aguas abajo.

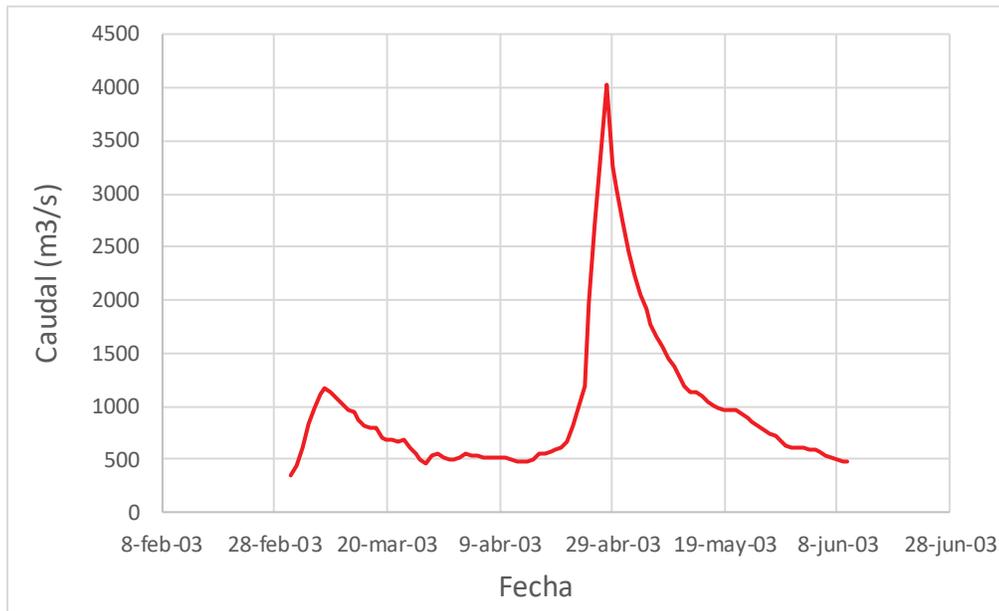


Figura 4.21: Hidrograma en la sección RP 70. Fuente: [Ferreira \(2005\)](#).

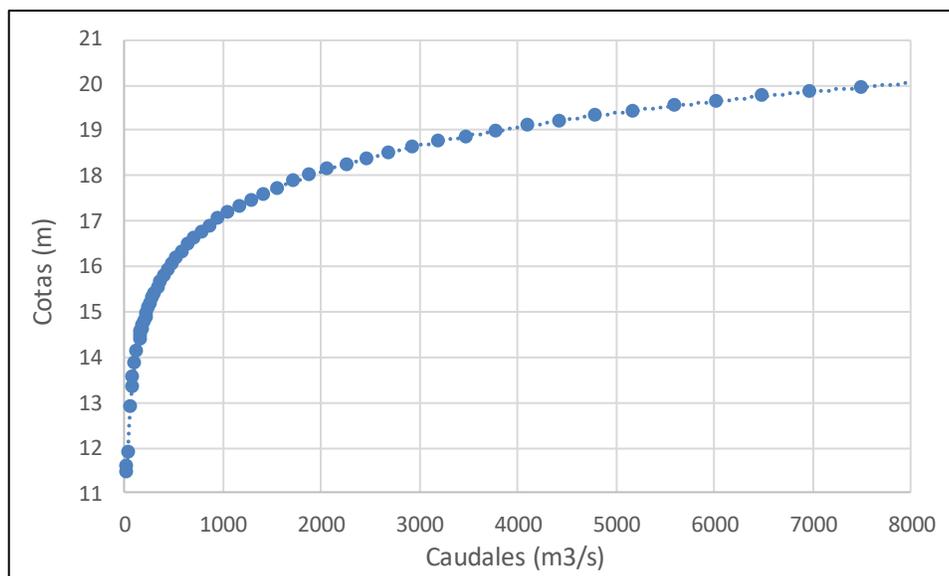


Figura 4.22: Curva Altura - Caudal en la sección RP 70. Fuente: [Ferreira \(2005\)](#).

Las simulaciones con SisBaHiA se realizaron en régimen estacionario, por lo tanto, fue necesario definir como condición de borde aguas arriba un caudal de ingreso, mientras que aguas abajo se debe especificar una cota de la superficie de agua. Tomando como referencia los datos de [Ferreira \(2005\)](#), se fijaron como condiciones de borde una cota de superficie libre de agua = 19.10m aguas abajo, y un caudal de 4000 m<sup>3</sup>/s aguas arriba.

Para distribuir el caudal a lo largo de la sección de ingreso, en SisBaHiA se deben ingresar datos de caudal nodal, y la integral de los caudales nodales a lo largo de la sección debe ser igual al caudal total. En la Figura 4.23 se muestra una imagen extraída del manual de SisBaHiA donde se esquematiza la manera de ingresar los caudales en la frontera de aguas arriba.

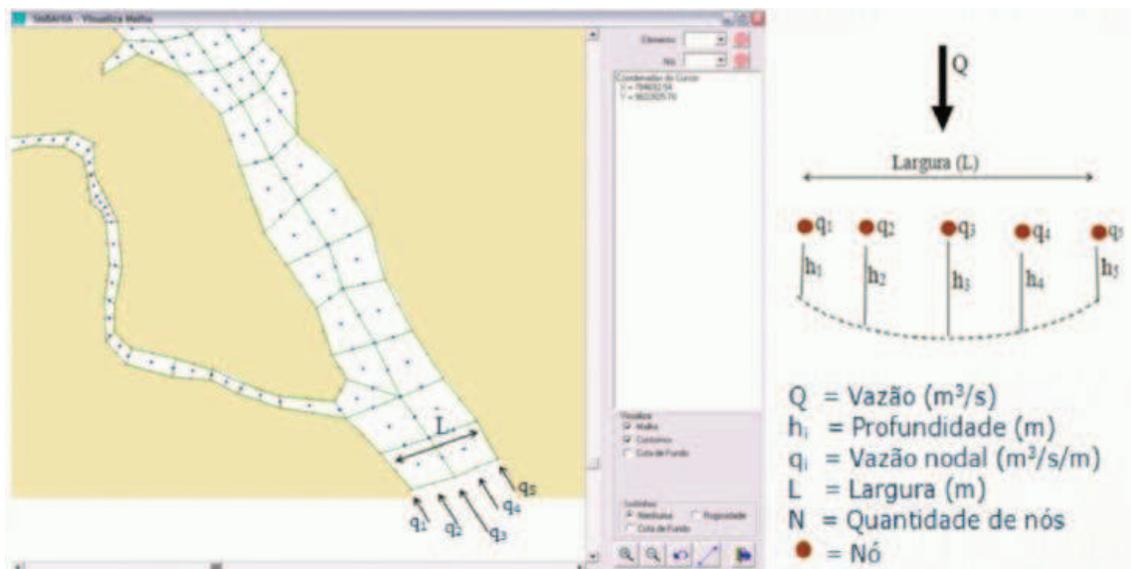


Figura 4.23: Metodología para ingresar los caudales en la frontera aguas arriba. Fuente: Referência Técnica do SisBaHiA (Rosman, 2008)

El caudal pico fue distribuido a lo ancho de la sección de entrada de modo tal que el caudal ingresado por el cauce fue equivalente al 20 % del caudal total y el ingresado por planicie equivalente al 80 % del total. Esta distribución se adoptó a partir de cálculos previos realizados con modelos 1D (Imhoff y Trento, 2012).

#### 4.6 Información disponible para calibrar el modelo

Se contó con información brindada por las autoridades de la Municipalidad de Esperanza para la calibración del modelo. Los datos recopilados fueron los siguientes:

- Puntos acotados en casas y puestos rurales cercanos al cauce principal. En su mayoría se relevaron marcas dejadas por el nivel máximo de la crecida. En la Figura 4.24 se muestran los puntos donde se contó con información. En la Tabla 4.4 se presentan las características de los puntos acotados. Cabe destacar que estas determinaciones pueden tener errores de algunos centímetros asociados a las dificultades para identificar el

máximo nivel del agua días después del paso del pico, sobre todo en los puntos N3 a N6 de difícil acceso por caminos anegados.

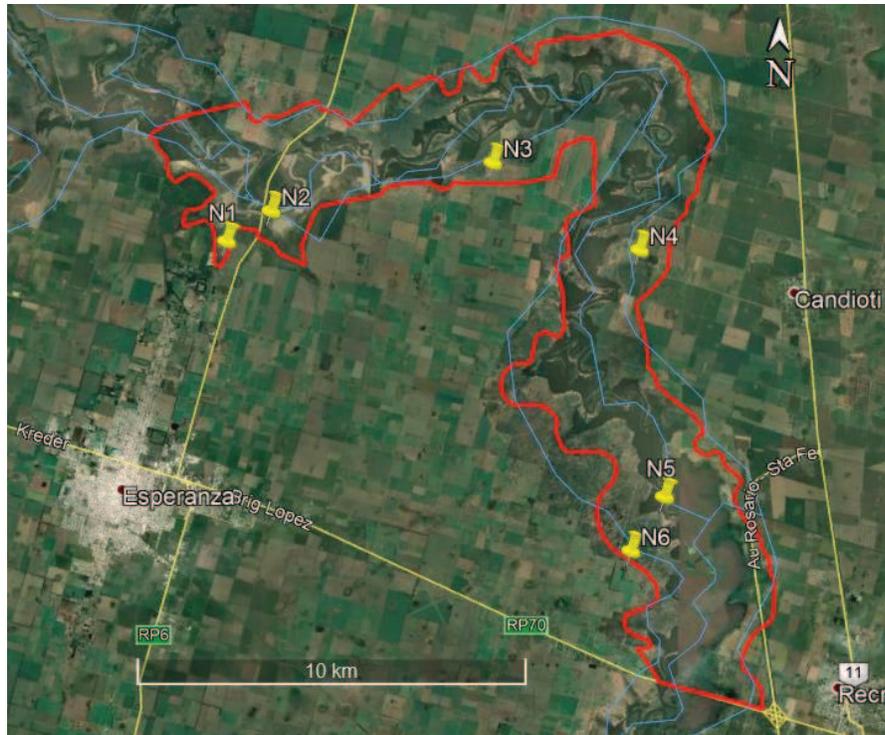


Figura 4.24: Puntos de cota conocida del nivel de agua para el pico de la crecida.

Punto	Cota (m)	Coordenadas Gauss Kruger		Observaciones
		N (x)	E (y)	
N1	23.91	5413940.123	6526858.08	Sobre calle 1° de Mayo a la altura del límite noreste de las lagunas de tratamientos.
N2	23.70	5415060.899	6527667.41	Nivel máximo al en el puente de RP 6.
N3	22.82	5420718.085	6529077.67	Cota de marca dejada por el nivel máximo alcanzado en puesto rural.
N4	21.40	5424548.754	6526965.37	Cota de marca dejada por el nivel máximo alcanzado en puesto rural.
N5	19.91	5425388.378	6520665.51	Cota de marca dejada por el nivel máximo alcanzado en puesto rural.
N6	19.80	5424569.852	6519255.78	Cota de marca dejada por el nivel máximo alcanzado en puesto rural.

Tabla 4.4: Características de los puntos acotados.

- Mapas de áreas afectadas por la crecida: de acuerdo a la información recabada por la Municipalidad se realizaron, en algunos sectores, mapas de manchas de inundación para las siguientes situaciones; áreas con tirantes de agua entre 0.10m-1.00m, áreas con tirantes de agua entre 1.00m-2.00m, y zonas con tirantes de agua por encima de los 2m (ver Figura 4.25).

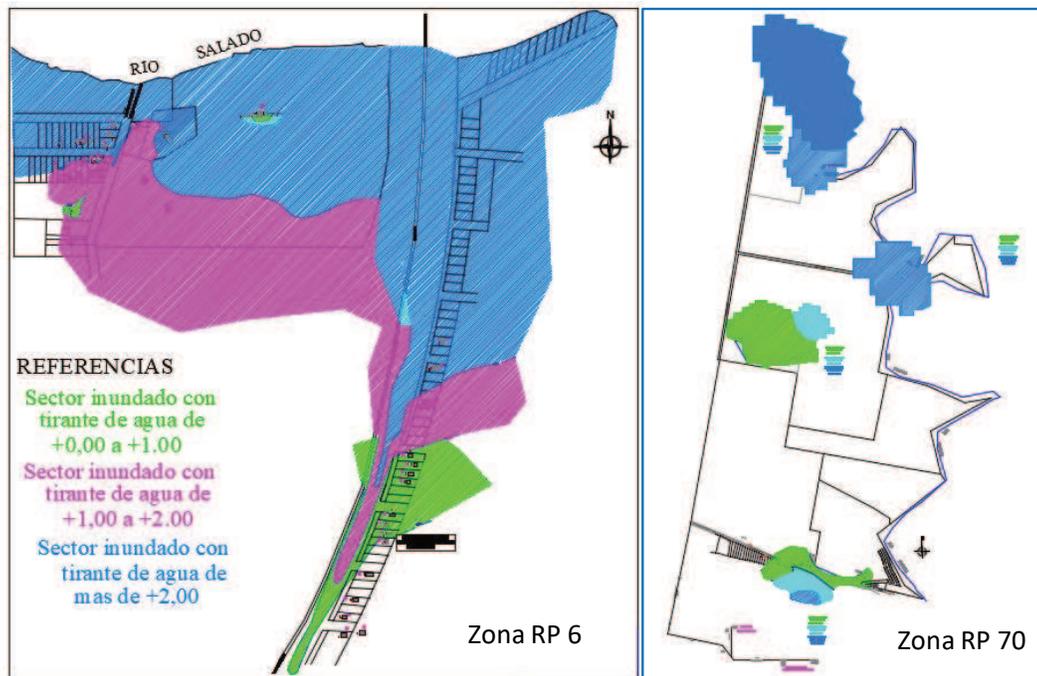


Figura 4.25: Mapas de profundidades de agua en zona RP6 (a la izquierda) y zona RP 70 (a la derecha). Fuente: Municipalidad de Esperanza.

- Fotografías obtenidas durante la crecida. En la Figura 4.26 se muestra una foto del día 30/04/2003, tomada desde la calzada de la RP6. En la misma se observa que la calzada no fue completamente sobre pasada, y que se generó un desnivel entre la zona de aguas arriba y aguas abajo de entre 0.70m-1.00m.



Figura 4.26: : Fotografía tomada desde la calzada de la RP6 (zona del punto N2 en Figura 4.24). Fecha: 29-04-2003. Fuente: Municipalidad de Esperanza.

En la Figura 4.27 se muestra otra fotografía del día 29-04-2003 (momento del pico), tomada sobre el camino continuación de la calle 1° de Mayo, a la altura del límite norte de las lagunas de tratamientos de efluentes industriales (punto N1 en la Figura 4.24). De acuerdo a los registros, la cota máxima alcanzada en ese lugar fue de 23.91m.



Figura 4.27: Fotografía tomada desde sobre camino rural continuación de calle 1° de Mayo (zona del punto N1 en Figura 4.24). Fecha: 29-04-2003. Fuente: Municipalidad de Esperanza.

## 4.7 Simulaciones realizadas

En la Tabla 4.5 se muestran las resoluciones de las mallas empleadas, los métodos de cálculo, los intervalos de tiempo de cálculo, el período de tiempo simulado y los tiempos de duración de las simulaciones ejecutadas con HEC-RAS 5.0. Las mismas fueron realizadas con una computadora con sistema operativo Windows 10 Pro de 64 bits, con un procesador Intel Core i5-3230M.

	Resolución de malla	Método de cálculo	$\Delta t$ de cálculo (segundos)	Período de tiempo simulado (días)	Tiempo de simulación
MDT 30m	30m x 30m	Onda dinámica	5	5	6hs 27min
MDT 30m	50m x 50m	Onda dinámica	5	5	2hs 37min
MDT 30m	80m x 80m	Onda dinámica	5	5	1hs 11min
MDT 30m	80m x 80m	Onda difusiva	5	5	0hs 59min
MDT 30m	150m x 150m	Onda dinámica	5	5	0hs 30min
MDE- Ar	80m x 80m	Onda dinámica	5	5	1h 05min
MDE 5m	80m x 80m	Onda dinámica	5	5	0hs 56min
MDT- Perfiles	80m x 80m	Onda dinámica	5	5	0h 54min

Tabla 4.5: Simulaciones realizadas con HEC-RAS 5.0.

Teniendo en cuenta que la información más real con la que se cuenta, son los perfiles transversales relevados a partir de los cuales se elaboró el MDT-Perfiles, y que a partir de la estimación del Error Cuadrático Medio (ECM) se determinó que el MDT-30m es el que presenta menores diferencias respecto al MDT-Perfiles (ver cálculo de los estimadores en el punto 5.1), el MDT-30m fue utilizado para la ejecutar las simulaciones de los modelos hidrodinámicos.

En HEC-RAS se realizó la calibración del modelo con el MDT-30m y la malla de 30m x 30m, para conservar el mayor detalle del MDE. Adicionalmente se simularon otras 3 diferentes resoluciones de mallas para el MDT-30m a fin de comparar los resultados. En base a este último análisis, y teniendo en cuenta los tiempos de simulación requeridos, se decidió trabajar con la malla de 80m x 80m debido a que se consideraron adecuados los resultados en relación al tiempo de cálculo necesario. De esta manera, se utilizaron los restantes MDE para definir la topografía del dominio de simulación y se simuló la crecida del 2003 con la malla de 80m x 80m con cada uno de ellos para comparar los resultados.

Se determinó que el tiempo de simulación disminuye 12 veces cuando se pasa de una malla de 30m x 30m a una malla 150m x 150m, como consecuencia del aumento del número de celdas.

Con SisBaHiA se realizó la simulación en régimen estacionario definiendo la topografía del dominio de modelación a partir de los datos del MDT-30. El intervalo de tiempo de cálculo adoptado fue de 1 segundo, y el período de tiempo de simulación requerido para la estabilización de los resultados fue de 5 días y el tiempo de cálculo fue de 2.45 horas.

## 5 RESULTADOS

### 5.1 MDE generados para el dominio de modelación

En este apartado se muestran los MDE resultantes de los procesos desarrollados en el punto 4.2, y que sirvieron de base para determinar la batimetría del dominio de simulación en los modelos hidrodinámicos. En las Figuras 5.1, 5.2, 5.3 y 5.4 se muestra el MDE-Ar v2.0, MDE-5m, MDT-30m y MDE-Perfiles respectivamente. Adicionalmente, en la Figura 5.1 se presenta la ubicación de los perfiles transversales que se utilizaron para comparar los MDE resultantes. Dichos perfiles coincidieron con perfiles transversales medidos en campo.

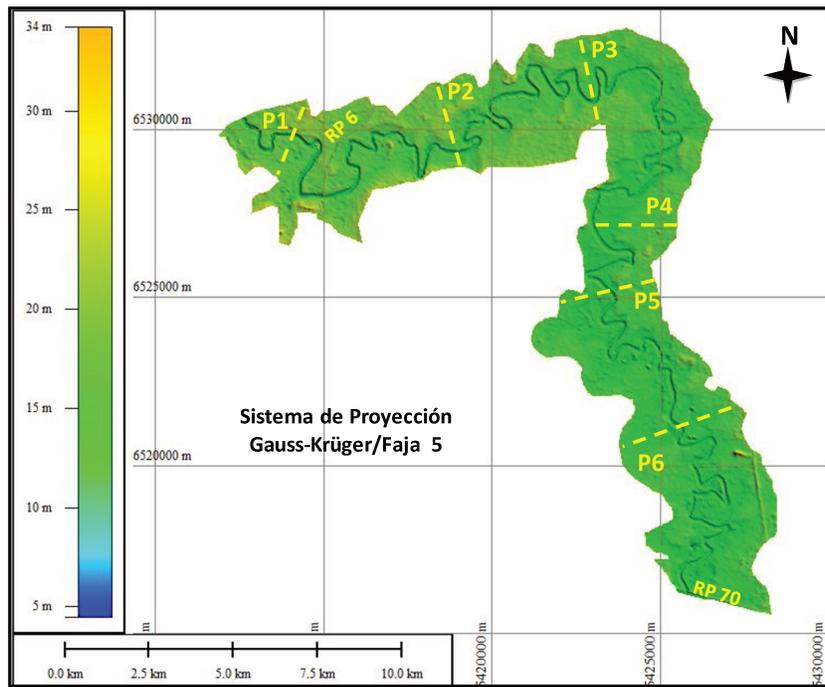


Figura 5.1: MDE-Ar v2.0 elaborado para el dominio de la simulación, con perfiles transversales P1, P2, P3, P4, P5 y P6.

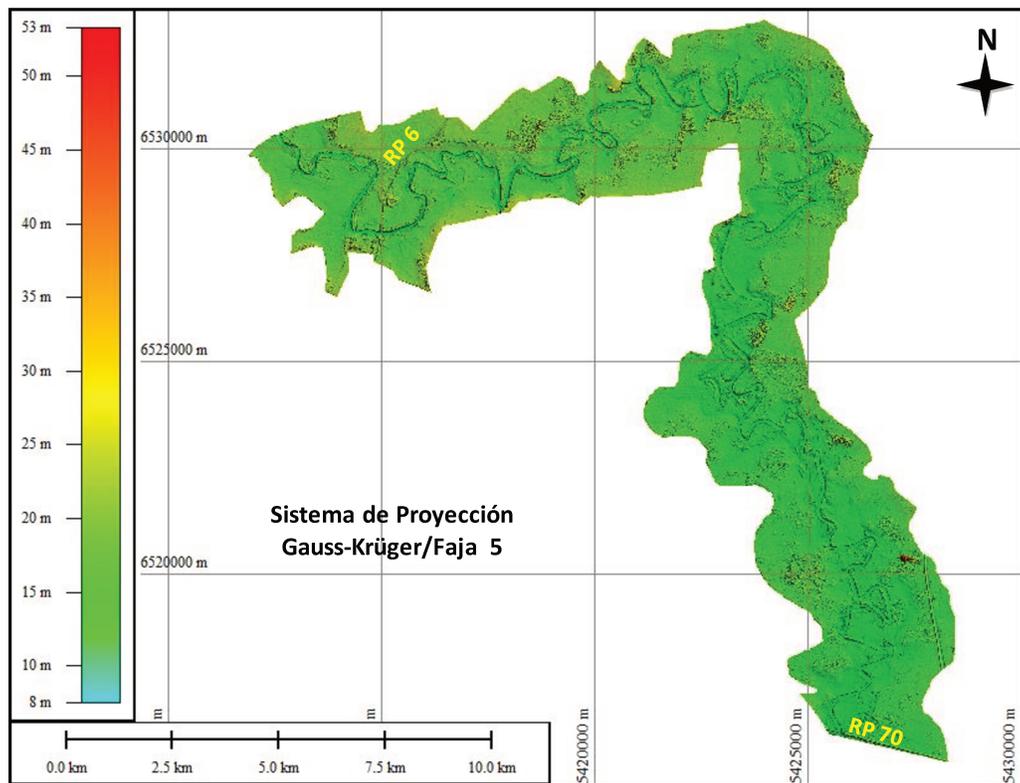


Figura 5.2: MDE-5m elaborado para el dominio de la simulación.

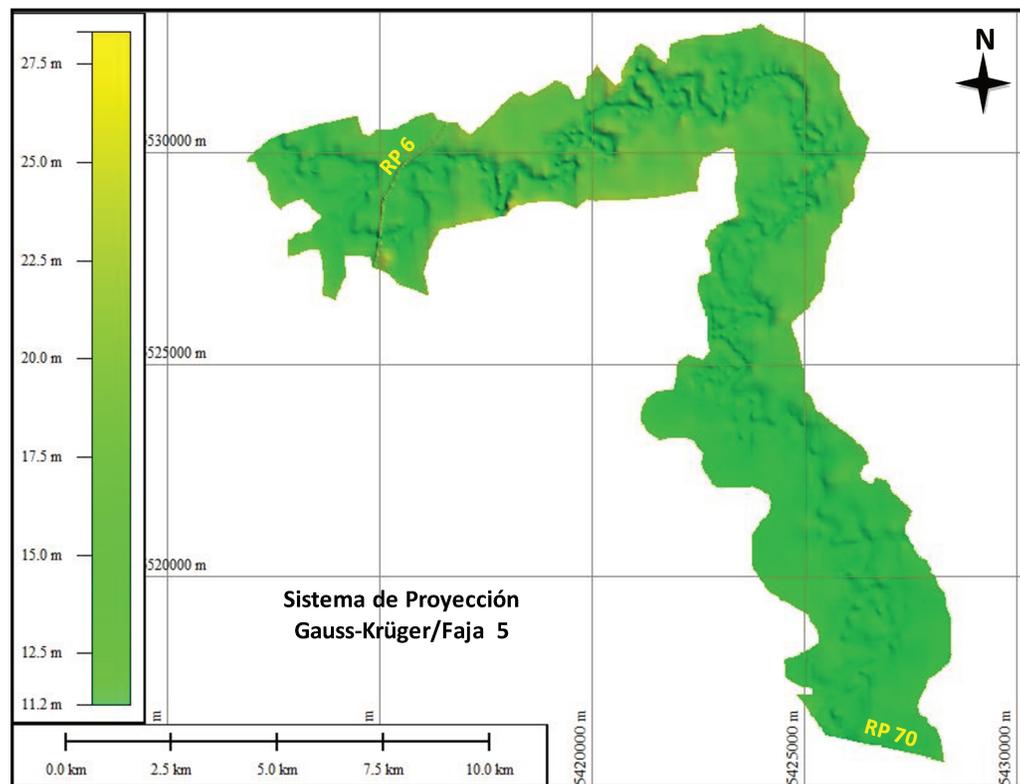


Figura 5.3: MDT-30m elaborado para el dominio de la simulación.

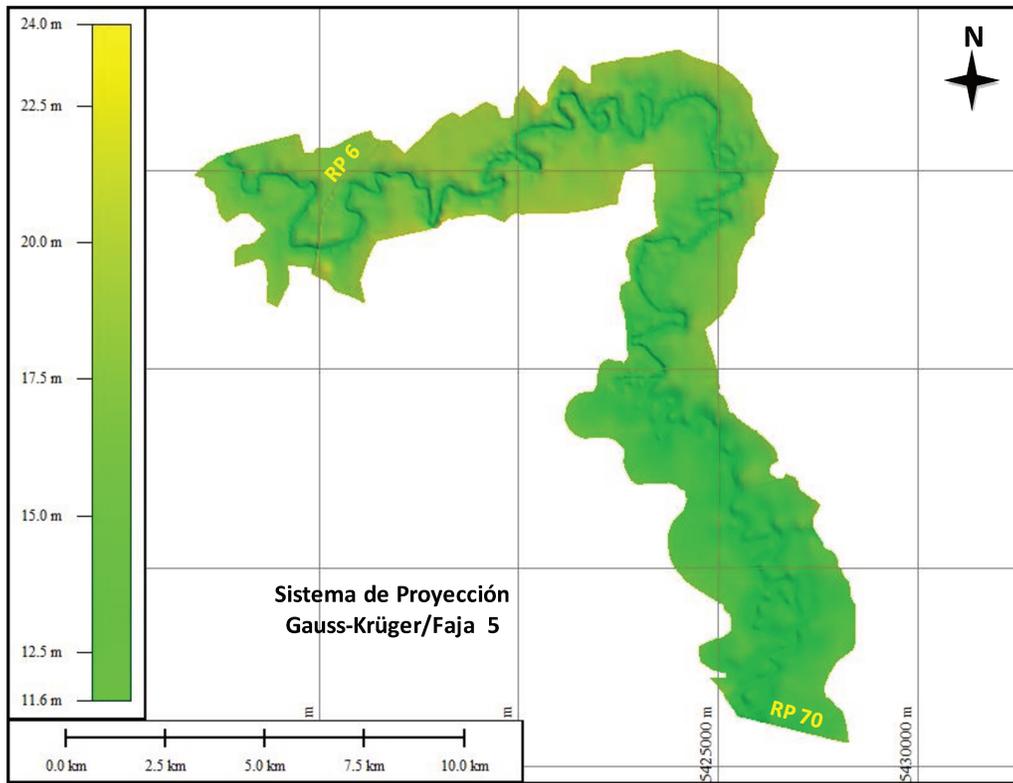


Figura 5.4: MDT-Perfiles elaborado para el dominio de la simulación.

En la Figura 5.5 se muestra una comparación de la zona de la RP6 entre los cuatro MDE generados. Se observa que con el MDE-5m, por el detalle de la resolución, se logra representar las zonas bajas, los caminos secundarios y las zonas con vegetación densa y de gran altura (montes con plantas y árboles de más de 1.50m de altura). Adicionalmente, en los demás MDE se observa la representación del terraplén de la RP 6 lograda por superposición del MDE-5m.

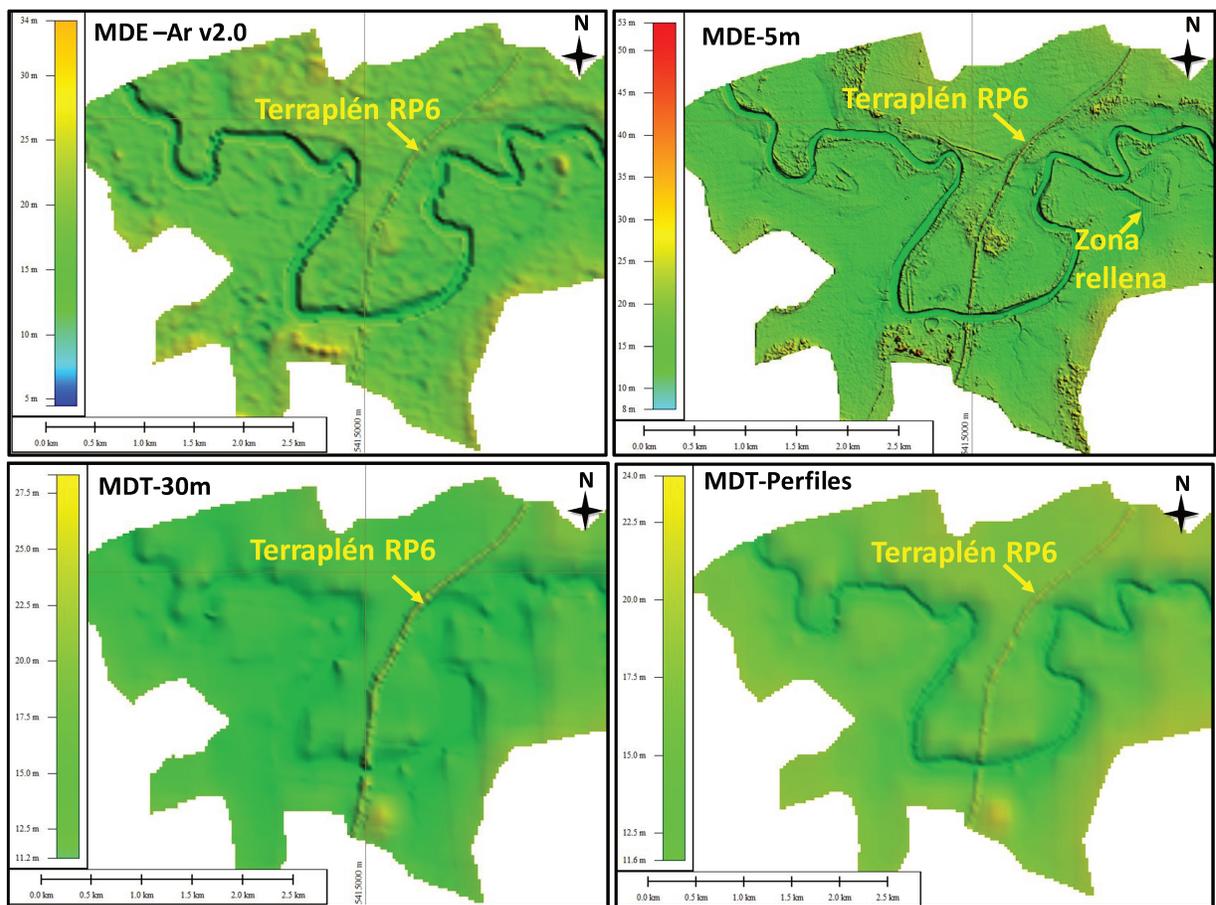


Figura 5.5: Detalle de la zona RP6 de los cuatro MDE generados.

En las Figuras 5.6 y 5.7 se presenta la comparación de los perfiles transversales P1, P2, P3 y P4, P5 y P6 respectivamente, de cada uno de los MDE resultantes. La ubicación de los perfiles se muestra en la Figura 5.1 (MDE Arv2.0):

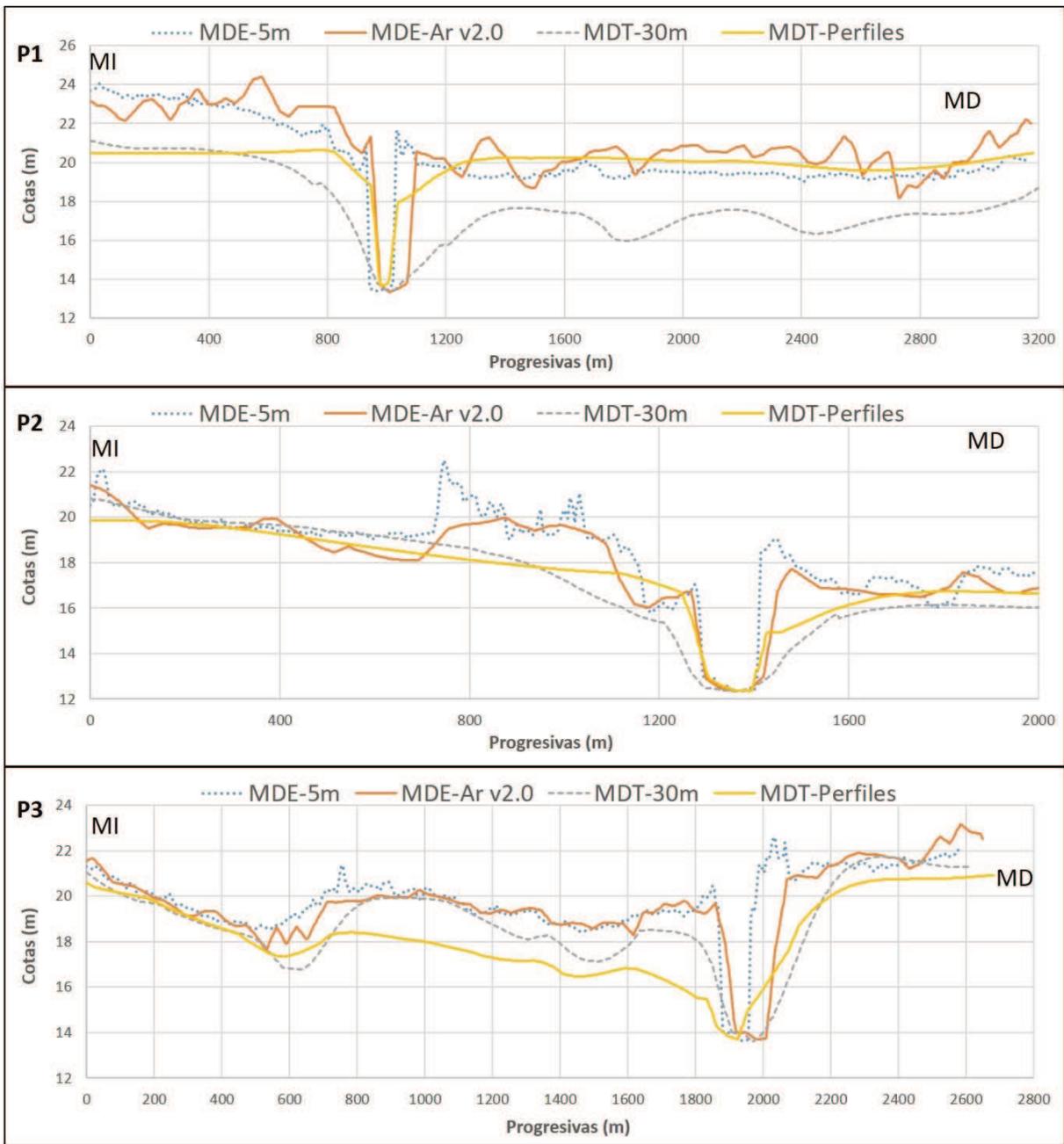


Figura 5.6: Comparación de perfiles transversales P1 (arriba), P2 (medio) y P3 (abajo).

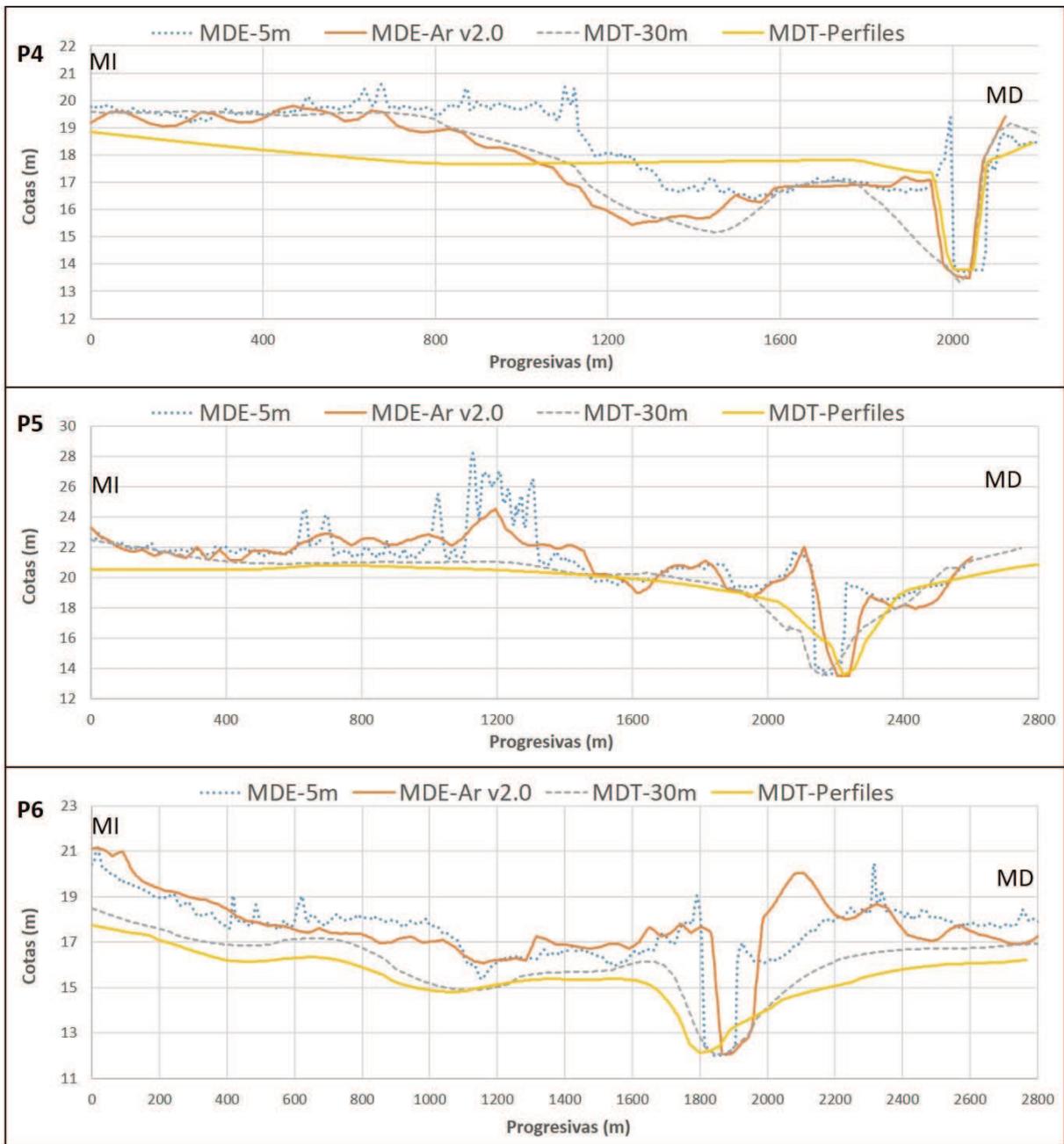


Figura 5.7: Comparación de perfiles transversales P4 (arriba), P5 (medio) y P6 (abajo).

Se observa a nivel general que para el MDE Ar v2.0 y el MDE-5ms las cotas son similares, mientras que tanto para el MDT-30m como el MDT-Perfiles presentan cotas de terreno por debajo de los dos mencionados inicialmente, y además se observan perfiles más “suavizados”, sin cambios bruscos a lo largo de la transversal.

En el MDE-5m y en menor medida en el MDE-Ar v2.0 se aprecian en la planicie de inundación algunos “picos” de cotas, que pueden ser atribuidos más a la vegetación que a la cota real del terreno natural. En cuanto a la definición del cauce, se aprecia que la misma es similar a la real tanto para el MDE-Ar como para el MDE-5m, mientras que en los dos MDE restantes, debido a la interpolación se observa un cauce algo más ancho que el cauce real.

Para definir cuál de MDE del IGN utilizar para realizar las simulaciones, se calculó el Error Cuadrático Medio (ECM) en los perfiles P1 a P6 (ver Figura 5.1).

El ECM mide la cantidad de error que hay entre dos conjuntos de datos. En otras palabras, compara un valor predicho y un valor observado o conocido. La fórmula para el cálculo del ECM es la siguiente:

$$ECM = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}}$$

En este caso, se consideraron como “valores observados” los puntos de los perfiles medidos y se calculó el ECM en cada perfil para los tres MDE del IGN. En la Tabla 5.1 se presentan los cálculos realizados:

	ECM (m)		
	MDT 30m	MDE-Ar 2.0	MDE 5m
P1	1.85	1.60	1.44
P2	0.02	1.05	1.50
P3	0.68	1.91	2.11
P4	1.04	1.45	1.39
P5	0.22	2.41	2.72
P6	0.29	2.66	2.27
Promedio	0.68	1.85	1.90

Tabla 5.1: Cálculo del estimador ECM.

El ECM eleva los residuos al cuadrado, eliminando el signo de los residuos, por lo tanto, se considera como un estimador de los errores absolutos respecto a los valores medidos. Entonces, dado que el menor ECM en promedio se obtuvo para el MDT-30m, el mismo fue el adoptado para la calibración del modelo HEC-RAS y el análisis de los resultados por considerarse el más representativo de la topografía real del terreno.

## 5.2 Resultados de las simulaciones con HEC RAS 5.0

### 5.2.1 Calibración del modelo

Se utilizó el MDT-30m para la calibración del modelo. El tamaño de la malla utilizado fue de 30m x 30m a fin de conservar la mayor cantidad de información posible del modelo original, ya que coincidió con las resoluciones de los MDE. El parámetro de calibración fue el coeficiente de rugosidad  $n$  de Manning, el cual se varió en un rango 15% por debajo y por encima del  $n$  inicial determinado en el mapa temático. Los valores finales de  $n$  de Manning utilizados se muestran en la Tabla 5.2. Los mismos son un 12% mayores a los  $n$  iniciales mostrados en la Tabla 4.3, con los cuales se ajustaron modelos 1D en trabajos anteriores.

Clase	Cobertura	$n_{inicial}(sm^{-1/3})$	$n_{calibrado}(sm^{-1/3})$
1	Cauce	0.030	0.033
2	Suelo desnudo	0.040	0.045
3	Gramínea	0.045	0.050
4	Pasturas	0.050	0.056
5	Cultivos	0.060	0.067
6	Praderas	0.080	0.089
7	Monte	0.100	0.112

Tabla 5.2: Valores de  $n$  de Manning utilizados para la calibración de HEC-RAS 5.0.

En la Tabla 5.3 se muestran las comparaciones de niveles medidos y calculados en la calibración del modelo en los seis puntos donde se contó con una cota conocida al momento de la crecida (ver ubicación de puntos en Figura 4.24):

	N1	N2	N3	N4	N5	N6
<b>Cota medida (m)</b>	<b>23.91</b>	<b>23.70</b>	<b>22.82</b>	<b>21.40</b>	<b>19.91</b>	<b>19.80</b>
Cota (m)_Malla 30m	23.83	23.71	22.78	21.33	19.73	19.63
<b>Diferencia (m)</b>	<b>0.08</b>	<b>-0.01</b>	<b>0.04</b>	<b>0.07</b>	<b>0.18</b>	<b>0.17</b>

Tabla 5.3: Comparación niveles medidos y calculados con HEC-RAS. MDT-30m. Malla 30m

Los resultados demuestran que, para todos los casos, los mejores ajustes se lograron en la zona alta del dominio de simulación (puntos N1 a N4), con diferencias entre cotas medidas y calculadas menores a 0.08m. Mientras que, para los puntos N5 y N6 las diferencias entre los valores medidos y calculados aumentó a 0.18m a 0.17m respectivamente. Estas diferencias se consideraron aceptables para el grado de precisión requerido en el presente trabajo.

El aumento en la diferencia en los puntos N5 y N6 puede deberse a varios factores, como ser la definición de la rugosidad de la zona. El punto N5 se encuentra en una zona con desarrollo de montes, pero muy cercano al cauce y a una zona con escasa vegetación (unos 100 metros al norte). Esto pudiera haber inducido, debido a la resolución espacial de trabajo, a asignar una rugosidad menor a la correspondiente para calcular con mayor precisión el nivel de agua real. Una situación similar se da para la ubicación del punto N6. Adicionalmente, vale resaltar lo mencionado en el punto 4.6, respecto a la confiabilidad de los datos medidos, los cuales pueden contener un error de algunos centímetros. Esto se debe a que los mismos fueron determinados luego del paso del pico de la crecida, a partir de marcas existentes del nivel máximo alcanzado por el agua, debido a la dificultad para transitar por el terreno y los caminos anegados durante la crecida.

En la Figura 5.8 se muestra el mapa de profundidades máximas calculadas con el MDT-30m y la malla de 30m x 30m. Las mismas estuvieron en el orden de los 10-12 m en el cauce, disminuyendo hacia los extremos de la planicie de inundación, con profundidades mínimas del orden de los 0.50-0.60m. Estas profundidades calculadas son comparables a los datos brindados por la Municipalidad de Esperanza, donde se realizó un relevamiento de la zona de afectación de la crecida y se mapeó en la zona de la RP 6 y en la zona de la RP 70 las zonas inundadas con tirantes entre 0-1.00m, y zonas con tirantes mayores a los 2m (ver Figura 5.9).

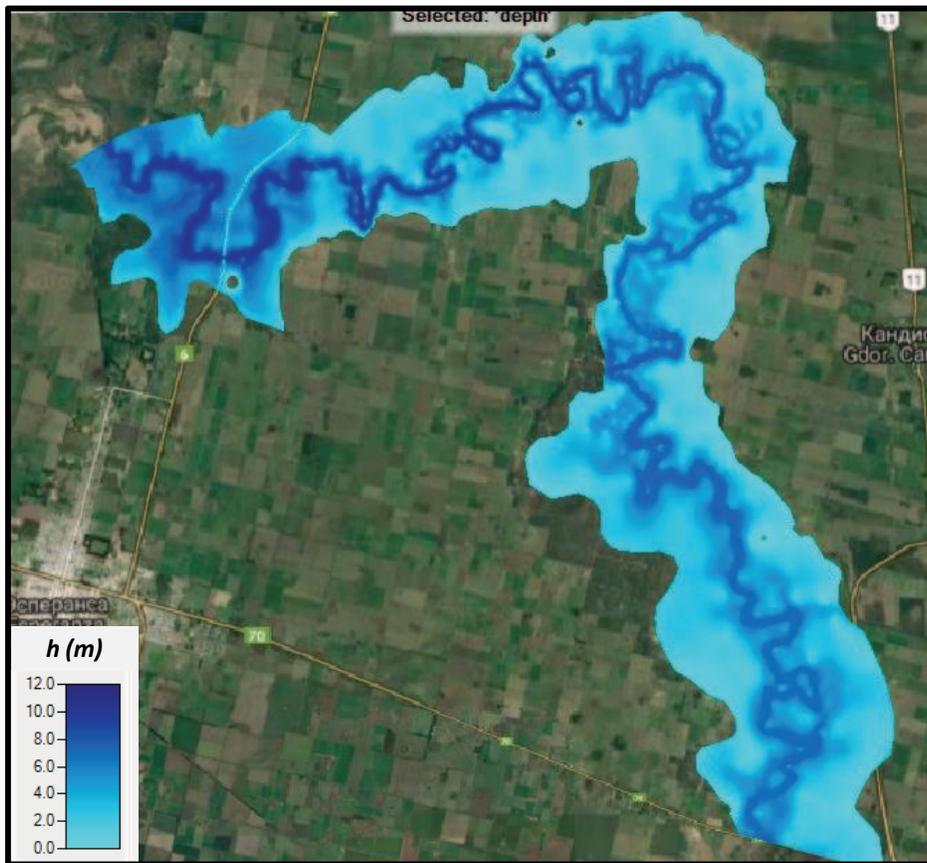


Figura 5.8: Mapa de profundidades máximas calculadas. MDT-30m, malla 30m x 30m.



Figura 5.9: Profundidades calculadas comparadas con las mapeadas por la Municipalidad.  
Profundidades calculadas comparadas con las mapeadas por la Municipalidad.

En la Figura 5.10 se muestra el mapa de velocidades máximas calculadas con el MDT-30m y la malla de 30m x 30m, para el instante del máximo caudal. Los valores máximos en el cauce, fueron del orden 1.60 m/s, mientras que, en la planicie, en general, las velocidades máximas calculadas estuvieron por debajo de los 0.60 m/s. Se observaron además zonas puntuales con elevadas velocidades, del orden de 1.50 m/s, lo cual indica que en algunos sectores de meandros muy cerrados el flujo “cortó” dichos meandros y se condujo mayormente por la planicie.

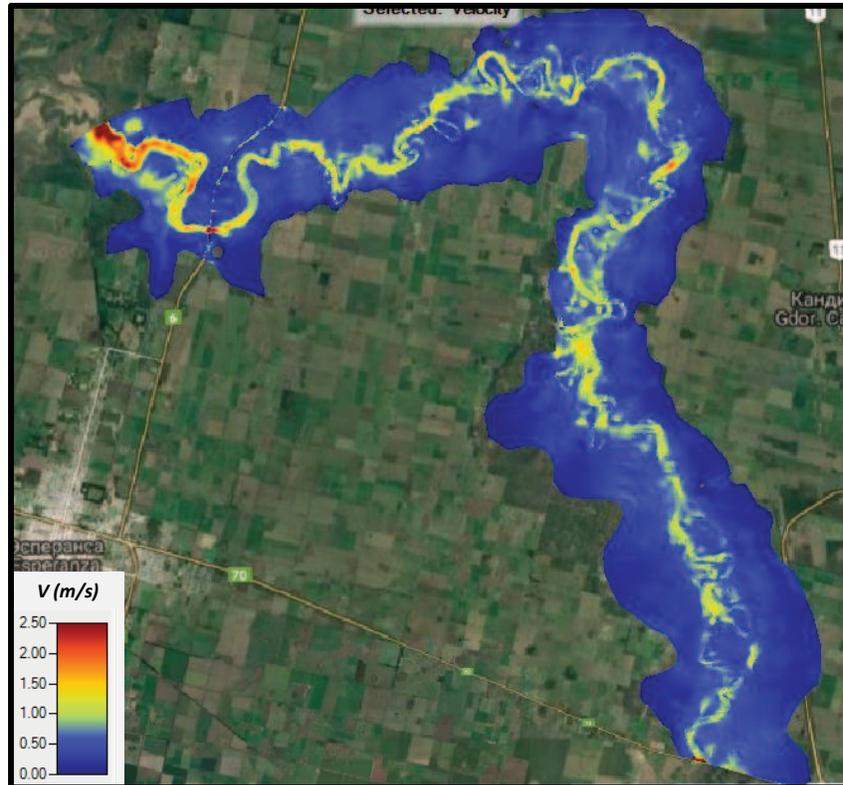


Figura 5.10: Mapa de velocidades máximas calculadas. MDT-30m, malla 30m x 30m.

### 5.2.2 Comparación entre los distintos MDE

En este apartado se presenta la comparación de los resultados obtenidos con los diferentes MDE, para la resolución de malla de 80m x 80m, utilizando las condiciones de borde descritas en el punto 4.5 y los valores de coeficiente de rugosidad mostrados en la Tabla 5.2. En la Tabla 5.4 se muestra el resumen de las cotas máximas calculadas en los puntos medidos para cada uno de los MDE.

Punto	Cota medida	MDT-30m		MDE-Ar		MDE-5m		MDT-Perfiles	
	(m)	Calc. (m)	Dif (m)	Calc. (m)	Dif (m)	Calc. (m)	Dif (m)	Calc. (m)	Dif (m)
N1	<b>23.91</b>	23.76	<b>0.15</b>	24.68	<b>-0.77</b>	24.79	<b>-0.88</b>	23.35	<b>0.56</b>
N2	<b>23.70</b>	23.67	<b>0.03</b>	24.47	<b>-0.77</b>	24.57	<b>-0.87</b>	23.29	<b>0.41</b>
N3	<b>22.82</b>	22.69	<b>0.13</b>	23.55	<b>-0.73</b>	24.00	<b>-1.18</b>	22.50	<b>0.32</b>
N4	<b>21.40</b>	21.31	<b>0.09</b>	22.11	<b>-0.71</b>	22.38	<b>-0.98</b>	20.92	<b>0.48</b>
N5	<b>19.91</b>	19.72	<b>0.19</b>	20.90	<b>-0.99</b>	20.76	<b>-0.85</b>	19.39	<b>0.52</b>
N6	<b>19.80</b>	19.58	<b>0.22</b>	20.54	<b>-0.74</b>	20.26	<b>-0.46</b>	19.26	<b>0.54</b>

Tabla 5.4: Cotas de nivel de agua medidas y máximas calculadas con HEC-RAS para los diferentes MDE. Tamaño de malla 80m x 80m.

Se observa que, debido a que fue el MDE utilizado para la calibración, los resultados más próximos a los medidos se obtuvieron con el MDT-30m, sobre todo en la zona alta del dominio de modelación. Con el MDT-Perfiles, las diferencias entre los niveles medidos y calculados estuvieron entre 0.32 y 0.56m, con niveles calculados siempre por debajo de los medidos. Esto indica que, con la interpolación de los perfiles transversales medidos, se obtiene un MDE “suavizado” respecto a la topografía obtenida con el MDT-30m, con lo cual se subestiman los niveles respecto a los calculados con el modelo utilizando el MDT-30m.

Por otra parte, con el MDE-5m y el MDE-Ar, las diferencias de cotas medidas y calculadas estuvieron por encima de los 0.73m llegando hasta 1.18m, con cotas calculadas siempre por encima de los valores medidos. Esto es concordante con los perfiles mostrados en las figuras 5.6 y 5.7, donde se observa que las cotas de terreno de estos MDE están por encima de los dos restantes, con lo cual, al utilizarlos en la simulación, se sobre estiman las cotas de nivel de agua.

En la Figura 5.11 se muestran imágenes comparativas de los mapas profundidades máximas calculadas en todo el dominio simulado para cada uno de los MDE utilizados.

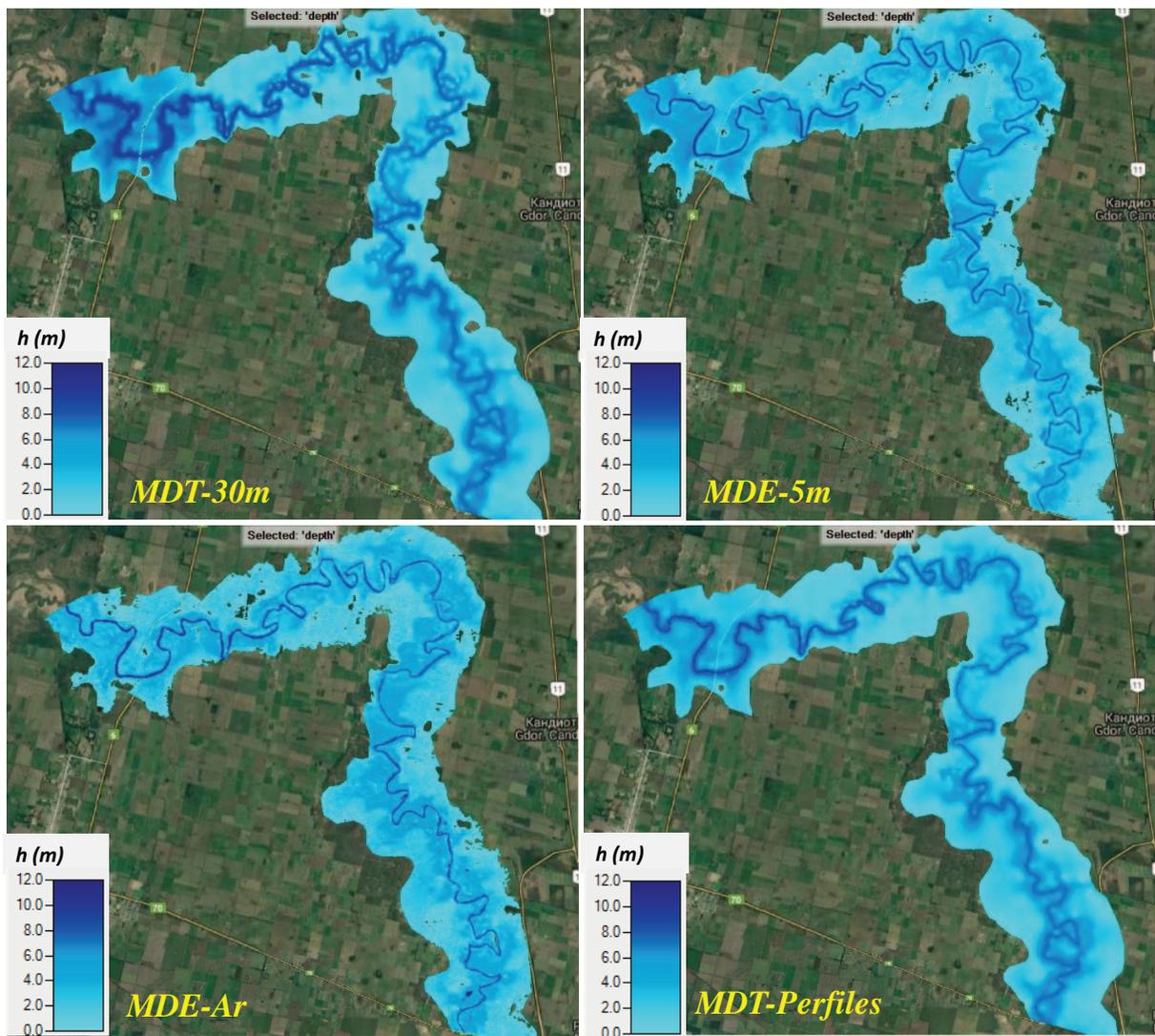


Figura 5.11: Comparación de mapas de profundidades máximas calculadas. Arriba a la izquierda, MDT-30m, arriba a la derecha MDE-5m, abajo a la izquierda MDE-Ar y abajo a la derecha MDT-Perfiles. Malla 80m x 80m.

En la Figura 5.12 se muestran imágenes comparativas de los mapas de velocidades máximas calculadas en todo el dominio simulado para cada uno de los MDE utilizados.

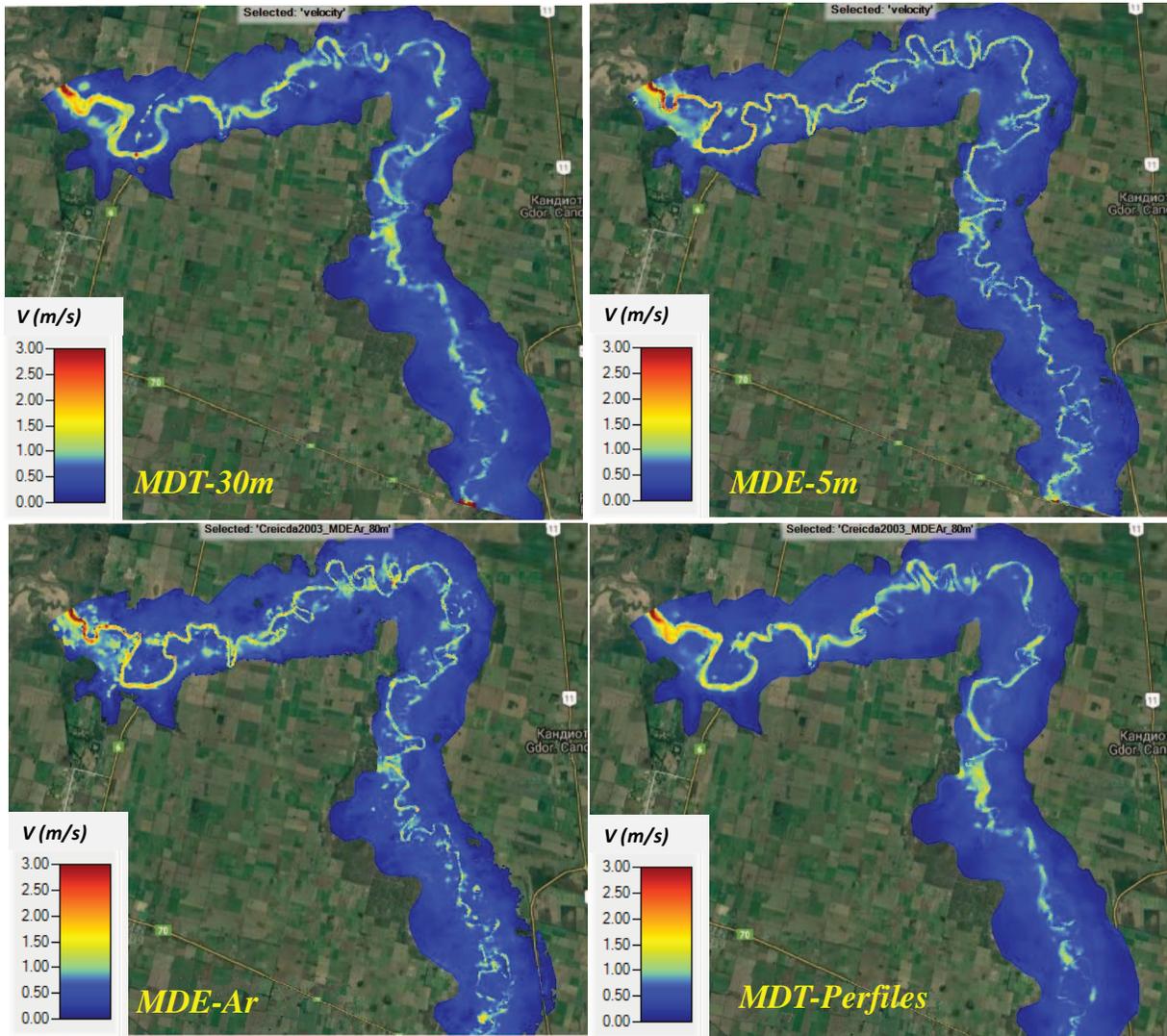


Figura 5.12: Comparación de mapas de velocidades máximas calculadas. Arriba a la izquierda, MDT-30m, arriba a la derecha MDE-5m, abajo a la izquierda MDE-Ar y abajo a la derecha MDT-Perfiles. Malla 80m x 80m.

En las Figuras 5.13 y 5.14 se muestran los mismos mapas mostrados en las dos figuras anteriores en detalle para la sección de la RP 6, que se corresponde con la ubicación del punto N2.

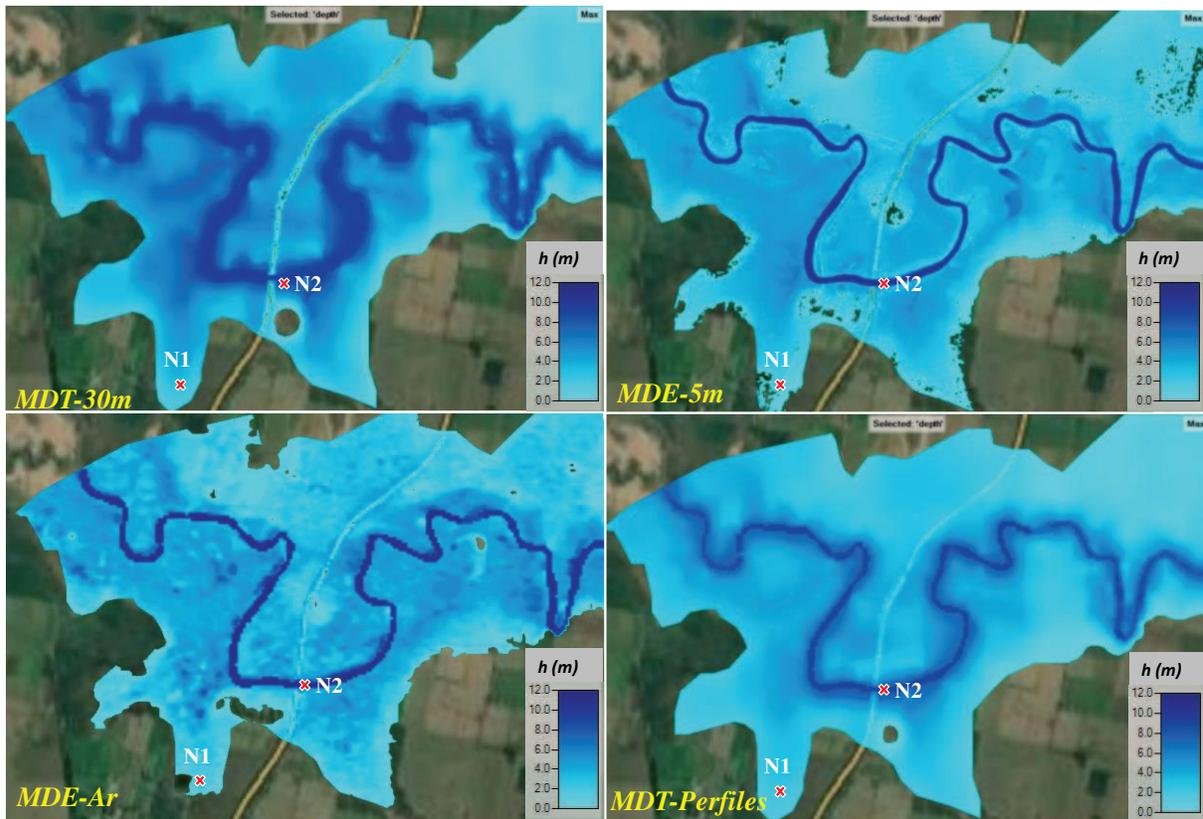


Figura 5.13: : Comparación de mapas de profundidades máximas calculadas en zona RP 6. Arriba a la izquierda, MDE-Ar, arriba a la derecha MDE-5m, abajo a la izquierda MDT-30m y abajo a la derecha MDT-Perfiles. Malla 80m x 80m.

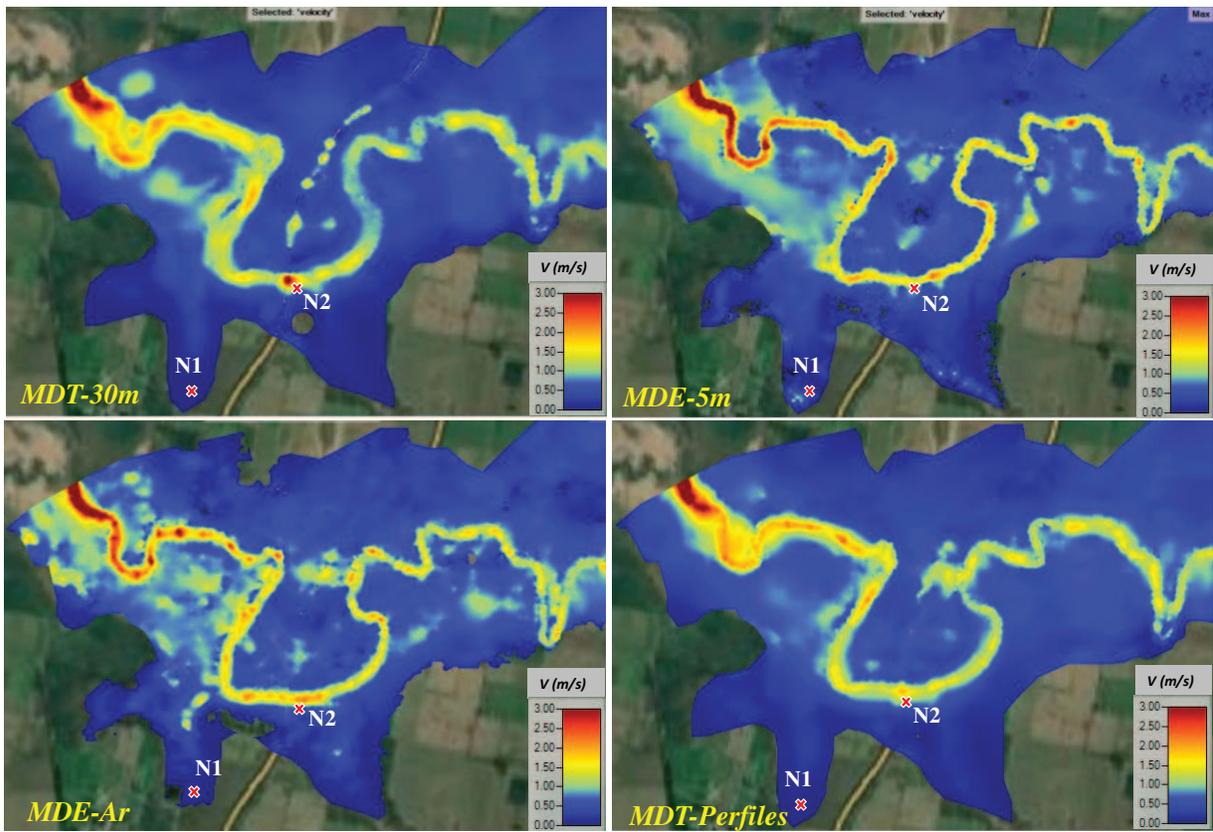


Figura 5.14: Comparación de mapas de velocidades máximas calculadas en zona RP6. Arriba a la izquierda, MDT-30m, arriba a la derecha MDE-5m, abajo a la izquierda MDE-Ar y abajo a la derecha MDT-Perfiles. Malla 80m x 80m.

En las Figuras 5.15 y 5.16 se muestran los mismos mapas mostrados en las figuras anteriores para la zona “Rincón del Pintado”, que se corresponde con la ubicación del punto N4.

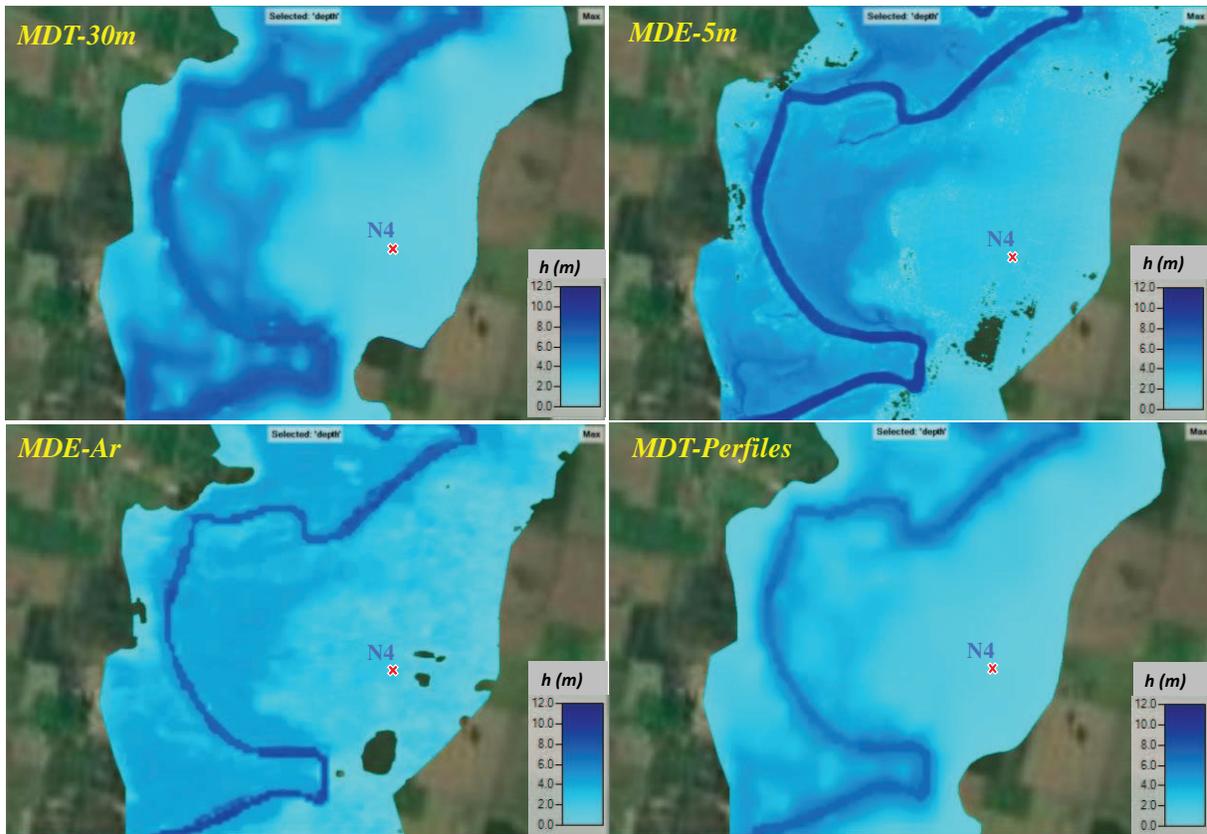


Figura 5.15: Comparación de mapas de profundidades máximas calculadas en zona Rincón del Pintado. Arriba a la izquierda, MDT-30m, arriba a la derecha MDE-5m, abajo a la izquierda MDE-Ar y abajo a la derecha MDT-Perfiles. Malla 80m x 80m.

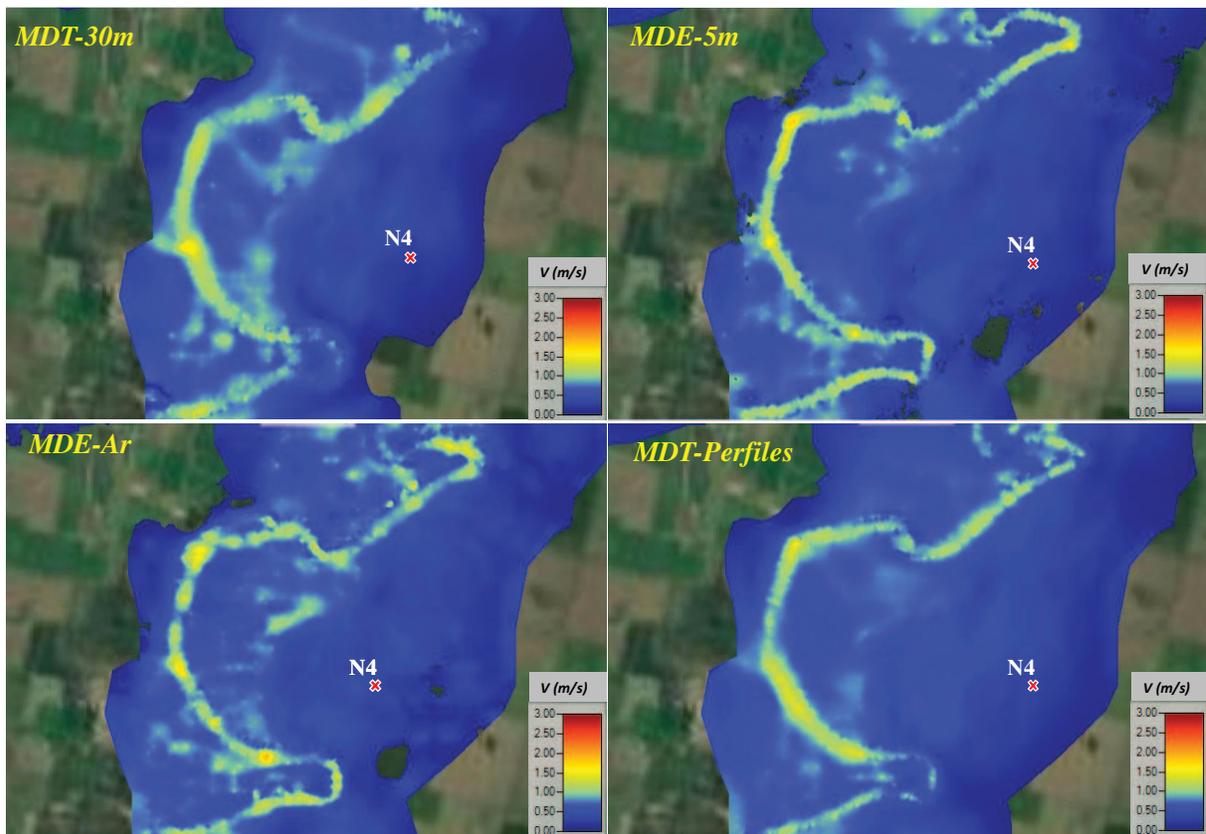


Figura 5.16: Comparación de mapa de velocidades máximas calculadas en zona Rincón del Pintado. Arriba a la izquierda, MDT-30m, arriba a la derecha MDE-5m, abajo a la izquierda MDE-Ar y abajo a la derecha MDT-Perfiles. Malla 80m x 80m.

De los mapas mostrados se observa que, en cuanto a las profundidades, las máximas calculadas estuvieron en el orden de los 11m dentro del cauce, disminuyendo hacia los extremos de la planicie de inundación, con profundidades mínimas de 0.60-0.80m. Los resultados, como se mencionó en el ítem 5.2.1, son comparables con los datos registrados por la Municipalidad de Esperanza en el mapeo de zonas afectadas por la crecida. En cuanto a los anchos de inundación, con el MDE-5m y el MDE-Ar se observa en los mapas de profundidades una sobre estimación de los mismos respecto a los calculados con el MDT-30m (los cuales son comparables a los medidos en la imagen radar del 06-05-2003) en el orden de los 150-250m en algunos sectores, producto del aumento de los niveles calculados. Teniendo en cuenta que el tamaño de pixel de la imagen radar es de 30m, cabe destacar que este ancho sobreestimado representa un número de 5-8 píxeles en la imagen, donde además en algunos sectores resulta dificultoso identificar el límite entre el área mojada y el área seca.

En los mapas de profundidad también se observan en los MDE del IGN, sobre todo en el MDE-Ar y el MDE-5m, zonas “vacías”, sin agua. Probablemente se trata de zonas con desarrollo de vegetación de alturas importantes, tipo bosques o montes, donde por la captura de los sensores de los satélites utilizados en la toma de imágenes, se ha asignado erróneamente como cota del terreno la cota de la copa de los árboles y las hojas de la vegetación. Esta situación, prácticamente no se registra en el MDT-Perfiles, el cual, al haber sido elaborado a partir de datos del terreno medidos en campo, elimina la fuente de error mencionada atribuible a la existencia de vegetación.

En cuanto a las velocidades, las máximas dentro del cauce estuvieron en el rango 1.40–2.40 m/s, mientras que en la planicie se observaron velocidades en promedio por debajo de los 0.60 m/s, con excepciones en zonas de paleo cauces o meandros cerrados donde el flujo se transportó por la planicie con mayor velocidad. Dado que no se contó con datos de velocidades medidas para cotejar los resultados, las mismas se compararon con los resultados de la simulación 1D realizada por [Imhoff y Trento \(2012\)](#), donde se obtuvieron resultados similares, ya que las velocidades en la planicie estuvieron por debajo de los 0.50 m/s, mientras que en el cauce se calculó una velocidad promedio del orden de 1.50 m/s, con picos de velocidades de 2.5-3.0 m/s en la sección de RP6 donde se definió el puente de la ruta.

Adicionalmente se observa en todos los mapas un mayor grado de definición en los resultados obtenidos con el MDE-5m, debido a la mayor densidad de información de base. Para un mayor detalle de la visualización de los resultados, se presentan a continuación los niveles y velocidades obtenidos en las secciones transversales donde se contó con datos medidos. En las Figuras 5.17, 5.18, 5.19, 5.20, 5.21 y 5.22 se muestran los perfiles transversales y los niveles de agua máximos calculados en cada una de dichas secciones.

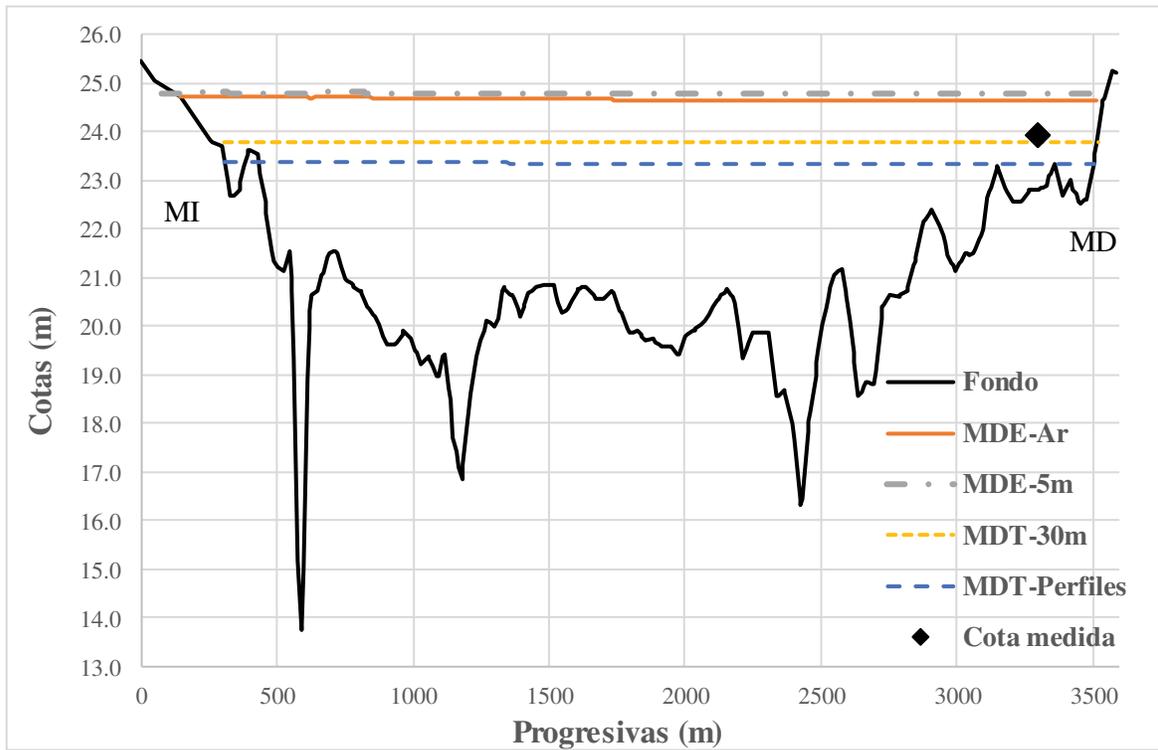


Figura 5.17: Perfil transversal y niveles de pelo de agua calculados en la sección del punto N1.

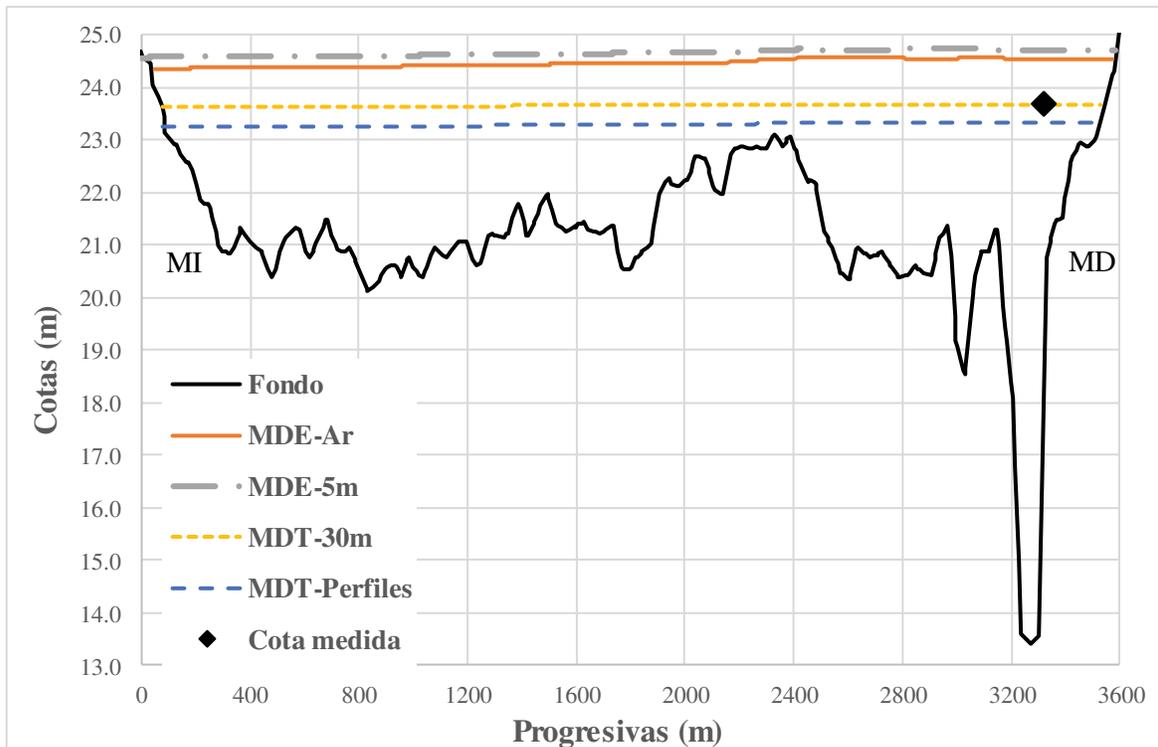


Figura 5.18: Perfil transversal y niveles de pelo de agua calculados en la sección del punto N2.

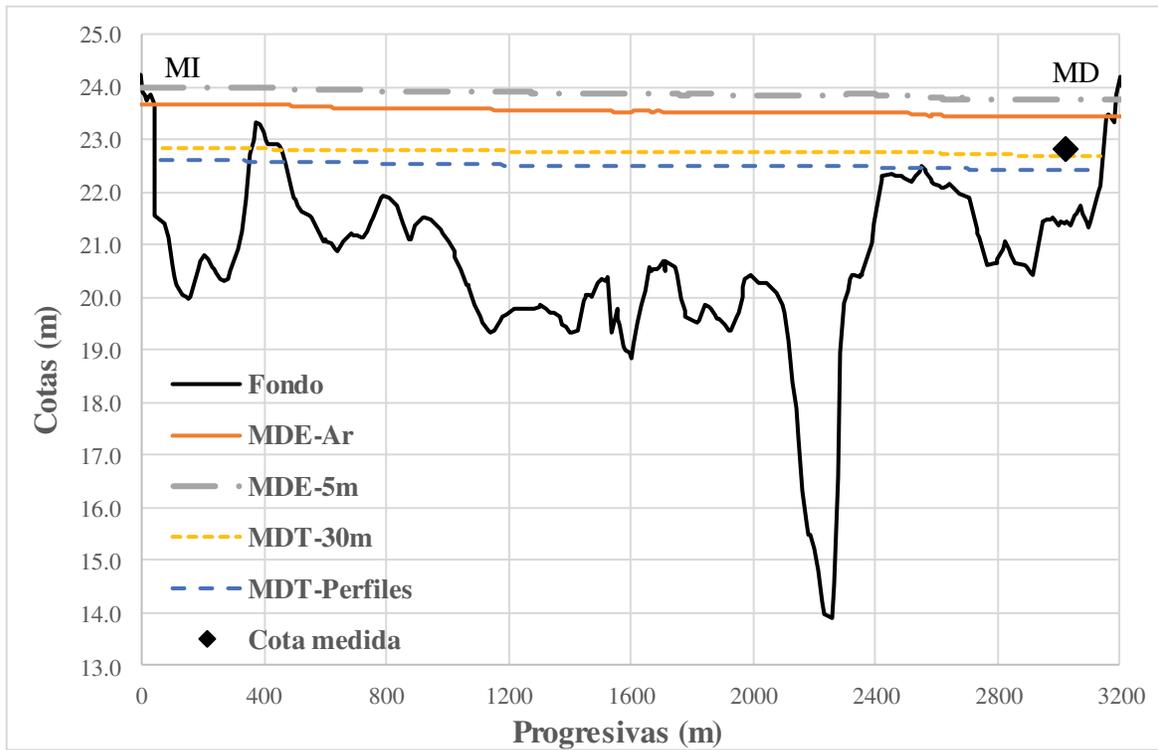


Figura 5.19: Perfil transversal y niveles de pelo de agua calculados en la sección del punto N3.

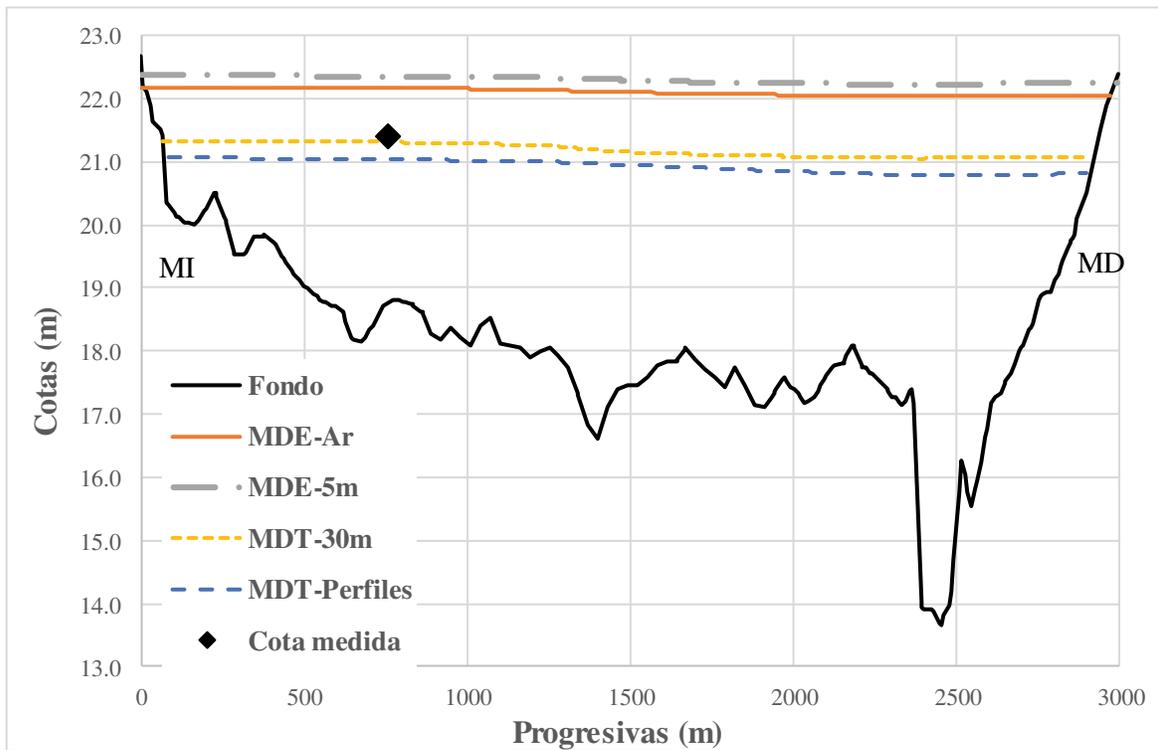


Figura 5.20: Perfil transversal y niveles de pelo de agua calculados en la sección del punto N4.

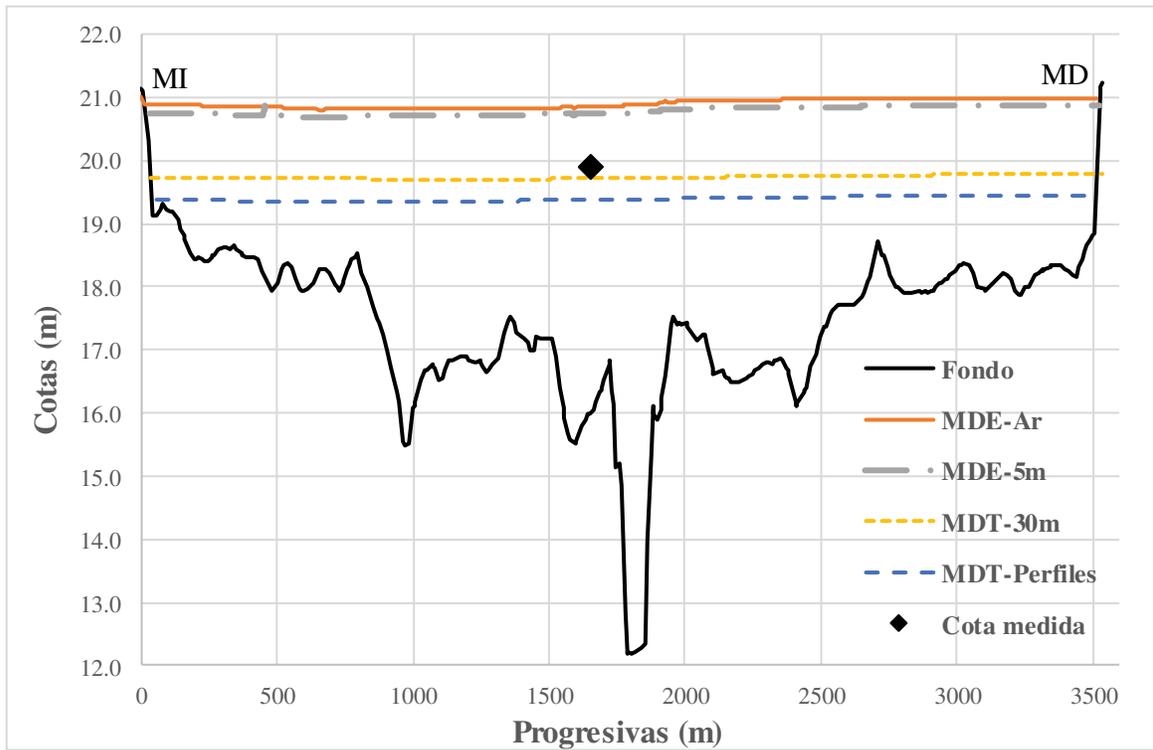


Figura 5.21: Perfil transversal y niveles de pelo de agua calculados en la sección del punto N5.

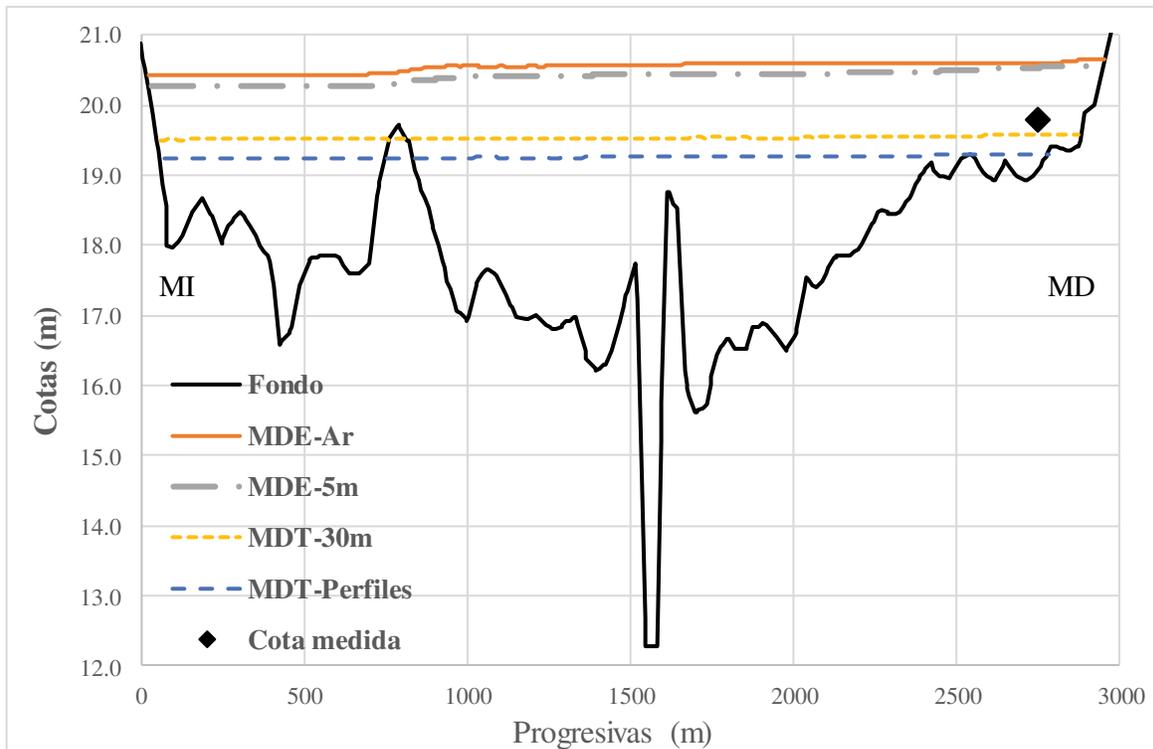


Figura 5.22: Perfil transversal y niveles de pelo de agua calculados en la sección del punto N6.

En los perfiles presentados, al igual que en la Tabla 5.4 se observa que las cotas calculadas más próximas a los valores medidos se obtuvieron con el MDT-30m, y que los niveles calculados con el MDT-Perfiles, estuvieron siempre por debajo de los valores medidos. Por el contrario, los niveles calculados con el MDE-Ar y el MDE-5m estuvieron muy por encima del valor medido. Como se describió anteriormente, esta sobre estimación de los niveles de agua está relacionada con la información de base de la topografía de la planicie, ya que en general el MDE-Ar y el MDE-5m presentan cotas de terreno más elevadas más elevadas que los otros dos.

En las Figuras 5.23, 5.24, 5.25, 5.26, 5.27 y 5.28 se muestran los perfiles transversales de velocidades máximas calculadas en cada una de las secciones donde se cuenta con niveles medidos. Se observa que excepto en la sección correspondiente al punto N3, en todos los casos la velocidad máxima se dio en el cauce. No obstante, se aprecian en algunos sectores puntuales picos de velocidad del orden de 1 m/s en la planicie, lo cual demostraría que la misma tuvo un rol importante no solo en el almacenamiento del flujo, sino también en la conducción del mismo.

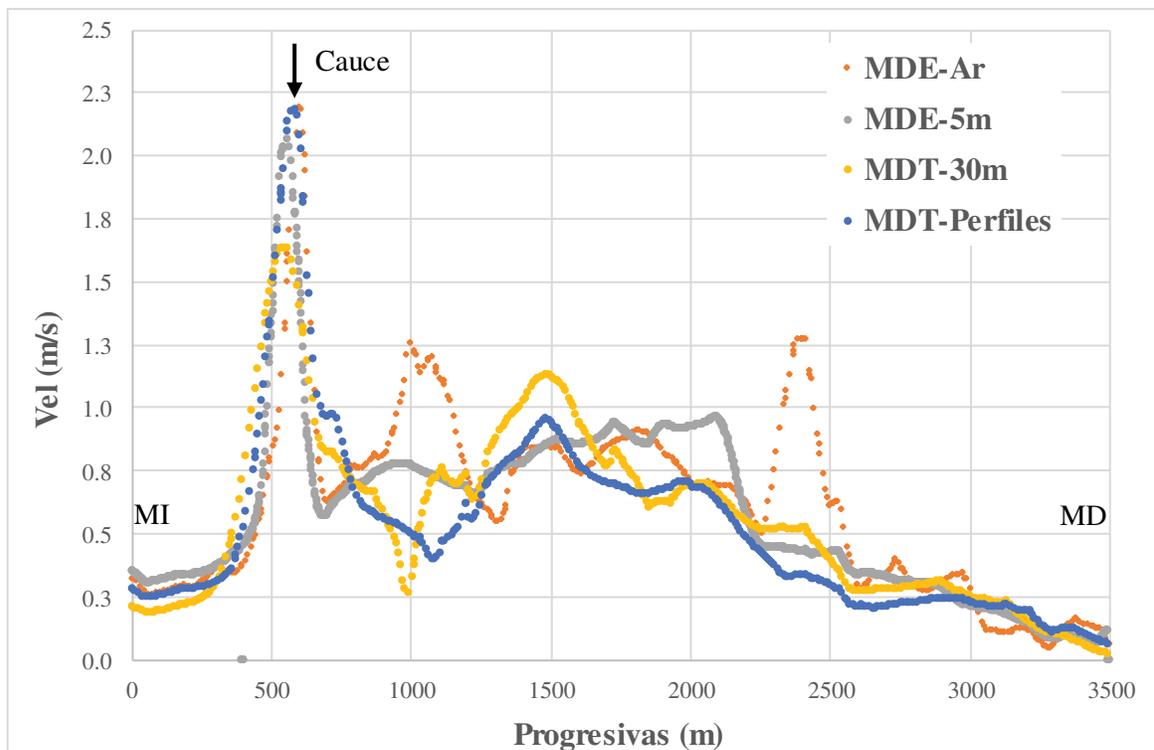


Figura 5.23: Perfiles transversales de velocidades máximas calculadas en sección punto N1.

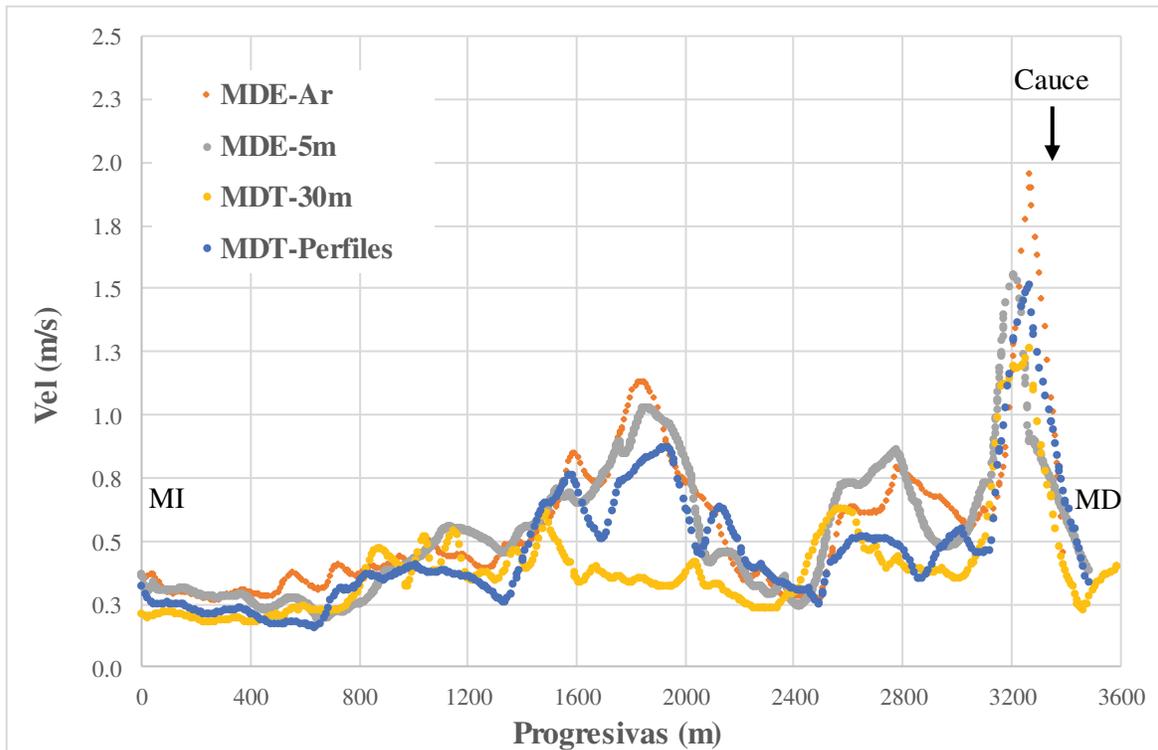


Figura 5.24: Perfiles transversales de velocidades máximas calculadas en sección punto N2.

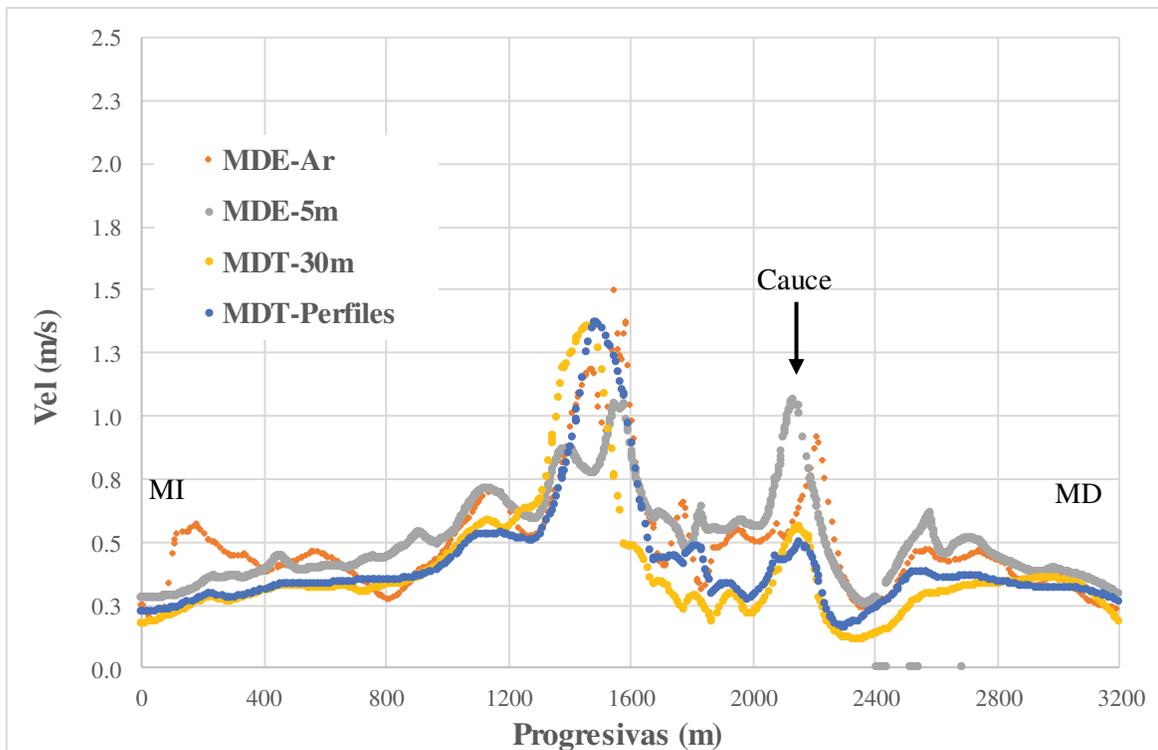


Figura 5.25: Perfiles transversales de velocidades máximas calculadas en sección punto N3.

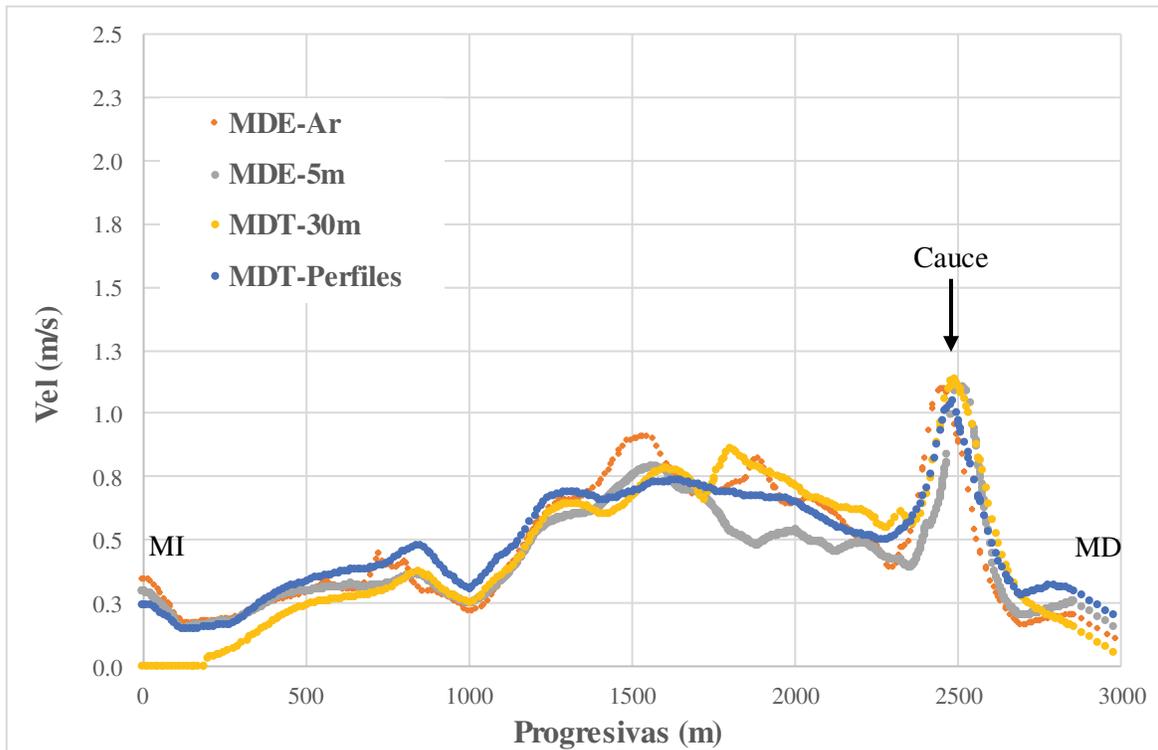


Figura 5.26: Perfiles transversales de velocidades máximas calculadas en sección punto N4.

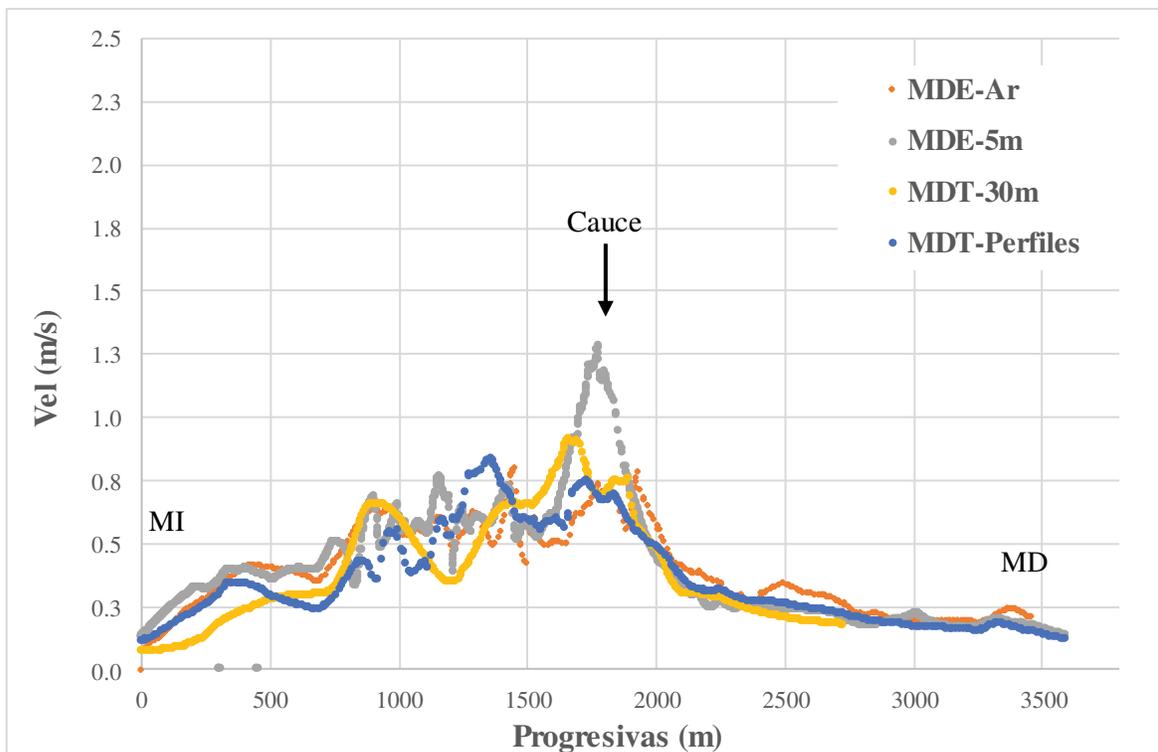


Figura 5.27: Perfiles transversales de velocidades máximas calculadas en sección punto N5.

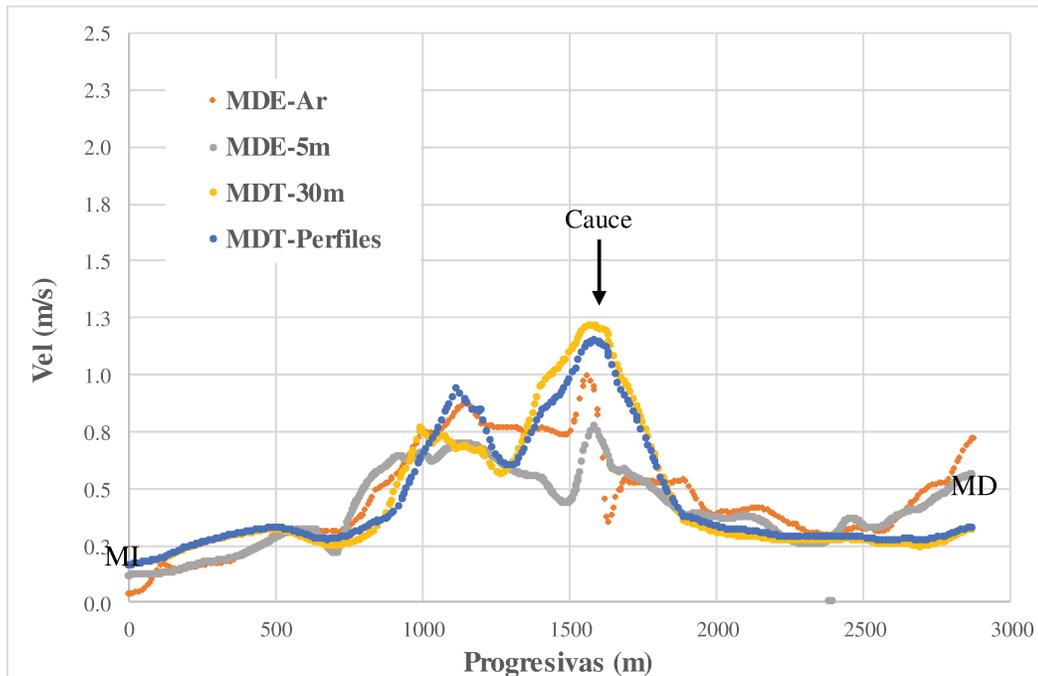


Figura 5.28: Perfiles transversales de velocidades máximas calculadas en sección punto N6.

En cuanto a los anchos de inundación, se detectaron zonas puntuales con diferencias de hasta 200m entre al ancho máximo y mínimo calculado. A los efectos de realizar una comparación general, se calculó el área anega máxima para cada una de las implementaciones y se compararon en el área anegada calculada sobre la imagen radar de mayo de 2003 (ver en Figura 4.1). En la Figura 5.29 se muestra una gráfica con el cálculo mencionado:

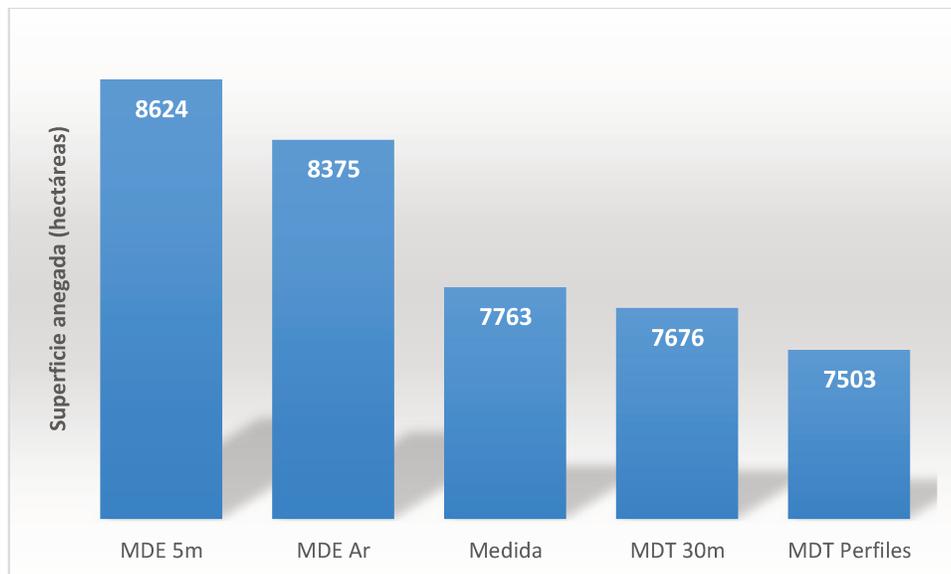


Figura 5.29: Cálculo de áreas anegadas.

Se observa que las mayores superficies se calcularon para los MDE, en coincidencia con los máximos niveles de agua. Para el MDE-5m se determinó una superficie de 8624 hectáreas, para el MDE-Ar, 8375 hectáreas, para el MDT-30m 7676 hectáreas inundadas y para el MDT-Perfiles 7503 hectáreas. La superficie medida sobre la imagen radar fue de 7763 hectáreas. Es decir que la diferencia máxima entre el MDE-5m y el área medida fue del 11%, mientras que con los MDT se obtuvieron buenos ajustes con -1 y -3% de diferencia respecto al valor medido.

### 5.2.3 Comparación para diferentes resoluciones de malla

En este apartado se presenta la comparación de los resultados obtenidos con las diferentes resoluciones de malla, utilizando las condiciones de borde descritas en el punto 4.5 y los valores de coeficiente de rugosidad mostrados en la Tabla 5.2.

En la Tablas 5.5, se muestran los resultados de cotas de pelo de agua máximas calculadas en los puntos donde se cuenta con información medida, con cada una de las resoluciones de malla:

	N1	N2	N3	N4	N5	N6
<b>Cota medida (m)</b>	<b>23.91</b>	<b>23.70</b>	<b>22.82</b>	<b>21.40</b>	<b>19.91</b>	<b>19.80</b>
Cota (m)_Malla 30m	23.83	23.71	22.78	21.33	19.73	19.63
<b>Diferencia (m)</b>	<b>0.08</b>	<b>-0.01</b>	<b>0.04</b>	<b>0.07</b>	<b>0.18</b>	<b>0.17</b>
Cota (m)_Malla 50m	23.79	23.70	22.73	21.30	19.76	19.61
<b>Diferencia (m)</b>	<b>0.12</b>	<b>0.00</b>	<b>0.09</b>	<b>0.10</b>	<b>0.16</b>	<b>0.19</b>
Cota (m)_Malla 80m	23.76	23.67	22.69	21.31	19.72	19.58
<b>Diferencia (m)</b>	<b>0.15</b>	<b>0.03</b>	<b>0.13</b>	<b>0.09</b>	<b>0.19</b>	<b>0.22</b>
Cota (m)_Malla 150m	23.74	23.66	22.66	21.29	19.70	19.57
<b>Diferencia (m)</b>	<b>0.17</b>	<b>0.04</b>	<b>0.16</b>	<b>0.11</b>	<b>0.21</b>	<b>0.23</b>

Tabla 5.5: Cotas de nivel de agua medidas y máximas calculadas con HEC-RAS.

Los resultados demuestran que se repite el mismo patrón para todos los tamaños de malla, donde los mejores ajustes se lograron en la zona alta del dominio de simulación (puntos N1 a N4), con diferencias entre las cotas medidas y calculadas menores a 0.17m. Mientras que en la zona baja (puntos N5 y N6) las diferencias entre los valores medidos y calculados aumentó en el orden de los 0.17 a 0.23m. Esto puede deberse como se explicó en el punto 5.2.1 a la estimación de la configuración de la rugosidad en esa zona, a la certeza de los valores medidos, como así también a la definición del cauce en ese tramo, puesto que como se ve en la Figura 4.4 se trata de un

sector alejado de los perfiles transversales medidos, con lo cual seguramente pudieran existir diferencias respecto a la batimetría real debido a la interpolación.

En las Figuras 5.30, 5.31, 5.32, 5.33, 5.34 y 5.35 se muestran los niveles de pelo de agua máximos calculados en la transversal, para cada uno de los tamaños de malla y la cota medida en cada uno de los puntos. La progresiva 0m de los perfiles se corresponde con la margen izquierda (MI). La margen derecha se indica en las figuras como MD. Por cuestiones de escala, no se presenta en las gráficas el perfil del fondo, ya que al incluir el mismo no se aprecia la diferencia entre los perfiles de pelo de agua para diferentes resoluciones.

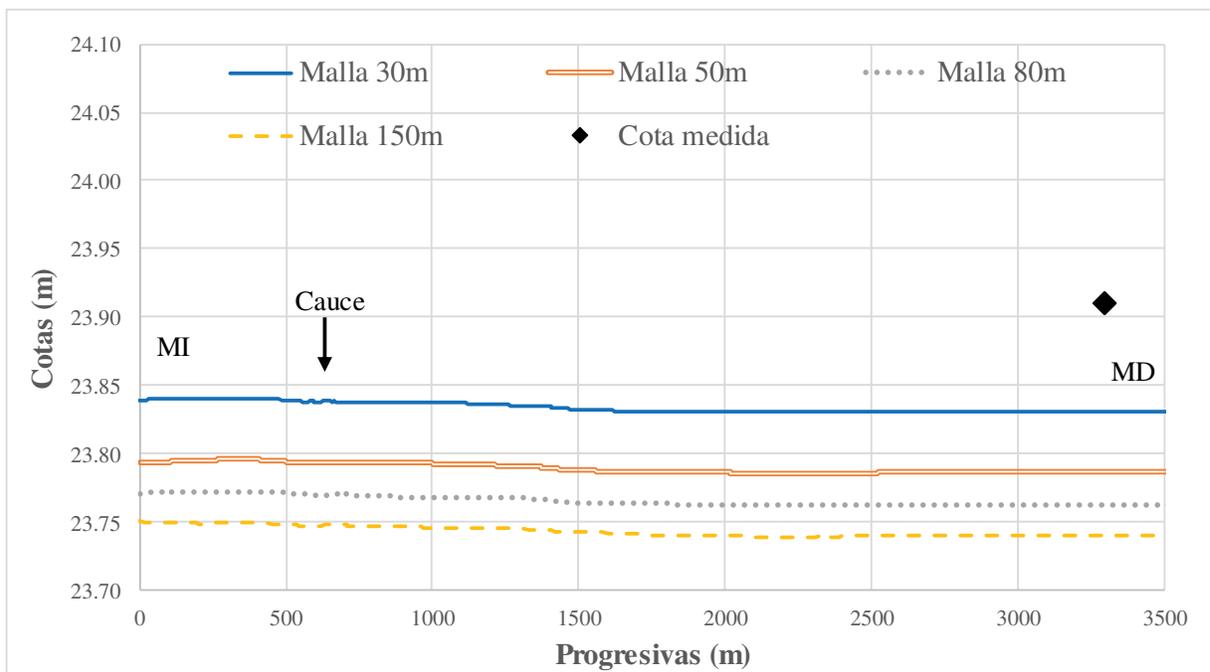


Figura 5.30: Niveles de agua máximos calculados en la sección transversal del punto N1 (medido sobre MD) para cada uno de los tamaños de malla utilizados. MDT-30m.

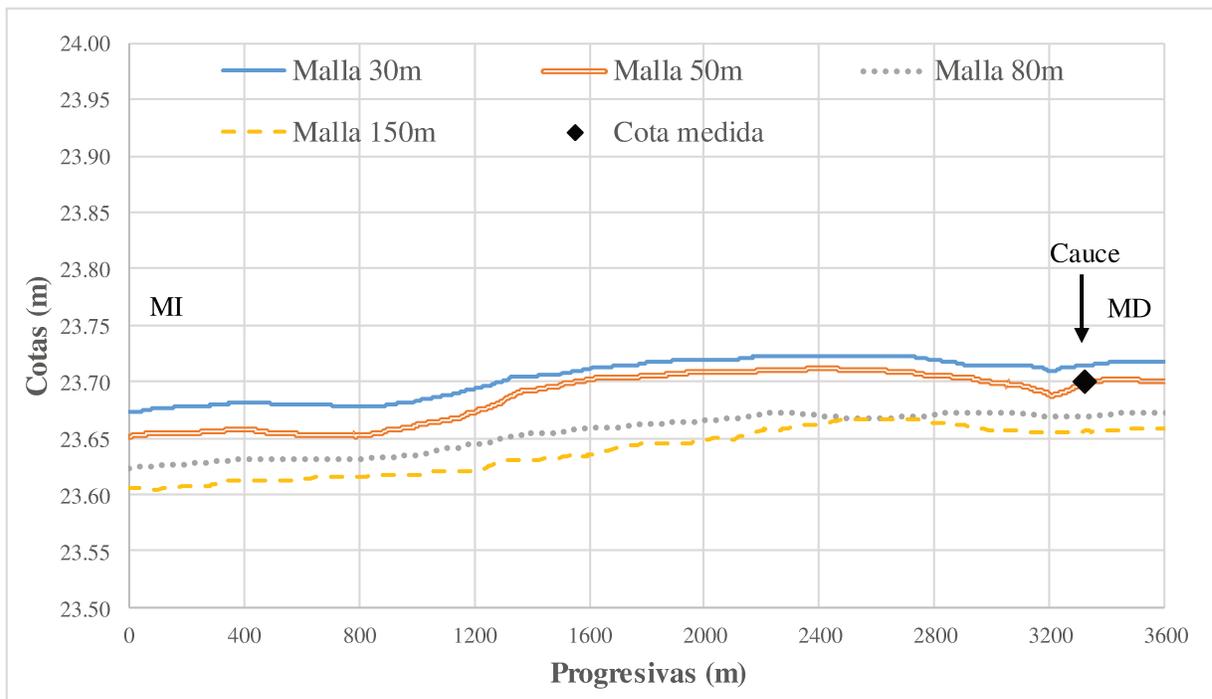


Figura 5.31: Niveles de agua máximos calculados en la sección transversal del punto N2 (medido en el cauce) para cada uno de los tamaños de malla utilizados. MDT-30m.

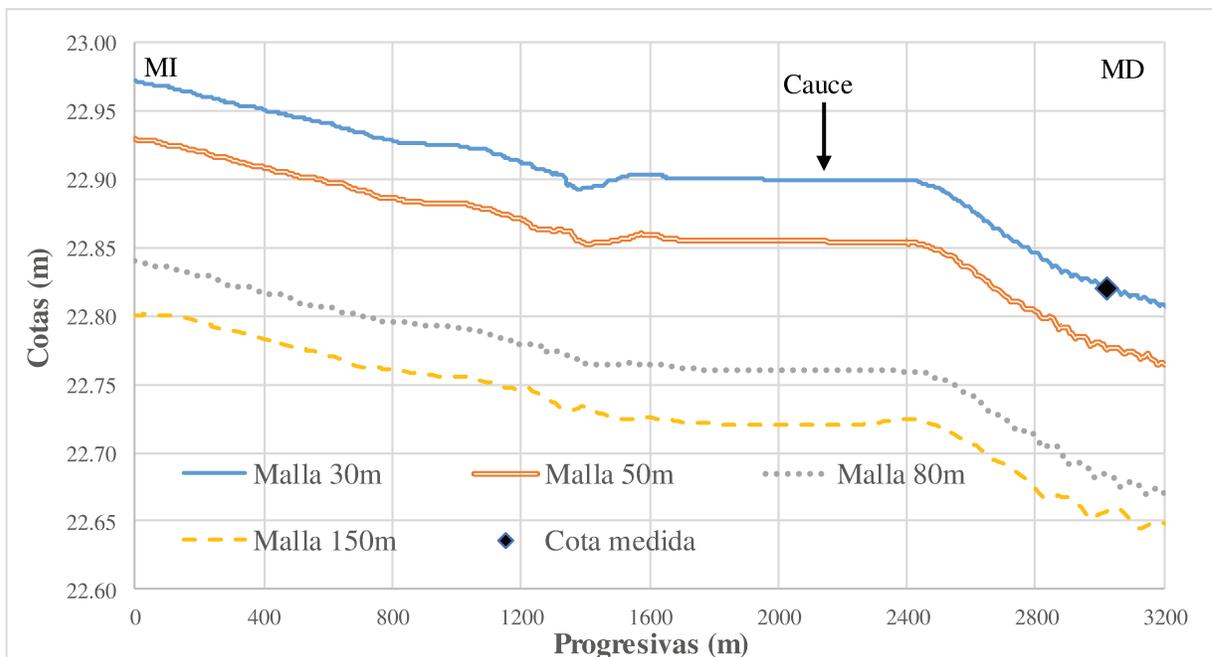


Figura 5.32: Niveles de agua máximos calculados en la sección transversal del punto N3 (medido sobre MD) para cada uno de los tamaños de malla utilizados. MDT-30m.

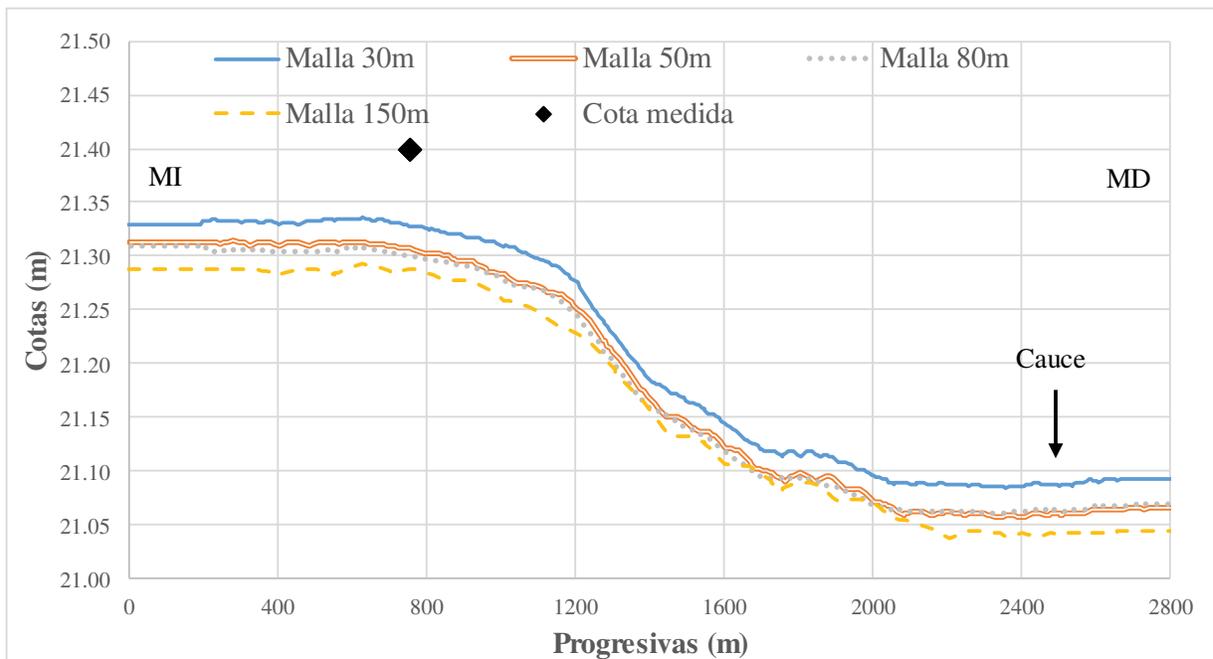


Figura 5.33: Niveles de agua máximos calculados en la sección transversal del punto N4 (medido sobre MI) para cada uno de los tamaños de malla utilizados. MDT-30m.

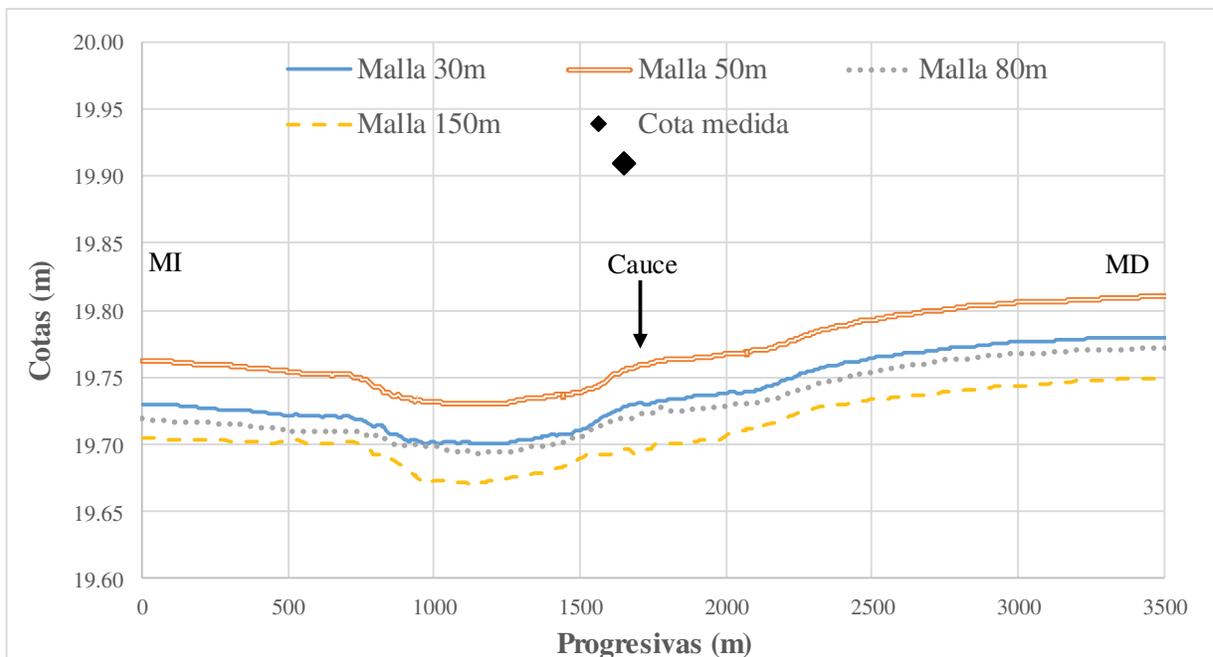


Figura 5.34: Niveles de agua máximos calculados en la sección transversal del punto N5 (medido sobre MD) para cada uno de los tamaños de malla utilizados. MDT-30m.

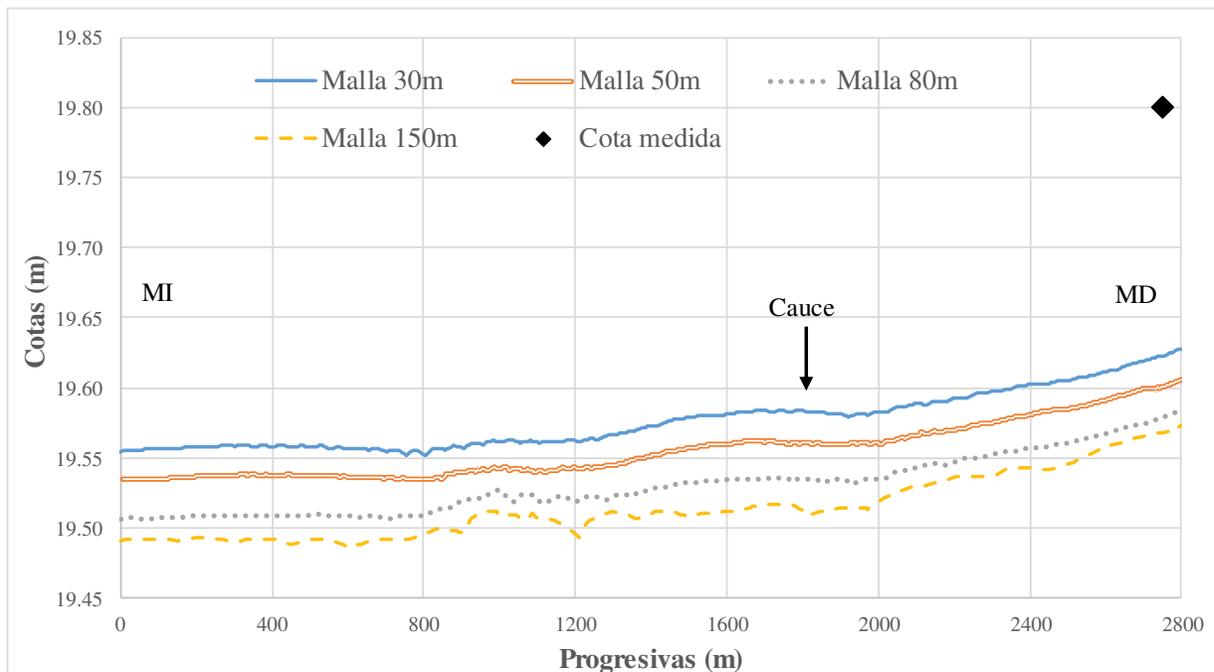


Figura 5.35: Niveles de agua máximos calculados en la sección transversal del punto N6 (medido sobre MD) para cada uno de los tamaños de malla utilizados. MDT-30m.

En la Tabla 5.5 como en las figuras 5.30 a 5.35 se observa que los mayores niveles calculados se obtuvieron con la resolución de malla de 30m x 30m, y que los mismos fueron disminuyendo a medida que aumenta la resolución.

Las diferencias de niveles entre la resolución de 30m x 30m y 150m x 150m estuvieron en promedio en los 0.09m, mientras que la diferencia entre el tiempo de una y otra simulación fue de 6 horas y 10 minutos aproximadamente (6 hs 36min para la resolución mayor, contra 0hs 22min para la resolución menor). Esto implica que solo en caso de que se requiera un elevado detalle en la precisión de los resultados, sería necesario utilizar una malla con tamaños de celda más pequeños. De otro modo, con un tamaño de celdas de 150m x 150m, se disminuye el tiempo de simulación unas 20 veces, obteniendo resultados con un margen de error menor a los 0.10m, en una zona donde en la planicie, las profundidades menores del agua estuvieron en el orden de 1m, mientras que en el cauce las mismas alcanzaron los 10-12m.

En las Figuras 5.36, 5.37, 5.38, 5.39, 5.40 y 5.41 se muestran los perfiles de velocidad máxima calculados en la transversal de los puntos donde se cuenta con cotas medidas, para el MDT-30m y cada uno de los tamaños de malla implementados.

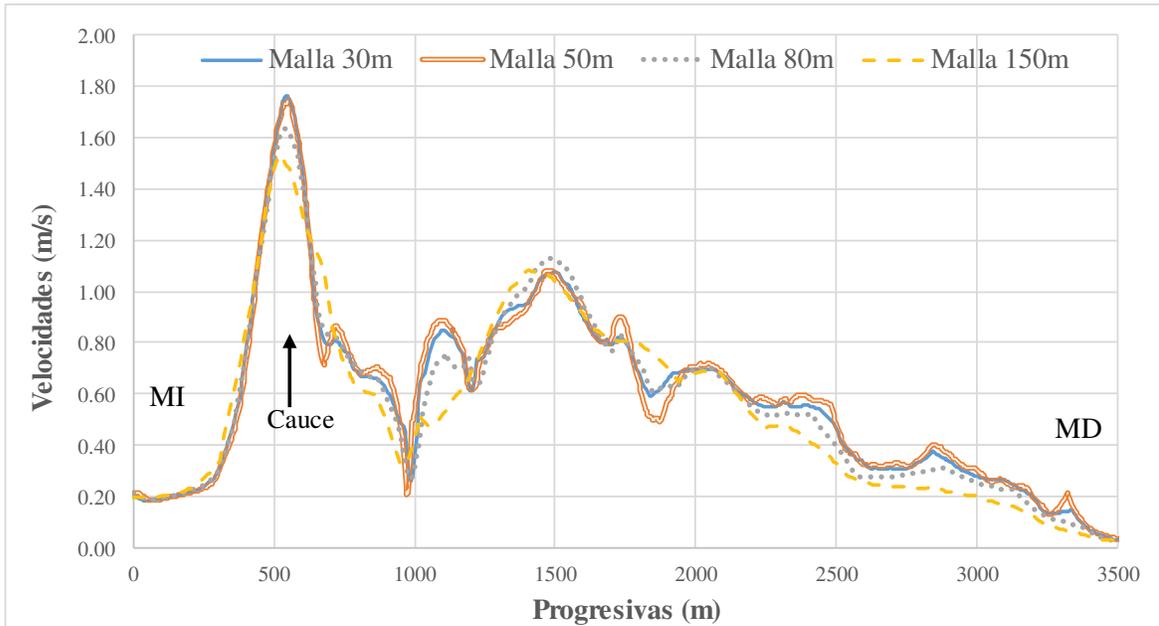


Figura 5.36: Perfiles de velocidades máximas calculadas en la sección transversal del punto N1 para cada uno de los tamaños de malla utilizados. MDT-30m.

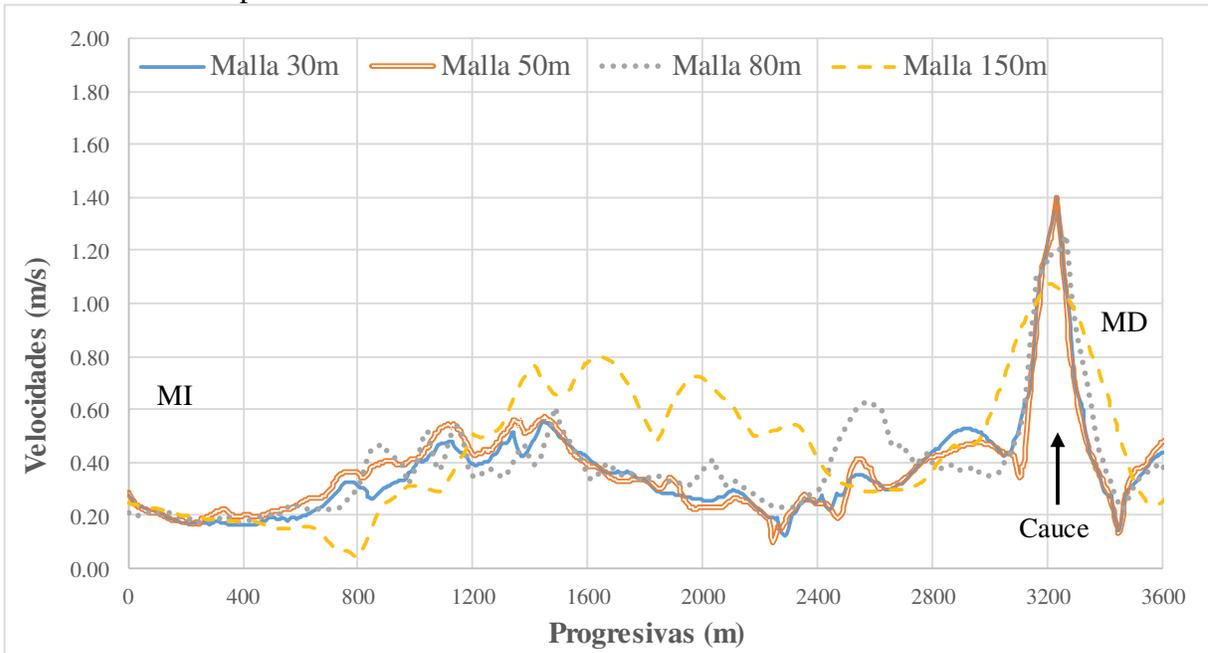


Figura 5.37: Perfiles de velocidades máximas calculadas en la sección transversal del punto N2 para cada uno de los tamaños de malla utilizados. MDT-30m.

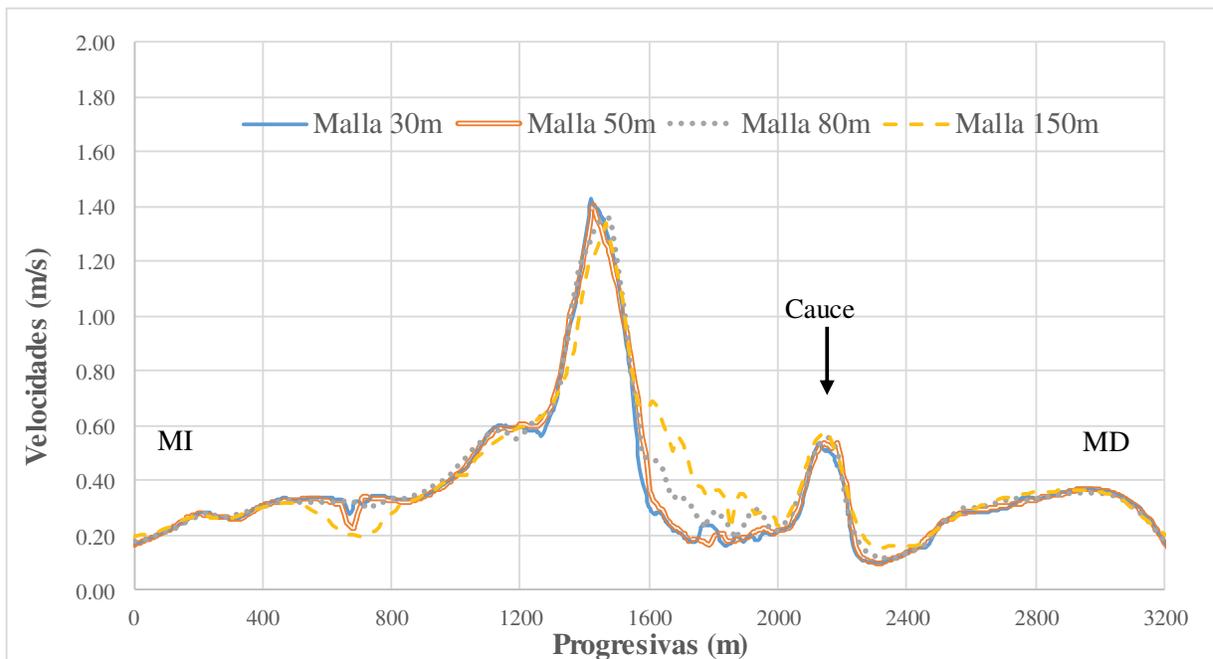


Figura 5.38: Perfiles de velocidades máximas calculadas en la sección transversal del punto N3 para cada uno de los tamaños de malla utilizados. MDT-30m.

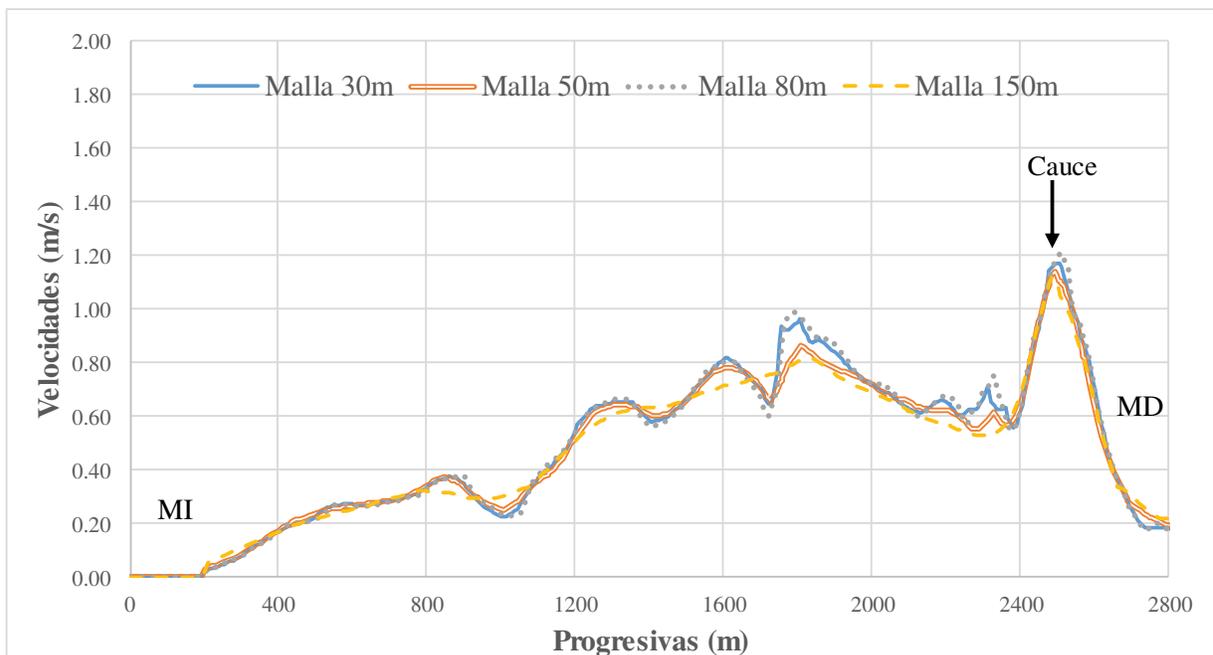


Figura 5.39: Perfiles de velocidades máximas calculadas en la sección transversal del punto N4 para cada uno de los tamaños de malla utilizados. MDT-30m.

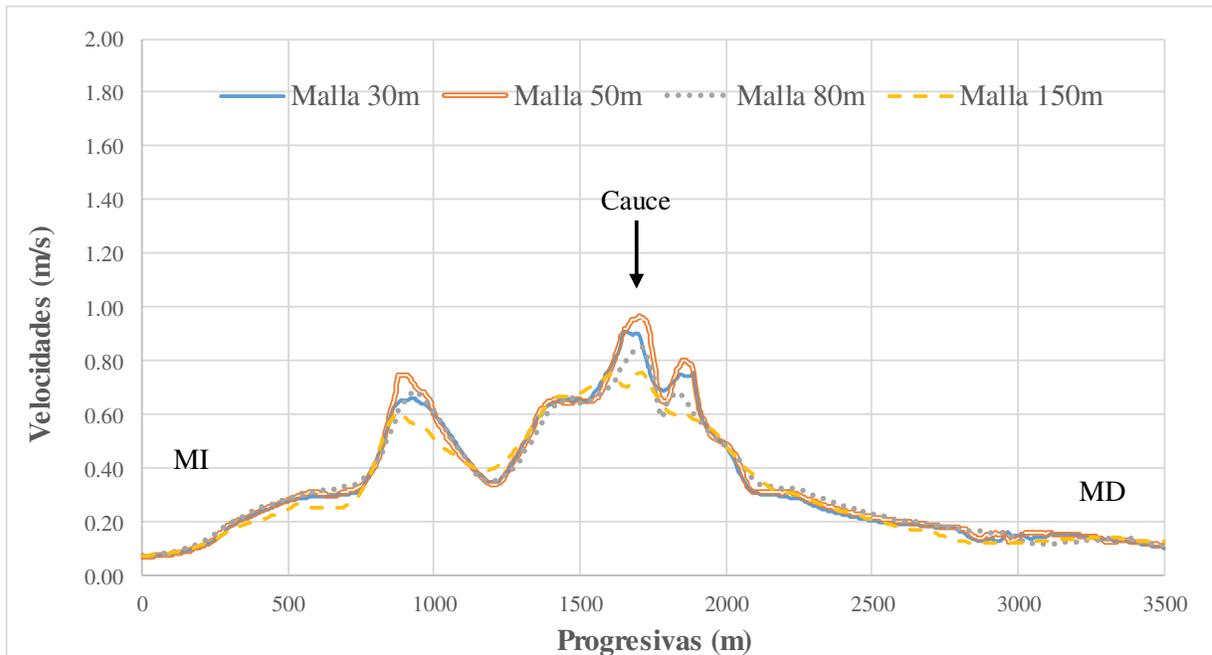


Figura 5.40: Perfiles de velocidades máximas calculadas en la sección transversal del punto N5 para cada uno de los tamaños de malla utilizados. MDT-30m.

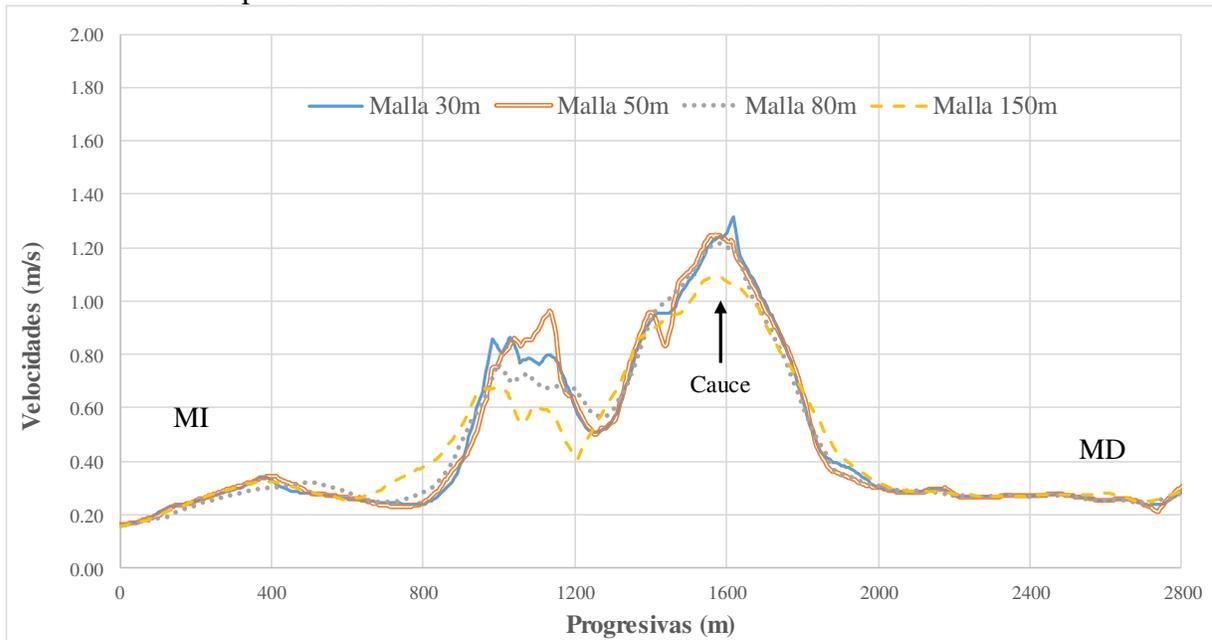


Figura 5.41: Perfiles de velocidades máximas calculadas en la sección transversal del punto N6 para cada uno de los tamaños de malla utilizados. MDT-30m.

Se aprecia a nivel general, que las diferencias de velocidades son mínimas, menores al 10%, en todos los casos. También se observa que excepto en la sección del punto N3, en todos los casos las velocidades máximas se dieron en el cauce. En la sección mencionada existe un meandro

que provoca un cambio de dirección del cauce principal prácticamente a 90°. En la Figura 5.42 se muestra un detalle de la sección definida en HEC-RAS y la ubicación del punto N3 sobre la imagen satelital de Google Earth.

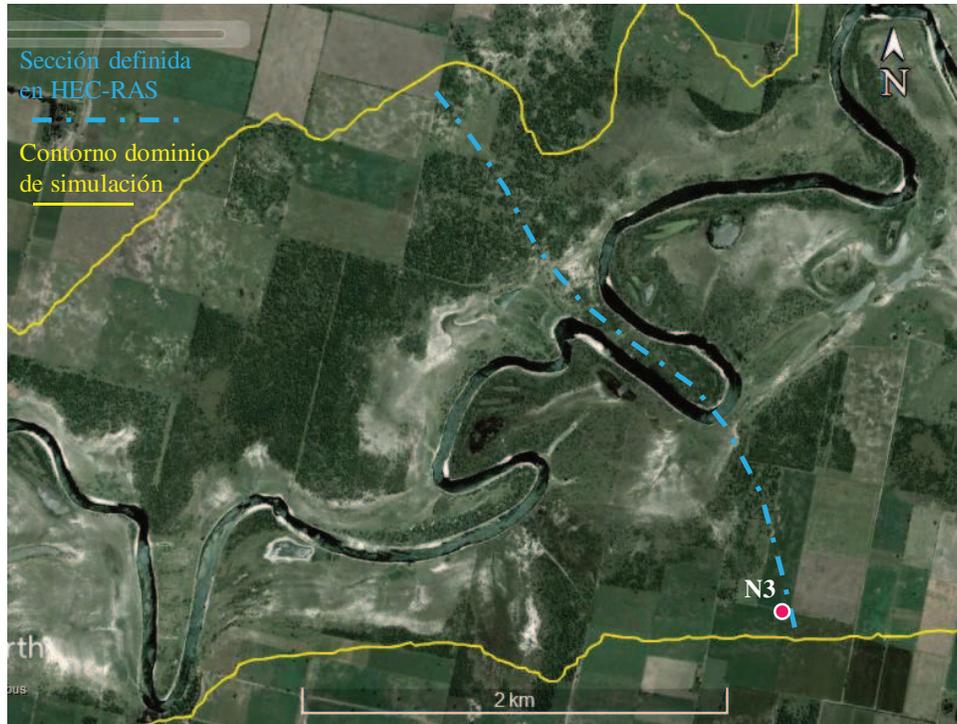


Figura 5.42: Ubicación de la sección definida en HEC-RAS y ubicación del punto N3 sobre imagen satelital de Google Earth. Fecha 10/10/2005.

Durante la crecida se produjo el desborde del cauce principal y la mayor parte del flujo se condujo por la planicie, “cortando” el meandro del cauce principal. Esta situación puede verificarse en el detalle del mapa de velocidades que se muestra en la Figura 5.43. Por esta razón, las velocidades máximas en la sección bajo análisis no se dieron en el cauce, tal como se mostró en los perfiles de la Figura 5.38.

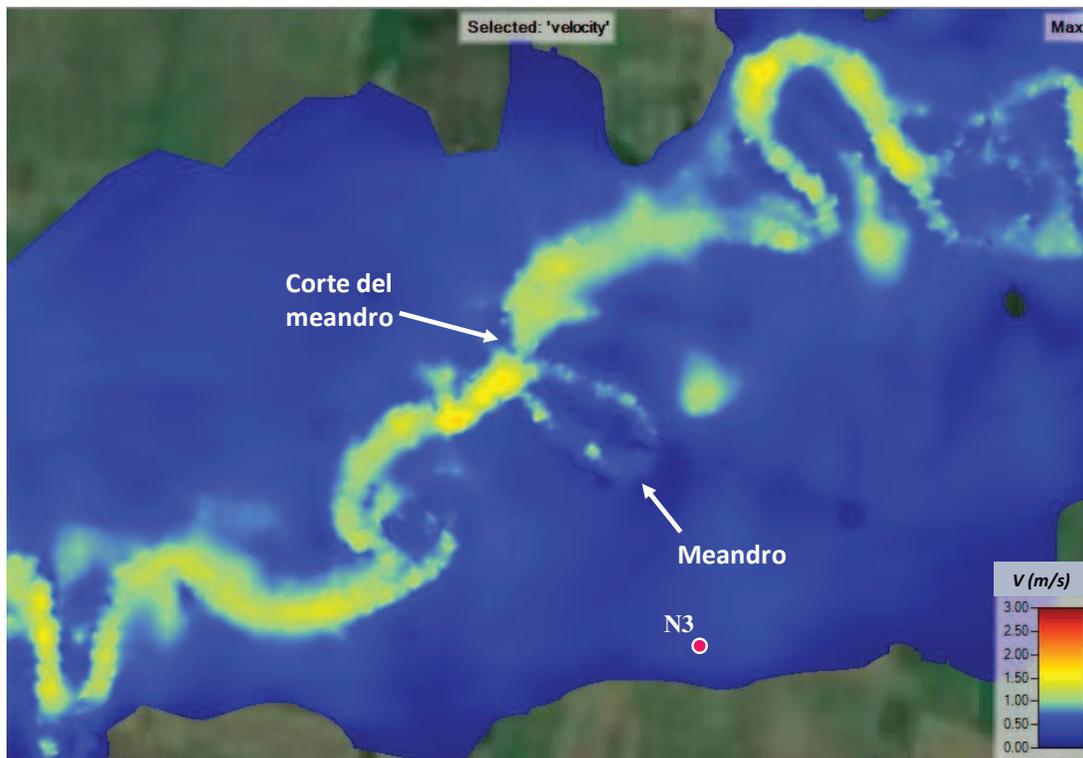


Figura 5.43: Detalle del mapa de velocidades máximas en la sección del punto N3. MDT-30m.

#### 5.2.4 Comparación entre los métodos de solución

Como se mencionó en el capítulo de Metodología, se realizaron simulaciones a los efectos de definir el método de resolución de las ecuaciones hidrodinámicas, puesto que HEC-RAS 5.0 permite seleccionar al usuario entre resolver las ecuaciones completas de Saint-Venant (onda dinámica), o bien, despreciar los términos inerciales y resolver las ecuaciones de la onda difusiva.

Se presentan en este apartado los resultados obtenidos entre ambos métodos, utilizando la malla de 80m x 80m y el MDT-30m. En la Tabla 5.6 se muestran las cotas máximas de nivel de agua calculadas en los puntos donde se cuenta con cotas medidas, para cada uno de los métodos de solución:

Punto	Cota medida (m)	Cota onda Difusiva (m)	Cota onda Dinámica (m)	Diferencia Din. - Dif. (m)
N1	23.91	23.61	23.76	0.15
N2 (RP 6)	23.70	23.49	23.67	0.18
N3	22.82	22.54	22.69	0.15
N4	21.40	21.09	21.31	0.22
N5	19.91	19.59	19.72	0.13
N6	19.80	19.41	19.58	0.17

Tabla 5.6: Cotas máximas de nivel de agua calculadas con la onda difusiva y con la onda dinámica. MDT-30m, malla de 80m x 80m.

En la Tabla 5.7 se presentan las diferencias en relación a la profundidad del agua en cada punto:

Punto	$h$ Difusiva (m)	$h$ Dinámica (m)	Diferencia $h_{Dif} - h_{Din}$ (m)	Diferencia % de $h$
N1	0.79	0.94	0.15	16
N2 (RP 6)	10.07	10.25	0.18	2
N3	1.16	1.31	0.15	11
N4	2.27	2.49	0.22	9
N5	3.60	3.73	0.13	3
N6	0.29	0.46	0.17	37

Tabla 5.7: Diferencias de niveles entre la onda difusiva y la onda dinámica en relación a la profundidad de agua.

En base a los cálculos se determinó que existe una diferencia entre 0.13 y 0.22m entre los niveles calculados con la onda difusiva y la onda dinámica, siendo los valores superiores correspondientes a este último método de resolución. Si se considera la profundidad del agua en cada punto, se observa que en zonas como la del punto N2, donde se determinó una profundidad de más de 10m, la diferencia entre los niveles calculados por uno y otro método es del 2% de la profundidad. Sin embargo, en zonas de la planicie con pocas profundidades (como la sección del punto N6), la diferencia de niveles es del 37% de la profundidad. Es decir que al despreciar los términos inerciales de las ecuaciones de Saint-Venant se subestiman los niveles de agua. Adicionalmente, el tiempo de simulación requerido para la simulación de la onda difusiva fue de un 10% menor que para la onda dinámica. Las diferencias de los perfiles de velocidades calculados entre uno y otro método fueron inferiores al 8% en el cauce, registrándose velocidades superiores con el método de la onda difusiva. En la planicie, las diferencias fueron menores al 5%.

Adicionalmente, se realizó un análisis de sensibilidad del coeficiente de viscosidad turbulenta. Si bien el sistema HEC-RAS realiza un proceso de difusión numérica automático ([USACE a, 2016](#)) también permite al usuario incluir el cálculo de los efectos de la turbulencia. Como se explicó en la metodología en el punto 4.3.1, el coeficiente de viscosidad turbulenta  $\nu_t$ , se calcula a partir de la profundidad del flujo, la velocidad de corte, y un coeficiente empírico adimensional ( $D_T$ ). El valor de este coeficiente por defecto es 0, es decir que no se utiliza. No obstante, en caso de que el usuario decida utilizar un valor distinto de 0, en el manual de usuario ([USACE a, 2016](#)) se especifican rangos de valores sugeridos para tal coeficiente en función de la existencia o no de meandros, y de la rugosidad.

En el presente trabajo se realizó una simulación para la malla de 80m x 80m y el MDT-30m con un valor elevado de  $D_T=3$  para evaluar la sensibilidad de dicho parámetro. Los resultados demostraron que prácticamente no hubo variación entre una y otra simulación, con variaciones de niveles menos a 0.02m y de menos del 5% en las velocidades máximas. Esto puede deberse a que, como se trata de una simulación en aguas altas, el efecto de los meandros es insignificante. Para una simulación en aguas bajas, con flujo encauzado, este coeficiente podría cobrar relevancia.

## **5.3 Resultados del modelo SisBaHiA**

### **5.3.1 Malla de elementos finitos**

Como se mencionó en el punto 4.4.2, se utilizaron dos escalas diferentes para representar la planicie de inundación y el cauce. La malla elaborada se compone de un total de 5282 elementos y 17939 nodos. En la Figura 5.44 se muestra una imagen de la malla utilizada, y detalles en la zona de curvas, donde se identifica la diferencia entre las dos escalas utilizadas para representar el cauce y la planicie.

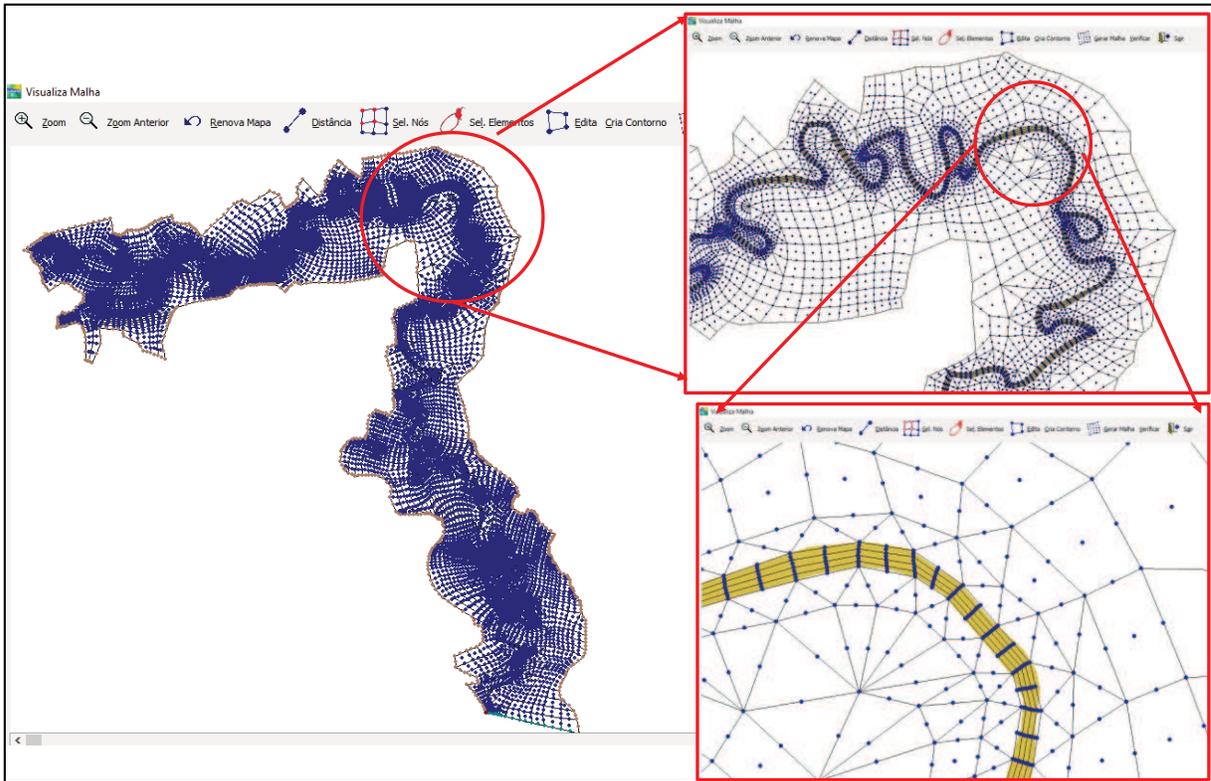


Figura 5.44: Detalhes de la malla utilizada en SisBaHiA.

### 5.3.2 Cálculo de las variables hidráulicas

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos para el caudal pico de 4000 m<sup>3</sup>/s, con la configuración de rugosidad equivalente a la utilizada en HEC-RAS, cuyos valores se muestran en la Tabla 5.8:

	$k$ (m)	$n$ (sm <sup>-1/3</sup> )
Cauce	0.095	0.033
Suelo desnudo	0.238	0.034
Gramínea	0.307	0.050
Pasturas	0.392	0.056
Cultivos	0.548	0.067
Praderas	0.834	0.089
Monte	1.084	0.110

Tabla 5.8: Altura de rugosidad total  $k$  utilizada en SisBaHiA para cada clase, comparada con el coeficiente de rugosidad  $n$  de Manning usado en HEC-RAS.

En la Tabla 5.9 se muestran las cotas de pelo de agua calculadas y medidas en las secciones donde se contó con información para calibrar el modelo:

	N1	N2	N3	N4	N5	N6
<b>Cota medida (m)</b>	<b>23.91</b>	<b>23.70</b>	<b>22.82</b>	<b>21.40</b>	<b>19.91</b>	<b>19.80</b>
Cota calculada (m)	24.01	24.01	22.74	21.61	20.17	20.07
Diferencia (m)	-0.10	-0.31	0.08	-0.21	-0.26	-0.27

Tabla 5.9: Cotas de nivel de agua medidas y calculadas con SisBaHiA. MDT-30m.

Se observa que los valores calculados se encuentran por encima de los niveles medidos, entre 0.08 y 0.31m, excepto en la sección correspondiente al punto N3, donde la cota calculada fue 0.08m menor que la registrada. En la Tabla 5.10 se muestra la comparación de las cotas calculadas con HEC-RAS para la calibración y con SisBaHiA:

Punto	Cota medida (m)	HEC - RAS		SisBaHiA	
		Cota calculada (m)	Diferencia (m)	Cota calculada (m)	Diferencia (m)
N1	<b>23.91</b>	23.83	0.08	24.01	-0.10
N2	<b>23.70</b>	23.71	-0.01	24.01	-0.31
N3	<b>22.82</b>	22.78	0.04	22.74	0.08
N4	<b>21.40</b>	21.33	0.07	21.61	-0.21
N5	<b>19.91</b>	19.73	0.18	20.17	-0.26
N6	<b>19.80</b>	19.63	0.17	20.07	-0.27

Tabla 5.10: Cotas de nivel de agua medidas y calculadas con HEC-RAS y SisBaHiA.

Se aprecia que para los resultados de SisBaHiA las diferencias entre las cotas calculadas y medidas aumenta, en promedio unos 0.20m. En la Figura 5.45 se muestra el mapa de profundidades de agua máximas en calculadas en todo el dominio de simulación:

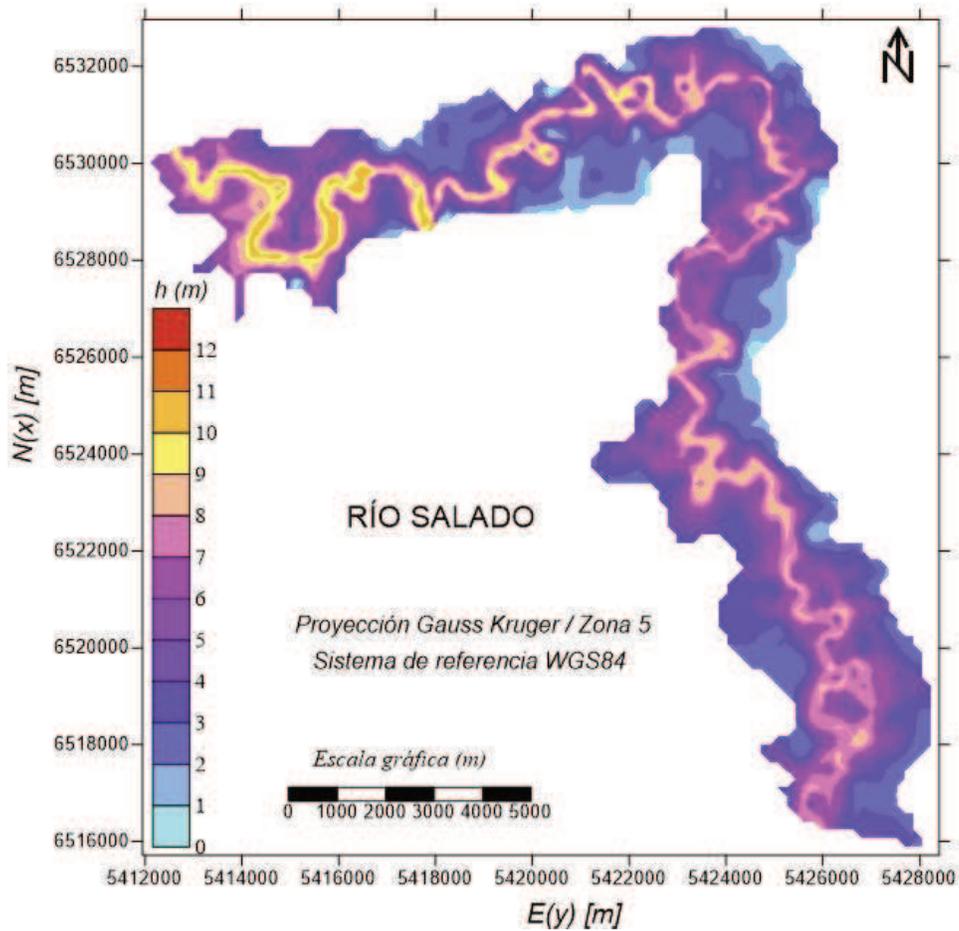


Figura 5.45: Mapa de profundidades máximas calculadas con SisBaHiA. MDT-30m.

Las profundidades máximas dentro del cauce estuvieron en el orden de los 9-10 m, mientras que en la planicie las mismas estuvieron en general por debajo de los 6m, con valores mínimos entre 0.80-2.00m en los extremos. Estos valores, representan una sobre estimación respecto a las profundidades registradas por la Municipalidad de Esperanza, y están en relación con las cotas de agua calculadas que se muestran en la Tabla 5.9, donde los niveles calculados estuvieron en todos los casos por encima de los medidos.

En las Figuras 5.46 se muestra el mapa de vectores de velocidad calculado:

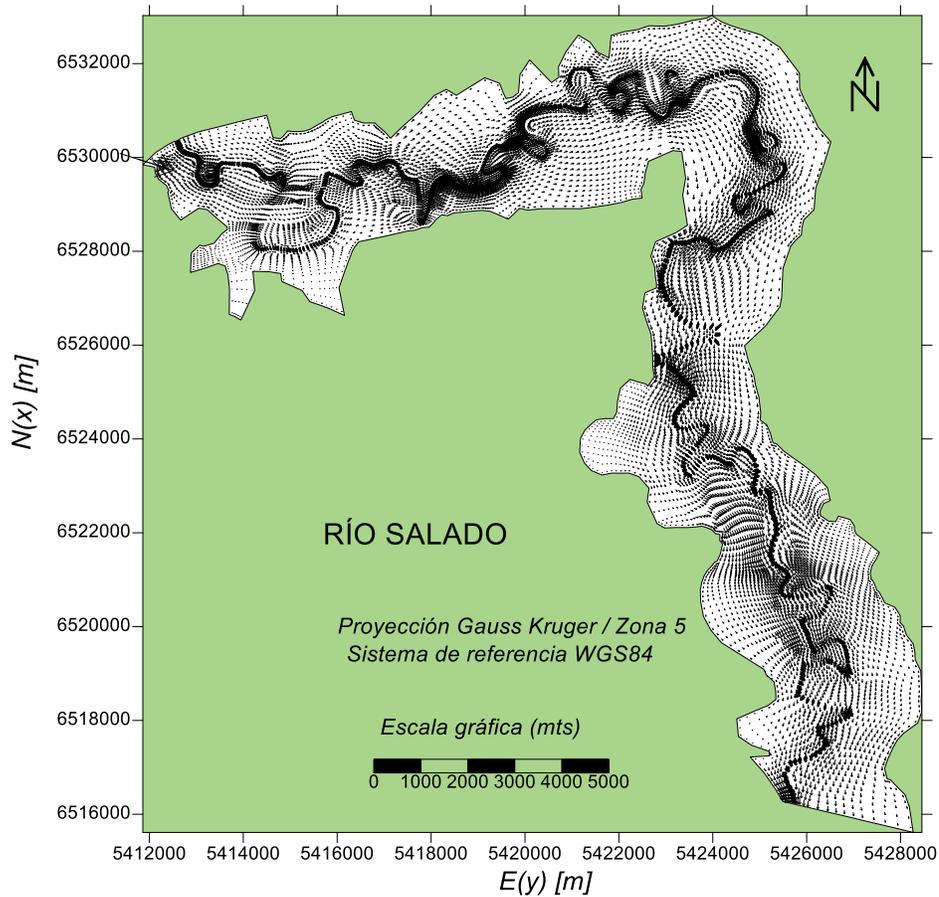


Figura 5.46: Mapa de vectores de velocidades máximas calculadas con SisBaHiA.

En las Figuras 5.47, 5.48 y 5.49 se muestran detalles del mapa de vectores de velocidad en la zona de la RP6 (punto N2), en la zona del punto N3 y en el sector de Rincón del Pintado (punto N4) respectivamente.

En la Figura 5.47 se observa cómo se condujo el flujo a través de los puentes aliviadores del terraplén de la ruta, ya que se observan vectores de velocidad de mayor magnitud que en el resto de la planicie (ver detalle en el círculo color rojo)

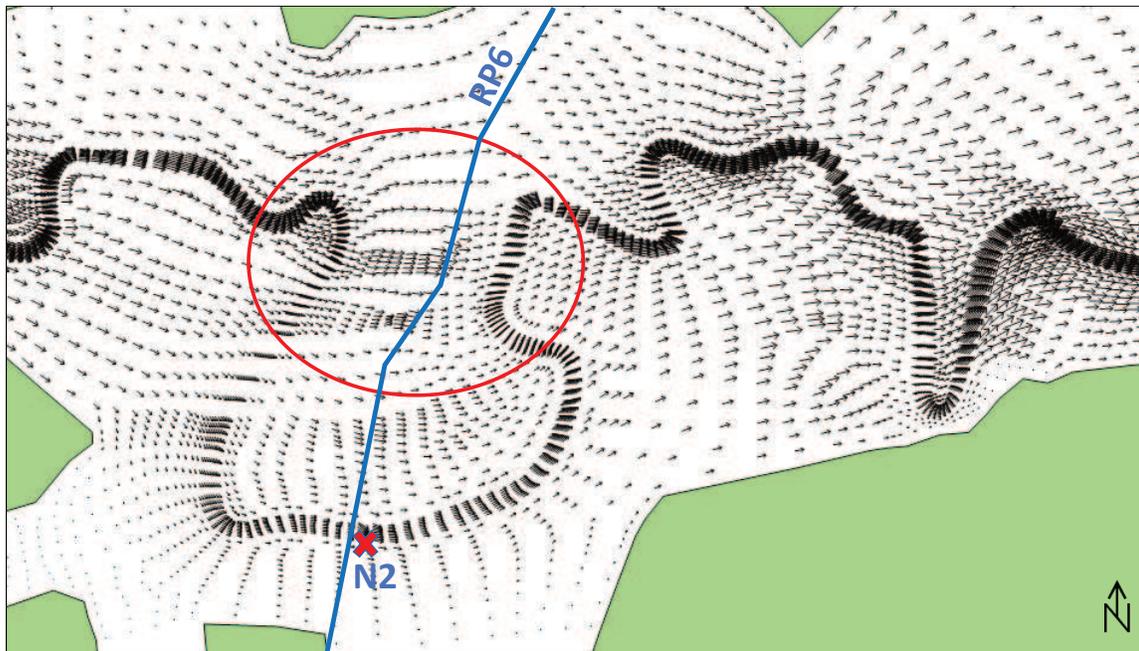


Figura 5.47: Detalle del mapa de vectores de velocidad calculados con SisBaHiA en la zona de la RP6. Escala aproximada: 1cm=1.8 m/s.

En la Figura 5.48 se aprecia una situación comparable a los mostrado en el Figura 5.23 en el detalle del mapa de velocidades calculado con HEC-RAS, donde se determinó que las velocidades máximas se dieron en la planicie y no en el cauce, debido a la existencia de un meandro cerrado donde durante el pico de la crecida se produjo el corte del mismo.

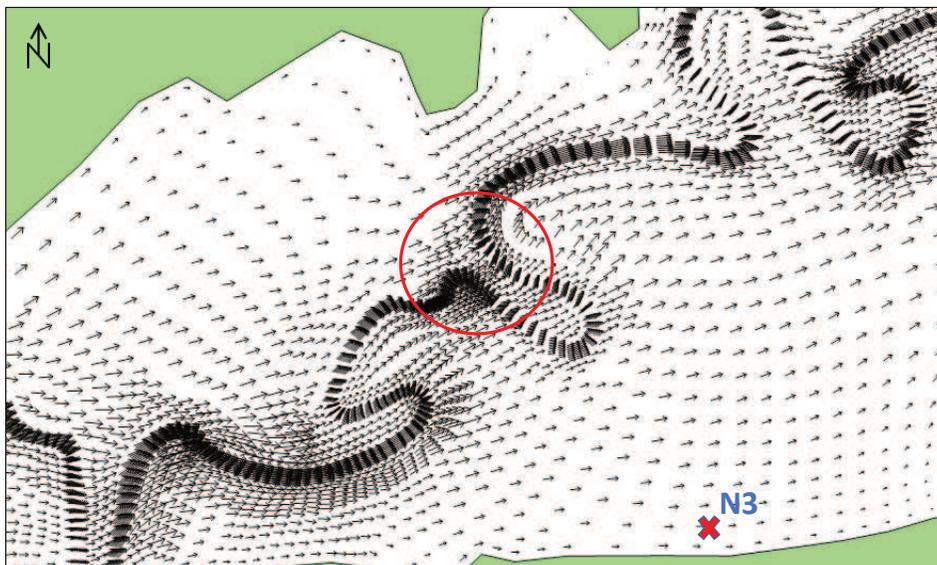


Figura 5.48: Detalle del mapa de vectores de velocidad calculados con SisBaHiA en la zona del punto N3. Escala aproximada: 1cm=1.8 m/s.

En la Figura 5.49, en la zona de Rincón del Pintado se calcularon vectores de velocidad de igual o mayor magnitud que en el cauce, lo cual indicaría que se condujo gran parte del flujo por la planicie.

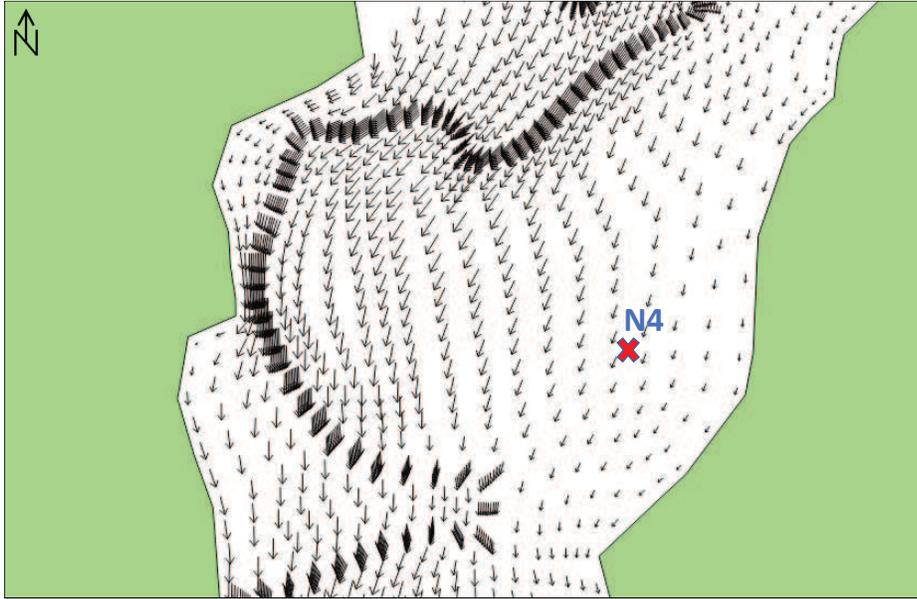


Figura 5.49: Detalle del mapa de vectores de velocidad calculados con SisBaHiA en la zona de Rincón del Pintado punto N4. Escala aproximada: 1cm=1.8 m/s.

En las Figuras 5.50, 5.51, 5.52, 5.53, 5.54 y 5.55 se muestran los perfiles transversales de velocidades calculadas con SisBaHiA comparados con los calculados con HEC-RAS en las secciones donde se contó con datos medidos de nivel de agua.

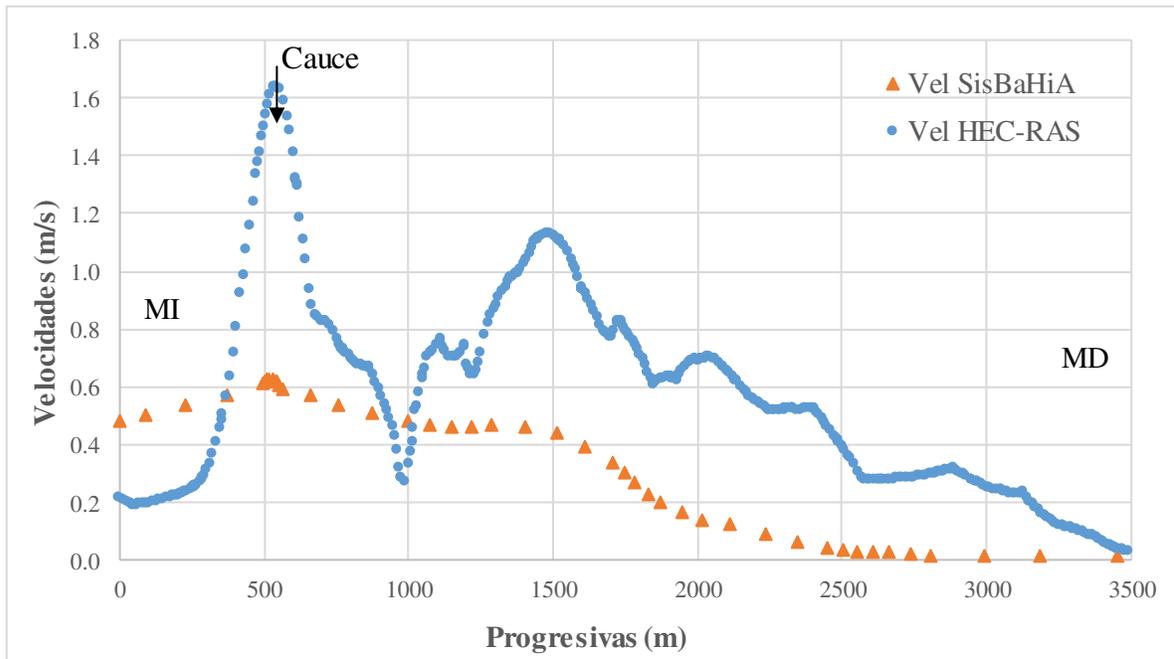


Figura 5.50: Perfil transversal de velocidades máximas calculadas con SisBaHiA y HEC-RAS en la sección N1.

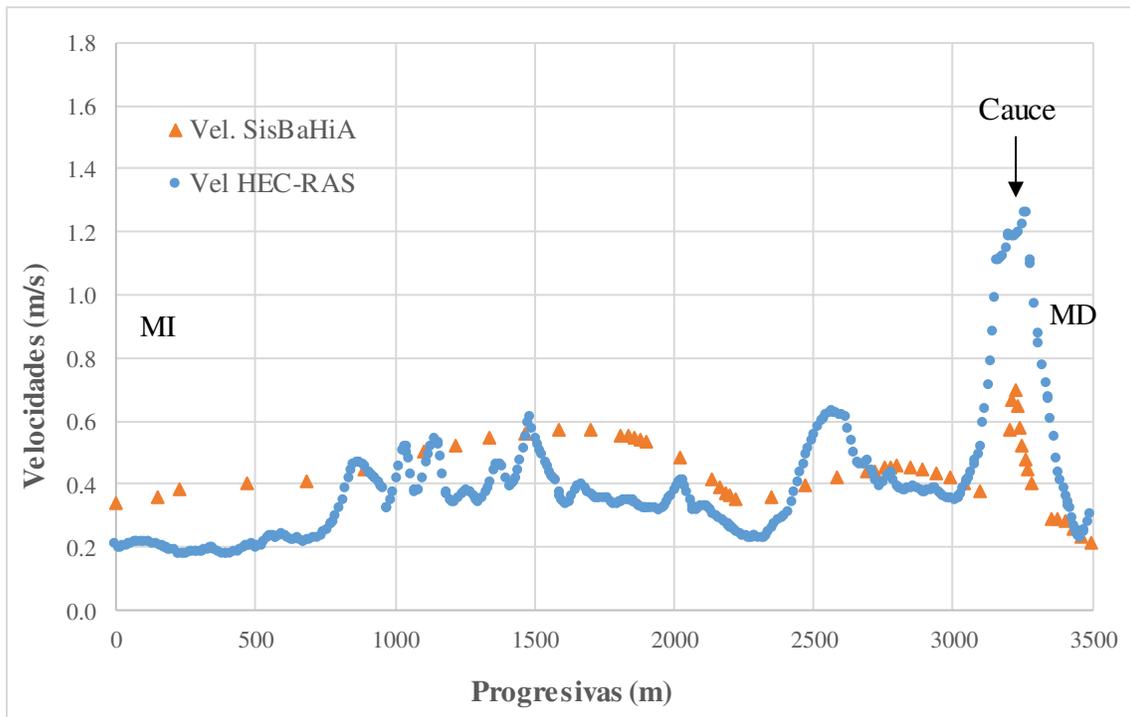


Figura 5.51: Perfil transversal de velocidades máximas calculadas con SisBaHiA y HEC-RAS en la sección N2.

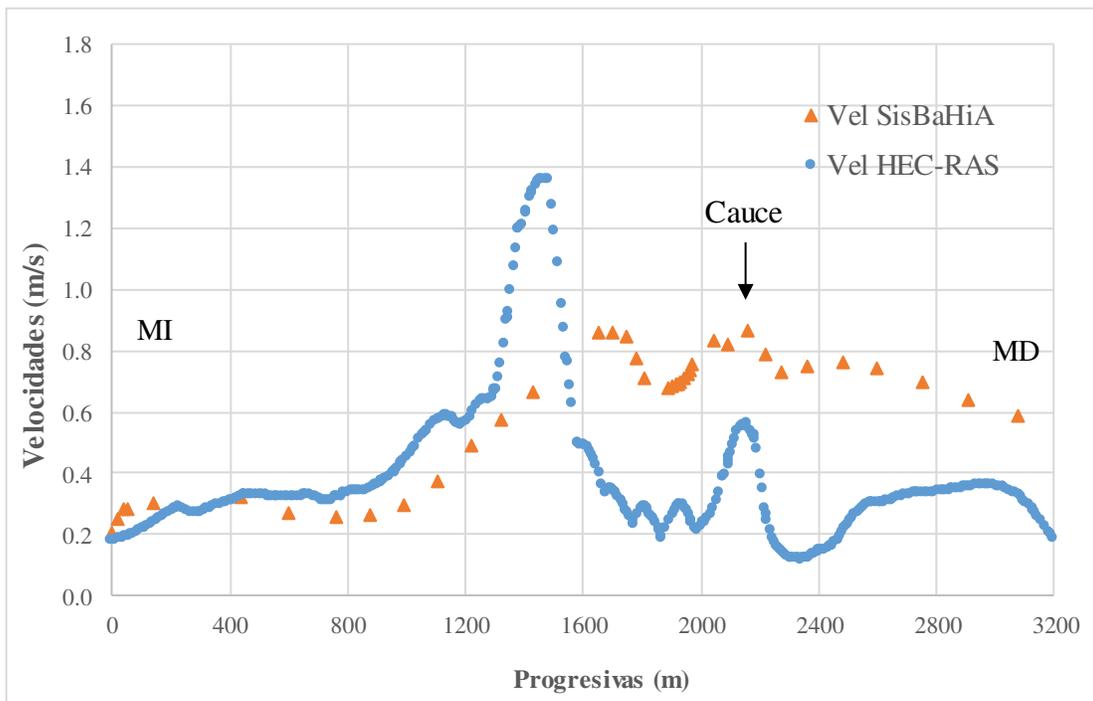


Figura 5.52: Perfil transversal de velocidades máximas calculadas con SisBaHiA y HEC-RAS en la sección N3.

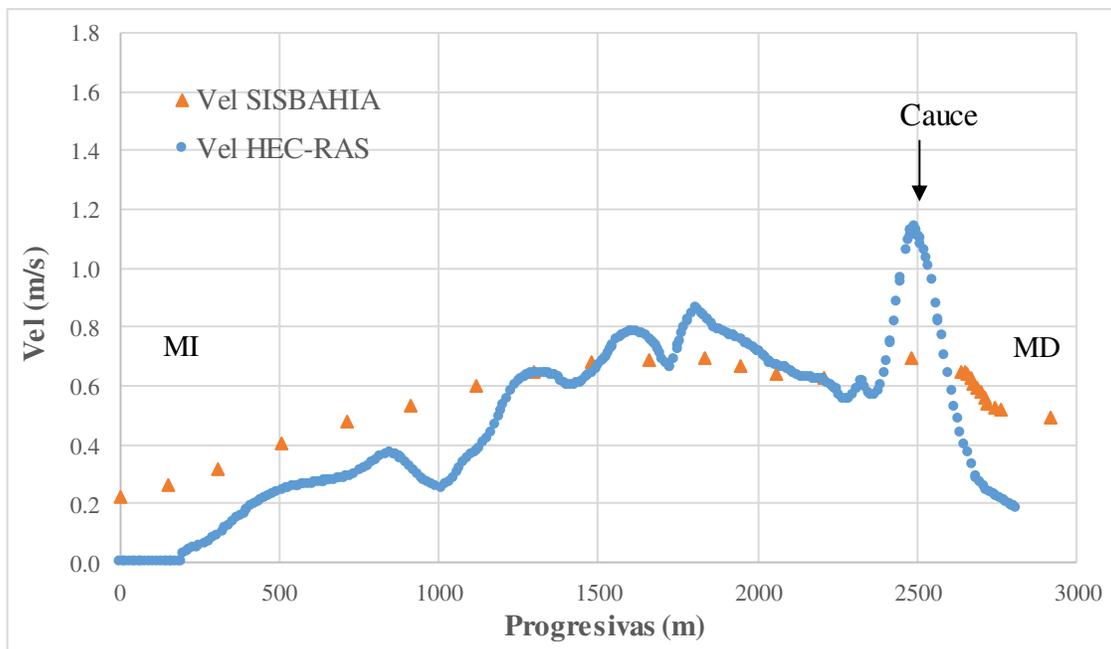


Figura 5.53: Perfil transversal de velocidades máximas calculadas con SisBaHiA y HEC-RAS en la sección N4.

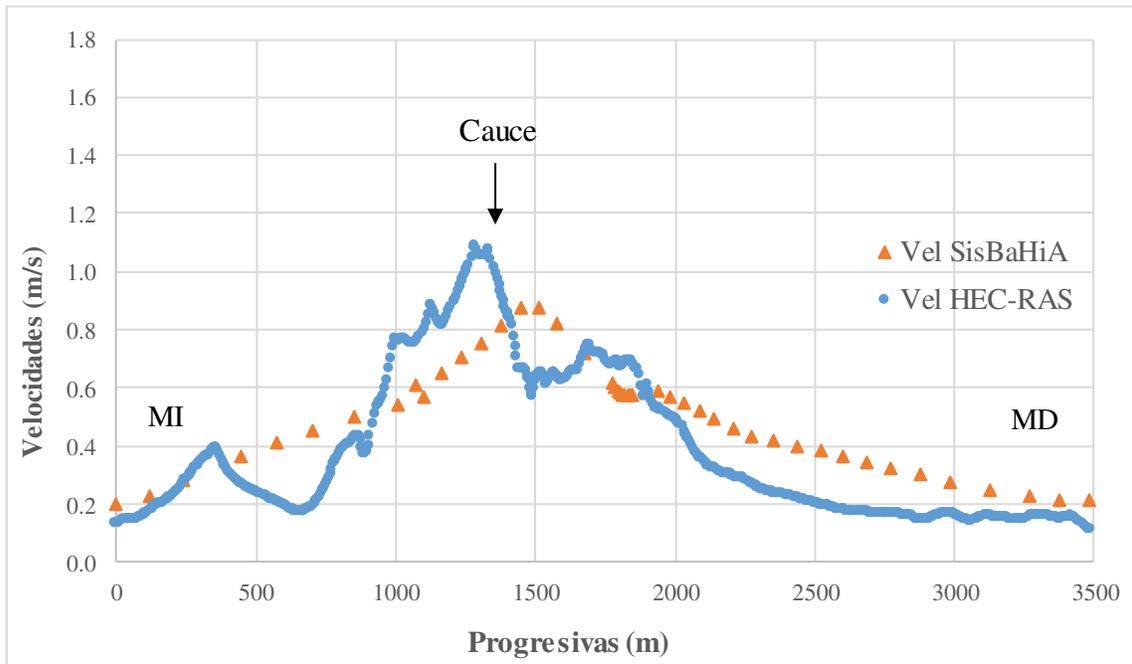


Figura 5.54: Perfil transversal de velocidades máximas calculadas con SisBaHiA y HEC-RAS en la sección N5.

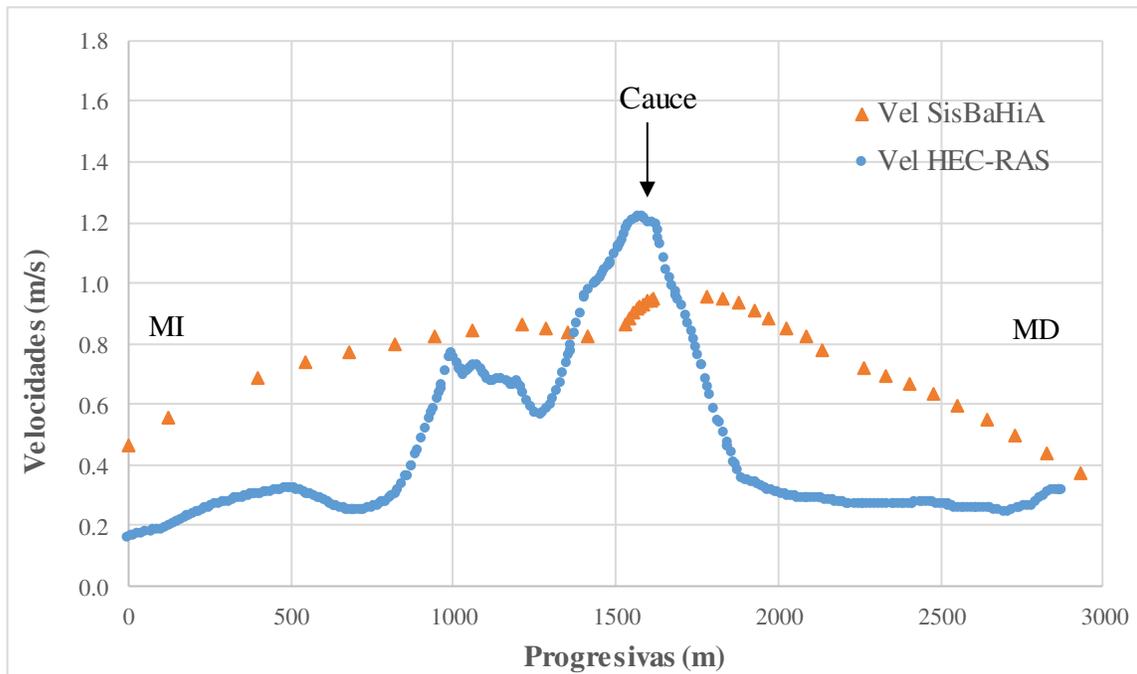


Figura 5.55: Perfil transversal de velocidades máximas calculadas con SisBaHiA y HEC-RAS en la sección N6.

En los perfiles se observa que en todos los casos las velocidades calculadas con SisBaHiA en el cauce se encuentran por debajo de las calculadas con HEC-RAS, siendo que en el caso de los perfiles N1 a N4, las diferencias son mayores al 100%. En la planicie se encontraron diferencias variables, donde de acuerdo a los perfiles observados se alternaron las velocidades máximas entre SisBaHiA y HEC-RAS. Las velocidades determinadas con SisBaHiA a lo largo de todo el perfil no superan 1m/s, siendo estos valores comparables a los calculados por [Filippa et. al. \(2009\)](#) en su trabajo de estimación del campo de velocidades en la planicie del río Salado.

La diferencia entre uno y otro modelo puede explicarse por un lado en la cantidad de elementos de cada una de las mallas utilizadas para el cálculo, ya que en HEC-RAS la malla de tamaño 80m x 80m tiene una cantidad de celdas 3 veces mayor que la malla de SisBaHiA (16108 elementos contra 5282); y por el otro en el tratamiento de la información topográfica de base (contenida en los MDE) para la determinación de las cotas de cada una de las celdas de la malla. En SisBaHiA se utiliza un esquema de elementos finitos donde para cada celda rectangular se definen 9 nodos, y es necesario asignar a cada uno de los nodos una cota por medio de interpolación de las cotas contenidas en el MDE. En este proceso de interpolación, “se pierde” detalle del cauce real, con lo cual en algunas secciones se obtienen perfiles transversales más suavizados, con un ancho del cauce algo mayor al real. Este aumento de la sección del cauce, podría determinar una velocidad menor en el mismo. A modo de ejemplo, se muestra en la Figura 5.56 la comparación entre los perfiles transversales correspondientes a la sección del punto N1 y los niveles de agua calculados y medido.

Adicionalmente, debe tenerse en cuenta que los valores de altura de rugosidad total  $k$  calculados a partir de los valores de  $n$  de Manning pueden requerir de un ajuste para la calibración del modelo. Por ejemplo, el valor de  $k=0.095$  calculado para el cauce estuvo por encima de los valores utilizados en trabajos antecedentes, donde se adoptó un valor de  $k=0.07$ . Esta diferencia incide en el cálculo de las velocidades.

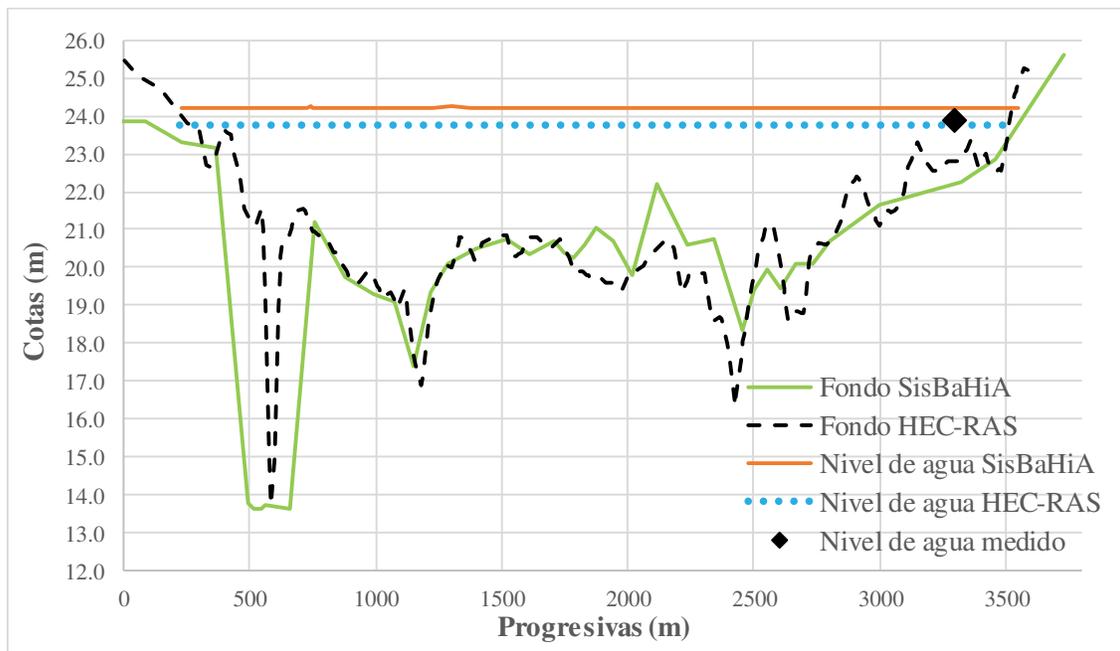


Figura 5.56: Comparación de perfiles transversales de HEC-RAS y SisBaHiA en la ubicación del punto N1 con niveles de agua calculados y medido.

Por su parte, HEC-RAS utiliza un esquema de volúmenes finitos, en donde en lugar de asignar a cada una de las celdas un único valor de cota, el sistema ejecuta un procesamiento donde se calcula una relación elevación-volumen para cada celda; y para cada contorno de celda calcula la relación elevación-perímetro mojado, elevación-área, elevación-rugosidad, y elevación-capacidad de transporte. De esta manera cada contorno de la celda queda definido como una sección transversal, de modo tal que el flujo de agua de entrada y salida (y por lo tanto el almacenamiento) de cada celda, está controlado por las características de las relaciones definidas en los contornos y por la relación elevación-volumen. Estas relaciones que crea el programa permiten conservar con más precisión la topografía del MDE de base, y tal como lo indica el manual del programa (USACE a, 2016) se generan resultados con mayor detalle que en otros modelos que consideran un nivel de terreno constante para toda la celda y los lados de la misma.

#### 5.4 Cuantificación del caudal transportado por el cauce y la planicie

En este apartado, se determinó a partir de los resultados obtenidos con ambos modelos, la cantidad de caudal pico transportado por el cauce y por la planicie, a fin de determinar la importancia de esta última en la conducción y/o el almacenamiento del flujo.

Para tal fin, se definieron tres secciones transversales para realizar los cálculos, a saber: una sección aguas arriba correspondiente a la ubicación del punto medido N2, una sección intermedia coincidente a la ubicación del punto medido N4, y otra sección aguas abajo que se corresponde con la ubicación del punto medido N6.

En HEC-RAS se utilizaron los resultados obtenidos con el MDT-30m con la malla de tamaño 80m x 80m. En la Tabla 5.11 se muestran los porcentajes de caudal pico transportados por el cauce (%Q cauce), por la margen izquierda de la planicie (%Q MI), por la margen derecha de la planicie (%Q MD), y el total por la planicie (%Q planicie total) en las 3 secciones mencionadas donde se realizaron los cálculos.

	% Q cauce	%Q MI	% Q MD	%Q planicie total
N2	16.5	71.8	11.7	83.5
N4	20.2	72.6	7.2	79.8
N6	24.8	46.4	28.9	75.2

Tabla 5.11: Porcentajes de caudal pico transportado por el cauce, por la margen izquierda de la planicie (%Q MI), por la margen derecha de la planicie (%Q MD) y por la planicie total, calculados con HEC-RAS para el MDT-30m y malla de 80m x 80m.

En la Tabla 5.12 se muestran los mismos porcentajes determinados a partir de los cálculos realizados con SisBaHiA.

	% Q cauce	%Q MI	% Q MD	%Q planicie total
N2	14.5	78.2	7.3	85.5
N4	18.9	76.5	4.6	81.1
N6	27.2	40.3	32.5	72.8

Tabla 5.12: Porcentajes de caudal pico transportado por el cauce, por la margen izquierda de la planicie (%Q MI), por la margen derecha de la planicie (%Q MD) y por la planicie total, calculados con SisBaHiA.

Los resultados demuestran que con ambos modelos se determinó que durante el pico de la crecida la mayor parte del caudal se condujo por la planicie, con valores entre 75 y 84% del caudal total transportado por la planicie en HEC-RAS y del 73-85% en SisBaHiA.

Esto indica el grado de relevancia en representar correctamente la topografía y los efectos resistivos al flujo de la planicie, y la importancia de la misma no solo en el almacenamiento, sino mayormente en la conducción del escurrimiento ante la ocurrencia de crecidas de gran magnitud.

## 5.5 Análisis de sensibilidad de los coeficientes de rugosidad

### 5.5.1 Influencia de la variación del $n$ de Manning en HEC-RAS

Se realizaron simulaciones para analizar la influencia del coeficiente de rugosidad  $n$  de Manning en el cálculo de niveles de agua y velocidades. Para tal fin se utilizó el MDT-30m con la malla de tamaño 80m x 80m y se simularon las condiciones hidrodinámicas correspondientes a la crecida del 2003, incrementando y disminuyendo los valores de  $n$  en un 25% respecto a los valores utilizados en la calibración. En la tabla 5.13 se muestran los valores de  $n$  de calibración y  $n$  con incremento y con disminución del 25%.

Clase	Cobertura	$n$ (sm <sup>-1/3</sup> )	$n +25%$ (sm <sup>-1/3</sup> )	$n -25%$ (sm <sup>-1/3</sup> )
1	Cauce	0.033	0.042	0.025
2	Suelo desnudo	0.045	0.056	0.033
3	Gramínea	0.050	0.063	0.038
4	Pasturas	0.056	0.070	0.042
5	Cultivos	0.067	0.084	0.050
6	Praderas	0.089	0.112	0.067
7	Monte	0.112	0.140	0.084

Tabla 5.13: : Valores de  $n$  de Manning de calibración e incrementado y disminuido un 25%.

En la tabla 5.14 se presenta el resumen de las cotas de nivel de agua calculadas para todas las configuraciones de rugosidad en cada uno de los puntos donde se cuenta con datos medidos. Las diferencias calculadas en la tabla están en referencia al valor de cota calculada con el  $n$  de calibración:

	N1	N2	N3	N4	N5	N6
<b>Cota medida</b>	<b>23.91</b>	<b>23.70</b>	<b>22.82</b>	<b>21.40</b>	<b>19.91</b>	<b>19.80</b>
<b>Cota <math>n</math> calibración (m)</b>	<b>23.76</b>	<b>23.67</b>	<b>22.69</b>	<b>21.31</b>	<b>19.72</b>	<b>19.58</b>
Cota $n$ calibración +25% (m)	24.17	24.08	23.08	21.68	19.92	19.75
<b>Diferencia</b>	<b>-0.41</b>	<b>-0.41</b>	<b>-0.39</b>	<b>-0.37</b>	<b>-0.20</b>	<b>-0.17</b>
Cota $n$ calibración - 25% (m)	23.32	23.23	22.33	20.9	19.53	19.42
<b>Diferencia</b>	<b>0.45</b>	<b>0.44</b>	<b>0.36</b>	<b>0.41</b>	<b>0.19</b>	<b>0.16</b>

Tabla 5.14: : Comparación entre cotas máximas de nivel de agua calculadas con  $n$  de calibración, incrementado un 25% y disminuido 25%. MDT-30m, tamaño de malla 80m x 80m

Se observa que el aumento del 25% en la rugosidad provoca un aumento en los niveles de agua calculados entre 0.17 y 0.41m respecto a los valores calculados con el  $n$  de calibración. Por el contrario, cuando se disminuye un 25% el valor del coeficiente de rugosidad, los niveles calculados disminuyen entre 0.16 y 0.45m respecto a los determinados inicialmente. En ambos casos, las diferencias son menores en la zona baja del dominio de modelación (puntos N5 y N6). Esto puede deberse a la cercanía de dichos puntos a la sección de control aguas abajo, donde se utilizó la misma condición de borde para todas las simulaciones.

Las diferencias calculadas indican la importancia de definir de manera adecuada el parámetro de rugosidad, que determina los efectos resistivos al flujo, sobre todo en un caso como el de estudio, donde la crecida produjo el desborde del cauce principal inundando la planicie con un ancho anegado de unos 3000 metros.

En las Figuras 5.57, 5.58, 5.59, 5.60, 5.61 y 5.62 se muestran los perfiles transversales de velocidades máximas calculadas para las tres configuraciones de rugosidad, en las secciones donde se contó con datos medidos de nivel de agua. Las variaciones en los picos de velocidad respecto a los valores calculados con el  $n$  de calibración fueron del orden del 15%, aumentando con los menores valores de  $n$ , y viceversa con los mayores valores de coeficiente de rugosidad.

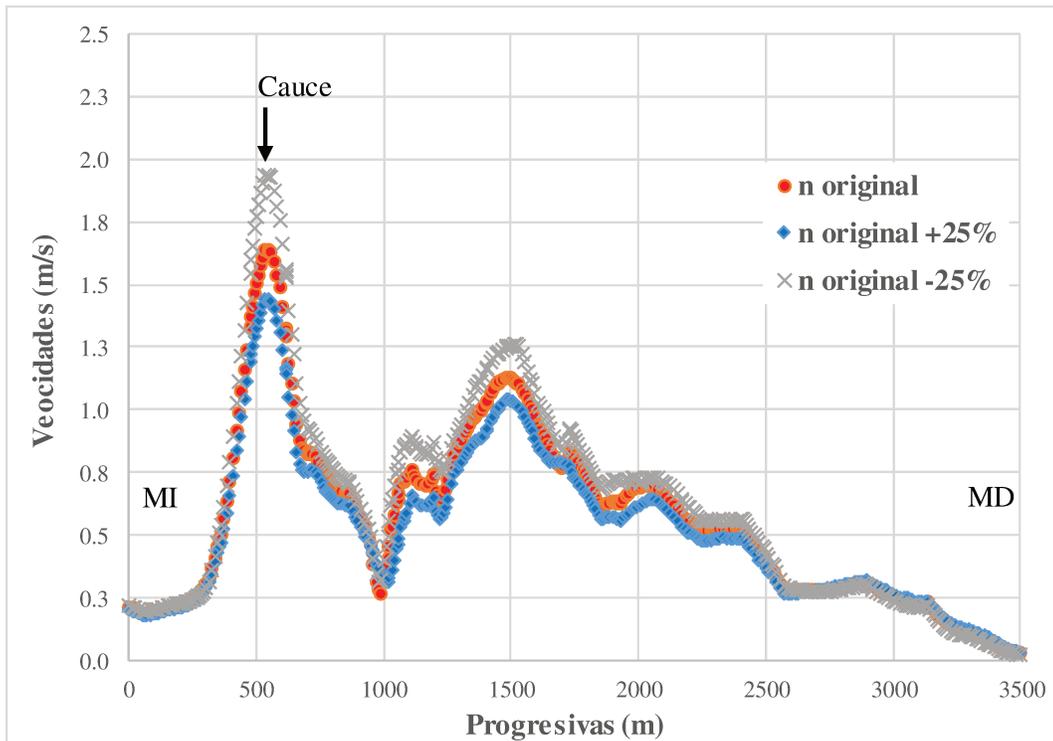


Figura 5.57: Perfiles transversales de velocidades máximas en la sección N1 con  $n$  calibración,  $n$  incrementado 25% y  $n$  disminuido 25%. MDT-30m, malla de 80m x 80m.

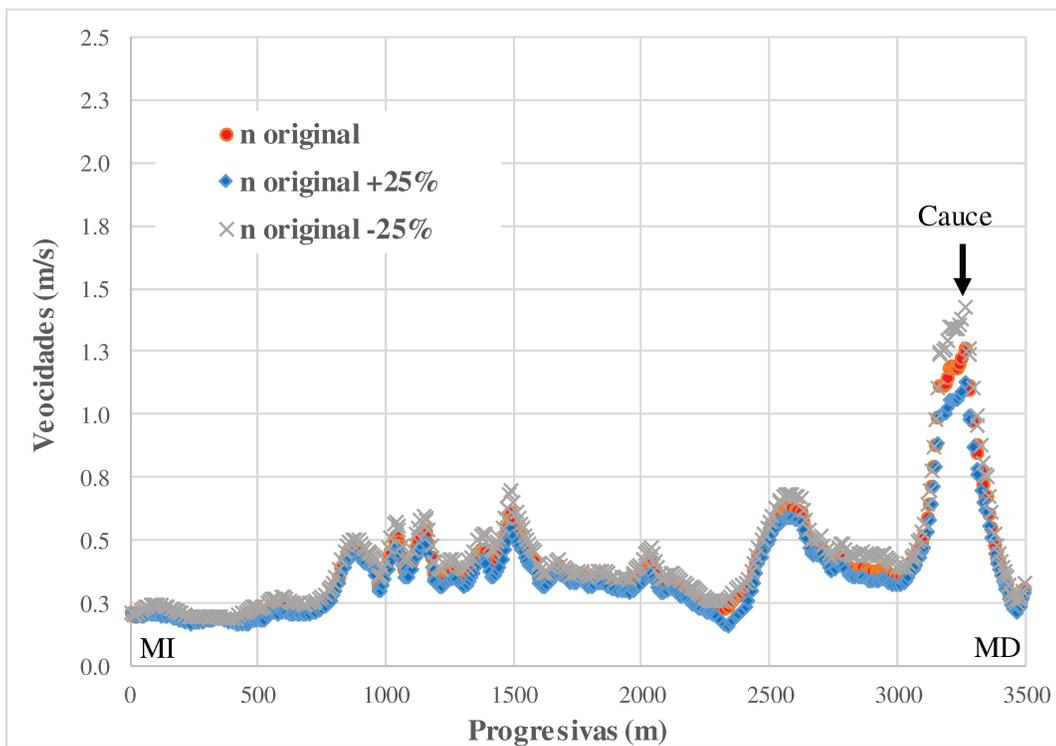


Figura 5.58: Perfiles transversales de velocidades máximas en la sección N2 con  $n$  calibración,  $n$  incrementado 25% y  $n$  disminuido 25%. MDT-30m, malla de 80m x 80m.

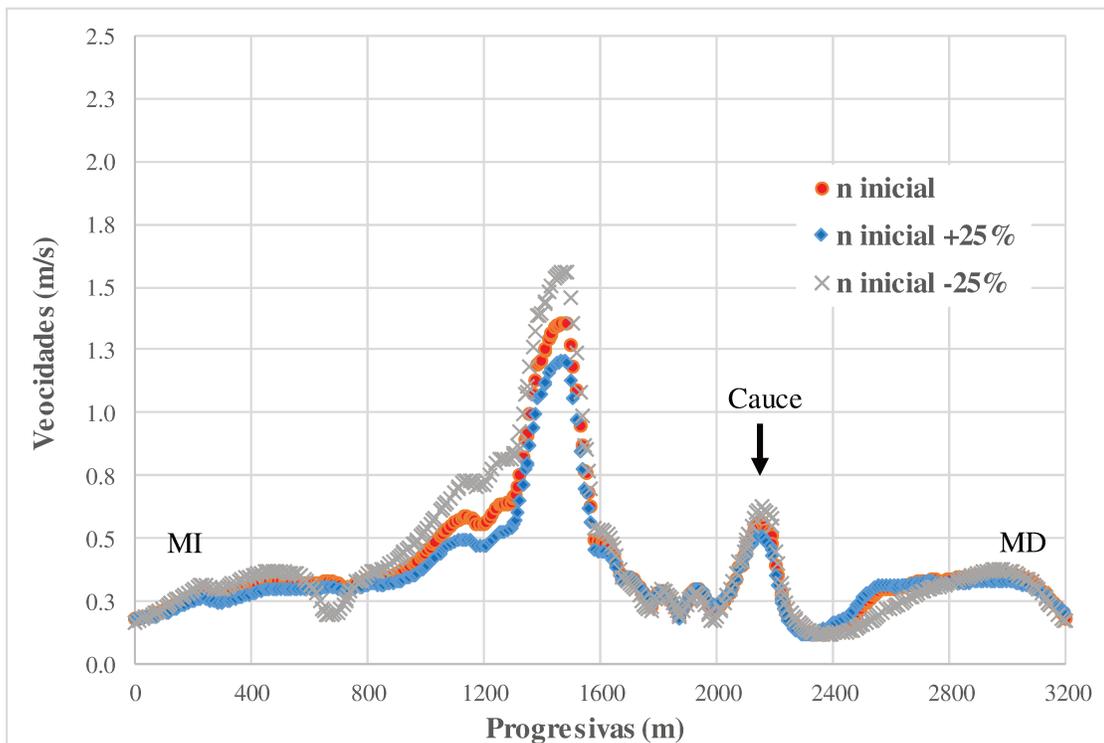


Figura 5.59: Perfiles transversales de velocidades máximas en la sección N3 con  $n$  calibración,  $n$  incrementado 25% y  $n$  disminuido 25%. MDT-30m, malla de 80m x 80m.

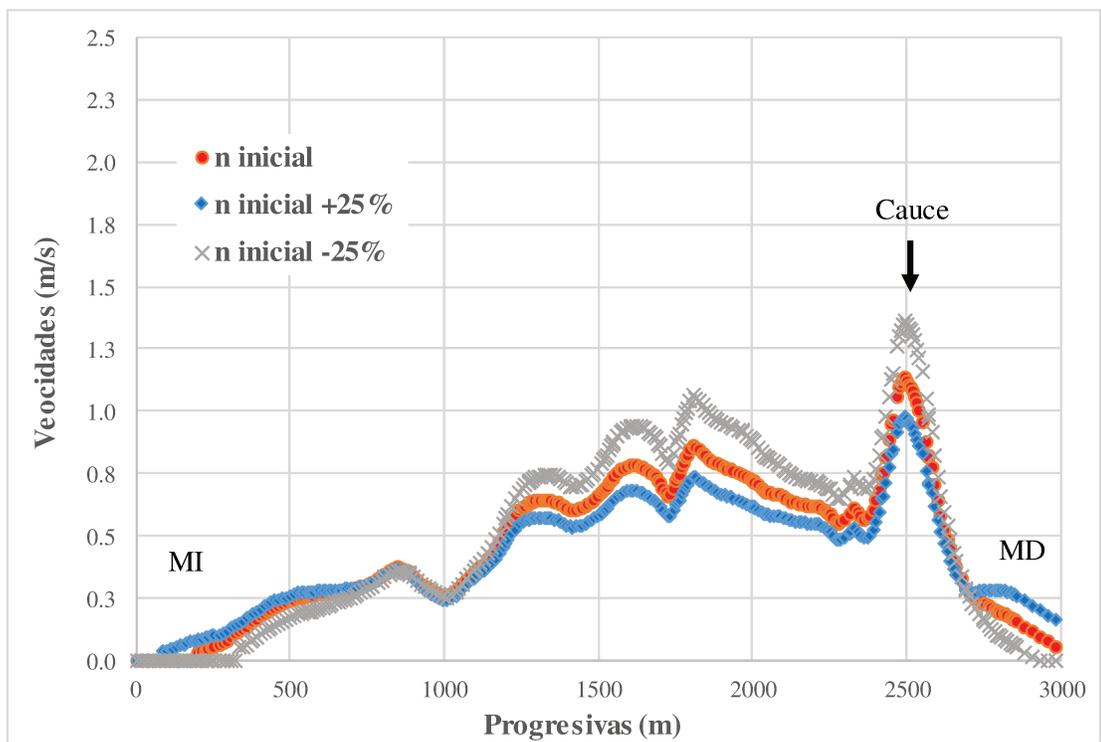


Figura 5.60: Perfiles transversales de velocidades máximas en la sección N4 con  $n$  calibración,  $n$  incrementado 25% y  $n$  disminuido 25%. MDT-30m, malla de 80m x 80m.

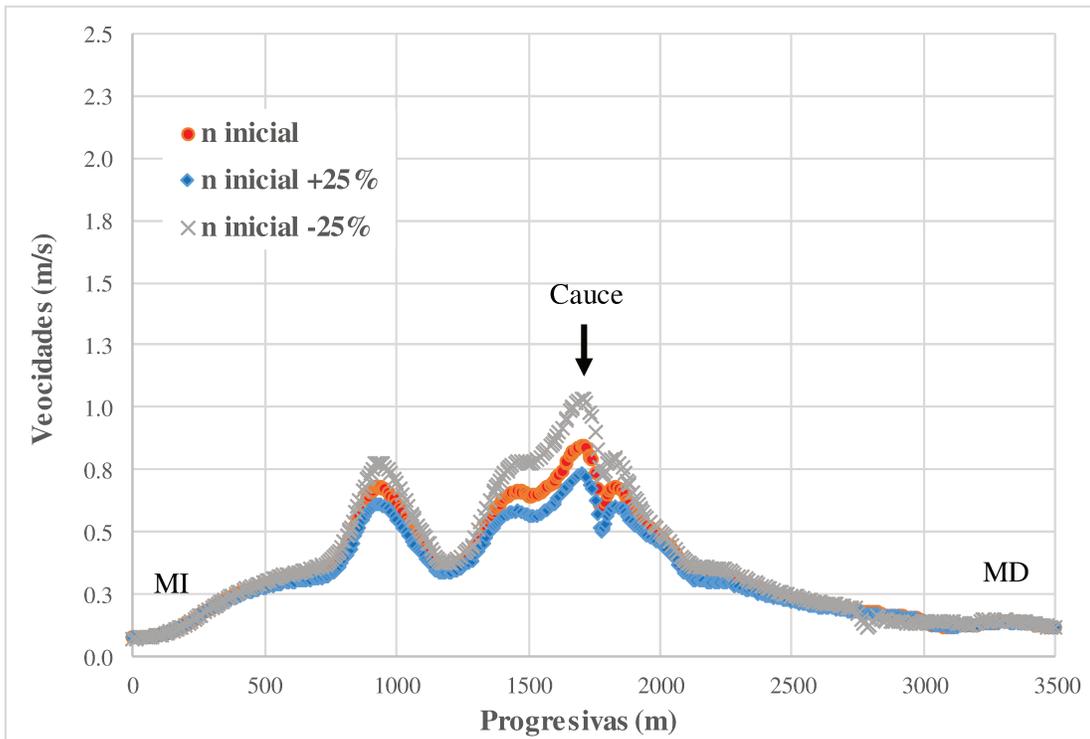


Figura 5.61: Perfiles transversales de velocidades máximas en la sección N5 con  $n$  calibración,  $n$  incrementado 25% y  $n$  disminuido 25%. MDT-30m, malla de 80m x 80m.

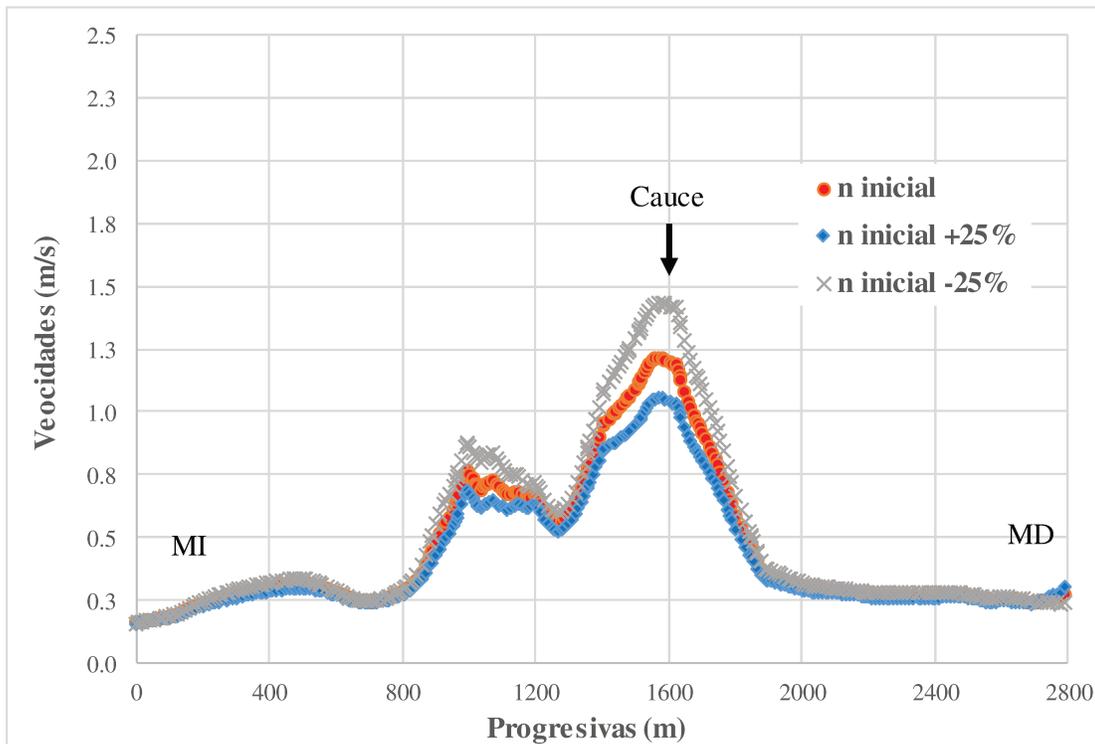


Figura 5.62: Perfiles transversales de velocidades máximas en la sección N6 con  $n$  calibración,  $n$  incrementado 25% y  $n$  disminuido 25%. MDT-30m, malla de 80m x 80m.

### 5.5.2 Influencia de la variación de la altura de rugosidad total $k$ en SisBaHiA

Al igual que con HEC-RAS se realizaron simulaciones para analizar la influencia del coeficiente de rugosidad  $k$  de los niveles de agua y velocidades incrementando y disminuyendo el valor de  $k$  en un 25% respecto a los valores utilizados como equivalentes al  $n$  de Manning usados en HEC-RAS. En la Tabla 5.15 se muestran los valores de  $k$  equivalentes y  $k$  con incremento y con disminución del 25%.

	$k$ (m)	$k +25%$ (m)	$k -25%$ (m)
Cauce	0.095	0.119	0.071
Suelo desnudo	0.238	0.298	0.179
Gramínea	0.307	0.384	0.230
Pasturas	0.392	0.490	0.294
Cultivos	0.548	0.685	0.411
Praderas	0.834	1.043	0.626
Monte	1.084	1.355	0.813

Tabla 5.15: Valores de  $k$  equivalente e incrementado y disminuido un 25%.

En la tabla 5.16 se presentan las cotas de nivel de agua calculadas para las tres configuraciones de rugosidad en cada uno de los puntos donde se cuenta con datos medidos. Las diferencias calculadas en la tabla están en referencia al valor de cota calculada con el  $k$  equivalente:

	N1	N2	N3	N4	N5	N6
<b>Cota medida (m)</b>	<b>23.91</b>	<b>23.7</b>	<b>22.82</b>	<b>21.40</b>	<b>19.91</b>	<b>19.80</b>
<b>Cota <math>k</math> equivalente (m)</b>	<b>24.01</b>	<b>24.01</b>	<b>22.74</b>	<b>21.61</b>	<b>20.17</b>	<b>20.07</b>
Cota $k$ equiv. +25% (m)	24.22	24.24	22.94	21.79	20.34	20.27
<b>Diferencia (m)</b>	<b>-0.21</b>	<b>-0.23</b>	<b>-0.20</b>	<b>-0.18</b>	<b>-0.17</b>	<b>-0.20</b>
Cota $k$ equiv. -25% (m)	23.83	23.78	22.56	21.45	19.95	19.88
<b>Diferencia (m)</b>	<b>0.18</b>	<b>0.23</b>	<b>0.18</b>	<b>0.16</b>	<b>0.22</b>	<b>0.19</b>

Tabla 5.16: : Comparación entre cotas de nivel de agua calculadas en SisBaHiA con  $k$  equivalente, incrementado un 25% y disminuido 25%.

Se observa que las diferencias absolutas respecto a las cotas calculadas con los  $k$  equivalentes estuvieron en el rango de 0.17-0.23m. Este rango de variación de cotas es menor que el calculado con las diferentes rugosidades en HEC-RAS, donde las diferencias llegaron en algunos casos a 0.44m. Por otra parte, se advierte con los valores de  $k$  disminuidos en un 25% se logra un mejor ajuste respecto a los datos medidos. En tanto que, las variaciones en las velocidades calculadas resultaron menores al 10%.

## 6 CONCLUSIONES

### **En cuanto al uso de MDE para la simulación de crecidas**

La posibilidad de acceder de manera libre y gratuita a bases de datos con información topográfica como los MDE, resultó de gran utilidad en la implementación de modelos hidrodinámicos 2D para predecir inundaciones, sobre todo en aquellos casos donde el área de simulación es muy extensa y de difícil acceso como para realizar relevamientos de campo.

Con los datos disponibles en el área de estudio se logró construir cuatro MDE que abarcaron toda la zona del dominio de simulación, con una calidad suficiente para su utilización en la simulación de la crecida.

Se evidenció que, en zonas de llanura con gran desarrollo de la vegetación, como es el caso del área de estudio de la presente tesis, la calidad y precisión del MDE cumple un rol preponderante en la simulación del escurrimiento superficial. De modo tal que debe analizarse adecuadamente la información de los MDE a los efectos de no incurrir en errores y atribuir como cota de terreno la cota de los cultivos o la flora existente. En el presente trabajo se observaron diferencias de hasta 2 metros comparando el MDE-Ar y el MDE-5m con el MDT-30m y el MDT-Perfiles, atribuible a la existencia de vegetación. Dado que se contó con perfiles transversales medidos, se determinó a partir del ECM que el MDT-30m fue el que mejor representó la topografía real del terreno con un ECM de 0.68m, mientras que el MDE-Ar y el MDE-5m presentaron ECM de 1.85m y 1.90m respectivamente.

Esto demuestra que, a pesar de la practicidad que ofrecen en la actualidad los MDE para extraer datos de altimetría del terreno con un alto grado de resolución, en zonas con escaso desnivel

topográfico resulta indispensable cotejar los datos del modelo con datos medidos en campo, a los efectos de conocer fehacientemente el grado de precisión del mismo.

Además de la vegetación, en las zonas de llanura, las obras de infraestructura como por ejemplo terraplenes de rutas y caminos principales, tienen gran incidencia sobre la dinámica hídrica. Muchas veces, los detalles de estas obras no son evidenciados en los MDE producto de la resolución de los mismos, o de la técnica a partir de la cual fueron elaborados. Por esta razón, para una buena representación de la topografía del terreno, resulta fundamental la edición de los MDE para representar estos obstáculos al escurrimiento. En este caso, el terraplén de la RP6 se incorporó en todos los modelos a partir de los datos del MDE-5m, el cual por su resolución fue el único donde se representó adecuadamente esta obra. Los datos del cauce, se representaron a partir de los perfiles transversales medidos, puesto que en los MDE disponibles, el mismo no se identificaba adecuadamente.

#### **En cuanto a los resultados obtenidos de la simulación de la crecida**

Los resultados más cercanos a los datos medidos se obtuvieron con el MDT-30m, mientras que con el MDE-Ar y el MDE-5m, en las simulaciones con HEC-RAS se sobre estimaron los niveles máximos en un rango promedio de 0.80-0.90m. Estas diferencias, en zonas de llanuras pueden representar una extensa área anegada. Por el contrario, con el MDT-Perfiles los niveles calculados estuvieron por debajo de los medidos, en el rango medio de 0.30-0.50m. Estos resultados están en relación con lo expuesto anteriormente, donde se remarcó la importancia de la calidad y precisión del MDE para la simulación de crecidas en zonas de llanura, y además se describió las diferencias entre las cotas de terreno de los MDE, atribuibles a la existencia de la vegetación.

Del análisis de la incidencia del cambio de resolución en el tamaño de malla, se determinó que a medida que se aumenta el tamaño de celdas, los niveles calculados disminuyeron. Las diferencias de niveles entre la resolución de 30m x30m (la menor utilizada) y 150m x 150m (la mayor utilizada) estuvieron en promedio en los 0.10m, mientras que la diferencia entre el tiempo de una y otra simulación fue de 6 horas y 10 minutos. Esto implica que, dependiendo del grado de precisión requerido por el trabajo, se puede utilizar una malla de mayor tamaño, disminuyendo 20 veces el tiempo de simulación y obteniendo resultados con un margen de error

del orden de los 0.10m, en una zona donde en la planicie, las profundidades menores del agua estuvieron en el orden de 1m, mientras que en el cauce las mismas alcanzaron los 10-12m.

Se recalca la importancia de contar con datos medidos confiables para la calibración de modelos numéricos y su posterior explotación para la simulación de eventos de interés y predicción de inundaciones. En este trabajo se simuló la mayor crecida registrada en toda la historia del río Salado (2003) durante la cual resultó muy difícil relevar niveles y caudales. Los datos utilizados para la calibración de los modelos se extrajeron de información oficial del municipio local, y publicada en trabajos científicos, con lo cual se consideran aceptables para la calibración.

Los niveles calculados con SisBaHiA estuvieron en todos los casos por encima de los niveles calculados con HEC-RAS para la malla de 30mx30m. En la comparación con HEC-RAS para la malla de 50mx150m (tamaño más comparable a la malla de SisBaHiA) en dos de los seis puntos donde se contó con datos medidos, se lograron mejores ajustes con SisBaHiA. Se recalca que se podrían lograr mejores ajustes calibrando el coeficiente de rugosidad.

Los trabajos antecedentes de [Bodoira \(2009\)](#) e [Imhoff y Trento \(2011\)](#) permitieron una parametrización adecuada de los efectos resistivos de la planicie, lo que permitió lograr resultados próximos a los medidos en cuanto niveles máximos del río y anchos de inundación. El análisis de sensibilidad para el coeficiente de rugosidad en planicie, mostró la importancia del análisis detallado de la variabilidad espacial de la rugosidad, sobre todo en la determinación de las cotas de pelo de agua. Para una variación del 25% de la rugosidad, con HEC-RAS se calcularon variaciones de niveles del orden de 0.20-0.45m, lo cual, en una zona de llanura, puede representar una extensa área anegada. Con SisBaHiA las diferencias promedio calculadas estuvieron en el orden de 0.20m en los puntos analizados.

Las velocidades calculadas con HEC-RAS estuvieron en el rango de las calculadas en trabajos antecedentes con modelos 1D en el mismo tramo de estudio. En algunos sectores, las velocidades máximas se dieron en la planicie y no en el cauce, lo cual indica que en esas zonas el flujo se condujo mayormente por la planicie, cortando los meandros muy cerrados. Por su parte, las velocidades calculadas con SisBaHiA estuvieron por debajo de las calculadas con HEC-RAS, sobre todo en el cauce, con diferencias que en algunos casos fueron mayores al 100%. Esta diferencia se explica en la dificultad para representar correctamente la geometría

del cauce en SisBaHiA, debido a la interpolación necesaria para definir las cotas de cada nodo. En definitiva, en situaciones donde se requiere simular el escurrimiento combinado en un sistema cauce-planicie, HEC-RAS resulta más adecuado para la representación de la topografía a partir de un MDE de base.

A partir de los resultados obtenidos se pudo verificar el papel relevante que jugó la planicie de inundación durante la crecida, no solo en el almacenamiento del caudal, sino más aún, en la conducción del mismo, llegando a transportar entre un 70% al 85% del caudal pico total. De esto se desprende el impacto hidro-ambiental que genera una inundación de este tipo, dado que el río es receptor de efluentes industriales y cloacales, los cuales al desbordarse el río pueden ser transportados durante una crecida hacia zonas de la planicie destinadas a la producción agrícolas-ganaderas.

### **En cuanto a los modelos utilizados**

#### Sobre HEC-RAS

Se ha comprobado que HEC-RAS 5.0 resulta una herramienta eficaz para la simulación de crecidas en su versión 2D, sobre todo con la incorporación de la ventana Ras Mapper, que permite una visualización muy sencilla de los resultados. Este sistema en su versión 2D cuenta aún con algunas limitaciones, como ser la imposibilidad de incorporar estructuras hidráulicas, lo que hace necesario un pre procesamiento adecuado del MDE para representar las mismas. No obstante, se constató que el método numérico de la resolución de las ecuaciones es muy estable para distintos intervalos de tiempo de cálculo y para diferentes tamaños de malla.

El proceso de elaboración de la malla 2D en HEC-RAS 5.0 resulta sencillo con las herramientas disponibles en el sistema, donde además se puede aumentar el detalle de la misma en sectores de interés (como ser el cauce) a través del uso de las “break lines”, y representar así dos escalas espaciales distintas, como ser planicie y cauce.

La generación de relaciones Elevación-Volumen para cada celda y Elevación-Perímetro Mojado, Elevación-Área, Elevación-Rugosidad, y Elevación-Capacidad de Transporte para cada cara de las celdas, permitió definir celdas de mayor tamaño conservando un mayor detalle del MDE que se utilizó para definir la topografía del dominio de simulación. En este trabajo se utilizaron 4 diferentes tamaños de malla (30m x 30m, 50m x 50m, 80m x 80m y 150m x 150m)

y se verificó que la diferencia en el cálculo de los niveles de agua entre la malla de menor y de mayor tamaño estuvieron en promedio en los 0.09m, mientras que el tiempo de simulación entre una y otra aumentó 20 veces (pasando de 22 minutos a 6 horas y 36 minutos). Esto demuestra que, en caso de no requerirse una detallada precisión en los cálculos, no se justificaría la utilización de una malla de 30m por sobre la de 150m, debido al costo computacional que implican los cálculos. Por esto motivos, para el presente trabajo se adoptó la malla de tamaño 80m x 80m para el análisis de los resultados.

En cuanto a la superficie máxima anegada, los resultados obtenidos comparados con el área medida en la imagen radar del 06-05-2003, determinaron que con el MDE-5m y el MDE-Ar se sobrestimó la misma en un 11 y 8% respectivamente (esto implica una diferencia de entre 650 y 900 hectáreas). Con los MDT, se obtuvieron superficies cercanas a la medida, con diferencias de -1 y -3% para el MDEt-30m y el MDT-Perfiles respectivamente.

A partir de la comparación entre los resultados de niveles obtenidos con la resolución de las ecuaciones completas de Saint-Venant (onda dinámica) y con las ecuaciones simplificadas (onda difusiva) se determinaron diferencias de 0.13m y 0.22m. Esto indicaría que, en el caso de la simulación de una crecida con altos caudales y velocidades, no es recomendable despreciar los términos inerciales de las ecuaciones de Saint-Venant, puesto que esta simplificación puede subestimar los niveles de agua. Adicionalmente, el tiempo de simulación requerido para la simulación de la onda difusiva fue de un 10% menor que para la onda dinámica, con lo cual no se justifica el ahorro de tiempo computacional.

La visualización de resultados con la herramienta Ras Mapper permite la elaboración de mapas de todas las variables hidráulicas calculadas en un entorno similar a los sistemas de información geográfica (SIG), lo cual presenta grandes ventajas para la edición de los mismos y la representación de la variabilidad espacial de los resultados.

Las cualidades descritas, la facilidad de uso del software gracias a los manuales con los que cuenta y la gratuidad del mismo, convierten a HEC-RAS en un software con grandes ventajas y capacidades para la simulación de inundaciones.

## Sobre SisBaHiA

El módulo hidrodinámico del sistema SisBaHiA resultó adecuado para la simulación de crecidas de ríos de llanura como el caso de estudio, ya que, teniendo en cuenta que este modelo no fue calibrado, se obtuvieron valores de niveles de agua comparables con los datos medidos,

El proceso de elaboración de la malla 2D en SisBaHiA ofrece dos alternativas: una manera automática con elementos triangulares y cuadrangulares para los cuales se debe indicar un tamaño medio para cada celda, y otra manual, donde se pueden dibujar los elementos de tamaño variable de acuerdo a la elección del usuario. Para casos como el de estudio, para representar la diferencia de escalas entre el cauce y la planicie, fue necesaria la elaboración de manera manual, a los efectos de contar con número representativo de nodos dentro del cauce, y poder disminuir la densidad de elementos en la planicie.

Los cálculos del modelo se pueden procesar con softwares específicos para la visualización gráfica de resultados, con los que se pueden elaborar mapas tanto de isolíneas como de vectores. Éstos pueden ser editados mediante el agregado de elementos (escala, ejes de coordenadas, norte, etc.) lo cual permite la elaboración de mapas con toda la información que el usuario desee, a diferencia de HEC-RAS, donde la edición de los resultados se encuentra acotada a las herramientas disponibles en Ras-Mapper.

La gran ventaja del sistema SisBaHiA radica en la posibilidad de acoplar al módulo hidrodinámico los demás módulos del programa, como ser el de transporte y calidad de agua, para realizar análisis de la conducción de escalares.

## **7 RECOMENDACIONES**

Dada la necesidad de contar con datos medidos para la calibración y explotación de modelos de simulación de inundaciones, se recomienda el relevamiento continuo de niveles y caudales para distintos estados del río a través de la red de alerta del río Salado, la cual actualmente se encuentra fuera de operación en la mayoría de sus estaciones.

Se recomienda a futuro, avanzar en estudios de transporte de escalares a los efectos de analizar posibles escenarios que representen riesgos ambientales severos para la zona de estudio, como ser la existencia de concentraciones elevadas de metales pesados en el agua del río y la ocurrencia de una crecida.

## 8 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abbot, M.B. and Basco, D.R. (1989). *Computational Fluid Dynamics, an Introduction for Engineers*, Longman Group, UK Limited.
- Ackermann, F. (1996). *Digital Photogrammetry. An addendum to the manual of photogrammetry*. ASPRS. ISBN: 1-57083-037-1.
- Alvarez, A. M. T. (2012). *Modelación Numérica del Transporte de Metales Pesados y Sedimentos Finos en Cursos Fluviales. Caso de Estudio: cromo en el río Salado (Santa Fe-Argentina)*. *Tesis de Maestría en Ingeniería de Recursos Hídricos*. FICH – UNL, Argentina.
- Arcement, G.J. and Schneider, V.R. (1989). *Guide for Selecting Manning's Roughness Coefficients for Natural Channels and Flood Plains*. *US Geological Survey, Water-Supply Paper 2339*.
- Banco Mundial. (2014). *Las inundaciones, el fenómeno natural más caro para Argentina*, *Banco Mundial*, [www.bancomundial.org/es/news/feature/2014/10/01/inundaciones-en-argentina](http://www.bancomundial.org/es/news/feature/2014/10/01/inundaciones-en-argentina).
- Bates, P. D. and De Roo, A. (2000). *A simple raster-based model for flood inundation simulation*. *Journal of Hydrology*, 236, 54-77.
- Bodoira F., Trento A. and Graciani S. (2009). *Determination of roughness coefficient in floodplains using Landsat images: the case of the Salado river lower basin (Argentina)*. *6th Symposium on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics, RCEM 2009*, Santa Fe, Argentina. Eds. Vionnet C., Perillo G., Latrubesse E. y García M.
- Brière, C., Abadie, S., Bretel, P. (2007). *Assesment of TELEMAC system performances, a hydrodynamic case study of Anglet, France*. *Coastal of Engineering*, 54, 345-356.
- Burgos V. H., Salcedo, A. P. (2014). *Modelos digitales de elevación: Tendencias, correcciones hidrológicas y nuevas fuentes de información*, *2do Encuentro de Investigadores en Formación en Recursos Hídricos*, Instituto Nacional del Agua (INA) Ezeiza, Argentina
- Butler, J., Lane, S., Chandler, J. (1998). *Assessment of dem quality for characterizing surface roughness using close range digital photogrammetry*. *Photogrammetric Record*. 16, 271-291.
- CEDEX, GEAMA, FLUMEN y CIMNE. (2010). *IBER. Modelización bidimensional del flujo en lámina libre en aguas poco profundas*. *Manual básico de usuario*.
- CEPAL, (2003). *Las inundaciones de 2003 en Santa Fe, Argentina. Evaluación del Impacto Socioeconómico y Ambiental*. <http://www.eclac.cl/argentina/noticias/noticias/0/12620/presentacion.pdf>.
- Chow, V.T. (1959). *Open-Channel Hydraulics*. Ed. McGraw-Hill: New York.
- Collazos, G., Villanueva, I., Briseño, N., Cazenave, G., Guevara, C., Blanco, M. (2018). *Modelo bidimensional de inundación urbana de la ciudad de Azul (Argentina) con herramientas de uso libre*. *XXVIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica de ríos*. Buenos Aires.
- Cook A. and Merwade V. (2009). *Effect of topographic data, geometric configuration and modeling approach on flood inundation mapping*. *Journal of Hydrology*, 377, 131-142.

- CRED (2020). Human Cost of Disasters (2000-2019). Cred Crunch, Issue no. 61. *Centre for Research on the Epidemiology of Disasters*.
- CRED (2021). Disaster Year in Review 2020. Global Trends and Perspectives. Cred Crunch, Issue no. 62. *Centre for Research on the Epidemiology of Disasters*.
- De Gonzalo, A.C. (2011). Propuesta metodológica de modelización hidrometeorológica e hidrodinámica enfocada a la ordenación del riesgo de inundación: Aplicación a la cuenca del Arroyo Pejibaye (Costa Rica), *Universidad Politécnica de Madrid, España*.
- Deltares, (2012). “Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments”. *DELFT3D-FLOW User Manual*.
- DHI (2003). MIKE 11, A modelling system for Rivers and Channels. *Danish Hydraulic Institute*.
- Estornell, J. y Ruiz, L.A. (2007). Generación de MDE y MDS en una zona de vegetación arbórea y arbustiva mediante datos Lidar e imágenes de satélite QB. VII Semana Geomática, Barcelona.
- Eulliades P., Vénere, M., Clausse, A., Vives, L., Varni, M., and Usunoff, E. (2002). Modelos Digitales de Elevación para simulación computacional de inundaciones: Interferometría vs. Cartografía. *First South American Congress on Computational Mechanics, Parana-Santa Fe, Argentina*. Eds. Idelsohn S.R., Sonzogni V. E., y Cardona A., 11, 2267-2277.
- Felicísimo, A.M. (1994). Modelos digitales del terreno. Introducción y aplicaciones en ciencias ambientales 118 pp.
- Ferreira, C. G. (2005). La crecida extraordinaria del Río Salado en Abril - Mayo de 2003. (Provincia de Santa Fe - Argentina) – Aspectos hidrológicos. *XX Congreso Nacional del Agua. Mendoza- Argentina*.
- FHWA. (2002). FESWMS FST2DH User’s Manual. Publication number FHWA-RD-03-053.
- Filippa, L., Gallo, M., Trento, A., Vinzón, S. (2009). Estimación del campo de velocidades en planicie de inundación. Río Salado 2003. *IV Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos, Salta, Argentina*.
- Filippa, L., y Trento, A. (2013). Ensayos de floculación con sedimentos del río Salado contaminados con cromo mediante un dispositivo Jar Test. *III Simposio sobre Métodos Experimentales en Hidráulica, Santa Fe, 77-78*.
- Gallo, M., Trento, A., Alvarez, A. M. T., Beldomenico, H., Campagnoli D. (2006). Dissolved and Particulate Heavy Metals in the Salado. *Water Air And Soil Pollution*, 174:367 – 384.
- García, L. (2010). Marco internacional y discusión de los conceptos del riesgo. *The OFDA/CRED International Disaster Database*.
- Horritt, M.S. and Bates P.D. (2001). Effects of spatial resolution on a raster based model of flood flow. *Journal of Hydrology*, 326, 153-165.
- Hunter, N. M., Bates, P.D., Horritt, M.S., and Wilson, M.D. (2007). Simple Spatially-Distributed Models for Predicting Flood Inundation: A Review. *Geomorphology*, 90(3-4), 208.

- Imhoff, M. y Trento, A., (2011). Simulación hidrodinámica de la planicie del río Salado (Santa Fe), *V Simposio Regional de Hidráulica de Ríos*, Santiago del Estero, Argentina.
- Imhoff, M. y Trento, A. (2012). Determinación de la rugosidad superficial y anchos de inundación en la planicie del río Salado (Santa Fe) para la crecida del 2003. *Cuadernos del CURIHAM – FCEIA (UNR)*. ISSN 1514-2906, 18, 51-61.
- INA. (2006). Estudio de delimitación de áreas de riesgo hídrico en Santa Fe, actualización del estudio de 1992. *Informe Final*. INA, Centro Regional Litoral.
- Järvelä, J. (2004). Determination of flow resistance caused by non-submerged Woody vegetation. *International Journal in Management River Basin*, 2(1), 61-70.
- López, F. y Garcia, M. (2001). Mean flow and turbulence structure of open-channel flow through non-emergent vegetation. *Journal of Hydraulic Engineering*, 127(5), 392-402.
- López Ramírez, D. P. y Gómez Rojas, D. F. (2019). Determinación de la cota de inundación del río Arauca en la vereda Barrancones, Municipio de Arauca, mediante un modelo hidrodinámico. *Tesis de Maestría en Ingeniería Civil con especialización en Recursos Hídricos, Universidad Católica de Colombia*.
- Maling, D.H. (1989). Measurements from maps. Principles and methods of cartometry. *Pergamon Press. Oxford*.
- Mason, D.C., Cobby, D.M., Horritt, M.S. (2003). Floodplain friction parameterization in two-dimensional river flood models using vegetation heights derived from airborne scanning laser altimetry. *Hydrological Processes*, 17, 1711-1732.
- Méndez, R. y López, C. (2010). Modelo Digital de Elevación de mejora continua con aporte voluntario de datos. Proyecto PR\_FMV\_2009\_1\_2647 SGM.
- Meza, J.C. (2020). Análisis comparativo de los modelos digitales de elevaciones SRTM y MDE-Ar 2.0 para la identificación de áreas de peligrosidad por inundaciones y anegamientos en un área urbana de llanura. *Revista Geográfica Digital*, 17, 44-60.
- Nepf, H.M. (1999). Drag, Turbulence, and difusión in flow through emergent vegetation. *Water Resources Research*, 35(2), 479-489.
- Ochoa, S., Reyna, T., Reyna, S., García, M., Labaque, M., Díaz, J.M. (2016). Modelación hidrodinámica del tramo medio del río Ctalamochita, Provincia de Córdoba. *Revista Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (FCEFyN)*, 3, No. 2.
- OECD. (2020). Gobernanza del Agua en Argentina, *OECD Publishing, Paris*, <https://doi.org/10.1787/53ee8b2e-es>. ISBN 978-92-64-78832-9 (impresa). ISBN 978-92-64-37502-4 (pdf).
- Paredes, P. N. (2013). Sobre el rol de la incertidumbre hidrológica en la modelación de inundaciones a gran escala: río Usumacinta, Tabasco. *Tesis de Maestría en Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México*
- Paoli, C. U. (2015). Gestión integrada de crecidas. Guía y caso de estudio. *European Union, Report EUR 27493 ES*.
- Reyna, J., Spaletti, P., Brea, J. D. (2007). Riesgo de inundaciones en el río Luján, *III Simposio Regional de Hidráulica de Ríos*, Córdoba, Argentina.

- Riccardi, G. (2001). *Un Sistema de Simulación Hidrológica-Hidráulica cuasi-2D multicapa para ambientes rurales y urbanos*. Tesis Doctoral, FCEFyN, UNC, Córdoba, Argentina.
- Rosman, P. C. C. (1987). *Modeling Shallow Water Bodies via Filtering Techniques*. Ph.D. Thesis, Ralph M. Parsons Laboratory for Water Resources and Hydrodynamics, Civil Engineering Department, Massachusetts Institute of Technology.
- Rosman, P. (2008). Referência Técnica do SisBaHiA® (<http://www.sisbahia.coppe.ufrj.br>).
- Sanders B. F. (2007). Evaluation of on-line DEMs for flood inundation modeling. *Advances in Water Resources*, 30, 1831-1843.
- Scuderi C. M., Riccardi G. A., Zimmermann E. D. (2015). Aplicación de un modelo distribuido físicamente basado al pronóstico de niveles para un curso de llanura del sur Santa Fe. *XXV Congreso Nacional del Agua (CONAGUA 2015)*, Paraná, Entre Ríos, Argentina.
- Sturm, T.R. (2001). *Open Channel Hydraulics*, McGraw-Hill. New York.
- Syme, W.J. (1991). Dynamically linked two-dimensional/one-dimensional hydrodynamic modelling program for rivers, estuaries and coastal waters. *MRes thesis, University of Queensland, Australia*.
- Trento, A. y Alvarez, A. (2011). A numerical model for the transport of chromium and fine sediments. *Environmental Modeling and Assessment*, 16, 6:551-564. DOI: 10.1007/s10666-011-9263-5.
- Trento, A., Álvarez, A., Gallo, M., Filippa, L. y Vinzón, S. (2009). Simulación hidrodinámica de la planicie de inundación del río Salado para la crecida de 2003. *XVII Congreso sobre Métodos Numéricos y sus Aplicaciones, ENIEF, Tandil, Argentina, XXVIII*, 2869-2881 (artículo completo).
- USACE a. (2016). 2D Modeling User's Manual. Version 5.0. *United States Army Corp of Engineers. Hydrologic Engineering Center*.
- USACE b. (2016). Hydraulic Reference Manual. Version 5.0. *United States Army Corp of Engineers. Hydrologic Engineering Center, Davis, CA*, 149p.
- Verwey, A. (2003). Integrated 1D and 2D flood modelling with SOBEK: cases studies and trends. *International Conference on Advances in Flood Forecasting in Europe, Rotterdam, The Netherlands*, 2, 182-190.
- Wu F. and Shen H. (1999). Variation of roughness coefficients for unsubmerged and submerged vegetation. *Journal of Hydraulic Engineering*, 125 (9), 934-942.
- Zenclussen, C., Palman, L., Alvarez, A., y Trento, A. (2014). Trabajos de laboratorio y campo con un trazador fluorescente para calcular el coeficiente de dispersión longitudinal. *2do Congreso Internacional de Hidrología de Llanuras*.