

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA**  
**Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales**

*Maestría en Ciencias de la Ingeniería*  
*Mención en Recursos Hídricos*



**Dinámica del aporte de sedimentos a cuerpos  
de agua lénticos. Caso de aplicación: Embalse  
San Roque, Córdoba, Argentina**

**TESIS DE MAESTRÍA**

Autora: Ing. Rocío Bianchi  
Director: Dr. Ing. Carlos Marcelo García Rodríguez

Córdoba, 2022

# Dinámica del aporte de sedimentos a cuerpos de agua lénticos. Caso de aplicación: Embalse San Roque, Córdoba, Argentina

---

## Resumen

El embalse San Roque, ubicado en el valle de Punilla de Córdoba, Argentina, es uno de los cuerpos de agua más importantes de la provincia de Córdoba, Argentina, ya que se utiliza para abastecimiento de agua potable a la Ciudad de Córdoba, generación de energía eléctrica, riego, control de crecidas y recreación. Estudios previos indican que el río San Antonio, uno de sus principales tributarios, aporta gran cantidad de sedimentos a ese embalse los cuales deben ser gestionados adecuadamente para impedir su colmatación. Actualmente la información hidrológica, hidráulica y sedimentológica existente en el área de estudio no es suficiente para desarrollar herramientas de gestión sostenible de este cuerpo de agua como por ejemplo un plan de extracción de áridos del curso fluvial en el ingreso del embalse que siga un criterio en función de las características del curso fluvial y de las condiciones hidrológicas existentes (caudales líquidos del río y niveles de embalse) de manera de prevenir la disminución de la vida útil del embalse. En esta tesis se presentan avances en el estudio de la dinámica del aporte de sedimentos del río San Antonio en la desembocadura del embalse San Roque.

Para cumplimentar este objetivo general, en primer lugar se realizó una estimación de la producción de sedimentos en la cuenca de aporte. Estos sedimentos son los que serán transportados al área de estudio. Luego se elaboró un modelo conceptual para comprender los procesos físicos que gobiernan el transporte de sedimentos en el área de estudio y las variables más importantes. El modelo fue desarrollado en Python y requiere como variables de entrada características del flujo, del fluido, del sedimento y del tramo de río analizado, junto a parámetros del esquema de la modelación. Definidos los datos de entrada, es posible determinar las profundidades de flujo, el transporte de sedimentos total del lecho (por fondo y en suspensión) y la evolución del lecho a lo largo del tiempo de modelación. Con el modelo se determinaron las variables dominantes en la dinámica del transporte de sedimentos en la zona de estudio, que luego fueron relevadas en campo: las condiciones hidrológicas e hidráulicas (precipitación, caudal líquido, niveles del embalse, tirantes y velocidades del flujo en el río), la topografía (a través de modelos digitales de elevación y relevamientos topográficos de formas de fondo) y las características del sedimento (granulometría y transporte de sedimentos). Se relevaron estas variables para nueve eventos de crecida y cuatro condiciones luego de la ocurrencia de la crecida, aplicando distintas metodologías experimentales, de acuerdo a la tecnología disponible y las condiciones del flujo. Luego, los datos obtenidos fueron utilizados para validar los resultados del modelo conceptual y de esa forma interpretar los procesos intervinientes en cada caso.

Se obtuvo que el mayor ingreso de sedimentos al embalse ocurre en condiciones de niveles bajos del embalse o en crecidas significativas y su efecto es más marcado de acuerdo a la magnitud del evento. Cuando el embalse presenta niveles bajos y ocurre una crecida, hay transporte de sedimentos en todo el tramo de estudio. Luego, al aumentar el nivel, en la zona cercana al embalse se produce deposición y la zona donde se transporta sedimento se traslada hacia aguas arriba. Los

resultados de esta tesis pueden ser utilizados para desarrollar herramientas de gestión sostenible del cuerpo de agua, como definir los lugares y tiempos recomendados de extracción de áridos.

## Palabras claves

Hidráulica Fluvial, Transporte de sedimentos, Embalses, Modelos conceptuales, Métodos experimentales.

## Abstract:

The San Roque reservoir, located in the Punilla Valley of Córdoba, Argentina, is one of the most important reservoirs in the province of Córdoba, Argentina, since it is used to supply drinking water to the City of Córdoba, generating electric power, irrigation, flood control and recreation. Previous studies indicate that the San Antonio River, one of its main tributaries, contributes a large amount of sediment to this reservoir, which must be properly managed. Currently, the existing information in the study area is not sufficient to characterize the dynamics of sediment inflow to this reservoir. This information is required to develop sustainable management tools, such as a plan for extracting sediments from the river near the reservoir that follows a criterion based on the characteristics of the river and the existing hydrological conditions (flow discharge of the river and reservoir levels) in order to prevent the reduction of the useful life of the reservoir. This thesis presents advances in the study of the dynamics of the sediment contribution of the San Antonio River at the mouth of the San Roque reservoir.

To meet this general objective, first an estimate of sediment production in the input basin is presented. These sediments are the ones that will be transported to the study area. A conceptual model was then developed to understand the physical processes that govern sediment transport in the study area and the most important variables. The model was developed in Python and requires characteristics of the flow, the fluid, the sediment and the analyzed river section as input variables, together with parameters of the modeling scheme. Once the input data is defined, it is possible to determine the flow depths, the total sediment transport of the bed (by bottom and in suspension) and the evolution of the bed over the modeling time. With the model, the most important variables in the dynamics of sediment transport in the study area were determined, which were later surveyed in the field: hydrological and hydraulic conditions (precipitation, flow discharge, reservoir levels, depths and flow velocities in the river), topography (through digital elevation models and topographic surveys of bedforms) and sediment characteristics (granulometry and sediment transport). These variables were then surveyed for nine flood events and four conditions after the occurrence of the flood, applying different experimental methodologies, according to the available technology and the flow conditions. Then, the data was used to validate the results of the conceptual model and thus interpret the processes involved in each case.

It was found that the highest sediment input to the reservoir occurs in conditions of low levels of the reservoir or in significant floods and its effect is more important according to the magnitude of the event. When the reservoir has low water levels and a flood occurs, there is sediment transport throughout the study section. Then, as the level rises, deposition occurs in the area near the reservoir and the area where sediment is transported moves upstream. The results of this thesis can

be used to develop tools for sustainable management of the dam, such as defining the recommended times and places for the sediment extraction.

**Key words:**

River hydraulics, Sediment transport, Reservoirs, Conceptual models, Experimental methods.



## Agradecimientos

---

La finalización de este trayecto académico no hubiera sido posible sin el apoyo de mi familia, compañeros de trabajo, colegas y amigos. Por ello quiero agradecer especialmente:

- A mi familia que me apoya incondicionalmente en todos mis estudios, ideas y pasiones.
- A mi director Carlos Marcelo García por creer en mí desde el primer día, brindarme su tiempo, su confianza y contagiarme el entusiasmo y pasión por la ciencia, los recursos hídricos, la educación y el trabajo.
- A mis compañeros y amigos del CETA-LH y FCEFYN por su apoyo en el trabajo, ensayos y campañas de medición, explicaciones pacientes, sugerencias y tiempos de calidad compartidos.
- A mis profesores de la maestría, por transmitirme sus enseñanzas y experiencias a pesar de afrontar tiempos de pandemia y virtualidad.
- A mis amigos, que me escucharon pacientemente hablar horas y horas de la tesis y me acompañan dentro y fuera de la facultad.
- A los estudiantes, docentes y ciudadanos que forman parte del Proyecto MATTEO por permitirme soñar con ustedes, aprender juntos, vivir experiencias que me llenan el corazón y recopilar información utilizada en esta tesis.
- A Francisco Pedocchi y Rodrigo Mosquera del IMFIA-UDELAR; Micaela Ru y Ricardo Szupiany de la FICH-UNL; Susana Degiovanni, Nelso Doffo y Eugenia Benito de la FCEFYQ-UNRC por su apoyo y aportes durante mi trayectoria académica.
- A los integrantes del Laboratorio de Geotecnia de la FCEFYN-UNC por abrirme sus puertas y permitirme realizar ensayos fundamentales para el presente trabajo.
- A la APRHi por su apoyo en la realización de las campañas de medición.

¡Muchas gracias a todos!

## Índice general

Capítulo 1: Marco referencial de la tesis.....	18
1.1. Introducción .....	18
1.2. Área de estudio .....	18
1.3. Estudios preliminares.....	24
1.4. Área de vacancia .....	26
1.5. Objetivos .....	27
1.6. Organización de la tesis.....	28
Capítulo 2: Producción de sedimentos en la cuenca .....	29
2.1. Introducción .....	29
2.2. Aplicación de métodos empíricos .....	29
2.3. Análisis de estudios batimétricos.....	38
2.4. Análisis, validación de resultados y discusión.....	44
Capítulo 3: Modelo conceptual de los procesos de transporte de sedimentos en el río San Antonio .....	47
3.1. Introducción .....	47
3.2. Descripción del modelo.....	47
3.3. Síntesis y diagrama de flujo de la modelación .....	54
3.4. Implementación del modelo .....	57
3.5. Análisis de resultados y discusión .....	72
Capítulo 4: Metodología utilizada para el relevamiento de campo de variables que controlan el transporte de sedimentos.....	74
4.1. Introducción .....	74
4.2. Relevamiento de condiciones hidrometeorológicas, hidráulicas y niveles del embalse ..	74
4.3. Relevamiento topográfico.....	82
4.4. Relevamiento de características de la granulometría del lecho y del transporte de sedimentos.....	87
Capítulo 5: Resultados del relevamiento de campo realizado durante crecidas.....	93
5.1. Introducción .....	93
5.2. Resultados obtenidos.....	93
5.3. Análisis de resultados y discusión .....	123
Capítulo 6: Resultados del relevamiento de campo realizado durante estiaje .....	124

6.1. Introducción .....	124
6.2. Resultados obtenidos.....	124
6.3. Análisis de resultados y discusión .....	149
Capítulo 7: Contraste entre los resultados del modelo y datos relevados .....	152
7.1. Introducción .....	152
7.2. Metodología .....	152
7.3. Resultados obtenidos: Eventos relevados en condición de crecida .....	153
7.4. Análisis de resultados y discusión .....	167
Capítulo 8: Conclusiones y recomendaciones.....	169
8.1. Introducción .....	169
8.2. Principales conclusiones en relación a la producción de sedimentos en la cuenca del río San Antonio .....	169
8.3. Principales conclusiones y recomendaciones en relación a la modelación de la dinámica del aporte de sedimentos en cuerpos de agua.....	170
8.4. Principales conclusiones y recomendaciones en relación al relevamiento de condiciones hidrológicas, hidráulicas, nivel del embalse, topografía y características de la granulometría del lecho	171
8.5. Principales conclusiones y recomendaciones para el manejo de sedimentos en el tramo del río San Antonio en su desembocadura al embalse San Roque .....	173
8.6. Trabajos futuros .....	173
Anexo .....	174
Código del Modelo Conceptual desarrollado en el Capítulo 3 de la presente tesis .....	174
Bibliografía .....	180

## Índice de figuras

Figura 1.- Ubicación espacial de la zona de estudio.....	19
Figura 2.- Cuencas tributarias al embalse San Roque (INA-CIRSA, 2020).....	20
Figura 3.- Inundaciones en el río San Antonio, puente central, Villa Carlos Paz. Fuente: (a, b, c) Eldor Bertorello. (d) Facundo Resolani. ....	23
Figura 4.- Evolución temporal de los DEM del Embalse (Fuente: APRHi) .....	26
Figura 5.- Estaciones meteorológicas automáticas utilizadas y distribución espacial de la precipitación media anual (PMA) .....	32
Figura 6.- Mapa de distribución de (a) la erosividad de las lluvias RUSLE, (b) la erodabilidad de los suelos KUSLE, (c) factor topográfico topográfico LUSLESUSLE y (d) factor de cobertura y manejo de la vegetación CUSLE. ....	35
Figura 7.- Mapa de la litología de la cuenca del embalse San Roque (INA-CIRSA, 2020).....	36
Figura 8.- Ecuación de pérdida de suelos (USLE) en el área de estudio, factor AUSLE.....	37
Figura 9.- Transectas realizadas con sonda ecográfica y perfilador sísmico durante el estudio batimétrico en el embalse San Roque, 2016 (CEPROCOR, 2016).....	39
Figura 10.- Batimetrías embalse San Roque. ....	40
Figura 11.- Secciones de análisis planteadas en el embalse San Roque.....	40
Figura 12.- Correlación entre caudal líquido medio anual y caudal sólido medio anual que ingresan al embalse. ....	41
Figura 13.- Elevaciones en la sección transversal L1. ....	42
Figura 14.- Elevaciones en la sección transversal L0. ....	43
Figura 15.- Elevaciones en la sección transversal L3. ....	43
Figura 16.- Elevaciones en la sección longitudinal L2.....	44
Figura 17.- Elevaciones en la sección longitudinal L4.....	44
Figura 18.- Imágenes de la zona 3 captadas aguas abajo del Puente Central en (a) 1940 (Fuente: Grupo Facebook Encuentros con la Villa de Don Carlos Nicandro) y (b) 20/10/2021.....	45
Figura 19.- Imágenes de Villa Carlos Paz en (a) Década del '20 (Fuente: Eldor Bertorello) y (b) 06/07/2021 (Fuente: Google Earth). ....	46
Figura 20.- Esquema del proceso de transporte de sedimentos en un río.....	50
Figura 21.- Esquema del proceso de transporte de sedimentos en suspensión en un río.....	51
Figura 22.- Ábaco de Shields-Parker (García, 2007).....	53
Figura 23.- Área modelada, río San Antonio, Villa Carlos Paz, Córdoba, Argentina.....	57
Figura 24.- Lecho inicial representado con (a) $\eta$ y (b) $\eta'$ . ....	59
Figura 25.- Resultados de variación del lecho obtenidos en la modelación distintas fórmulas empíricas para calcular $q_b$ .....	61
Figura 26.- Resultados de transporte unitario de sedimentos de fondo obtenidos en la modelación distintas fórmulas empíricas para calcular $q_b$ .....	61
Figura 27.- Resultados de variación del lecho obtenidos en la modelación distintas fórmulas empíricas para calcular $q_s$ .....	62
Figura 28.- Resultados de transporte unitario de sedimentos de fondo en suspensión obtenidos en la modelación distintas fórmulas empíricas para calcular $q_s$ . ....	62
Figura 29.- Resultados de variación del lecho obtenidos en la modelación con $y_f$ variable.....	63
Figura 30.- Resultados de variación de la tensión de corte obtenidos en la modelación con $y_f$ variable. ....	64
Figura 31.- Ábaco de Shields-Parker con resultados de la modelación en distintas progresivas con $y_f = 0.5 \text{ m}$ .....	65
Figura 32.- Ábaco de Shields-Parker con resultados de la modelación en distintas progresivas con $y_f = 0.8 \text{ m}$ .....	65
Figura 33.- Ábaco de Shields-Parker con resultados de la modelación en distintas progresivas con $y_f = 2 \text{ m}$ .....	66
Figura 34.- Ábaco de Shields-Parker con resultados de la modelación en distintas progresivas con $y_f = 3.8 \text{ m}$ .....	66
Figura 35.- Relación entre la velocidad de corte y la velocidad media del flujo a lo largo de $x$ , para $q = 1 \text{ m}^2/\text{s}$ con $y_f$ variable.....	67
Figura 36.- Resultados de transporte total unitario de sedimentos obtenido en la modelación con $y_f$ variable.....	67
Figura 37.- Resultados de variación del lecho obtenidos en la modelación con $D_{50}$ variable.....	68
Figura 38.- Resultados de transporte total unitario de sedimentos obtenido en la modelación con $D_{50}$ variable. ....	68
Figura 39.- Variación del lecho obtenida en la modelación con $S_0$ variable.....	69
Figura 40.- Resultados de transporte total unitario de sedimentos obtenido en la modelación con $S_0$ variable. ....	69

Figura 41.- Variación del lecho bajo las condiciones 1 y 2 en el escenario $y_f = 0.50$ m. La condición 3 no se representa porque es supercrítica. ....	70
Figura 42.- Variación del lecho bajo las distintas condiciones, en el escenario $y_f = 0.8$ m. ....	71
Figura 43.- Variación del lecho bajo las distintas condiciones, en el escenario $y_f = 2$ m. ....	71
Figura 44.- Variación del lecho bajo las distintas condiciones, en el escenario $y_f = 3.8$ m. ....	72
Figura 45.- Zonas relevadas en campo en el río San Antonio. ....	74
Figura 46.- Estaciones meteorológicas oficiales y de la red MATTEO (estaciones meteorológicas y pluviómetros) utilizadas. ....	75
Figura 47.- Ubicación de la sección de aforo con ADCP en la zona 2 del río San Antonio. ....	78
Figura 48.- Descripción del ADCP SonTek S5 (Sontek, 2013) ....	79
Figura 49.- Variación del nivel del embalse San Roque en el tiempo. ....	80
Figura 50.- Sección de medición de velocidades en el Río San Antonio y puntos fijos. ....	81
Figura 51.- Punto fijo relevado con GPS en el Puente Mansilla. ....	82
Figura 52.- Perfiles longitudinales considerados para la estimación de longitud de formas de fondo mediante análisis de imágenes satelitales. ....	83
Figura 53.- Perfil longitudinal a lo largo de la zona de estudio en el río San Antonio. ....	84
Figura 54.- Longitudinales para caracterizar las formas de fondo en la zona 1. ....	85
Figura 55.- Longitudinales para caracterizar las formas de fondo en la zona 2. ....	85
Figura 56.- Longitudinales para caracterizar las formas de fondo en la zona 3. ....	86
Figura 57.- Esquema de mediciones dinámicas con ADCP en la sección de estudio. ....	86
Figura 58.- Esquema del método del lazo con ADCP en la sección de estudio en el río San Antonio. ....	89
Figura 59.- Esquema de las mediciones estacionarias con ADCP en la sección de estudio en el río San Antonio, el día 02/02/2021. ....	90
Figura 60.- Imágenes satelitales del Río San Antonio el día 30/11/2011. ....	94
Figura 61.- Reporte meteorológico de precipitación acumulada desde el 20/11/2011 a las 00:00 hs. al 21/11/2011 a las 00:00 hs, recopilando información de estaciones meteorológicas oficiales y de la red MATTEO (estaciones meteorológicas y pluviómetros). ....	95
Figura 62.- Niveles del embalse, período 01/11-31/12/2011. ....	96
Figura 63.- Imágenes satelitales del Río San Antonio del día 18/11/2017. ....	96
Figura 64.- Reporte meteorológico de precipitación acumulada desde el 26/09/2017 a las 00:00 hs. al 27/09/2017 a las 00:00 hs, recopilando información de estaciones meteorológicas oficiales y de la red MATTEO (estaciones meteorológicas y pluviómetros). ....	97
Figura 65.- Reporte meteorológico del evento ocurrido el 30/01/2021, recopilando información de estaciones meteorológicas oficiales y de la red MATTEO (estaciones meteorológicas y pluviómetros). ....	98
Figura 66.- Perfil medio de velocidades durante la medición del 30/01/2021, $Q=35.43$ m <sup>3</sup> /s. ....	99
Figura 67.- Mediciones dinámicas realizadas en la campaña del 30/01/2021, $Q=35.43$ m <sup>3</sup> /s. ....	99
Figura 68.- Resultado del método del lazo de la campaña del 30/01/2021, $Q=35.43$ m <sup>3</sup> /s. ....	100
Figura 69.- Perfil de velocidades obtenido con el método del lazo y valores de $V_{mb}$ puntual determinados con mediciones estacionarias de la campaña del 30/01/2021, $Q=35.43$ m <sup>3</sup> /s. ....	101
Figura 70.- Reporte meteorológico de lluvia precipitada entre el 01/02/2021 09:00 hs hasta el 02/02/2021 09:00 hs, recopilando información de estaciones meteorológicas oficiales y de la red MATTEO (estaciones meteorológicas y pluviómetros). ....	102
Figura 71.- Perfil medio de velocidades durante la medición. ....	103
Figura 72.- Resultado del método del lazo de la campaña del 02/02/2021, $Q=45.82$ m <sup>3</sup> /s. ....	103
Figura 73.- Ubicación de las mediciones realizadas con el método del lazo durante la campaña del 02/02/2021, $Q=45.82$ m <sup>3</sup> /s. ....	104
Figura 74.- Perfiles de velocidad obtenidos en las campañas del 30/01/2021 y 02/02/2021. ....	105
Figura 75.- Imágenes del punto fijo 2 (a) antes del evento (24/09/2021) y (b) después del evento de crecida (20/10/2021) ....	105
Figura 76.- Imágenes del punto fijo 4 (a) antes del evento (24/09/2021) y (b) después del evento de crecida (14/10/2021) ....	106
Figura 77.- (a) Ortofoto y (b) Modelo Digital de Elevaciones, generados con el VANT en la zona 1. ....	106
Figura 78.- (a) Ortofoto y (b) Modelo Digital de Elevaciones, generados con el VANT en las zonas 2 y 3. ....	107
Figura 79.- Perfil longitudinal del lecho del cauce en la zona 1. ....	107

Figura 80.- Perfil longitudinal del lecho del cauce en la zona 2.....	107
Figura 81.- Perfil longitudinal del lecho del cauce en la zona 3.....	108
Figura 82.- Muestras de sedimento extraídas durante la campaña.....	108
Figura 83.- Curvas granulométricas del material del fondo para las muestras extraídas de la zona 1.....	109
Figura 84.- Curvas granulométricas del material del fondo para las muestras extraídas de la zona 2.....	109
Figura 85.- Reporte meteorológico de lluvia precipitada entre el 12/10/2021 09:00 hs hasta el 13/10/2021 09:00 hs, recopilando información de estaciones meteorológicas oficiales y de la red MATTEO (estaciones meteorológicas y pluviómetros).....	110
Figura 86.- Hidrograma de tributarios al embalse San Roque y niveles de embalse, período 01/03-29/06/2021.....	111
Figura 87.- Imagen captada desde el punto fijo 1 el día 13/10/2021.....	111
Figura 88.- Video de la crecida ocurrida en el río San Antonio el día 13/10/2021 (Carlos Paz En Vivo, 2021).....	111
Figura 89.- Reporte meteorológico de lluvia precipitada entre el 09/11/2021 09:00 hs hasta el 10/11/2021 09:00 hs, recopilando información de estaciones meteorológicas oficiales y de la red MATTEO (estaciones meteorológicas y pluviómetros).....	112
Figura 90.- Hidrograma de aporte de tributarios (Q Total) al embalse San Roque y niveles de embalse, período 09/11/2021 00:00 hs-10/11/2021 12:00 hs.....	113
Figura 91.- Imágenes capturadas durante el evento de crecida del día 09/11/2021, 19:00 hs en (a) punto fijo 1 hacia aguas arriba, (b) punto fijo 2 hacia aguas arriba y (c) punto fijo 2 hacia aguas abajo.....	113
Figura 92.- Captura del video de la crecida en el río San Antonio ocurrida el día 9/11/2021 (a) minuto 0:36 y (b) minuto 2:46 (Daniel Alejandro, 2021).....	114
Figura 93.- Reporte meteorológico de lluvia precipitada entre el 10/11/2021 09:00 hs hasta el 11/11/2021 09:00 hs, recopilando información de estaciones meteorológicas oficiales y de la red MATTEO (estaciones meteorológicas y pluviómetros).....	115
Figura 94.- Hidrograma de tributarios al embalse San Roque y niveles de embalse, período 10/11-12/11/2021.....	116
Figura 95.- Imágenes de capturadas en los puntos fijos (a) 2 y (b) 3 durante el evento de crecida del día 10/11/2021, 21:30 hs.....	116
Figura 96.- Reporte de lámina precipitada desde las 09:00hs del día 09/12/2021 a las 09:00hs del día 10/12/2021 en la cuenca de estudio.....	117
Figura 97.- Hidrograma de tributarios al embalse San Roque y niveles de embalse, período 10/11-12/11/2021.....	118
Figura 98.- Imágenes de capturadas el punto fijo 2 durante el evento de crecida del día 10/12/2021 10:40 hs, (a) hacia aguas arriba (b) hacia aguas abajo.....	118
Figura 99.- Sección transversal de muestreo de sedimentos durante la campaña del evento del 10/12/2020.....	119
Figura 100.- Curvas granulométricas obtenidas en la sección transversal analizada del Río San Antonio, Zona 2.....	119
Figura 101.- Esquema de distribución del diámetro medio a lo largo de la sección transversal.....	120
Figura 102.- Reporte meteorológico de lluvia precipitada entre el 22/01/2022 09:00 hs hasta el 23/01/2022 09:00 hs, recopilando información de estaciones meteorológicas oficiales y de la red MATTEO (estaciones meteorológicas y pluviómetros).....	121
Figura 103.- Hidrograma de tributarios al embalse San Roque y niveles de embalse, período 23/01/2022 00:00 hs - 14/01/2022 12:00 hs.....	122
Figura 104.- Imágenes capturadas durante el evento de crecida del día 23/01/2022 13:20 hs, desde el punto fijo 1 (a) hacia aguas arriba (b) hacia aguas abajo y punto fijo 2 (c) hacia aguas arriba y (d) hacia aguas abajo.....	122
Figura 105.- Imágenes satelitales del Río San Antonio el día 20/08/2009.....	125
Figura 106.- Reporte meteorológico del evento ocurrido durante los días 04-05/03/2009, recopilando información de estaciones meteorológicas oficiales.....	126
Figura 107.- Reporte meteorológico del evento ocurrido el 25/03/2009, recopilando información de estaciones meteorológicas oficiales.....	127
Figura 108.- Nivel del embalse San Roque, período 01/03-01/11/2009.....	127
Figura 109.- Imágenes satelitales del Río San Antonio del día 31/08/2017.....	128
Figura 110.- Reporte meteorológico de precipitación acumulada desde el 31/03/2017 a las 00:00 hs. al 04/04/2017 a las 00:00 hs, recopilando información de estaciones meteorológicas oficiales y de la red MATTEO (estaciones meteorológicas y pluviómetros).....	129
Figura 111.- Hidrograma del río San Antonio y niveles de embalse, período 01/03-31/12/2017.....	130
Figura 112.- Crecida del río San Antonio del día 04/04/2017 (Diario La nueva Mañana, 2017).....	130
Figura 113.- Imágenes satelitales del Río San Antonio del día 12/08/2020.....	131

Figura 114.- Dunas observadas en la zona 1 (a) y zona 2 (b), río San Antonio.....	131
Figura 115.- Dunas relevadas en las zonas 1 y 2.....	132
Figura 116.- (a) Ortofoto generada con el VANT en las zonas 1 y 2; (b) DEM generado con el VANT en las zonas 1 y 2..	132
Figura 117.- Perfil longitudinal en el eje del río (cuando está crecido) en la zona 1.....	133
Figura 118.- Perfil longitudinal en el eje del río (cuando está crecido) en la zona 2.....	133
Figura 119.- Ubicación espacial de las muestras de sedimento extraídas durante la campaña de relevamiento del evento del 25/03/2020. ....	134
Figura 120.- Curvas granulométricas del material del fondo para las muestras extraídas de la zona 1. ....	134
Figura 121.- Curvas granulométricas del material del fondo para las muestras extraídas de la zona 3. ....	135
Figura 122.- Reporte meteorológico del evento ocurrido el 25/03/2020, recopilando información de estaciones meteorológicas oficiales y de la red MATTEO (estaciones meteorológicas y pluviómetros). ....	136
Figura 123.- Hidrograma de tributarios al embalse San Roque y niveles de embalse, período 20/03-01/08/2020. ....	137
Figura 124.- Crecida del río San Antonio del día 25/03/2020 (Carlos Paz En Vivo, 2020) .....	137
Figura 125.- Entrevista canal Doce referida a la bajante del río San Antonio, Córdoba (Eldoce, 2020) .....	138
Figura 126.- Imagen capturada por un VANT el día 14/10/2020 sobre el río San Antonio en (a) puente Mansilla, (b) puente Central y (c) puente Uruguay. (Tortolomágenes, 2020) .....	138
Figura 127.- Formas de fondo en el área de estudio (a) zona 1; (b) zona 3.....	139
Figura 128.- Dunas relevadas (a) en la zona 1; (b y c) en la zona 2.....	140
Figura 129.- Perfiles relevados en la zona 1. ....	140
Figura 130.- Perfiles relevados en la zona 2. ....	141
Figura 131.- Perfiles relevados en la zona 3. ....	141
Figura 132.- (a) Ortofoto y (b) Modelo Digital de Elevaciones, generados con el VANT en la zona 1. ....	142
Figura 133.- (a) Ortofoto y (b) Modelo Digital de Elevaciones, generados con el VANT en las zonas 2 y 3.....	142
Figura 134.- Muestras de sedimento extraídas durante la campaña del evento del 13/03/2021. ....	143
Figura 135.- Curvas granulométricas del material del fondo para las muestras extraídas de la zona 1. ....	144
Figura 136.- Curvas granulométricas del material del fondo para las muestras extraídas de la zona 2. ....	144
Figura 137.- Curvas granulométricas del material del fondo para las muestras extraídas de la zona 3. ....	145
Figura 138.- Reporte meteorológico de lluvia precipitada entre el 15/03/2021 09:00 hs hasta el 16/03/2021 09:00 hs, recopilando información de estaciones meteorológicas oficiales y de la red MATTEO (estaciones meteorológicas y pluviómetros). ....	147
Figura 139.- Hidrograma de tributarios al embalse San Roque y niveles de embalse, período 01/03-29/06/2021. ....	148
Figura 140.- Crecida del río San Antonio del día 16/03/2021 (Municipalidad de Villa Carlos Paz, 2020). ....	148
Figura 141.- Distribución del diámetro medio de las partículas transportadas durante los eventos de los días 25/03/2020 y 10/12/2021 en la zona de estudio. ....	150
Figura 142.- Distribución del diámetro medio de las partículas transportadas durante el evento del día 16/03/2021 en la zona de estudio. ....	150
Figura 143.- Distribución del diámetro medio de las partículas transportadas durante el evento del día 13/10/2021 en la zona de estudio. ....	150
Figura 144.- Relaciones (a) caudal líquido-longitud de duna y (b) caudal líquido-altura de duna. ....	151
Figura 145.- Transporte unitario total de sedimentos a lo largo del área de estudio durante el evento del día 27/09/2017. ....	153
Figura 146.- Variación del lecho generada durante el evento del día 27/09/2017. ....	154
Figura 147.- Relación entre la velocidad de corte y la velocidad media del flujo a lo largo de x para las condiciones del evento del día 30/01/2021.....	155
Figura 148.- Transporte unitario de sedimentos a lo largo del área de estudio durante el evento del día 30/01/2021. ..	156
Figura 149.- Variación del lecho generada durante el evento del día 30/01/2021. ....	156
Figura 150.- Relación entre la velocidad de corte y la velocidad media del flujo a lo largo de x para las condiciones del evento del día 02/02/2021.....	157
Figura 151.- Transporte unitario de sedimentos a lo largo del área de estudio durante el evento del día 02/02/2021. ..	158
Figura 152.- Variación del lecho generada durante el evento del día 02/02/2021. ....	158
Figura 153.- Transporte unitario total de sedimentos a lo largo del área de estudio durante el evento del día 13/10/2021. ....	159
Figura 154.- Variación del lecho generada durante el evento del día 13/10/2021. ....	159

<i>Figura 155.- Relación entre la velocidad de corte y la velocidad media del flujo a lo largo de x para las condiciones del evento del día 09/11/2021.....</i>	<i>160</i>
<i>Figura 156.- Transporte unitario de sedimentos a lo largo del área de estudio durante el evento del día 09/11/2021. ..</i>	<i>161</i>
<i>Figura 157.- Variación del lecho generada durante el evento del día 09/11/2021. ....</i>	<i>161</i>
<i>Figura 158.- Relación entre la velocidad de corte y la velocidad media del flujo a lo largo de x para las condiciones del evento del día 10/11/2021.....</i>	<i>162</i>
<i>Figura 159.- Transporte unitario de sedimentos a lo largo del área de estudio durante el evento del día 10/11/2021. ..</i>	<i>163</i>
<i>Figura 160.- Variación del lecho generada durante el evento del día 10/11/2021. ....</i>	<i>163</i>
<i>Figura 161.- Relación entre la velocidad de corte y la velocidad media del flujo a lo largo de x para las condiciones del evento del día 10/12/2021.....</i>	<i>164</i>
<i>Figura 162.- Transporte unitario de sedimentos a lo largo del área de estudio durante el evento del día 10/12/2021. ..</i>	<i>165</i>
<i>Figura 163.- Variación del lecho generada durante el evento del día 10/12/2021. ....</i>	<i>165</i>
<i>Figura 164.- Relación entre la velocidad de corte y la velocidad media del flujo a lo largo de x para las condiciones del evento del día 23/01/2022.....</i>	<i>166</i>
<i>Figura 165.- Transporte unitario de sedimentos a lo largo del área de estudio durante el evento del día 23/01/2022. ..</i>	<i>167</i>
<i>Figura 166.- Variación del lecho generada durante el evento del día 23/01/2022. ....</i>	<i>167</i>



## Índice de tablas

Tabla 1.- Estaciones meteorológicas automáticas utilizadas y su correspondiente precipitación media anual (PMA).....	31
Tabla 2.- Rangos de clases de erosión.....	37
Tabla 3.- Volúmenes y tasas de sedimentación del embalse San Roque.....	41
Tabla 4.- Parámetros de entrada del modelo conceptual del río San Antonio desarrollado.....	58
Tabla 5.- Variables de entrada del modelo conceptual del río San Antonio desarrollado.....	58
Tabla 6.- Tirantes $y_f$ y los niveles del embalse asociados.....	59
Tabla 7.- Resultados obtenidos de $q_b$ y $q_s$ en la modelación para $y_f$ y $q$ variables.....	60
Tabla 8.- Valores de $Rep$ y $\tau^*$ obtenidos en las progresivas 2500, 1500 y 500 en la modelación con $y_f$ variable.....	64
Tabla 9.- Condiciones de modelación al variar $y_f$ y $q$ .....	70
Tabla 10.- Constituyentes de la red MATTEO en Punilla.....	75
Tabla 11.- Análisis de precipitaciones históricas en las estaciones 500 y 600 INA CRSA.....	77
Tabla 12.- Tamices utilizados en los ensayos granulométricos realizados en la presente tesis.....	87
Tabla 13.- Resumen de las características relevadas por evento.....	93
Tabla 14.- Resultado de las mediciones de caudal líquido de la campaña del 30/01/2021, $Q=35.43$ m <sup>3</sup> /s.....	98
Tabla 15.- Caracterización de dunas mediante análisis dinámico de la campaña del 02/02/2021, $Q=45.82$ m <sup>3</sup> /s.....	100
Tabla 16.- Resultados del método del lazo de la campaña del 30/01/2021, $Q=35.43$ m <sup>3</sup> /s.....	101
Tabla 17.- Resultados de las mediciones estacionarias cortas de la campaña del 30/01/2021, $Q=35.43$ m <sup>3</sup> /s.....	101
Tabla 18.- Resultado de las mediciones de caudal líquido de la campaña del 02/02/2021, $Q=45.82$ m <sup>3</sup> /s.....	102
Tabla 19.- Resultados del método del lazo de la campaña del 02/02/2021, $Q=45.82$ m <sup>3</sup> /s.....	104
Tabla 20.- Parámetros representativos obtenidos para las muestras del evento del 13/10/2021.....	109
Tabla 21.- Parámetros característicos obtenidos en la sección transversal analizada del Río San Antonio, Zona 2. La ubicación de los puntos se observa en la Figura 101.....	119
Tabla 22.- Resumen de las características relevadas por evento.....	124
Tabla 23.- Resultados relevamiento convencional de dunas en las zonas 2 y 3.....	132
Tabla 24.- Longitud, altura y empinamiento de dunas en las zonas de estudio.....	133
Tabla 25.- Parámetros característicos del material del fondo para las muestras extraídas de las zonas 1 y 3.....	135
Tabla 26.- Volumen total promedio de los sedimentos acumulados las zonas de estudio.....	135
Tabla 27.- Resultados relevamiento convencional de dunas en las zonas 1 y 2.....	139
Tabla 28.- Longitud, altura y empinamiento de dunas en las zonas de estudio.....	142
Tabla 29.- Volumen de sedimentación/erosión obtenidos en las zonas de estudio como consecuencia del evento del 13/10/2021.....	143
Tabla 30.- Parámetros representativos obtenidos del material del fondo para las muestras extraídas del evento del 16/03/2021.....	145
Tabla 31.- Volumen total promedio de los sedimentos de las zonas de estudio.....	146
Tabla 32.- Resumen de características del flujo y formas de fondo obtenidas en campaña para distintos eventos.....	151
Tabla 33.- Variables de entrada del modelo conceptual del río San Antonio desarrollado aplicado para el estudio de transporte de sedimentos.....	152
Tabla 34.- Variables de entrada del modelo conceptual del río San Antonio aplicado en el evento del 27/09/2017.....	153
Tabla 35.- Variables de entrada del modelo conceptual del río San Antonio aplicado en el evento del 30/01/2021.....	154
Tabla 36.- Resultados obtenidos para el Puente Mansilla bajo las condiciones del evento del día 30/01/2021.....	155
Tabla 37.- Variables de entrada del modelo conceptual del río San Antonio aplicado en el evento del 02/02/2021.....	156
Tabla 38.- Resultados obtenidos para el Puente Mansilla bajo las condiciones del evento del día 02/02/2021.....	157
Tabla 39.- Variables de entrada del modelo conceptual del río San Antonio aplicado en el evento del 13/10/2021.....	158
Tabla 40.- Variables de entrada del modelo conceptual del río San Antonio aplicado en el evento del 09/11/2021.....	160
Tabla 41.- Resultados obtenidos para el Puente Mansilla bajo las condiciones del evento del día 09/11/2021.....	160
Tabla 42.- Variables de entrada del modelo conceptual del río San Antonio aplicado en el evento del 10/11/2021.....	161
Tabla 43.- Resultados obtenidos para el Puente Mansilla bajo las condiciones del evento del día 10/11/2021.....	162
Tabla 44.- Variables de entrada del modelo conceptual del río San Antonio aplicado en el evento del 10/12/2021.....	163
Tabla 45.- Resultados obtenidos para el Puente Mansilla bajo las condiciones del evento del día 10/12/2021.....	164
Tabla 46.- Variables de entrada del modelo conceptual del río San Antonio aplicado en el evento del 23/01/2022.....	165
Tabla 47.- Resultados obtenidos para el Puente Mansilla bajo las condiciones del evento del día 23/01/2022.....	166

*Tabla 48.- Resumen de resultados de la simulación (transporte de sedimentos y variación del lecho) y contraste entre modelo conceptual y datos relevados..... 168*

## Notación de la tesis: Definiciones, acrónimos y abreviaturas

$\%_{pasante}$  = Porcentaje de muestra pasante durante un ensayo granulométrico

$A$  = Constante =  $1.3 \times 10^{-7}$

$A_1$  = Constante

$A_{fl}$  = Acumulación del flujo

$A_{USLE}$  = Pérdida anual de suelo

ADCP = Velocímetro Acústico Doppler

APRHi = Administración Provincial de Recursos Hídricos de la Provincia de Córdoba

$\alpha$  = Factor de forma

$B_1$  = Constante

$b_4$  = Banda 4 de LANDSAT 8

$b_5$  = Banda 5 de LANDSAT 8

$\beta$  = Coeficiente de fricción dinámica

$C$  = Concentración media en la columna de agua

$C_b$  = Concentración de sedimentos en la cercanía del fondo

$C_{USLE}$  = Factor de cobertura

CETA = Centro de Estudios y Tecnología del Agua de la FCEFyN – UNC

CIRSA = Centro de Estudios de la Región Semiárida – Instituto Nacional del Agua

$D$  = Diámetro del sedimento del lecho

$D_{16}$  = Tamaño del sedimento del lecho correspondiente al 16% pasante

$D_{50}$  = Diámetro medio del sedimento del lecho

$D_{84}$  = Tamaño del sedimento del lecho correspondiente al 84% pasante

$D_{90}$  = Tamaño del sedimento del lecho correspondiente al 90% pasante

$D_i$  = Diferencia de posición de seguimiento de fondo en el método del lazo

$D_{up}$  = Distancia entre la posición inicial y final reportada por el ADCP

$\Delta$  = Altura de la duna

$\Delta_{m\acute{a}x}$  = Altura de duna máxima

$\Delta_{min}$  = Altura de duna mínima

$\Delta t$  = Diferencia de tiempo

$\Delta t_i$  = Intervalo de tiempo

$\Delta x$  = Diferencia en la coordenada  $x$

$E$  = Tasa de entrada en suspensión

$E_c$  = Energía cinética liberada por las lluvias

$EI_{30}$  = Índice de erosión pluvial en un intervalo de 30 minutos

FCEFyN = Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

$Fr$  = Número de Froude del lecho fluvial

$f_{c\ arena}$  = Factor de arena

$f_{h\ arena}$  = Factor de alto contenido de arena

$f_{limo-arcilla}$  = Factor de limo y arcilla

$f_s$  = Factor de fricción de Darcy – Weisbach del grano

$f_{Corg}$  = Factor de carbono orgánico

$g$  = Aceleración de la gravedad

$g_{sf}$  = Carga de fondo del lecho

$\eta$  = Elevación del lecho respecto a  $x$

$\eta'$  = Elevación del lecho respecto a  $x$  rectificada

$\theta_S$  = Número adimensional de Shields del grano de sedimento  
 $\theta_T$  = Número adimensional de Shields total  
 $I_{30}$  = Máxima intensidad de la precipitación en un intervalo de 30 minutos  
INA = Instituto Nacional del Agua  
IGN = Instituto Geográfico Nacional  
 $K_{USLE}$  = Factor de erodabilidad del suelo  
 $k_s$  = Rugosidad equivalente del grano de arena  
 $\lambda$  = Longitud de la duna  
 $\lambda_b$  = Concentración lineal de sedimentos  
 $\lambda_p$  = Porosidad del sedimento del lecho  
 $L_m$  = Longitud del tramo modelado  
 $L_{USLE}$  = Factor de longitud de la pendiente  
MATTEO = Monitoreo Automático del Tiempo en la Tropósfera en Escuelas y Organismos  
MAyGA = Ministerio de Agricultura y Ganadería de la provincia de Córdoba  
 $m_{arcilla}$  = Contenido en porcentaje de la fracción de arcilla (< 0.002 mm de diámetro)  
 $m_{arena}$  = Contenido en porcentaje de la fracción de arena (0.05 – 2.00 mm de diámetro)  
 $m_{corg}$  = Contenido en porcentaje de carbono orgánico  
 $m_{limo}$  = Contenido en porcentaje de la fracción de limo (0.002 – 0.05 mm de diámetro)  
NDVI = Índice de vegetación normalizado  
 $n_e$  = Número de eventos de precipitación durante el año  
 $\nu$  = viscosidad cinemática del agua  
 $p$  = Probabilidad de movimiento de la partícula  
PMA = Precipitación Media Anual  
 $P_T$  = Peso total de la muestra durante un ensayo granulométrico  
 $P_{USLE}$  = Factor de control de la erosión mediante prácticas de cultivo  
 $Q$  = Caudal líquido  
QRev = Programa para procesar datos medidos con ADCP desarrollado por el USGS  
 $Q_{lma}$  = caudal líquido medio anual  
 $Q_{pico}$  = Caudal líquido máximo en un evento de crecida  
 $Q_{sma}$  = caudal sólido medio anual  
 $q$  = Caudal líquido por unidad de ancho  
 $q_b$  = Transporte unitario de fondo  
 $q_s$  = Transporte unitario en suspensión  
 $q_t$  = Transporte unitario total  
 $R$  = Gravedad específica sumergida del sedimento  
 $Re_p$  = Número de Reynolds de la partícula  
 $R_i$  = Peso retenido en cada tamiz durante un ensayo granulométrico  
 $R_h$  = Radio hidráulico  
 $R_{USLE}$  = Factor de erosividad de las lluvias  
 $R_*$  = Número de Reynolds del grano  
 $r_0$  = Coeficiente de forma  
 $\rho_s$  = Densidad del sedimento  
 $\rho_w$  = Densidad del agua  
 $S_0$  = Pendiente del lecho fluvial  
 $S_f$  = Pendiente de energía  
 $S_{USLE}$  = Factor de inclinación de la pendiente  
 $\sigma_g$  = Desviación estándar geométrica del sedimento del lecho

$T$  = tiempo de medición con ADCP con el método del Lazo  
 $T_c$  = Tamaño de celda de análisis en ArcGis  
 $t_0$  = Tiempo inicial  
 $t_t$  = Tiempo que tarda el trazador en desplazarse entre dos puntos fijos  
 $t_m$  = Tiempo de simulación  
 $\tau$  = Tensión de corte total  
 $\tau_s$  = Tensión razante del grano  
 $\tau^*$  = Parámetro de Shields  
 $U$  = Velocidad del flujo  
 $U_{med}$  = Velocidad media del flujo  
 $UNC$  = Universidad Nacional de Córdoba  
 $USGS$  = Servicio Geológico de los Estados Unidos de América  
 $u_*$  = Velocidad de corte  
 $u_{*s}$  = Velocidad de corte del grano  
 $V_{mb}$  = Velocidad de fondo móvil  
 $V_{pl}$  = Volumen de sedimento unitario del perfil longitudinal  
 $V_t$  = Volumen total de sedimento  
 $v_d$  = Velocidad de migración de la duna  
 $v_{mbi}$  = Velocidad de fondo en un tramo  $i$   
 $v_s$  = Velocidad superficial del flujo  
 $w_s$  = Velocidad de caída de los sedimentos  
 $x$  = Eje de referencia horizontal, positivo en la dirección del flujo  
 $x_f$  = Coordenada del eje horizontal en el punto aguas abajo  
 $x_i$  = Coordenada del eje horizontal en el punto aguas arriba  
 $x_t$  = Distancia de la sección de control  
 $YSI/SonTek$  = Fabricante de ADCP y ADV  
 $y$  = Tirante  
 $y_c$  = Tirante crítico  
 $y_f$  = Tirante aguas abajo  
 $y_i$  = Tirante aguas arriba  
 $y_m$  = Tirante medio del cauce  
 $Z_u$  = Variable de similitud para sedimento uniforme

---

## Capítulo 1: Marco referencial de la tesis

---

### 1.1. Introducción

Al interponer un obstáculo a un río, como es el caso de una presa, se altera la dinámica del transporte de sedimentos ya que la producción de los mismos en la cuenca alta continúa, pero se modifica el escurrimiento y la capacidad de transporte en los tramos aguas arriba y aguas abajo de la presa. Aguas arriba, se origina un efecto remanso y el material grueso se deposita según la disminución de la velocidad del agua por el efecto de ampliación del cauce y el crecimiento del tirante (Sánchez & Álvarez, 1997). Ello, junto a la geología, topografía y capacidad de producción de sedimentos de la cuenca, la eficiencia de retención del embalse, el manejo del reservorio y el cambio climático se identifican como las principales causas de la sedimentación en cuerpos de agua (Adeogun, Salami, Ibitoye, Salami, & Ithagh, 2020). Para evitar o mitigar los impactos, se deben adoptar nuevas estrategias centradas en la gestión del embalse y la cuenca hidrográfica para equilibrar la entrada y la salida de sedimentos (Nda, Adnan, Yusoff, Jiya, & Ebenehi, 2020). Es fundamental para ello caracterizar la dinámica del transporte de sedimentos en el ingreso a cuerpos de agua y los procesos intervinientes. En cuencas torrenciales de grandes pendientes y tiempos de concentración bajos, aplicar los métodos convencionales de muestreo de sedimentos no resulta sencillo, ya que las mayores tasas de transporte de fondo se dan durante grandes crecidas. En consecuencia, aparece la necesidad de explorar nuevas técnicas para cuantificar experimentalmente los aportes de sedimentos a cuerpos de agua a través de los ríos, especialmente en dichos eventos de crecidas.

Sin embargo, en general la cuantificación de sedimentos que ingresan a un embalse se realiza por intervalos relativamente largos (meses, años) y no se focaliza en la dinámica del transporte durante eventos. Para ello se suelen emplear técnicas experimentales basadas en el análisis fotografías aéreas y levantamientos batimétricos cuando el sedimento está completamente sumergido o se estima la producción de sedimentos en la cuenca a través de métodos estadísticos como el de USLE (Wischmeier & Smith, 1978), (Fournier, 1960) (Fournier, 1962), (Djorovic & Gavrilovic, 1974), (Gavrilovic, 1988), entre otros.

En general, no hay antecedentes del estudio de la dinámica mencionada en los embalses de la provincia de Córdoba, lo que deja un área de vacancia en donde se focalizará esta tesis. Uno de los embalses más importantes de la provincia es el San Roque ubicado en el Valle de Punilla de la Provincia de Córdoba, Argentina, que abastece de agua potable a la ciudad de Córdoba Capital. Estudios realizados por la Administración Provincial de los Recursos Hídricos de la Provincia de Córdoba (APRHi) y la Subgerencia del Centro de la Región Semiárida del Instituto Nacional del Agua (Pusetto, Piovano, Rodríguez, Ruiz, & Halac, 2020) indican que las mayores cantidades de sedimentos aportadas a dicho embalse provienen del río San Antonio, evidenciadas por una zona de sedimentación significativa en la desembocadura del mismo.

### 1.2. Área de estudio

#### 1.2.1. Descripción del área de estudio

En esta tesis, el área de estudio corresponde a la desembocadura del río San Antonio en el embalse San Roque (31°25'13.6"S, 64°30'26.4"O), ubicado en el Valle de Punilla de la Provincia de Córdoba, Argentina, tal como se puede observar en la Figura 1.



Figura 1.- Ubicación espacial de la zona de estudio.

El valle de Punilla se encuentra rodeado por las sierras grandes y las sierras chicas. Presenta un clima templado con estaciones diferenciadas: el verano es cálido y húmedo, el otoño es cálido a templado con lluvias que disminuyen gradualmente, el invierno es templado y seco con vientos fuertes que, junto a la falta de lluvias, posibilitan la propagación de incendios forestales, y la primavera presenta clima templado y un aumento progresivo de precipitaciones. Debido a ello, los cursos de agua de la cuenca tienen un régimen intermitente, con caudales máximos en verano y bajos caudales durante el invierno.

En dicho valle se encuentra el embalse San Roque, cuya cuenca de recepción (Figura 2) posee aproximadamente 1635 km<sup>2</sup> y tiene cuatro tributarios principales: los ríos Cosquín y San Antonio y los arroyos Los Chorrillos y Las Mojarras. Además, recibe aportes de cuencas menores tributarias al peribalse: arroyos Los Mimbres, Las Catas, del Valle y Huahuas Mayun, junto a cursos semipermanentes provenientes del área urbana (INA-CIRSA, 2020).



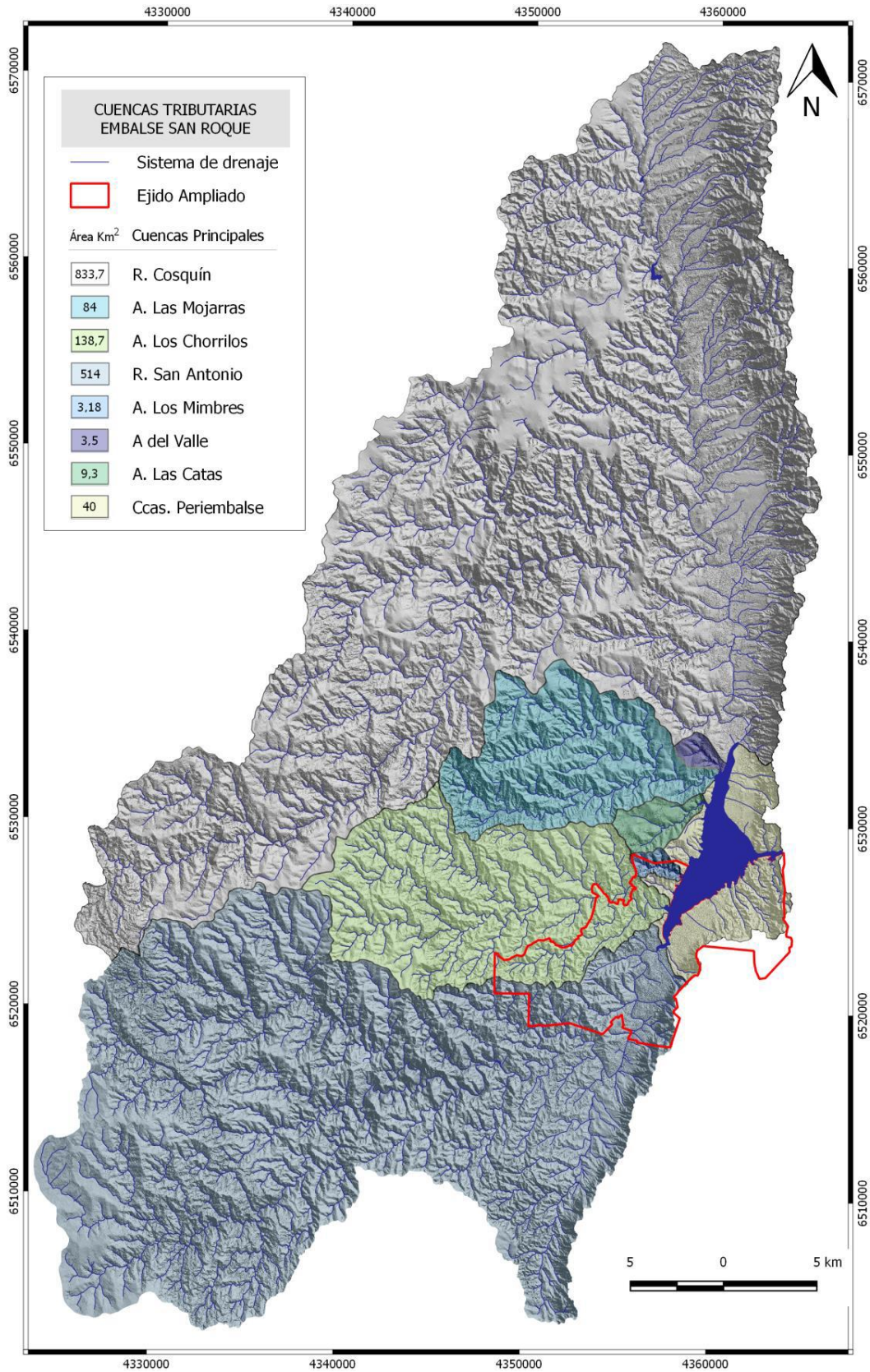


Figura 2.- Cuencas tributarias al embalse San Roque (INA-CIRSA, 2020)



El río Cosquín se forma con la confluencia del río Grande de Punilla y el Yuspe. El río Grande de Punilla nace de la unión de arroyuelos que descienden de la dorsal de La Cumbre, y el río Yuspe se forma en Los Gigantes. El Cosquín transita hacia el sur incorporando los arroyos El Rosario y Suncho Huayco o Santa María, con un caudal medio total de  $5.5 \text{ m}^3/\text{s}$ . Al entrar en el embalse, se une con el arroyo Las Mojarras, cuyos tributarios son los ríos Tanti y Mallín y presenta un caudal medio de  $0.3 \text{ m}^3/\text{s}$ .

El río San Antonio nace de la confluencia de los ríos Icho Cruz y Malambo. El Icho Cruz nace en las vertientes de la Pampa de Achala, y el río Malambo se encuentra formado por torrentes y arroyitos como El Mogotes, El Sauce, Las Barrancas, etc. El San Antonio, ya formado, recoge aguas de pequeños arroyos, como las Achiras, Cuesta Blanca, San Antonio, etc., y el río del Cajón hasta alcanzar el embalse San Roque. Atraviesa la ciudad de Villa Carlos Paz y recibe al arroyo Los Chorrillos que presenta un caudal medio de  $0.3 \text{ m}^3/\text{s}$  y escurre las pendientes orientales de la Pampa del Matadero entre los cerros Blanco, Chorrillos y Potrero. El San Antonio se caracteriza por un caudal líquido promedio de  $4 \text{ m}^3/\text{s}$  y su cuenca abarca una superficie de  $515 \text{ km}^2$  (Barbeito & Ambrosino, 1997), se la puede clasificar desde el punto de vista de su dinámica como una cuenca de torrentes de depósitos recientes no estabilizados o vivos, con predominio de deslizamientos de laderas y carcavamiento lineal. Su principal fuente de carga fluvial son las pendientes empinadas de la parte media y alta de la cuenca por debajo de los 2000 m correspondiente a las subcuencas de los ríos Cajón, Malambo e Icho Cruz, donde la producción de sedimentos al pie de las laderas está relacionada principalmente por el material procedente de deslizamientos retransportado por acción de la escorrentía superficial (Beltramone C. , 2007). En consecuencia, es el principal aportante de sedimentos al embalse.

Reunidos en el valle, los ríos Cosquín y San Antonio dan nacimiento al río Primero o Suquía, que luego de su paso por el Dique San Roque, circula hacia la localidad de La Calera y la ciudad de Córdoba, donde incorpora al arroyo de La Cañada, que desagua el área de La Lagunilla (Vázquez, Miatello, & Roqué, 1979). Luego, escurre por la llanura Chaco-Pampeana y desemboca en un apéndice de la laguna Mar Chiquita, denominado Laguna del Plata con características hipersalinas (Piovano, Zanor, & Ariztegui, 2006).

Respecto al embalse San Roque, en 1884 se proyectó el viejo dique a cargo de los ingenieros Dumesnil y Cassaffouth, con el objetivo de controlar y aprovechar las aguas de las crecidas para riego. Luego, en 1930 los ingenieros Ballester, Volpi y Suárez proyectan un nuevo dique con mayor capacidad y seguridad, a 130 m aguas abajo de la presa inicial, que terminó de construirse en 1944 y es el que se utiliza actualmente. Es de tipo gravedad de planta curva, con un vertedero con entrada acampanada y túnel con una descarga máxima de  $280 \text{ m}^3/\text{s}$ . La fundación se encuentra a 601 msnm y el labio de vertedero a 643.3 msnm (35.5 m sobre el cero local). Su volumen hasta la cota labio vertedero es de  $201 \text{ Hm}^3$  y el volumen máximo  $350 \text{ Hm}^3$ . Originalmente, la cota de expropiación para los terrenos del periembalse era 43 m. Luego, el Decreto N° 8178 (08/10/69) liberó a los terrenos ubicados arriba de la cota 36 m y avanzó la urbanización sobre el periembalse. Esta zona se encuentra sometida a riesgos por inundación en crecidas extraordinarias y limita las operaciones de manejo. Actualmente, el embalse abastece de agua potable a la ciudad de Córdoba y La Calera, genera energía eléctrica, proporciona agua para riego, se utiliza para el control de crecidas y como zona recreativa.

### 1.2.2. Problemática del área de estudio

El río San Antonio es el principal aportante de sedimentos en el embalse del dique San Roque. Estudios realizados por la Administración Provincial de los Recursos Hídricos de la Provincia de Córdoba (APRHi) y la Subgerencia del Centro de la Región Semiárida del Instituto Nacional del Agua (Pusetto, Piovano, Rodríguez, Ruiz, & Halac, 2020) confirman esto, evidenciando una zona de sedimentación significativa en la desembocadura del río San Antonio en el embalse. Dicha sedimentación impacta en el perímbalse, debido a que una elevación del fondo favorece los desbordes fluviales. Además, la vida útil de los reservorios de agua disminuye con la acumulación de sedimentos, y por lo tanto se deben adoptar estrategias de manejo de la cantidad y calidad del sedimento y agua que ingresa.

Esto se encuentra agravado por el cambio climático que genera una inestabilidad hidrológica, incrementando la severidad de las inundaciones y sequías. Esto contribuye al aumento de la necesidad de mayores volúmenes útiles de embalses para garantizar un suministro estable de agua, energía y un control de inundaciones. También se prevé que el cambio climático aumente la concentración de sedimentos en muchos ríos, agravando la amenaza de sedimentación de los embalses (Annandale, Morris, & Karki, 2016).

Considerando los usos e importancia del embalse San Roque y la capacidad de transporte de sedimentos propia del río San Antonio (dada por sus características litológicas, tectónicas, geomorfología e hidrología) resulta necesario estudiar la dinámica de los sedimentos, para realizar una correcta planificación y gestión del embalse, tendiente a evitar la pérdida de su capacidad de almacenamiento.

La cuenca de estudio presenta un clima de tipo templado con caracteres específicos de una zona mediterránea y sufre variaciones puntuales dependientes de la combinación de las masas de aire y los procesos meteorológicos con los aspectos geomorfológicos y orográficos (INA-CIRSA, 2006). La temperatura media anual es de 12.4°C, alcanzándose una máxima media mensual de 23.2°C y mínima media mensual de 5.9°C (Colladon, 2004).

En la cuenca alta del río San Antonio la precipitación anual media está entre 800 y 900 mm. En la cuenca media y baja, las precipitaciones fluctúan entre 600 y 800 mm anuales. La precipitación se encuentra mal distribuida durante el año, concentrándose en el periodo octubre-marzo, con eventos intensos de corta duración, que suelen generar crecientes repentinas. Entre los meses de abril-septiembre se registra la mayor frecuencia de sequías (INA-CIRSA, 2006). En consecuencia, el caudal presenta grandes variaciones, con un rango de 0.2 m<sup>3</sup>/s en época de estiaje y del orden de 1000 m<sup>3</sup>/s en crecidas (con un período de retorno de 25 años).

La superficie cubierta por vegetación en la cuenca está compuesta esencialmente pastizales y monte bajo y llega a ser del 75% (Beltramone, 2007). Ha sido frecuentemente afectada por incendios en distintos niveles de la cuenca y escalas de gravedad, afectando a los distintos pisos de vegetación existentes. Esta situación, junto a las características intrínsecas de la cuenca (litología, pendientes, clima, vegetación natural, etc.), influye notablemente en las crecidas repentinas (INA-CIRSA, 2006).

Las condiciones de la dinámica fluvial cambian sustancialmente por el efecto que genera el embalse (INA-CIRSA, 2006). Cuando el nivel del agua se encuentra cercano a la cota del labio vertedero, crecidas importantes históricamente generaron inundaciones en los sectores del perímbalse. De acuerdo a una recopilación periódica realizada por el ciudadano Eldor Bertorello, el 16 de marzo

de 1975 llegó una crecida de 4 m en el río San Antonio, superando el puente central y provocando serios daños en la cabecera céntrica, al igual que en viviendas particulares y comercios. Situaciones similares ocurrieron durante el 7 de febrero de 1931, donde la crecida se llevó la parte más amplia del puente central, el 6 de enero de 1992 y el 1 de noviembre de 1999. En la Figura 3 se presentan imágenes de crecidas extraordinarias del río mencionado, capturadas en la zona del puente central de Villa Carlos Paz.



(a) 07/02/1931



(b) 03/1983



(c) ©01/11/1999



(d) 16/03/2021

Figura 3.- Inundaciones en el río San Antonio, puente central, Villa Carlos Paz. Fuente: (a, b, c) Eldor Bertorello. (d) Facundo Resolani.

### 1.2.3. Información disponible

En la cuenca hay información pluviométrica y de caudal escurrido superficialmente en el sistema fluvial provista por estaciones del INA CRSA, disponible en <https://sgainacirsa.ddns.net/cirsa/>. La APRHi y el MAGyA tienen instalada una red de estaciones meteorológicas automáticas en la provincia y sensores de nivel en los ríos San Antonio y Cosquín y el Dique San Roque que envían datos cada 10 minutos. Con los datos de nivel y una curva Nivel-Caudal calibrada, se realiza el manejo del embalse a tiempo real. La información se puede consultar en <https://newmagya.omixom.com/>. Además, se cuenta con información pluviométrica relevada por escuelas, organismos y ciudadanos que forman parte de MATTEO (Monitoreo Automático del Tiempo de la Troposfera en Escuelas y Organismos), proyecto de compromiso social estudiantil de la FCEfYn-UNC creado en homenaje al estudiante científico MATTEO Ravagli Cáceres, estudiante

del Instituto Dante Alighieri de Villa Carlos Paz. En este marco, se realizan reportes meteorológicos de Punilla, recopilando registros de lámina de lluvia diaria de todas las fuentes de información anteriormente mencionadas. Los mismos se encuentran disponibles para la descarga en <https://sites.google.com/view/proyectomatteo/reportes-meteorol%C3%B3gicos/reportes-diarios> y los datos se incluyen en <https://matteo.aprhi.gob.ar/>.

El San Antonio es monitoreado, al igual que el embalse San Roque, estacionalmente en su calidad y cantidad de agua desde hace más de 20 años por la Subgerencia de la Región Semiárida del Instituto Nacional del Agua (<https://www.ina.gov.ar/cirsa/index.php?seccion=3>). Sin embargo, hasta la actualidad no se realizan mediciones sistemáticas y precisas del transporte de sedimentos durante crecidas para identificar y cuantificar la dinámica de ese transporte. Ello se debe a que en dichas condiciones la implementación de técnicas convencionales de muestreo resulta difícil, insegura y con una gran incertidumbre en los resultados.

### 1.3. Estudios preliminares

Varios autores realizaron estudios del marco geológico de la cuenca del río San Antonio. La misma se compone por un basamento cristalino metamórficoplutónico de edad precámbrica a eopaleozoica respectivamente, que alterna con materiales modernos de carácter fluvio-torrencial (Pleistoceno) y sedimentos aluvionales que rellenan las depresiones (Holoceno). Las rocas cristalinas ocupan el 82.83% de la superficie total de la cuenca, correspondiendo un 40.46% a rocas metamórficas y un 42.37% a rocas ígneas (INA-CIRSA, 2006).

Los rasgos del relieve deben su origen a la tectónica y a la actuación de procesos fluviales y de gravedad, los que ya han sido estudiados (Schmieder, 1921) (Beltramone, Barbeito, & Ambrosino, 2003), (Barbeito, 2000). Las unidades de relieve comprenden rocas graníticas en la zona alta (Cumbres de Achala y Sierra Grande), gneis y esquistos en la Sierra Chica que presentan fracturas que organizan la red de drenaje y acentúan la acción erosiva de los agentes morfogénicos, y finalmente rocas esquistosas en la zona baja que conforman un relieve de bloques a menor altitud donde tuvo importante participación la constitución geológica del material aflorante (estructura y litología) que condicionó la implantación de la red de avenamiento y la formación de filos y crestones (Beltramone, 2007).

La cuenca del San Antonio es torrencial, lo que implica que el cauce recibe en forma instantánea una considerable cantidad de sedimentos producto de la evolución de vertientes y que el río transporta sedimentos gruesos (Beltramone, 2007). Ello se manifiesta en el sitio de estudio por las grandes pendientes, que hacen que la escorrentía se concentre pronto en canales de drenaje haciendo que el pico de crecida sea intenso y permita un fuerte avance de la onda de crecida. Además, el cauce principal recibe en forma instantánea una considerable cantidad de sedimentos producto de la evolución de sus vertientes y tiene la capacidad de transportarlos, y predomina un sustrato rocoso impermeable (rocas esquistosas y gnésicas).

De acuerdo al informe del INA (2006) el perfil longitudinal del río presenta tres tramos de acuerdo a su aspecto geológico y geomorfológico que se desarrollan a continuación:

**Tramo A:** Comprende el recorrido del río Icho Cruz-San Antonio en el paisaje geomorfológico de la Vertiente Oriental Escalonada de la Sierra Grande, desde aguas arriba de Cuesta Blanca hasta San Antonio de Arredondo. Debido a las altas pendientes, predomina la erosión en profundidad sobre la lateral y los procesos de arrastre sobre los de deposición. La roca del basamento cristalino

conforma las laderas de los valles en “V” y frecuentemente aflora en el fondo del cauce o soporta escasa potencia de aluvión (arenas, gravas y cantos).

**Tramo B:** Formado desde la desembocadura del arroyo San Antonio en el río Icho Cruz-San Antonio, hasta aguas abajo de Playas de Oro. Aquí disminuye la pendiente media, generando un aumento de la erosión lateral, disminución de la erosión en profundidad y un cierto equilibrio entre los procesos de arranque y transporte sobre los de deposición. El río amplía el valle y desarrolla en terrazas los márgenes. Posee rocas del basamento metamórfico cristalino hacia la margen oeste (gneis y metatexita) y materiales de piedemonte (depósitos fluviotorrenciales) derivados de la Sierra Chica, a la margen este.

**Tramo C:** Comprende desde el Barrio El Canal, hasta la desembocadura del río en el embalse de San Roque, atravesando la zona urbana de Villa Carlos Paz. El curso es rectilíneo, con muy baja sinuosidad y encajado por efecto de la estructura en valle en “V”, sin terrazas. Aguas abajo, en la zona ocupada actualmente por el embalse y condicionada por la cota del mismo, aumenta la amplitud del valle fluvial y la potencia de los sedimentos fluviales. La formación del San Roque, que actúa como nivel de base local, ha generado la modificación de la red con la aparición de nuevas llanuras aluviales por represamiento aguas arriba del mismo (Beltramone, 2007). El área de estudio de la presente tesis está incluida en este tramo.

Si bien no hay estudios sobre la dinámica del transporte de sedimentos en la cuenca, hay antecedentes de análisis paleolimnológicos que logran reconstruir impactos históricos derivados del desarrollo urbano en la cuenca del embalse relacionados con la dinámica de los procesos sedimentarios y de eutrofización (Halac, y otros, 2020) (Mengo, Halac, Faray, Costamagna, & Piovano, 2022), junto a estudios de la distribución espacial de la granulometría y composición geoquímica de los sedimentos de fondo del embalse, que indican que las fracciones gruesas predominan en proximidades a las desembocaduras y las fracciones finas en las zonas profundas del embalse (Pusetto, Piovano, Rodríguez, Ruiz, & Halac, 2020). Además, estudios realizados por la APRHi indican que hay una zona de sedimentación significativa en la desembocadura del río San Antonio en el embalse, tal como se puede observar en la Figura 4. Para el análisis, se utilizaron batimetrías realizadas en el embalse del año 1929 y 2016, que se encuentran disponibles. Los mayores aportes de sedimentos se ubican en el ingreso de los tributarios al embalse, esto se debe a la pérdida de capacidad de carga por disminución de la velocidad. Las mayores tasas de sedimentación se presentan en el Río San Antonio (tramo estudiado en la presente tesis) y Los Chorrillos.

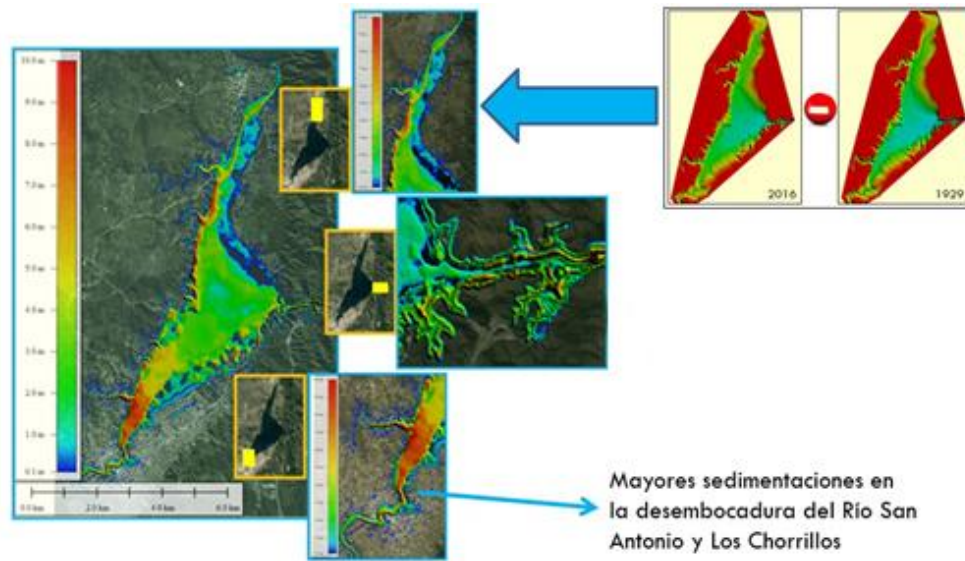


Figura 4.- Evolución temporal de los DEM del Embalse (Fuente: APRHi)

En otras cuencas de Córdoba, como la del río Tercero o Ctlamochita se realizaron estudios para caracterizar la dinámica del transporte de sedimentos utilizando tecnología acústica Doppler (Heredia Ligorria, 2017), mediante técnicas que se implementarán en la presente tesis.

Respecto a la producción de sedimentos, hay estudios en la cuenca del río Cuarto o Chocancharava (Corral, Baldissone, Farias, Rodríguez, & López, 2009), (Degiovanni, Villegas, & Ulla, 2013) (Andreazzini, Degiovanni, Spalletti, & Irigoyen, 2014) y en los principales embalses de Córdoba incluido el San Roque (Reyna, Reyna, Lábaque, Riha, & Rafaelli, 2011).

#### 1.4. Área de vacancia

Actualmente hay escasa información hidrológica e hidráulica para gestionar de forma sustentable los recursos hídricos y sedimentológicos. Los organismos de gestión no cuentan con suficientes herramientas para la planificación de un manejo. En el caso del área de estudio, no hay una estimación de la producción de sedimentos de la cuenca, caracterización de los procesos de transporte de sedimentos y su variación estacional. No existe un plan de extracción de áridos que siga un criterio en función de las características del curso fluvial y de las condiciones hidrológicas, que considere épocas de mayor o menor transporte, de manera de mantener el equilibrio de material sólido en el río y prevenir la colmatación del embalse San Roque.

Además, no hay modelos conceptuales que caractericen la dinámica del aporte de sedimentos al embalse San Roque y permitan identificar las variables de interés que se deberán relevar para calibrar modelos numéricos detallados. Para ello se requiere información hidrológica, hidráulica topográfica y sedimentológica, obtenidas de forma experimental bajo distintas condiciones (estiaje, crecidas).

Al interés por estas áreas de vacancia se suman los retos y desafíos que implican el estudio y evaluación de los procesos de sedimentación y erosión en cuerpos de agua lénticos (por ejemplo embalses) que están incluidos en los Objetivos de Desarrollo Sostenible, también conocidos por sus siglas ODS, los cuales son una iniciativa impulsada por Naciones Unidas para dar continuidad a la



agenda de desarrollo tras los Objetivos de Desarrollo del Milenio. Para ello se propone de aquí al 2030, en el objetivo 6 “Agua limpia y saneamiento”:

- **lograr el acceso universal y equitativo al agua** potable a un precio asequible para todos.
- **lograr el acceso a servicios de saneamiento e higiene adecuados** y equitativos para todos y poner fin a la defecación al aire libre, prestando especial atención a las necesidades de las mujeres y niñas y las personas en situaciones de vulnerabilidad.
- **mejorar la calidad del agua reduciendo la contaminación**, eliminando el vertimiento y minimizando la emisión de productos químicos y materiales peligrosos, reduciendo a la mitad el porcentaje de aguas residuales sin tratar y aumentando considerablemente el reciclado y la reutilización sin riesgos a nivel mundial.
- **aumentar considerablemente el uso eficiente de los recursos hídricos** en todos los sectores y asegurar la sostenibilidad de la extracción y el abastecimiento de agua dulce para hacer frente a la escasez de agua y reducir considerablemente el número de personas que sufren falta de agua.
- **implementar la gestión integrada de los recursos hídricos a todos los niveles**, incluso mediante la cooperación transfronteriza, según proceda.
- **proteger y restablecer los ecosistemas relacionados con el agua**, incluidos los bosques, las montañas, los humedales, los ríos, los acuíferos y los lagos.
- **ampliar la cooperación internacional** y el apoyo prestado a los países en desarrollo para la **creación de capacidad en actividades y programas relativos al agua y el saneamiento**, como los de captación de agua, desalinización, uso eficiente de los recursos hídricos, tratamiento de aguas residuales, reciclado y tecnologías de reutilización.
- **Apoyar y fortalecer la participación de las comunidades locales en la mejora de la gestión del agua** y el saneamiento (Naciones Unidas, 2022).

Sobre las áreas de vacancia y los retos propuestos se plantearon los objetivos que se desarrollan a continuación.

## 1.5. Objetivos

### 1.5.1. Objetivo General

El objetivo general de esta tesis es avanzar en la caracterización de la dinámica del aporte de sedimentos a cuerpos de agua lénticos. Específicamente los estudios se focalizan en la dinámica de los aportes del Río San Antonio en la desembocadura del embalse San Roque, en la provincia de Córdoba.

### 1.5.2. Objetivos Específicos

A continuación se sintetizan los principales objetivos específicos de la tesis:

- Cuantificación, a través de métodos empíricos, de la producción **promedio anual** de sedimentos en la cuenca de aporte al Río San Antonio y contrastar este resultado con la evolución batimétrica del embalse en las últimas décadas.
- Elaboración un modelo conceptual que represente la dinámica de los aportes de sedimentos producidos en la cuenca al embalse San Roque por el río San Antonio durante crecidas, identificando los principales procesos y variables que lo controlan.

- Relevamiento en terreno de la información hidrológica, hidráulica, topográfica, y de sedimentos requerida para evaluar la dinámica del transporte de sedimentos.
- Relevamiento experimental de condiciones de transporte durante crecidas para validar el modelo conceptual desarrollado.
- Validación del modelo conceptual a partir de la información obtenida del relevamiento durante crecidas.
- Transferencia de la información obtenida y las herramientas generadas a los organismos de gestión que sean útiles para tomar medidas tendientes a mitigar los efectos de los procesos de sedimentación en el embalse.

## **1.6. Organización de la tesis**

Para el desarrollo de la tesis, se ha realizado en primer lugar una recopilación de antecedentes e información del sistema de estudio, para definir la problemática existente, áreas de vacancia y los objetivos. Todo ello se documenta en el presente capítulo. Luego, en el capítulo 2 se desarrolla una estimación de la producción de sedimentos en la cuenca a través de métodos empíricos y se comparan los resultados obtenidos con la evolución batimétrica del embalse San Roque en las últimas décadas. En el capítulo 3 se propone un modelo conceptual que representa la dinámica de los aportes de sedimentos producidos en la cuenca al embalse San Roque por el río San Antonio y se identifican los principales procesos y variables intervinientes. En el capítulo 4, se plantea la metodología a implementar para relevar datos de las variables determinadas en el modelo conceptual (información hidrológica, hidráulica, topográfica y sedimentológica), bajo distintas condiciones hidráulicas: durante crecidas y luego de la crecida, en época de estiaje. Luego, en los capítulos 5 y 6 se presentan los resultados obtenidos durante los relevamientos en condiciones de crecida y en época de estiaje (respectivamente), información que será luego utilizada en el capítulo 7 para generar y validar el modelo conceptual propuesto. Finalmente, en el capítulo 8 se detallan las principales conclusiones alcanzadas a lo largo de esta tesis y se plantean herramientas y recomendaciones para los organismos de gestión.



## Capítulo 2: Producción de sedimentos en la cuenca

---

### 2.1. Introducción

La producción de sedimentos en una cuenca hidrológica se define como la cantidad de sedimentos entregados en una unidad de tiempo. En cuencas montañosas dicha producción se puede asociar fundamentalmente a dos fuentes, una relacionada a la erosión superficial generalizada del sustrato, y otra a los procesos de remoción en masa en sitios puntuales (Andreazzini, Degiovanni, Spalletti, & Irigoyen, 2014). Los factores que controlan la erosión incluyen las propiedades del suelo, la pendiente del terreno, la vegetación y la cantidad e intensidad de precipitaciones (Montgomery, 2007). Estos procesos generan consecuencias, entre las cuales se puede mencionar una disminución de la capacidad de los embalses e incremento en la frecuencia y severidad de las inundaciones al reducir la capacidad de los canales. Por lo tanto, resulta fundamental el estudio de los procesos intervinientes para efectuar diagnósticos y pronósticos del funcionamiento de los sistemas fluviales, utilizados para definir propuestas de manejo de cuencas, de ordenamiento territorial e intervenciones directas de los cursos.

Los sedimentos producidos en una cuenca hídrica y su consecuente grado de erosión pueden ser evaluados de forma indirecta mediante la medición de caudal sólido en los cursos de agua, a través de relevamientos batimétricos en cuerpos de agua o a partir de estimaciones formuladas por diversos autores (Wischmeier & Smith, 1978) (Djorovic & Gavrilovic, 1974) (Fournier, 1960) (Fournier, 1962). Generalmente no se presentan series de datos históricos de caudal sólido en los cursos de agua ni caracterizaciones granulométricas del material transportado y no todas las cuencas cuentan con embalses construidos que además presenten batimetrías. En consecuencia, se recurre a formulaciones empíricas que necesariamente deben ser verificadas, ya que una valoración cuantitativa precisa de la producción de sedimentos es imposible de asegurar debido a la complejidad del proceso erosivo, donde intervienen numerosos factores y escalas de fenómenos. Sin embargo, a pesar de las dificultades, pueden ajustarse ciertas metodologías con una precisión aceptable, que permitan cumplir los objetivos perseguidos (UNESCO, 2010).

En el caso de la zona de estudio, se aplicó la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (USLE) (Wischmeier & Smith, 1978), uno de los métodos empíricos más utilizados para la estimación de la producción de sedimentos. Los resultados obtenidos fueron comparados con otros estudios realizados en la cuenca y un análisis de batimetrías del embalse San Roque.

### 2.2. Aplicación de métodos empíricos

#### 2.2.1. Introducción

La Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (Wischmeier & Smith, 1978) es uno de los métodos empíricos más utilizados para la estimación de la producción de sedimentos. Es un método cuantitativo paramétrico, multiplicativo y evalúa la pérdida de suelos producida por erosión hídrica. Se ha aplicado en todo el mundo para una variedad de propósitos y bajo muchas condiciones diferentes, ya que parece satisfacer la necesidad de predicción de la erosión mejor que cualquier otra herramienta disponible (Risse, Nearing, Laflen, & Nicks, 1993). Además, es utilizado porque tiene un alto grado de flexibilidad y accesibilidad a los datos, una parametrización parsimoniosa, extensa literatura científica y comparabilidad de resultados que permiten adaptar el modelo a casi todo tipo de condiciones y regiones (Alewell, Pasquale, Katrin, & Panos, 2019). Sin embargo, presenta limitaciones significativas debido a que no considera la deposición del suelo (por ejemplo,

sedimentación) y en la mayoría de los casos no existen suficientes datos medidos para determinar rigurosamente los factores únicos para todas las situaciones y escenarios necesarios (Wischmeier & Smith, 1965) (Wischmeier & Smith, 1978). A pesar de ello, los modelos físicos basados en procesos (como el WEPP o PESERA) no generan necesariamente incertidumbres más bajas en comparación con modelos empíricos estructurados más simples como el USLE.

### 2.2.2. Metodología

La estimación de la erosión hídrica de suelos para la cuenca del embalse San Roque se realizó utilizando la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos. La cuenca y subcuencas utilizadas fueron desarrolladas por el INA-CIRSA y se presentaron en la Figura 2.

La ecuación USLE determina la pérdida media anual de suelo ( $A_{USLE}$ ) en  $Mg\ ha^{-1}año^{-1}$  a partir de la Ec. 1, considerando la erosividad de las lluvias ( $R_{USLE}$ ) en  $MJ\ mm\ ha^{-1}h^{-1}año^{-1}$ , el factor de erodabilidad del suelo ( $K_{USLE}$ ) en  $Mg\ ha\ h\ MJ^{-1}ha^{-1}mm^{-1}$  y los factores adimensionales de longitud de la pendiente ( $L_{USLE}$ ), inclinación de la pendiente ( $S_{USLE}$ ), cobertura ( $C_{USLE}$ ) y control de la erosión mediante prácticas de cultivo ( $P_{USLE}$ ).

$$A_{USLE} = R_{USLE} \times K_{USLE} \times L_{USLE} S_{USLE} \times C_{USLE} \times P_{USLE} \quad Ec. 1$$

A continuación se desarrolla la metodología de cálculo de cada uno de los parámetros. Para realizar un análisis espacial de la variación de la pérdida media anual del suelo a lo largo de la cuenca, se utilizó el software ArcGIS 10.8 (ESRI, 2016) y se generaron capas con cada uno de los factores a considerar. Finalmente, con álgebra de mapas se realizó el producto de las capas a fin de obtener la erosión hídrica.

#### a. Factor $R_{USLE}$ : Erosividad de las lluvias

El factor  $R_{USLE}$  representa los factores de lluvia y escurrimiento; corresponde a un número de unidades del índice de erosión pluvial ( $EI_{30}$ ), por año o en un período de tiempo considerado. Se calcula a partir de un valor  $E_c$  que es la energía cinética liberada por las lluvias (en  $MJ\ ha^{-1}$ ) y un valor  $I_{30}$  (en  $mm\ h^{-1}$ ) que corresponde a la máxima intensidad de la precipitación en un intervalo de 30 minutos.

$$EI_{30} = E_c I_{30} \quad Ec. 2$$

Tal como indica la Ec. 3, sumando todos los  $EI_{30}$  de los  $n_e$  eventos anuales, se obtiene el índice de erosividad anual  $R_{USLE}$ , que es una medida que combina estas variables y define los efectos conjuntos del impacto de las gotas de lluvia y la turbulencia de la escorrentía con el transporte de las partículas del suelo.

$$R_{USLE} = \sum_i^{n_e} EI_{30} \quad Ec. 3$$

En Argentina, se recopilaron datos de  $R_{USLE}$  para 75 localidades estimados por autores (Codromaz Rojas & Conde, 1985) (Codromaz Rojas, Conde, & Moresco, 1976) (Codromaz Rojas & Saluso, 1988) de acuerdo a la metodología original (Gaitán, y otros, 2017). Para ellas, se encontró que la precipitación media anual (PMA) es un buen estimador del factor  $R_{USLE}$ , a partir de la Ec. 4 (Bianchi & Cravero, 2010).

$$R_{USLE} = 0.2266 \times PMA^{1.1289} \quad Ec. 4$$

Para el cálculo de este factor en la cuenca de estudio, se recopiló información histórica de precipitación media anual de estaciones meteorológicas automáticas ubicadas en la cuenca y alrededores, detalladas en la Tabla 1. La ubicación de las estaciones y la distribución de las precipitaciones se pueden observar en la Figura 5. Luego, con el software ArcGIS se interpolaron los valores y se calculó el factor  $R_{USLE}$  para celdas de  $30\text{ m} \times 30\text{ m}$  con la Ec. 4.

Tabla 1.- Estaciones meteorológicas automáticas utilizadas y su correspondiente precipitación media anual (PMA)

<b>Código</b>	<b>Institución</b>	<b>Lugar</b>	<b>PMA [mm]</b>
<b>0</b>	APRHi	La Cumbre	675.1
<b>100</b>	INA-CRSA	Santo Tomás	858.6
<b>200</b>	INA-CRSA	Puesto Pereyra (Los Gigantes)	974.3
<b>300</b>	INA-CRSA	La Casita	807.6
<b>400</b>	INA-CRSA	Cañada Larga (Copina)	937.3
<b>500</b>	INA-CRSA	El Galpón	865.1
<b>600</b>	INA-CRSA	Bº Canal	659.0
<b>900</b>	INA-CRSA	Puesto Garay	938.5
<b>1010</b>	INA-CRSA	Confluencia Malambo	744.2
<b>1100</b>	INA-CRSA	Bº Santa Rita	723.0
<b>1200</b>	INA-CRSA	Las Ensenadas (El Cóndor)	884.9
<b>1400</b>	INA-CRSA	La Hoyada	910.7
<b>1700</b>	INA-CRSA	La Quebrada	643.3
<b>1800</b>	INA-CRSA	El Cajón	828.2
<b>2100</b>	INA-CRSA	Santa Rosa	756.9
<b>2200</b>	INA-CRSA	San Bernardo	853.3
<b>2300</b>	INA-CRSA	Observatorio Bosque Alegre	795.8
<b>2400</b>	INA-CRSA	Pampa de Olaen	722.6
<b>2700</b>	INA-CIRSA	Villa Giardino	580.5
<b>2900</b>	INA-CRSA	Villa Caeiro	777.3
<b>3400</b>	INA-CRSA	La Posta	942.4
<b>3800</b>	INA-CRSA	COSAG	778.7
<b>3900</b>	INA-CRSA	Las Junturas, Cosquín	775.1
<b>4050</b>	INA-CRSA	Pan de Azúcar	773.8
<b>4800</b>	INA-CRSA	Camino del Cuadrado	811.4

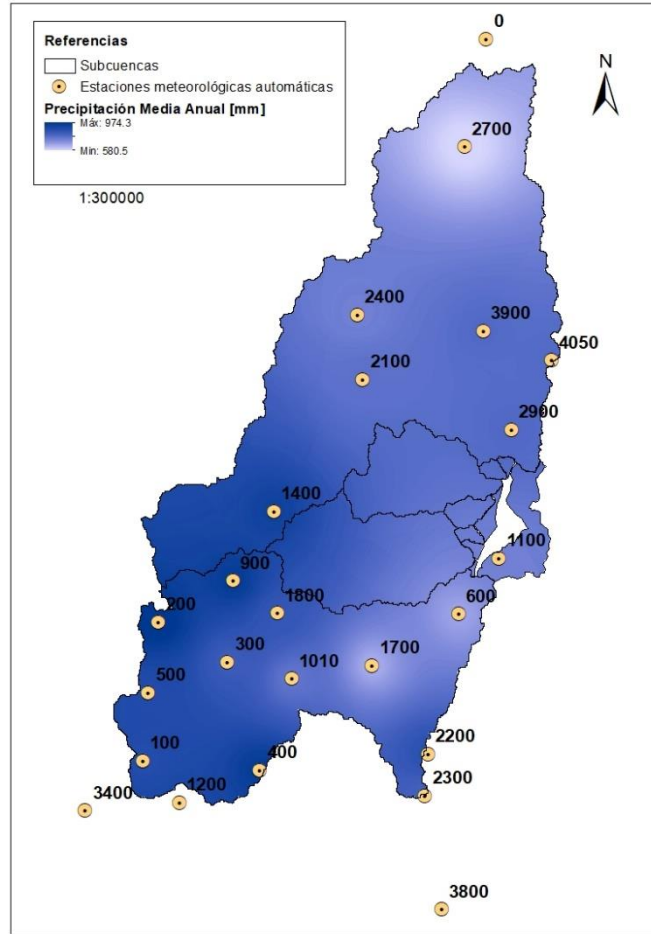


Figura 5.- Estaciones meteorológicas automáticas utilizadas y distribución espacial de la precipitación media anual (PMA).

*b. Factor  $K_{USLE}$ : Erodabilidad del suelo*

Se define al factor  $K_{USLE}$  como la vulnerabilidad o susceptibilidad del suelo a la erosión, expresada en unidades de pérdida de suelo por cada punto de  $R_{USLE}$ . Para su obtención, la metodología original desarrollada para suelos agrícolas propone la utilización del nomograma de erodabilidad (Wischmeier, Johnson, & Cross, 1971) que considera el porcentaje de limos, arenas finas, arenas, materia orgánica, estructura y permeabilidad del horizonte superficial del suelo. Dichos datos suelen no estar disponibles y en consecuencia se propusieron métodos alternativos para subsanar este inconveniente.

Williams (1995) propuso que el factor  $K_{USLE}$  depende de factores granulométricos y del contenido de materia orgánica. En consecuencia, planteó la Ec. 5, donde  $f_{c\ arena}$  es un factor que disminuye el  $K_{USLE}$  en suelos con alto contenido de arena gruesa, aumenta el factor para suelos con poca arena y se calcula con la Ec. 6; el  $f_{limo-arcilla}$  da factores de erodabilidad bajos para suelos con arcilla y limo y se calcula con la Ec. 7; el  $f_{Corg}$  reduce los valores de  $K_{USLE}$  en suelos con alto contenido de carbono orgánico y se determina mediante la Ec. 8; y el  $f_{h\ arena}$  reduce los valores para suelos con un contenido de arena extremadamente alto, calculado a partir de la Ec. 9 (Williams, 1995).

$$K_{USLE} = f_{c\ arena} \times f_{limo-arcilla} \times f_{orgc} \times f_{h\ arena} \quad Ec. 5$$

$$f_{c\text{ arena}} = \left( 0.2 + 0.3 \exp \left[ -0.256 m_{\text{arena}} \left( 1 - \frac{m_{\text{limo}}}{100} \right) \right] \right) \quad \text{Ec. 6}$$

$$f_{\text{limo-arcilla}} = \left( \frac{m_{\text{limo}}}{m_{\text{arcilla}} + m_{\text{limo}}} \right)^{0.3} \quad \text{Ec. 7}$$

$$f_{\text{Corg}} = \left( 1 - \frac{0.25 m_{\text{Corg}}}{m_{\text{Corg}} + \exp(3.72 - 2.95 m_{\text{Corg}})} \right) \quad \text{Ec. 8}$$

$$f_{h\text{ arena}} = 1 - \frac{0.7 \left( 1 - \frac{m_{\text{limo}}}{100} \right)}{\left( 1 - \frac{m_{\text{limo}}}{100} \right) + \exp \left( -5.51 + 22.9 \left( 1 - \frac{m_{\text{limo}}}{100} \right) \right)} \quad \text{Ec. 9}$$

Donde:

$m_{\text{arena}}$  = Contenido en porcentaje de la fracción de arena (0.05 – 2.00 mm de diámetro)

$m_{\text{limo}}$  = Contenido en porcentaje de la fracción de limo (0.002 – 0.05 mm de diámetro)

$m_{\text{arcilla}}$  = Contenido en porcentaje de la fracción de arcilla (< 0.002 mm de diámetro)

$m_{\text{Corg}}$  = Contenido en porcentaje de carbono orgánico

La información del contenido de las distintas fracciones de arena, limo, arcilla y materia orgánica se extrajo de las Cartas de Suelo de la Provincia de Córdoba (IDECOR, 2022). El factor  $K_{USLE}$  obtenido, de acuerdo al autor posee las siguientes unidades  $0.013 \text{ ton m}^2 \text{ h m}^{-3} \text{ ton}^{-1} \text{ cm}^{-1}$ . Para trabajar en las unidades mencionadas anteriormente ( $\text{Mg ha h MJ}^{-1} \text{ ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ ) se debe multiplicar por 1.293 (Marelli, Weir, Lattanzi, & Díaz, 1985).

#### c. Factores $L_{USLE}$ $S_{USLE}$ : Topografía y relieve

La influencia del relieve en la erosión hídrica se expresa a través del factor topográfico que resulta de combinar la pendiente ( $S_{USLE}$ ) con su longitud ( $L_{USLE}$ ). Este factor es adimensional y puede calcularse a partir del número de celdas que contribuyen al flujo en una celda dada, llamada acumulación del flujo  $A_{fl}$  y el tamaño de celda  $T_c$ , que en el este caso de estudio es 30 m. Estos parámetros, junto con la pendiente  $S_{USLE}$  son obtenidos con el modelo digital de elevaciones (IGN, 2022) con el Software ArcGis. Luego, se aplica la Ec. 10 (Moore & Burch, 1896).

$$L_{USLE} S_{USLE} = \left( A_{fl} \times \frac{T_c}{22.13} \right)^{0.4} \times \left( \text{sen} \left( \frac{S_{USLE}}{0.0896} \right) \right)^{1.3} \quad \text{Ec. 10}$$

La fórmula implica que hay que multiplicar la acumulación de flujo por el tamaño de la celda, lo que representa la longitud de escurrimiento. Para evitar una sobreestimación en la longitud de escurrimiento, se limita el cálculo del ráster a una longitud máxima de 270 m, lo que equivale a 9 celdas en el caso de estudio.

#### d. Factor $C_{USLE}$ : Cobertura y manejo de la vegetación

El factor de cobertura indica la proporción de pérdida de suelo en una superficie con cubierta y manejo específico con respecto a una superficie idéntica en barbecho, con labranza continua. Las pérdidas de suelo están relacionadas directamente con la cobertura vegetal que presenta el sitio y por lo tanto, a menores índices de cobertura vegetal, mayores serán dichas pérdidas.

El factor  $C_{USLE}$  se calcula mediante el análisis del índice de vegetación normalizado (NDVI, por sus siglas en inglés), a partir de las bandas de luz infrarroja y visible de las imágenes satelitales de LANDSAT 8 capturadas el día 13/09/2021 (USGS, 2022) ( $b_5$  y  $b_4$  respectivamente), utilizando la Ec. 11.

$$NDVI = \frac{b_5 - b_4}{b_5 + b_4} \quad \text{Ec. 11}$$

Los valores próximos a 1 indican la mayor densidad posible de la vegetación, los cercanos a 0 (entre -0.2 y +0.2) indican ausencia de hojas verdes. Por otro lado, los valores próximos a -1 se asocian con cuerpos de agua o urbanizaciones.

Una vez obtenido el NDVI, el factor  $C_{USLE}$  se calcula a partir de la Ec. 12 (Carvalho, Durigon, Antunes, Almeida, & Oliveira, 2014).

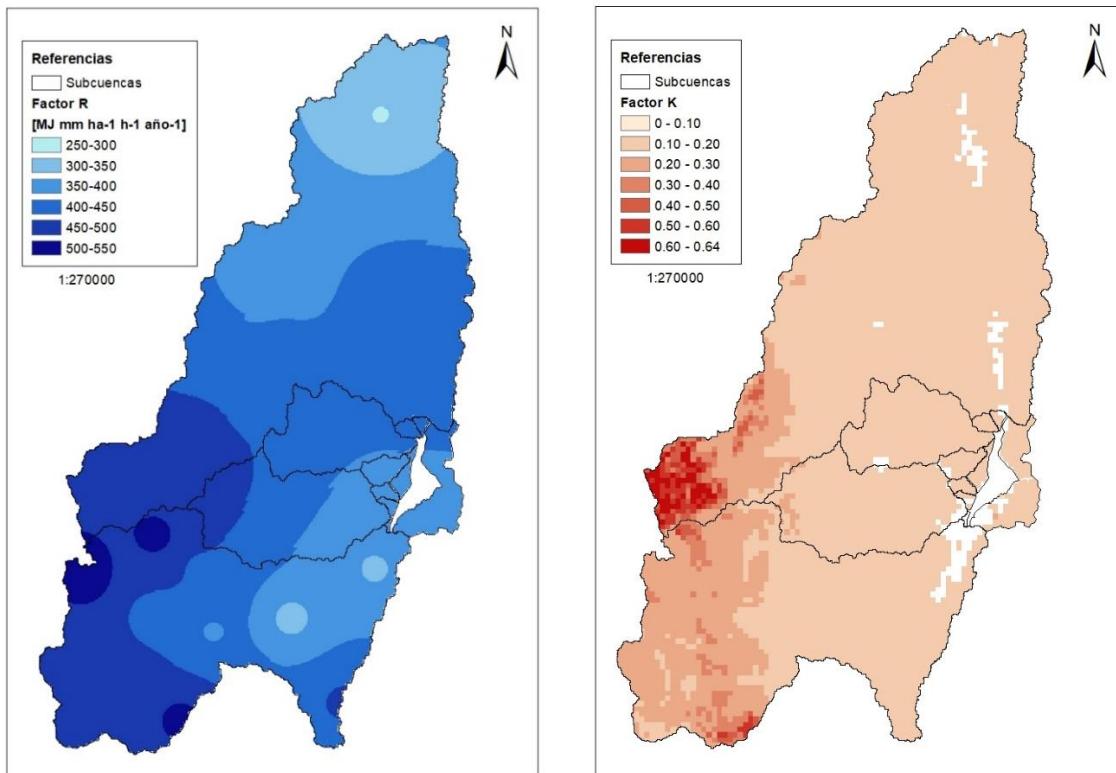
$$C = \frac{1 - NDVI}{2} \quad \text{Ec. 12}$$

*e. Factor  $P_{USLE}$ : Control de la erosión mediante prácticas de cultivo*

El factor  $P_{USLE}$  hace referencia a prácticas de manejo conservacionistas en áreas principalmente agrícolas tales como cultivos en terrazas, curvas de nivel, entre otros. Dado que no existen este tipo de prácticas, el factor será considerado igual a uno.

2.2.3. Resultados

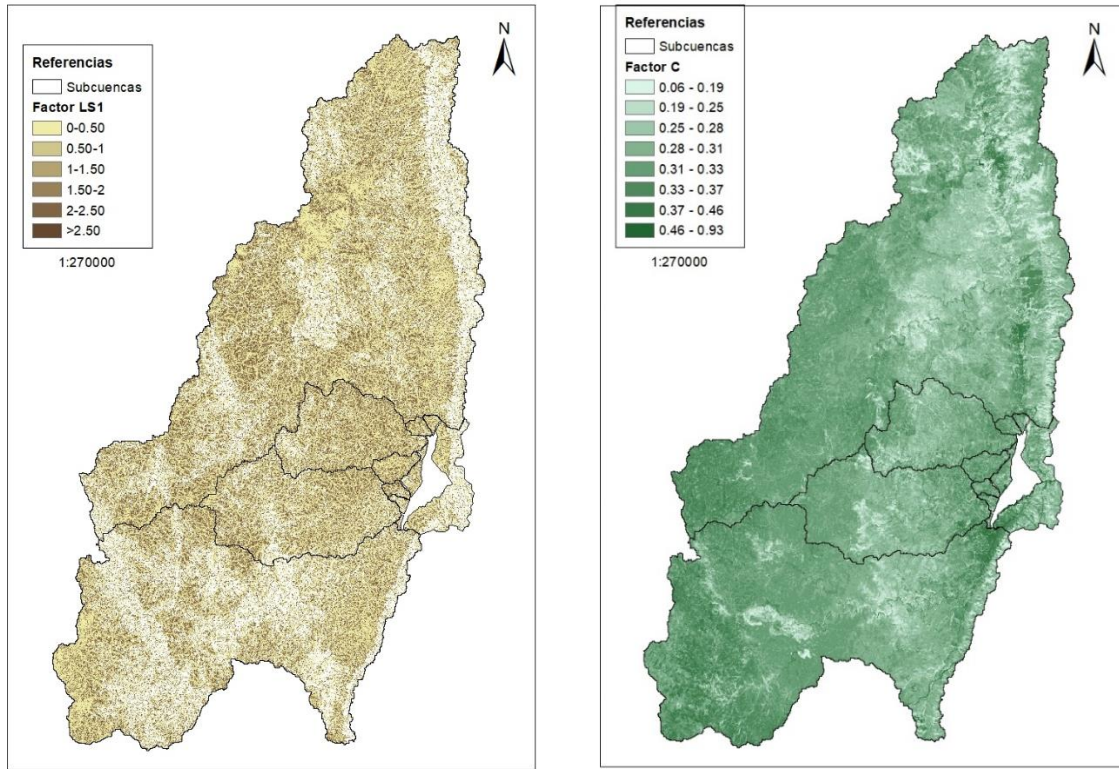
A continuación se presentan los mapas obtenidos en el cálculo de los factores que intervienen en la fórmula de USLE. En la Figura 6a se observa la distribución espacial de la erosividad de las lluvias y es notable que la misma es mayor en la cuenca alta del río San Antonio y una pequeña parte de la cuenca del río Cosquín. Lo mismo ocurre con la erosividad de los suelos (Figura 6b), que alcanza mayores valores en zonas similares. Luego, en la Figura 6c y d se observan los resultados obtenidos para el factor topográfico  $L_{USLE}S_{USLE}$  y el factor de cobertura y manejo de la vegetación  $C_{USLE}$  respectivamente, que presentan variabilidades en toda la cuenca.



(a)

(b)





(c)

(d)

Figura 6.- Mapa de distribución de (a) la erosividad de las lluvias  $R_{USLE}$ , (b) la erodabilidad de los suelos  $K_{USLE}$ , (c) factor topográfico  $L_{USLE}S_{USLE}$  y (d) factor de cobertura y manejo de la vegetación  $C_{USLE}$ .

Los resultados obtenidos para el factor  $K_{USLE}$  fueron comparados con un mapa de la litología de la cuenca de estudio (INA-CIRSA, 2020). La zona que presenta mayor erodabilidad coincide con la zona constituida por rocas graníticas en la cuenca alta de los ríos San Antonio y Cosquín, lo cual tiene coherencia debido a que las rocas graníticas son las más erodables y generan mayor producción.

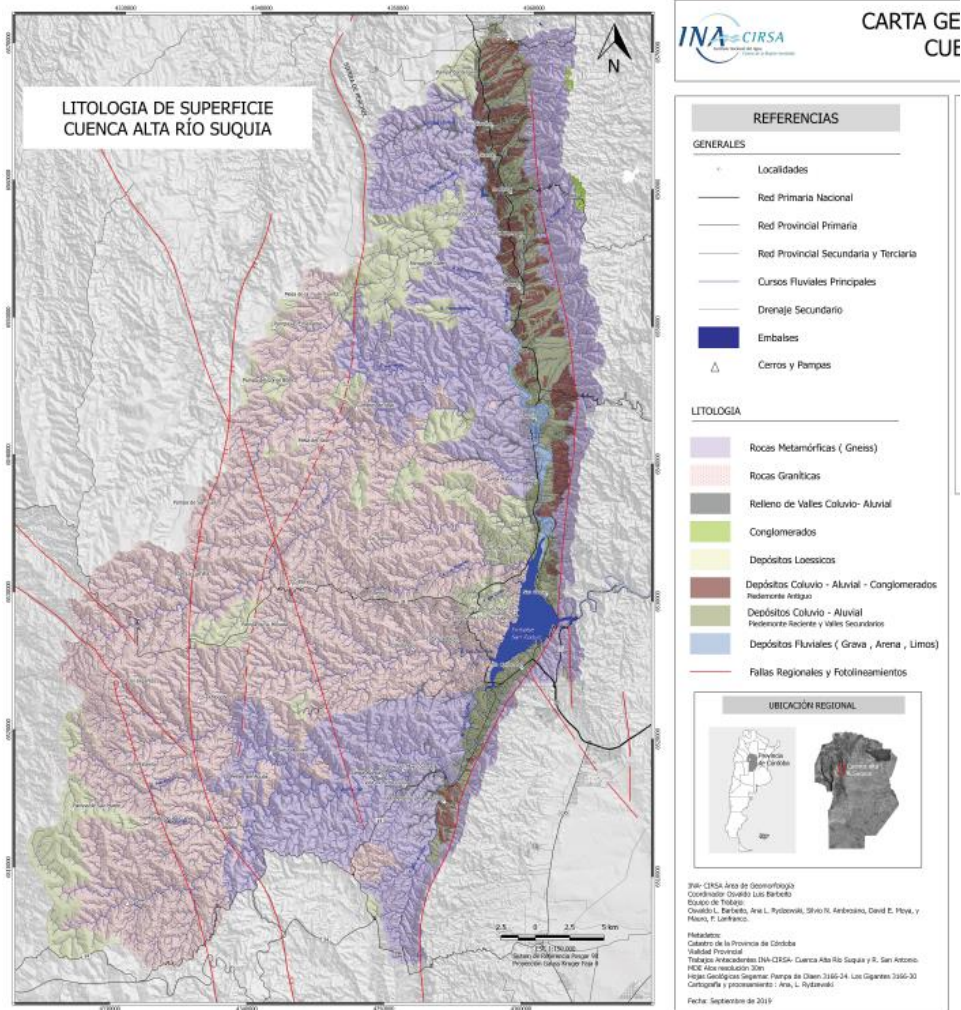


Figura 7.- Mapa de la litología de la cuenca del embalse San Roque (INA-CIRSA, 2020).

Finalmente, la combinación de las distintas capas teniendo en cuenta todos los factores da como resultado el  $A_{USLE}$ , cuya distribución y variabilidad en la cuenca se presenta en la Figura 8.



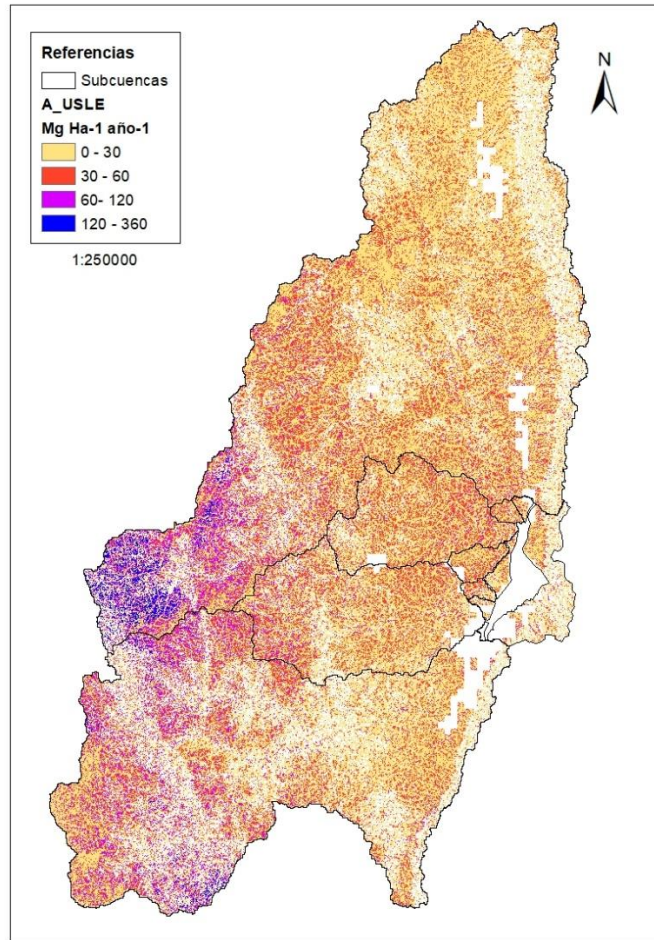


Figura 8.- Ecuación de pérdida de suelos (USLE) en el área de estudio, factor  $A_{USLE}$ .

Resulta evidente que los factores determinantes de la pérdida de suelos en la cuenca de estudio son la erosividad de la lluvia y la erodabilidad del suelo, mayores en la cuenca alta del río San Antonio y Cosquín.

Considerando los rangos de erosión presentados en la Tabla 2 (FAO-PNUMA-UNESCO, 1981), la cuenca de estudio presenta un 1% del área con erosión alta (en gran parte de la zona de la cuenca alta del río San Antonio y en una porción de la cuenca alta del río Cosquín), 27% de erosión moderada, 7% de erosión clasificada como baja y 65% de erosión nula o ligera.

Tabla 2.- Rangos de clases de erosión

Clase de erosión	$A_{USLE}$ [Mg ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> ]
Nula o ligera	30
Bajo	30 -60
Moderado	60-120
Alto	120-360
Muy alto	>360

A partir de los valores obtenidos, sumando el factor  $A_{USLE}$  obtenido en cada celda multiplicado por su área de influencia (el tamaño de celda, que en este caso es de  $0.09 \text{ ha}$ ), se obtiene una tasa de erosión de  $2304750 \text{ Mg/año}$ . Considerando una densidad aparente promedio de  $\rho_s = 1.2 \text{ tn/m}^3$  (Gaitán, y otros, 2017), se concluye que la cuenca del San Roque produce  $1.92 \text{ Hm}^3/\text{año}$  de sedimentos.

## 2.3. Análisis de estudios batimétricos

### 2.3.1. Introducción

Los datos batimétricos de sucesivos levantamientos de cuerpos de agua lénticos se utilizan para monitorear el agotamiento de su volumen útil y las curvas de elevación-capacidad, predecir el tipo, magnitud y horizonte temporal de los problemas de sedimentación, calibrar modelos de producción de sedimentos y controlar la eficacia de la gestión sedimentológica. Las batimetrías se realizan generalmente en intervalos de 5 a 20 años, que varían sustancialmente dependiendo de las limitaciones presupuestarias, el ritmo de agotamiento del almacenamiento, el tipo e importancia de los usos amenazados por la acumulación de sedimentos y las necesidades de la gestión (García, 2007).

Con las batimetrías, es posible calcular una tasa de sedimentación del embalse. Para ello se define una línea de alcance o contorno, que puede coincidir con la cota vertedero de la presa y se compara la diferencia entre el volumen útil del embalse en las distintas mediciones. Este método ha sido ampliamente utilizado, ya que permite estimar la producción de sedimentos en la cuenca con un mínimo dato de campo. Se aplicó en embalses de Tucumán, Salta y Santiago del Estero en Argentina (Mosa, Núñez, & Boso, 2009) e internacionalmente en Estados Unidos (Lachhab, Booterbaugh, & Beren, 2015), Rumania (Mihu-Pintilie, Asandulesei, Nicu, Stoleriu, & Romanescu, 2016), República Checa (Pacina, Lendáková, Stojdl, Matys Grygar, & Dolejs, 2020), entre otros. Sin embargo, la metodología presenta algunos problemas: la calidad de la estimación es cuestionable, sobre todo en lo que respecta a la capacidad inicial del embalse (cuando se construyó el embalse), los sedimentos calculados se promedian a lo largo de un periodo de tiempo amplio (Alatorre, Beguería, Lana-Renault, Navas, & García-Ruiz, 2012), el volumen total de deposición no da información sobre los patrones temporales (producción de sedimentos por eventos) y su variabilidad (Bussi, y otros, 2013). Además, se debe considerar la incertidumbre implicada en la determinación de las batimetrías a comparar.

Los estudios batimétricos se realizan normalmente con un sistema de posicionamiento GPS en combinación con una sonda de profundidad, ambos conectados a un ordenador portátil que registra los datos resultantes de las coordenadas  $x$ ,  $y$ ,  $z$  en un archivo que puede ser procesado posteriormente para dibujar curvas de nivel. Los sistemas de medición también pueden incorporar navegación que permiten trazar las pistas planificadas antes del levantamiento, proporcionando instrucciones de dirección y de posición al operador durante el procedimiento. Un ejemplo de este método lo proporcionan (Odhiambo & Boss, 2004).

Los errores disminuyen al aumentar la densidad de puntos de datos, por lo que la distancia entre las líneas de medición debe ser más corta que la anchura del embalse, y se debe obtener la mayor densidad de puntos posibles. La densidad de datos estará en última instancia limitada por el presupuesto de recogida de datos, ya que la velocidad típica de medición es de unos  $2 \text{ m/s}$  (García,

2007). A modo de ejemplo, se presentan en la Figura 9 las líneas de medición utilizadas en el año 2016 para realizar la batimetría del año 2016 del embalse San Roque.



Figura 9.- Transectas realizadas con sonda ecográfica y perfilador sísmico durante el estudio batimétrico en el embalse San Roque, 2016 (CEPROCOR, 2016).

Tal como se mencionó anteriormente, los resultados obtenidos a partir de métodos empíricos como la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos deben ser comparados con datos medidos en campo, como por ejemplo batimetrías. En consecuencia, se analizarán los estudios batimétricos existentes del embalse San Roque, para contrastar con los valores obtenidos en secciones anteriores.

### 2.3.2. Metodología

#### *a. Estimación de la tasa de sedimentación y tarquinamiento*

Mediante el análisis de batimetrías existentes del embalse San Roque, es posible estimar una tasa de sedimentación media anual. Para ello, se considera la diferencia entre volúmenes útiles de los modelos digitales de elevación de 1929, 1976 y 2016. En el informe del relevamiento batimétrico (CEPROCOR, 2016) se presentan los volúmenes del embalse en distintos tiempos, que se utilizaron para calcular la tasa de sedimentación para los períodos comprendidos entre 1929-1976 y 1976-2016.

Esta tasa de sedimentación se puede correlacionar con los caudales líquidos medios anuales que ingresaron al embalse en cada período, obtenido como un promedio de datos históricos.

#### *b. Análisis de secciones del embalse*

A partir del análisis de los archivos de las batimetrías existentes (en este caso 1929, 1987 y 2016) que se observan en la Figura 10, se puede determinar el cambio en el fondo del embalse a lo largo de los años.

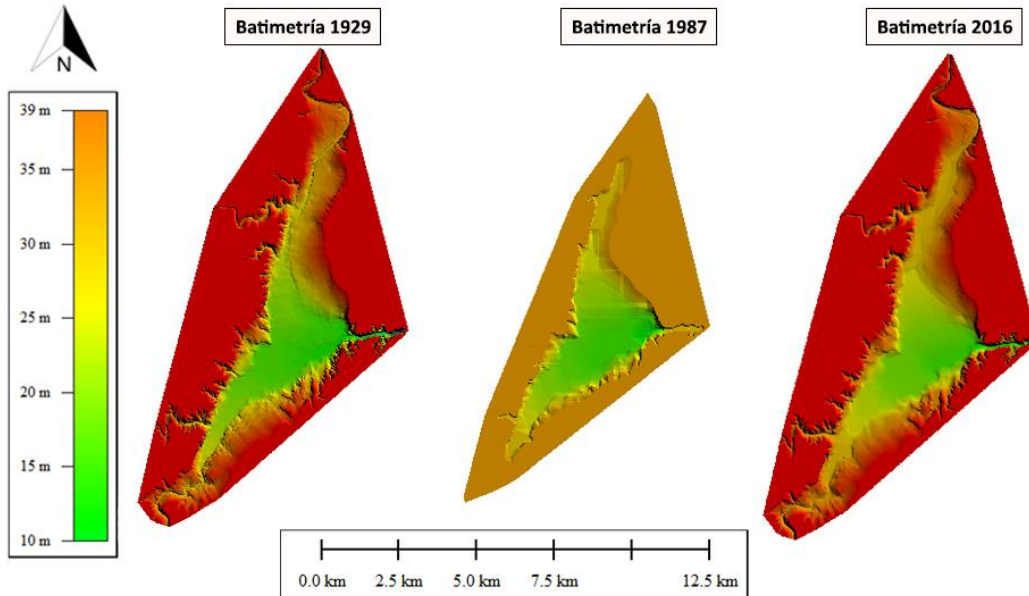


Figura 10.- Batimetrías embalse San Roque.

Con el objetivo de analizar el cambio de elevación en distintas zonas del embalse, se trazó una sección transversal inmediatamente aguas abajo del Puente Central de Villa Carlos Paz, en la desembocadura del río San Antonio (L1) y río Cosquín (L3) en el embalse, junto a longitudinales denominadas L2 y L4 a lo largo del embalse (trazadas desde los ríos San Antonio y Cosquín respectivamente), tal como se observa en la Figura 11.

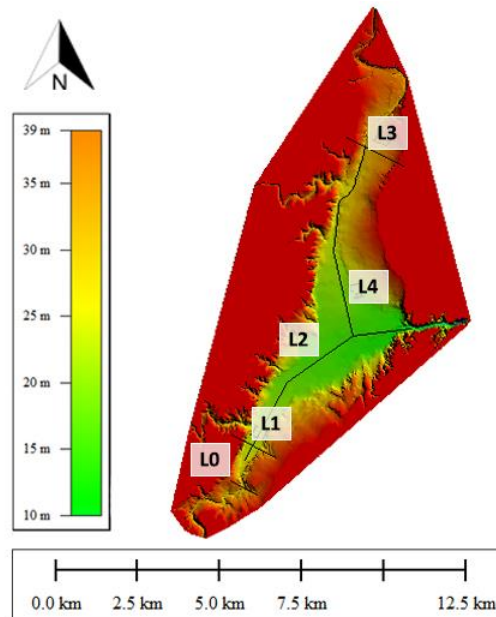


Figura 11.- Secciones de análisis planteadas en el embalse San Roque.

2.3.3. Resultados

a. *Estimación de la tasa de sedimentación y tarquinamiento*

En la Tabla 3 se presenta el volumen útil del embalse en distintos tiempos (CEPROCOR, 2016) y la tasa de sedimentación calculada para los períodos comprendidos entre 1929-1976 y 1976-2016.

Tabla 3.- Volúmenes y tasas de sedimentación del embalse San Roque.

Año	Volumen [Hm <sup>3</sup> ]	Tasa de sedimentación [Hm <sup>3</sup> /año]
1929	201.1	
1976	187.6	0.29
2016	173.6	0.35

Así, se evidencia que el volumen disminuyó un 6.7% en el período 1929-1976 y un 7.5% en 1976-2016. Los mayores aportes de sedimentos se ubican en el ingreso de los tributarios al embalse, esto se debe a la pérdida de capacidad de carga por disminución de la velocidad y tiene desarrollo en cotas inferiores a 25.3 m.

A su vez, la tasa de sedimentación aumentó, probablemente debido al importante incremento de las precipitaciones que se registró en la región a partir de 1950 (Scian & Pierini, 2013). Ello conduce a un aumento de la capacidad de carga de sedimentos por parte de los arroyos y ríos, y por lo tanto el tamaño de grano transportado es mayor, junto a la cantidad y tamaño del sedimento que ingresa al lago. Por otro lado, el incremento de las precipitaciones en la región, sin aumento de la evapotranspiración, condujo a un notable incremento de las áreas destinadas a cultivo, lo cual a su vez con el tiempo y la degradación del suelo se traduce en una disminución de la cantidad de agua de lluvia que se infiltra en el suelo, escurriendo en mayor medida por la superficie de los campos (Salas & Lovera, 1994). Como consecuencia, el agua transporta aguas abajo una mayor cantidad de sedimento, que posiblemente también contribuya al aumento de la velocidad de colmatación del lago (CEPROCOR, 2016).

La correlación entre la tasa de sedimentación calculada con los caudales líquidos medios anuales que ingresaron al embalse en cada período se presenta en la Figura 12.

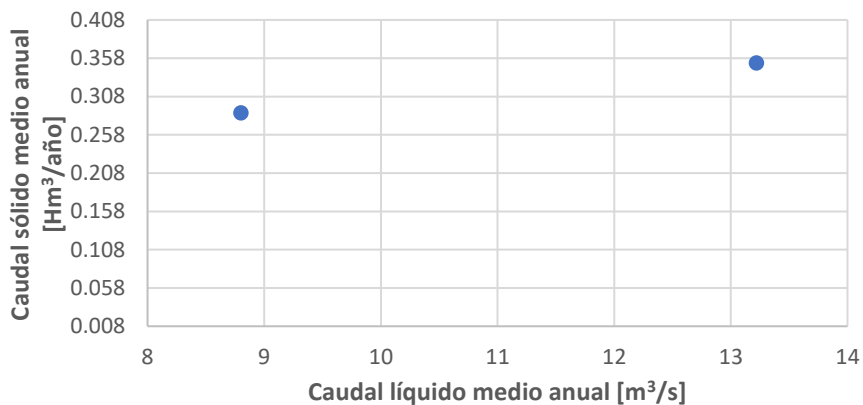


Figura 12.- Correlación entre caudal líquido medio anual y caudal sólido medio anual que ingresan al embalse.

En el caso de tener tres puntos o más que representen la correlación, es posible ajustarlos a una función potencial, obteniendo la Ec. 13, donde  $A_1$  y  $B_1$  son constantes,  $Q_{sma}$  es el caudal sólido medio anual y  $Q_{lma}$  el caudal líquido medio anual.

$$Q_{sma} = A_1 Q_{lma}^{B_1} \quad \text{Ec. 13}$$

Con esta ecuación se puede calcular la tasa de sedimentación anual esperable a partir de un aforo de caudal líquido medio anual que ingresa. Además, es posible realizar una estimación de la cantidad de años de vida útil del embalse. En la bibliografía se especifica que cuando el embalse se colmata en un 80%, el mismo llegó a su vida útil. Teniendo en cuenta el volumen inicial (año 1929) de 201.1 Hm<sup>3</sup>, se puede considerar de forma teórica que cuando el embalse tenga 40.2 Hm<sup>3</sup> estará colmatado. A partir de ello, considerando los caudales líquidos medios anuales que ingresan al embalse se puede estimar su año de tarquinamiento.

*b. Análisis de secciones del embalse*

En la Figura 13 se presenta el cambio en las elevaciones del perfil L1, que evidencia una notoria sedimentación en dicha sección. A partir de la diferencia entre la batimetría inicial y final, se determinó una sedimentación unitaria de 4063.8 m<sup>3</sup>/m, resultando una tasa de sedimentación anual en la sección de la desembocadura del río San Antonio en el embalse San Roque de 16.7 m<sup>3</sup>/m año.

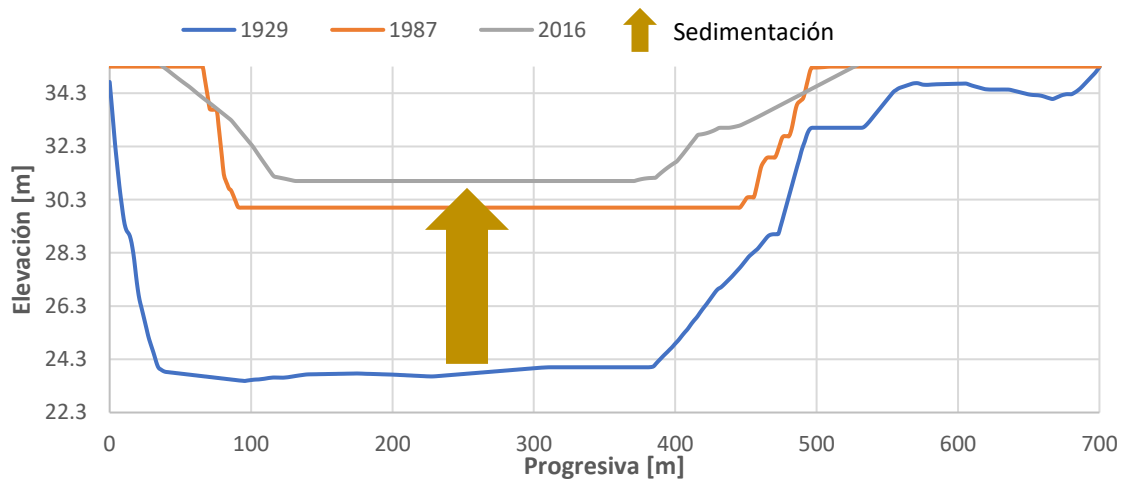


Figura 13.- Elevaciones en la sección transversal L1.

Además, se analizó la sección transversal L0 (ver Figura 11) que está definida inmediatamente abajo del Puente Central de Villa Carlos Paz. En este caso, la batimetría realizada en 1987 no alcanza a cubrir la zona y consecuentemente solo se analizó la diferencia entre 1929 y 2016, tal como se observa en la Figura 14. Allí, la sedimentación unitaria es de 389.1 m<sup>3</sup>/m, resultando una tasa de sedimentación anual en la sección del Puente Central de 4.5 m<sup>3</sup>/m año.



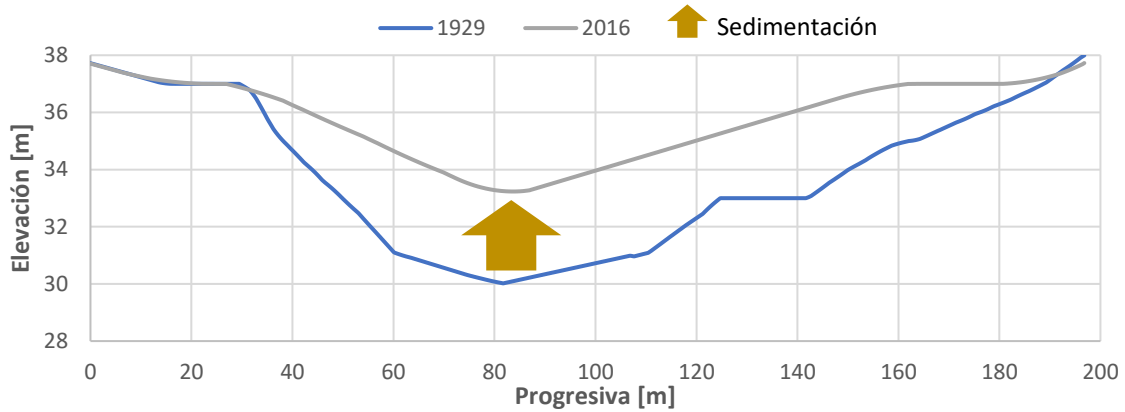


Figura 14.- Elevaciones en la sección transversal L0.

Las elevaciones en el perfil L3 (ver Figura 11) se observan en la Figura 15, que evidencia una notoria sedimentación en la margen izquierda y erosión en la margen derecha. En este caso, predomina la erosión y la erosión unitaria es de  $526 \text{ m}^3/\text{m}$ , resultando una tasa de erosión anual en la sección de la desembocadura del río Cosquín en el embalse San Roque de  $6 \text{ m}^3/\text{m}$  año.

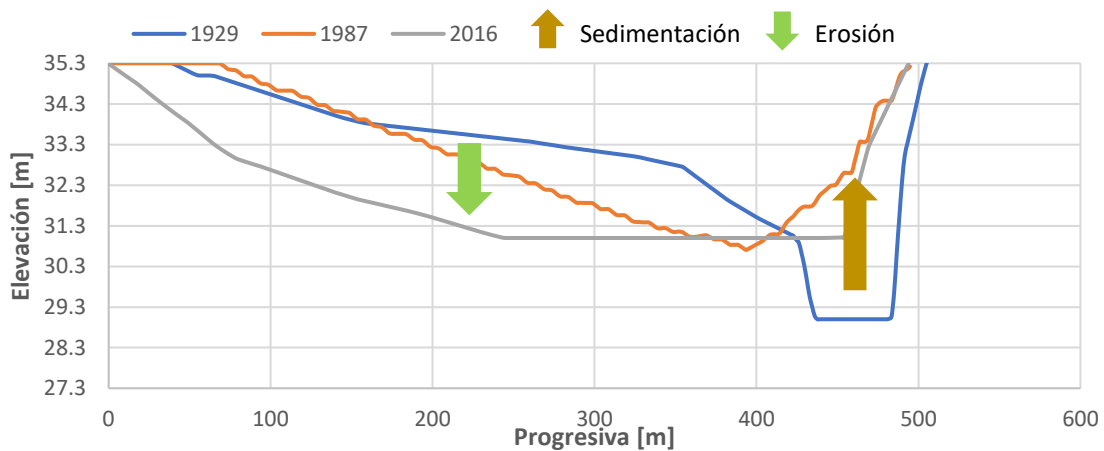


Figura 15.- Elevaciones en la sección transversal L3.

A partir del análisis de los perfiles longitudinales en el embalse, el L2 (trazado a partir de la desembocadura del río San Antonio hacia el dique San Roque, representado en la Figura 11) muestra una sedimentación que va disminuyendo hacia aguas abajo, tal como se observa en la Figura 16. La tasa de sedimentación unitaria anual resultó de  $180 \text{ m}^3/\text{m}$  año.

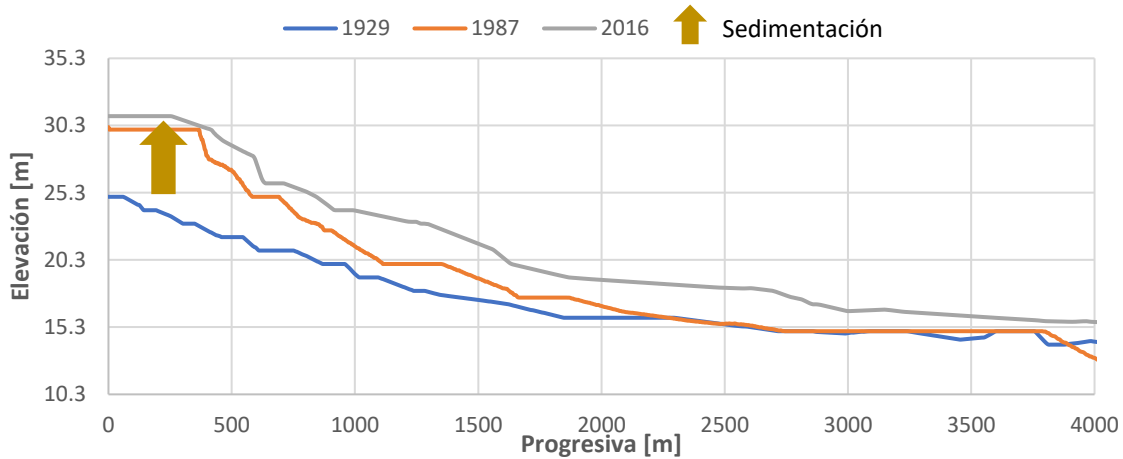


Figura 16.- Elevaciones en la sección longitudinal L2.

El perfil longitudinal L4 (trazado a partir de la desembocadura del río Cosquín por el centro del cauce hacia el dique San Roque, como se representa en la Figura 11) muestra una sedimentación que va disminuyendo hacia aguas abajo, tal como se observa en la Figura 17. La tasa de sedimentación unitaria anual resultó de  $97 \text{ m}^3/\text{m}$  año.

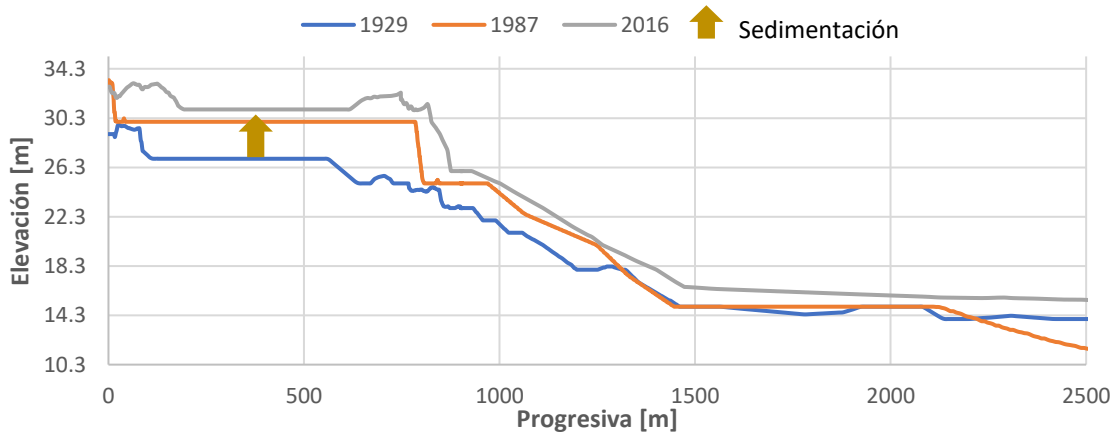


Figura 17.- Elevaciones en la sección longitudinal L4.

Comparando los resultados obtenidos, la tasa de sedimentación anual es mayor en la desembocadura del río San Antonio respecto al río Cosquín, siendo prácticamente el doble. Gráficamente, se observa en ambos perfiles longitudinales (L2 y L4) una disminución del volumen depositado desde la desembocadura de los ríos hacia aguas abajo.

Si bien la sección L2 analizada dio como resultado una erosión general en el lecho, dicho proceso predomina en la margen derecha del río Cosquín. Considerando el centro del cauce, predomina la sedimentación que se evidencia luego en el perfil L4.

## 2.4. Análisis, validación de resultados y discusión

Como resultado de la estimación de la erosión hídrica de suelos para la cuenca del embalse San Roque a partir de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (USLE) se obtuvieron valores altos de erosión en la cuenca alta de los ríos Cosquín y San Antonio, y una tasa de erosión total de



1.92  $Hm^3/año$ . Ello difiere de resultados obtenidos en otros estudios realizados en la cuenca, donde a partir del método de Djorovic & Gavrilovic (1974) se estimó una tasa de tarquinamiento para el embalse San Roque de 0.86  $Hm^3/año$  (Reyna, Reyna, Lábaque, Riha, & Rafaelli, 2011).

Al comparar los levantamientos batimétricos del embalse se obtuvo una tasa de 0.35  $Hm^3/año$ . Analizando los resultados con las distintas metodologías aplicadas, se observan diferencias que pueden estar dadas por las simplificaciones que presenta USLE, por ejemplo al no considerar la deposición de sedimentos a lo largo de la cuenca y la incertidumbre asociada en la definición de cada uno de los parámetros intervinientes. Ello hace que el método mencionado sobredimensione la producción de sedimentos, conclusión a la cual llegaron distintos autores que trabajaron en ambientes semiáridos (Romero Díaz, Alonso Sarriá, & Martínez Lloris, 2007) (Lafragua, Gutiérrez, Bahena, Moriel, & Fernández, 2006). En ocasiones se ha afirmado que la aplicación de esta ecuación sólo es válida para generar datos relativos (Romero Díaz, Martínez Lloris, & Belmonte Serrato, 2004) y conocer la distribución espacial de la producción de sedimentos.

Observando los resultados obtenidos con el método de USLE en la cuenca del río Cosquín, una gran parte de su área presenta una producción baja-media de sedimentos. Hay una fuente muy importante de arena en la cuenca alta, pero en la zona cercana al río principal hay una zona de menor producción de sedimentos, quedando el Cosquín desvinculado del área fuente predominante, disminuyendo así la deposición de sedimentos en dicho cuerpo de agua. En cambio, el área fuente de sedimentos de la cuenca del San Antonio es mayor y la morfometría de la cuenca y la red hace que los sedimentos generados lleguen de forma más directa al embalse San Roque. Ello coincide con los resultados obtenidos a partir del análisis de secciones transversales del embalse, donde se evidencia una mayor influencia de la sedimentación en la desembocadura del río San Antonio y lo relevado en campo, donde por ejemplo en la sección del puente Central de Villa Carlos Paz (LO en la Figura 14) se observan grandes volúmenes de sedimentos. En la Figura 18 se presenta la situación de dicha sección en (a) el año 1940 (imagen recuperada del Grupo Facebook Encuentros con la Villa de Don Carlos Nicandro), donde se observa el lecho de roca, y (b) la situación el día 20/10/2021, donde el lecho ascendió y está cubierto completamente de arena, producto del cambio en la dinámica del transporte de sedimentos generado por la construcción del actual Dique San Roque.



(a)



(b)

Figura 18.- Imágenes de la zona 3 captadas aguas abajo del Puente Central en (a) 1940 (Fuente: Grupo Facebook Encuentros con la Villa de Don Carlos Nicandro) y (b) 20/10/2021.

Se debe tener en cuenta que para el cálculo del factor  $K_{USLE}$  no se considera la litología de la cuenca, solo la fracción del suelo que la cubre. En consecuencia, los resultados del modelo USLE puede variar de lo que sucede en la realidad. Sin embargo, se observa que las zonas obtenidas de mayor

producción coinciden con las zonas que presentan roca granítica, coincidiendo con la capacidad de erodabilidad que presentan dichas rocas. Además, para el cálculo del factor de cobertura y manejo de la vegetación  $C_{USLE}$  se utilizaron imágenes satelitales de LANDSAT 8 capturadas el día 13/09/2021, época en la cual la vegetación no se encuentra desarrollada completamente. La cobertura vegetal, y en consecuencia el NDVI, varía mensualmente influenciada por los incendios forestales recurrentes en cuenca alta y media y a lo largo de los años con el aumento de la urbanización en la cuenca media y baja.

Al variar las condiciones de cobertura de la cuenca hay cambios en los caudales pico, tasas de sedimentación y el flujo base que provee de agua a la cuenca durante épocas secas. Al no considerar dicha variación en el cálculo de la Ecuación de Pérdida de Suelos, es esperable que la tasa de tarquinamiento obtenida sea superior a la determinada con las batimetrías. A modo de ejemplo, se presenta en la Figura 19 la comparación de la zona céntrica de Villa Carlos Paz entre la década del '20 y el día 06/07/2021, donde se evidencia el cambio en el uso de suelo en la zona. Situaciones similares se dieron en las localidades restantes del Valle de Punilla.



Figura 19.- Imágenes de Villa Carlos Paz en (a) Década del '20 (Fuente: Eldor Bertorello) y (b) 06/07/2021 (Fuente: Google Earth).

A su vez, estudios realizados con datos de lluvia del período 1873-2006 relevados por la estación Córdoba Observatorio del Servicio Meteorológico Nacional, indican que hubo un cambio en la distribución de las precipitaciones hacia un aumento en las precipitaciones estacionales acumuladas durante el periodo de verano a partir del año 1950, así como un cambio fluctuante en la varianza de la lluvia a lo largo del tiempo (Scian & Pierini, 2013). Tal incremento conduce a un aumento de la capacidad de carga de sedimentos por parte de los arroyos y ríos, influyendo directamente en el valor del factor  $R_{USLE}$ . En este caso, se consideró para su cálculo un promedio de precipitaciones anuales históricas de las estaciones meteorológicas existentes, sin tener en cuenta la tendencia del aumento de las precipitaciones mencionada.

Se debe tener en cuenta también que las batimetrías presentan cierta incertidumbre en sus resultados, propia de instrumento de medición. La misma no se encuentra especificada en los informes de los estudios realizados, pero en este caso se considera que es poco significativa y los resultados son representativos de lo que efectivamente ocurre en el embalse.

Consecuentemente, luego del análisis realizado es posible afirmar que la cuenca de estudio genera sedimentos que se están depositando en el embalse San Roque. Por lo tanto, resulta fundamental el estudio de la dinámica del transporte de los sedimentos para la implementación de medidas de gestión de dichos sedimentos, tendientes a evitar la colmatación del cuerpo de agua.

## Capítulo 3: Modelo conceptual de los procesos de transporte de sedimentos en el río San Antonio

---

### 3.1. Introducción

Las modelaciones se utilizan para ayudar a comprender procesos, respaldar hipótesis o realizar obras u desarrollos ingenieriles. Para entender procesos que gobiernan una zona de estudio y comprobar hipótesis se utilizan modelos conceptuales, mientras que para diseñar medidas estructurales y no estructurales se utilizan modelos de detalle. Cada uno posee distintos requerimientos y condiciones iniciales y de borde. En este caso, se estudiará mediante un modelo conceptual la dinámica del aporte de sedimentos del río San Antonio en la desembocadura del embalse San Roque, con el objetivo de determinar zonas de sedimentación/erosión, cambios generados con variaciones en las condiciones de contorno y definir las variables que gobiernan los procesos físicos involucrados en el estudio para relevarlas en campo y, a futuro, elaborar modelos computacionales de detalle.

### 3.2. Descripción del modelo

El modelo fue desarrollado en Python (ver código completo en el Anexo) y considera de forma simple la morfodinámica de la evolución del lecho de un río de ancho fijo y caudal constante que desemboca en un lago de la misma anchura y extensión infinita. Estima el transporte de sedimentos del lecho por fondo y suspensión, sin considerar los aportes de sedimentos por carga de lavado provenientes de la cuenca alta (se asume que son despreciables). La carga de fondo de sedimento se encuentra en equilibrio y en la sección aguas arriba hay disponibilidad de sedimentos para transportar (de esta forma, lo simulado sería lo que potencialmente podría ocurrir para esa condición). Además, considera que el fondo presenta una pendiente uniforme en todo el trayecto, sin tener en cuenta erosiones y deposiciones de eventos anteriores.

Las variables de entrada al modelo son la pendiente de fondo del lecho  $S_0$ , la longitud del tramo de río analizado  $L_m$ , el caudal líquido unitario y considerado como constante del río  $q$ , el tamaño medio de grano de sedimento  $D_{50}$ , la porosidad del lecho  $\lambda_p$ , el tirante final  $y_f$ , la diferencia entre dos puntos ubicados en el eje  $x$   $\Delta x$ , el tiempo de simulación  $t_m$ , el intervalo de tiempo entre cada simulación  $\Delta t$ , la viscosidad cinemática del agua  $\nu$ , la densidad del agua y del sedimento  $\rho_w$  y  $\rho_s$  respectivamente y la aceleración de la gravedad  $g$ .

El método desarrollado presenta grandes simplificaciones, por lo que los resultados obtenidos pueden utilizarse sólo como estimaciones los procesos que existen en el sitio de estudio. En caso de ser necesario, se debería considerar la geometría real del río y embalse, la variación del caudal y tirante a lo largo de un evento de crecida, las estructuras presentes en el cauce (como vados, puentes, vertederos), entre otros.

Este modelo tiene tres componentes: un modelo hidrodinámico, resuelto desde aguas abajo hacia aguas arriba, un modelo de transporte de sedimentos y un cálculo de evolución del lecho, resuelto desde aguas arriba hacia aguas abajo. Se considera que el flujo es a régimen permanente en cuanto al caudal que ingresa al tramo de estudio. Sin embargo, las variaciones del lecho generadas por los procesos de transporte de sedimentos modificarán la hidrodinámica del flujo. En consecuencia, se podría definir el modelo como cuasi permanente.

A continuación se desarrolla en detalle cada una de las componentes del modelo.

### 3.2.1. Modelo hidrodinámico

En este modelo se considera que el fondo evoluciona mucho más lento que el pelo de agua, es decir que hay un equilibrio hidrodinámico instante a instante y se utiliza la ecuación de flujo gradualmente variado para calcular la variación del tirante  $y$  respecto al eje horizontal  $x$ , tal como se expresa en la Ec. 14, donde  $S_0$  es la pendiente de fondo,  $S_f$  la pendiente de energía,  $g$  la aceleración de la gravedad y  $Fr$  el número de Froude. El desarrollo de la ecuación de flujo gradualmente variado incluye las siguientes hipótesis:

- A. El flujo es turbulento e incompresible, a régimen permanente.
- B. Prevalece la distribución hidrostática de presiones porque las líneas de corriente son paralelas.
- C. La pérdida de carga en una sección con flujo gradualmente variado es la misma que para un flujo uniforme que tiene la velocidad y radio hidráulico de la sección. Esto implica que el coeficiente de rugosidad estimado para flujo uniforme aplica a flujo gradualmente variado.
- D. La pendiente del canal es baja, y en consecuencia el tirante es aproximadamente igual a  $y$ .
- E. El canal es prismático, tiene alineamiento y forma constantes.
- F. La distribución de velocidad en la sección transversal es fija. Esto implica que los coeficientes de distribución de velocidades son constantes.
- G. El coeficiente de rugosidad es independiente de la profundidad del flujo y constante a través del tramo del canal.

$$\frac{dy}{dx} = \frac{S_0 - S_f}{1 - Fr^2} \quad \text{Ec. 14}$$

El  $Fr^2$  se obtiene al reemplazar la definición de  $Fr$  dada por la Ec. 15 y de velocidad del fluido  $U$  dada por la Ec. 16, tal como se describe en la Ec. 17. Finalmente, se obtiene la Ec. 18 que será la utilizada por el modelo. Esto es válido si se considera que la sección es rectangular y la pendiente es pequeña, con lo cual el tirante es aproximadamente  $y$  (Hipótesis D).

$$Fr = \frac{U}{\sqrt{gy}} \quad \text{Ec. 15}$$

$$U = \frac{q}{y} \quad \text{Ec. 16}$$

$$Fr^2 = \frac{U^2}{gy} = \frac{q^2}{gy^2} \quad \text{Ec. 17}$$

$$Fr^2 = \frac{q^2}{g y^3} \quad \text{Ec. 18}$$

La pendiente de fondo  $S_0$  es variable y se obtiene a partir de la variación de la elevación del lecho  $\eta$  en  $x$  expresada por la Ec. 19.

$$S_0 = -\frac{\partial \eta}{\partial x} \quad \text{Ec. 19}$$

En consecuencia, reemplazando la Ec. 18 y la Ec. 19 en la Ec. 14, la función para flujo gradualmente se puede expresar como:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{-\frac{\partial \eta}{\partial x} - S_f}{1 - \frac{q^2}{g y^3}} \quad \text{Ec. 20}$$

La pendiente de energía  $S_f$  depende del esfuerzo de corte, representado de forma adimensional por el número de Shields total  $\theta_T$  (Ec. 21). Despejando se obtiene la Ec. 22 que se utiliza en el modelo, donde se observa que la pendiente varía punto a punto con cada tirante. Dicha ecuación es válida si se cumplen las hipótesis C y G mencionadas anteriormente.

$$\theta_T = \frac{y S_f}{R D_{50}} \quad \text{Ec. 21}$$

$$S_f = \frac{R D_{50} \theta_T}{y} \quad \text{Ec. 22}$$

Donde  $R$  representa la gravedad específica sumergida del sedimento, calculada a partir de la Ec. 23.

$$R = \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} = 1.65 \quad \text{Ec. 23}$$

Para determinar el número de Shields total  $\theta_T$  se utilizará la Ec. 24 propuesta en la bibliografía (Engelund & Hansen, 1967). Además, se debe tener la relación del número de Shields con el esfuerzo de corte total  $\tau$  definida a partir de la Ec. 25.

$$\theta_T(y) = \left( \frac{\theta_S(y) - 0.06}{0.4} \right)^{1/2} \quad \text{Ec. 24}$$

$$\theta_T = \frac{\tau}{\rho_w g R D_{50}} \quad \text{Ec. 25}$$

La ecuación del número de Shields de grano utilizada en el modelo es la presentada en la Ec. 26. Ella se obtiene al relacionar  $\theta_S$  con el esfuerzo de corte o tensión rasante de grano  $\tau_S$  a partir de la Ec. 27, la definición de  $\tau_S$  dada por la Ec. 28, la Ec. 16 y la expresión de Manning Strickler de la Ec. 29, que considera la rugosidad equivalente del grano de arena  $k_s$  y el coeficiente de fricción  $C_f$  que se obtiene de García (2007).

$$\theta_S(y) = \frac{1}{g R D_{50}^{2/3}} \frac{(2.5)^{1/3} q^2}{(8.26)^2 y^{7/3}} \quad \text{Ec. 26}$$

$$\theta_S = \frac{\tau_S}{\rho_w g R D_{50}} \quad \text{Ec. 27}$$

$$\tau_S = C_f \rho_w U^2 \quad \text{Ec. 28}$$

$$C_f = \frac{1}{(8.1)^2} \left( \frac{k_s}{y} \right)^{1/3} = \frac{1}{(8.1)^2} \left( \frac{2.5D}{y} \right)^{1/3} \quad \text{Ec. 29}$$

Luego, si  $0.06 < \theta_S < 0.60$ , se cumple la Ec. 24. En caso contrario, no hay formas de fondo y se considera la Ec. 30 (Engelund & Hansen, 1967).

$$\theta_S = \theta_T \quad \text{Ec. 30}$$

Determinadas las variables que intervienen en la Ec. 14, se calcula la evolución del tirante. Para ello, se debe resolver la Ec. 31 desde aguas abajo hacia aguas arriba con una discretización  $\Delta x$ .



$$y(x) - y(x - \Delta x) = \frac{1}{1 - Fr^2} \{ -[\eta(x) - \eta(x - \Delta x)] - S_f \Delta x \} \quad Ec. 31$$

Despejando  $y(x - \Delta x)$  se obtiene la Ec. 32.

$$y(x - \Delta x) = y(x) + \frac{1}{1 - Fr^2} [\eta(x) - \eta(x - \Delta x) + S_f \Delta x] \quad Ec. 32$$

La Ec. 32 se resuelve considerando condiciones de contorno expresadas en términos de la profundidad del flujo en un punto. Aguas arriba para  $x = x_i$  se considera que el flujo es uniforme, por lo tanto el tirante será el normal. Luego, aguas abajo para  $x = x_f$  y el tirante será variable de acuerdo al nivel del embalse  $y = y_f$ . Conociendo  $y_f$  se puede calcular el tirante en el punto  $x - \Delta x$ , y así avanzar hacia aguas arriba en el cálculo de la curva de remanso.

### 3.2.2. Modelo de transporte de sedimentos

Los cambios en el lecho del río están influenciados por el transporte de sedimentos. En consecuencia, se calculará dicho transporte partiendo del esquema de la Figura 20.

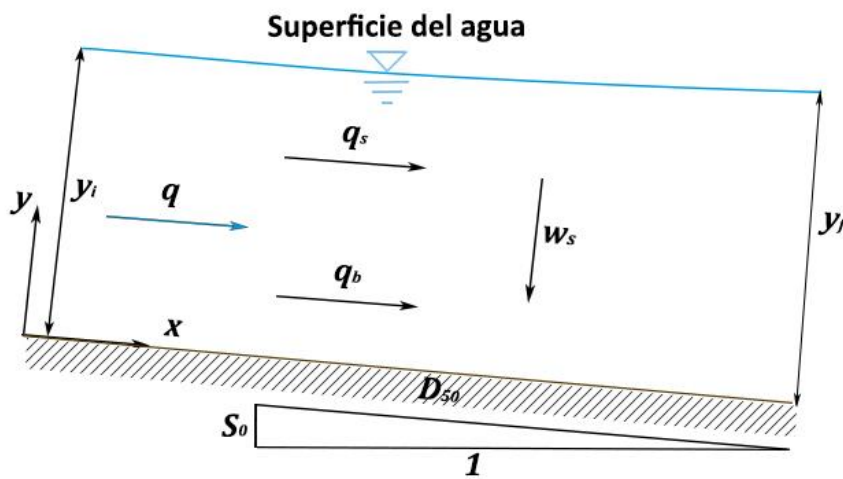


Figura 20.- Esquema del proceso de transporte de sedimentos en un río.

El **transporte de fondo**  $q_b$  se puede calcular a partir de fórmulas empíricas desarrolladas por distintos autores. El modelo permite aplicar la Ec. 33 (Meyer-Peter & Muller, 1948), la Ec. 34 (Wong & Parker, 2006) y la Ec. 35 (Parker, 1979).

$$q_b = \sqrt{gRD_{50}}D_{50} \times 8 \times (\theta_s - 0.047)^{1.5} \quad Ec. 33$$

$$q_b = \sqrt{gRD_{50}}D_{50} \times 4.93 \times (\theta_s - 0.047)^{1.6} \quad Ec. 34$$

$$q_b = \sqrt{gRD_{50}}D_{50} \times 11.2 \times \frac{(\theta_s - 0.047)^{4.5}}{\theta_s^3} \quad Ec. 35$$

En cálculos posteriores donde se aplica el modelo para el río San Antonio se utilizará la fórmula de Wong & Parker (2006), ya que los sedimentos del río de estudio se encuentran dentro del rango de validez de dicha fórmula (diámetros característicos entre 0.4 mm y 30 mm). Además, se consideró como antecedente su aplicación con buenos resultados en el río Tercero (Ctalamochita) de la provincia de Córdoba que presenta características similares al San Antonio (Heredia Ligorria, 2017).

Para el cálculo del **transporte en suspensión**  $q_s$ , se parte del esquema de la Figura 21, donde el cambio del transporte en suspensión a lo largo de  $x$  se puede expresar por balance de masa por la Ec. 36.

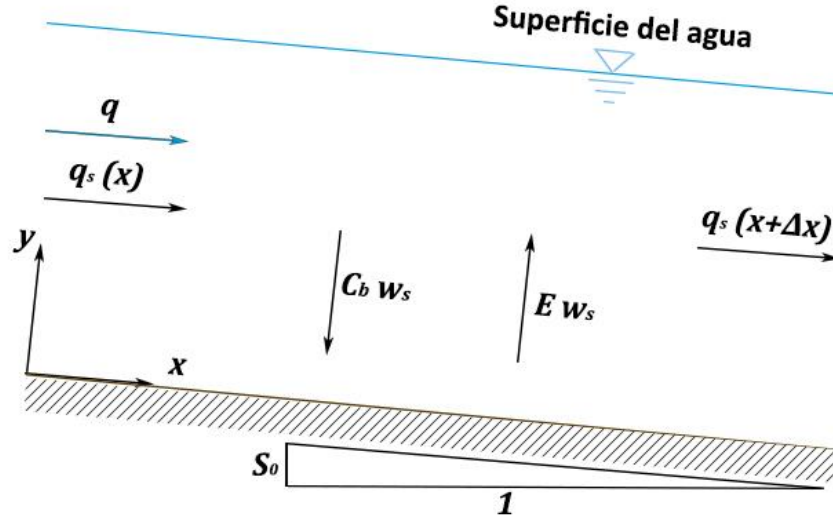


Figura 21.- Esquema del proceso de transporte de sedimentos en suspensión en un río.

$$\frac{\partial q_s}{\partial x} = w_s(E - C_b) \quad \text{Ec. 36}$$

Donde  $E$  es la entrada en suspensión,  $C_b$  la concentración de sedimentos cercana al fondo y  $w_s$  la velocidad de caída de las partículas.

La tasa de *entrainment* o entrada en suspensión  $E$  depende de la hidrodinámica del flujo y diversos autores definieron fórmulas empíricas para calcularla. El modelo permite seleccionar el método de cálculo propuesto por García & Parker (1991) o Engelund & Fredsoe (1976; 1982).

La Ec. 37 permite calcular  $E$  (García & Parker, 1991) considerando la constante  $A = 1.3 \times 10^{-7}$  y la variable de similitud para sedimento uniforme  $Z_u$  que se determina con la Ec. 38.

$$E = \frac{AZ_u^5}{1 + \frac{AZ_u^5}{0.3}} \quad \text{Ec. 37}$$

$$Z_u = R_{ep}^{0.6} \left( \frac{u_{*s}}{w_s} \right) \quad \text{Ec. 38}$$

La variable  $Z_u$  depende de la velocidad de corte del grano  $u_{*s}$  definida por la Ec. 39, el número de Reynolds de la partícula  $R_{ep}$  dado por la Ec. 40 y la velocidad de caída de las partículas  $w_s$  que se puede calcular con la Ec. 41 (Jimenez & Madsen, 2003).

$$u_{*s} = \sqrt{\frac{\tau_s}{\rho_w}} \quad \text{Ec. 39}$$

$$R_{ep} = \frac{\sqrt{gRD_{50}D_{50}}}{\nu} \quad \text{Ec. 40}$$

$$w_s = \sqrt{RgD_{50}} \left( 0.954 + \frac{17.49}{R_{ep}} \right)^{-1} \quad \text{Ec. 41}$$

Para calcular la velocidad de corte del grano, se debe calcular la tensión rasante del grano  $\tau_s$  con la Ec. 42, obtenida al despejar la Ec. 27.

$$\tau_s = \theta_s \rho_w g R D_{50} \quad \text{Ec. 42}$$

Por otro lado, también es posible calcular  $E$  a partir de la Ec. 43 (Engelund & Fredsoe, 1976) (1982), que fue calibrada para arenas con un  $D_{50} \geq 0.19 \text{ mm}$ , donde  $\lambda_b$  es la concentración lineal y se calcula con la Ec. 44,  $p$  es la probabilidad de movimiento de la partícula determinada por la Ec. 45 y  $\beta$  el coeficiente de fricción dinámica que toma el valor de 1.0.

$$E = \frac{0.65}{(1 + \lambda_b^{-1})^3} \quad \text{Ec. 43}$$

$$\lambda_b = \left[ \frac{\theta_s - 0.06 - \frac{\beta p \pi}{6}}{0.027(R + 1) \theta_s} \right]^{0.5} \quad \text{Ec. 44}$$

$$p = \left[ 1 + \left( \frac{\frac{\beta \pi}{6}}{\theta_s - 0.06} \right)^4 \right]^{-0.25} \quad \text{Ec. 45}$$

La concentración media de la columna de agua  $C$ , requerida para calcular el transporte total de sedimentos en suspensión, se puede calcular a partir de la concentración de sedimentos en la cercanía del fondo  $C_b$  utilizando la Ec. 46. Para ello se considera un coeficiente de forma  $r_0$  calculado a partir de la Ec. 47 (Parker, García, Fukushima, & Yu, 1987). Esta expresión se obtuvo a partir de un ajuste a un perfil de concentración de sedimentos de Rouse y es una aproximación. Se propone en versiones futuras del modelo realizar un cálculo más detallado de dicho coeficiente.

$$C = \frac{C_b}{r_0} \quad \text{Ec. 46}$$

$$r_0 = 1 + 31.5 \left( \frac{u_*}{w_s} \right)^{-1.46} \quad \text{Ec. 47}$$

Para determinar  $r_0$ , se debe definir la velocidad de corte  $u_*$  (que incluye los efectos de rugosidad de grano y de forma) a partir de la Ec. 48.

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau}{\rho_w}} \quad \text{Ec. 48}$$

Suponiendo que el transporte en suspensión se encuentra en equilibrio, de la Ec. 36 se obtiene que la concentración de sedimentos en la cercanía del fondo será igual a la entrada en suspensión. Esta suposición se considera válida al trabajar con flujo estacionario y gradualmente variado, es decir que el caudal de agua  $q$  es contante y el tirante y cambia lentamente. Por lo tanto, la velocidad media cambia muy despacio con  $x$ , al igual que la tensión de fondo (que gobierna el transporte de fondo) y los esfuerzos de Reynolds que mantienen los sedimentos en suspensión (que gobiernan el transporte del lecho en suspensión). Entonces se asume que la variación en la Ec. 36  $\frac{\partial q_s}{\partial x}$  es aproximadamente 0, suposición que será validada luego. Consecuentemente, se obtiene la Ec. 49.



$$C_b = E$$

Ec. 49

Finalmente  $q_s$  se obtiene a partir de la concentración media en la vertical y el flujo de agua con la Ec. 50.

$$q_s = qC$$

Ec. 50

Luego, tal como se presenta en la Ec. 51, el **transporte total**  $q_t$  está dado por la suma del transporte de fondo y de suspensión.

$$q_t = q_b + q_s$$

Ec. 51

Para definir la presencia o ausencia de transporte de sedimentos, el modo de transporte predominante (en suspensión o de fondo) y estimar las formas de fondo generadas en situaciones de transporte (fondo liso, rizos o dunas) bajo distintas condiciones de flujo y características del sedimento, se puede utilizar el ábaco de Shields-Parker (García, 2007) que se presenta en la Figura 22. A él se ingresa por ordenadas con  $\theta_T$  calculado a partir de la Ec. 25 y en abscisas con  $Re_p$  calculado a partir de la Ec. 40.

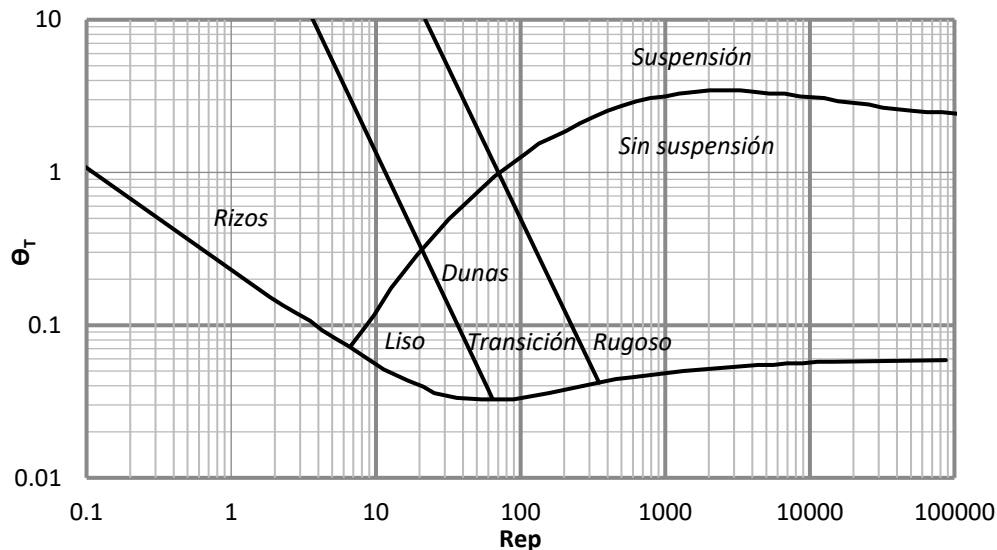


Figura 22.- Ábaco de Shields-Parker (García, 2007).

### 3.2.3. Modelo de evolución del lecho

Para calcular la evolución del lecho a partir del transporte de sedimentos determinado anteriormente, se parte de la Ec. 52 (Exner, 1925).

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = \frac{1}{(\lambda_p - 1)} \left[ \frac{\partial q_b}{\partial x} + \frac{\partial q_s}{\partial x} \right]$$

Ec. 52

En este modelo conceptual se considera que el flujo es a régimen permanente en cuanto al caudal que ingresa al tramo de estudio. Sin embargo, las variaciones del lecho generadas por los procesos de transporte de sedimentos modificarán la hidrodinámica del flujo. En consecuencia, se podría definir el modelo como cuasi permanente. El cálculo de la evolución del lecho se realiza desde aguas arriba hacia aguas abajo para cada  $t$ . En consecuencia, se plantea la Ec. 53 y la Ec. 54.

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = \frac{\eta(x + \Delta x, t + \Delta t) - \eta(x + \Delta x, t)}{\Delta t} \quad \text{Ec. 53}$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = \frac{1}{(\lambda_p - 1)} \frac{q_t(x + \Delta x, t) - q_t(x, t)}{\Delta x} \quad \text{Ec. 54}$$

De esta manera, se utiliza el transporte total calculado en el tiempo anterior para determinar el desbalance de sedimentos en un tiempo posterior, asegurando que la información viaja hacia aguas abajo.

Despejando  $\eta(x + \Delta x, t + \Delta t)$  de la Ec. 53 se obtiene la Ec. 55.

$$\eta(x + \Delta x, t + \Delta t) = \eta(x + \Delta x, t) + \frac{\Delta t}{\Delta x} \frac{1}{(n - 1)} [q_t(x + \Delta x, t) - q_t(x, t)] \quad \text{Ec. 55}$$

Para el primer instante,  $q_t(x, t)$  es conocido para todo el tramo (depende de las condiciones hidrodinámicas calculadas previamente para esas condiciones del lecho). De esta forma, se puede calcular la evolución del lecho para todo el tramo para el nuevo tiempo  $t + \Delta t$ .

4. Con los valores hallados de  $\eta(x + \Delta x, t + \Delta t)$  para cada  $x$ , en un tiempo posterior, se calculan los nuevos tirantes, utilizando el procedimiento desarrollado anteriormente en la sección de “Modelo hidrodinámico”. A continuación, para los nuevos tirantes se calcula el transporte de sedimentos desarrollado en la sección de “Modelo de transporte de sedimentos” y la evolución del lecho. Así se resuelve el bucle hasta alcanzar el tiempo del evento simulado, denominado  $t_f$ .

### 3.3. Síntesis y diagrama de flujo de la modelación

A modo resumen, se presenta a continuación una síntesis de la modelación y el diagrama de flujo correspondiente al modelo conceptual desarrollado.

1. Ingreso de datos:

Características del tramo analizado:  $S_0, L_m$

Características del fluido:  $v, \rho_w$

Características del sedimento:  $D_{50}, \rho_s, \lambda_p$

Características del flujo:  $q, y_f$

Parámetros del esquema de modelación:  $\Delta x, \Delta t, t_m$  (determinados a partir de un análisis de estabilidad de las soluciones numéricas, ya que se simulan distintos procesos físicos: hidrodinámicos y transporte de sedimentos).

Otros parámetros:  $g$

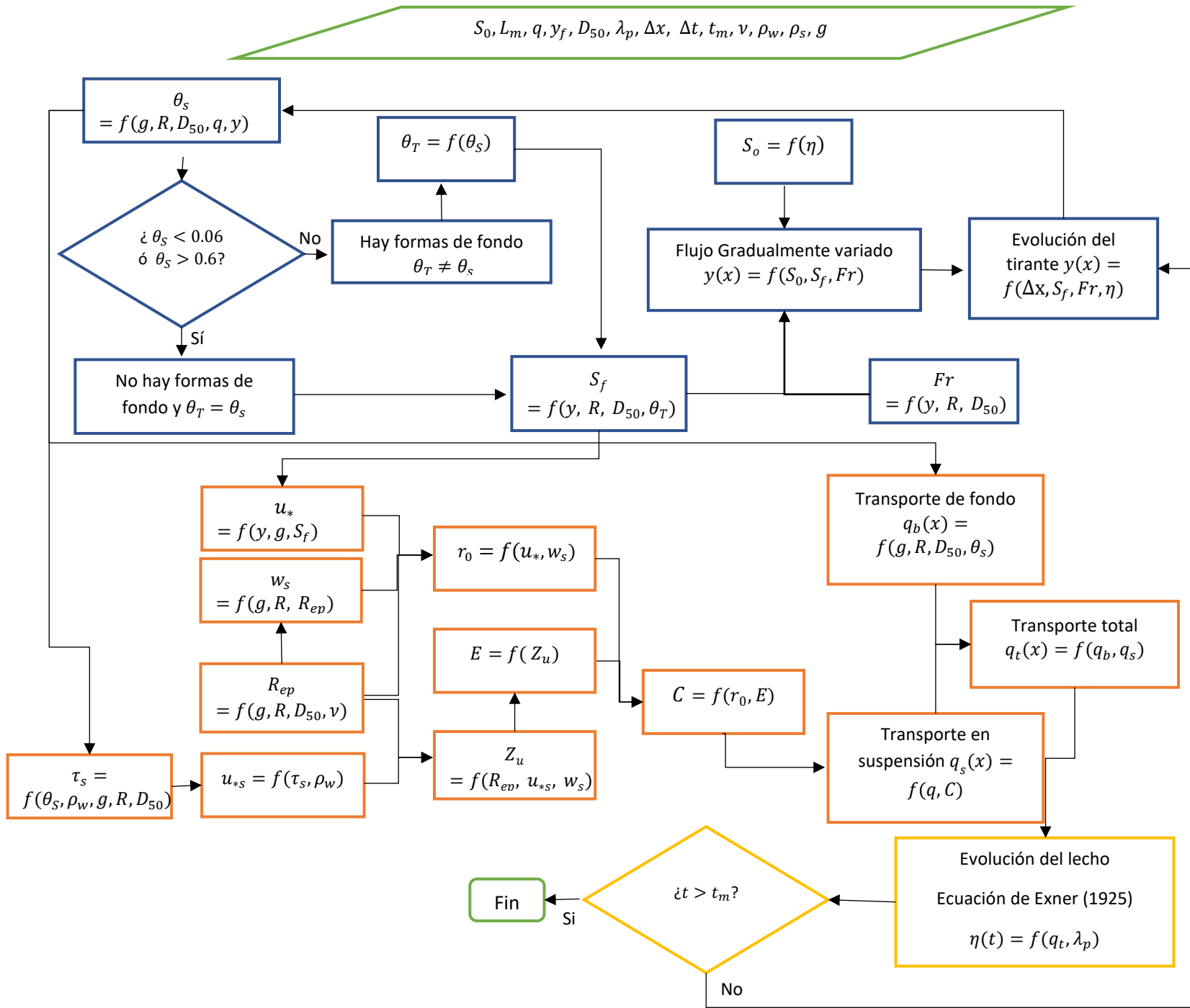
2. Determinación de profundidades de flujo iniciales ( $t = t_0$ ) en todo el tramo utilizando esquemas de flujo gradualmente variado para una condición de profundidad de flujo aguas abajo  $y_f$  y una posición de lecho inicial definido por la pendiente de fondo  $S_0$  (Ec. 19).

- 2.1. Determinación de la pendiente de la línea de energía:

- 2.1.1. Cálculo del efecto de la fricción sobre el flujo: esfuerzo de corte con dimensiones ( $\tau$ ) y adimensional ( $\theta$ ) teniendo en cuenta el efecto por grano y por forma de fondo (determinación de  $\theta_T$  con Ec. 24 o Ec. 30)

- 2.1.2. Cálculo de pendiente de línea de energía  $S_f$  (Ec. 22)

- 2.2. Cálculo del número de Froude.
- 2.3. Cálculo de la profundidad de flujo para cada progresiva en el instante inicial ( $t_0$ ).
3. Determinación de la posición del lecho para el nuevo instante  $t_0 + \Delta t$  con las condiciones hidrodinámicas determinadas en 2.
  - 3.1. Cálculo del transporte total de sedimentos del lecho  $q_t$ :
    - 3.1.1. Determinación del transporte de sedimento del lecho en suspensión  $q_s$ 
      - Cálculo de la distribución de sedimentos en suspensión
      - Cálculo del transporte de sedimento del lecho en suspensión
    - 3.1.2. Determinación del transporte de fondo del sedimento del lecho  $q_b$ .
    - 3.1.3. Cálculo del transporte total de sedimentos del lecho  $q_t$ .
  - 3.2. Determinación de la posición del lecho para el nuevo instante  $t + \Delta t$  utilizando la ecuación de balance de masa de Exner (Ec. 52) y el transporte total de sedimentos del lecho.
4. Repetir pasos 2 y 3 para los nuevos intervalos de tiempo hasta alcanzar el tiempo de modelación.
5. Generar gráficos y archivos de datos.



### 3.4. Implementación del modelo

El modelo conceptual unidimensional se aplicó simulando las condiciones de flujo de agua y de sedimento de un tramo de 3000 m del río San Antonio, delimitado aguas arriba por el Puente Los Gigantes, y aguas abajo por el Puente Cassaffousth, en Villa Carlos Paz. En la Figura 23 se presenta el área de estudio y se delimitan las progresivas en las zonas de mayor interés.



Figura 23.- Área modelada, río San Antonio, Villa Carlos Paz, Córdoba, Argentina.

Una buena porción del área de estudio se ve influenciada por el efecto remanso generado por el embalse San Roque y en ella se observó la presencia de transporte de sedimentos. De acuerdo a registros visuales de la zona, cuando el nivel del embalse es bajo, se logran ver pequeñas formas de fondo aun aguas abajo del Puente Cassaffousth. En consecuencia, se busca comprobar la hipótesis de que, dependiendo del tamaño de la crecida, los pulsos de sedimentos pueden llegar hasta dicha zona.

#### 3.4.1. Parámetros utilizados en el modelo

Se muestran a continuación, en la Tabla 4, los parámetros de entrada del modelo seleccionados para simular las condiciones existentes en el área de estudio.

Tabla 4.- Parámetros de entrada del modelo conceptual del río San Antonio desarrollado.

Parámetro	Valor	Unidad	Comentario
$\nu$	$1.018 \times 10^{-6}$	$m^2/s$	
$\rho_w$	1000	$kg/m^3$	
$\lambda_p$	0.4		
$\rho_s$	2650	$kg/m^3$	Sedimentos naturales
$L_m$	3000	m	Longitud del tramo de río estudiado
$g$	9.806	$m/s^2$	
$\Delta x$	50	m	Obtenido a partir de un análisis de sensibilidad de la variabilidad de los procesos
$t_m$	4	h	Duración promedio de un evento de crecida en la zona de estudio
$\Delta t$	0.1	h	

Para simular la dinámica del transporte de sedimentos se seleccionaron los valores de las variables que se presentan en la Tabla 5. Los mismos fueron variando en cada una de las simulaciones, de acuerdo al caso a analizar.

Tabla 5.- Variables de entrada del modelo conceptual del río San Antonio desarrollado.

Variables	Valor inicial	Rango de valores	Unidad
$q$	1	0.1-7	$m^2/s$
$y_f$	2	0.5-3.8	m
$D_{50}$	1.5	1-2	mm
$S_0$	0.15	0.10–0.20	%

El tirante  $y_f$  está asociado al nivel del embalse, referenciado a partir de la cota del labio vertedero tal como se observa en la Tabla 6. Además, el embalse genera un efecto remanso cuya influencia varía con el nivel. Se registró visualmente la zona hasta la cual llega el efecto remanso bajo distintas cotas del embalse, dicha información se presenta en la misma tabla.

Tabla 6.- Tirantes  $y_f$  y los niveles del embalse asociados.

$y_f$ [m]	Cota embalse [m]	Localización del efecto remanso	
		Lugar de referencia	$x$ [m]
0	31.5	Puente Cassaffousth	3000
0.5	32	Puente Central	2500
1	32.5	Esquina calles Prager y La Paz.	2250
1.5	33	Puente Mansilla	2000
2	33.5	Parque Estancia La Quinta	1500
2.4	33.9	50 m aguas abajo del vertedero pico de pato, Balneario El Fantasio	850
3.8	35.3	Cota superior del vertedero pico de pato, Balneario El Fantasio	800
4.5	36	Vado El Fantasio	500

En la modelación se considera que el menor valor de  $y_f$  seleccionado es igual al tirante normal para esa condición de flujo asumiendo que el efecto de remanso se da aguas bajo de la sección final.

En relación a la posición del lecho, para ilustrar los resultados obtenidos se rectificó la elevación del lecho  $\eta$ , tal como se observa en la Figura 24. La elevación rectificada  $\eta'$  se obtuvo a partir de la ecuación:

$$\eta' = \eta_i - \eta \quad \text{Ec. 56}$$

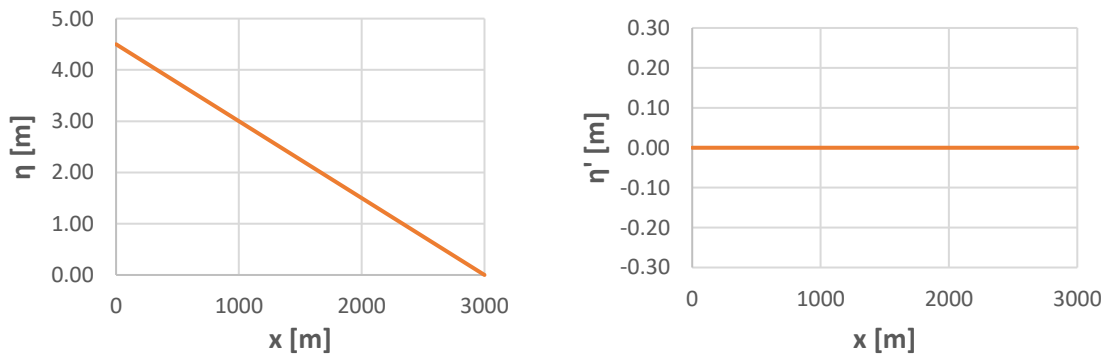


Figura 24.- Lecho inicial representado con (a)  $\eta$  y (b)  $\eta'$ .

A continuación se desarrollan las modelaciones realizadas.

### 3.4.2. Análisis de predominancia de tipo de transporte de sedimentos

Como primera instancia, se corrió el modelo conceptual desarrollado con condiciones de nivel del embalse  $y_f$  y caudal líquido unitario  $q$  variables, representando distintas condiciones de flujo posibles en la zona de estudio. En la Tabla 7 se presentan los resultados obtenidos.

Tabla 7.- Resultados obtenidos de  $q_b$  y  $q_s$  en la modelación para  $y_f$  y  $q$  variables.

$y_f$ [m]	$q$ [ $m^2/s$ ]							
	0.5	1	2	3	5	10	15	
1	1.8633e-07	7.3489e-05	0.0066	0.0214	0.0881	0.4463	1.0807	$q_s$
	0	9.7200e-06	0.0002	0	0.0046	0.0437	0.1608	$q_b$
2	1.0056e-09	1.7679e-07	6.3039e-05	0.0013	0.0244	0.1482	0.3965	$q_s$
	0	0	4.3149e-06	4.2546e-05	0.0003	0.0031	0.0119	$q_b$
3					0.0027	0.0588	0.1999	$q_s$
					5.0096e-05	0.0006	0.0025	$q_b$
4						0.0319	0.1053	$q_s$
						0.0002	0.0008	$q_b$
5							0.0807	$q_s$
							0.0003	$q_b$

Con los resultados obtenidos se pone en evidencia que en todos los casos predomina el transporte de fondo en suspensión frente al transporte de fondo. La relación entre los órdenes de magnitud de cada forma de transporte varía aproximadamente entre 1-3, de acuerdo a las condiciones de caudal líquido y nivel del embalse.

### 3.4.3. Análisis de sensibilidad de fórmulas empíricas

Luego, se corrió el modelo considerando una de las condiciones de crecida con transporte de sedimentos obtenida anteriormente para evaluar las diferencias entre los resultados obtenidos al aplicar distintas fórmulas empíricas. Las variables de entrada fueron  $D_{50} = 1.50 \text{ mm}$ ,  $y_f = 2 \text{ m}$ ,  $q = 5 \text{ m}^2/s$  y  $S_0 = 0.15 \%$  utilizando las fórmulas Wong & Parker (2006), Meyer-Peter & Muller (1948) y Parker (1979) para el cálculo del transporte de sedimento de fondo  $q_b$ . En la Figura 25 se presenta el resultado de la variación del lecho generada bajo las condiciones de modelación para cada uno de los autores. Allí se observa que la magnitud de la elevación del lecho es prácticamente igual (los resultados se encuentran solapados) y la zona de sedimentación se mantiene dentro de las mismas progresivas. En el transporte unitario representado en la Figura 26, se observa un cambio en la magnitud de la variable, pero el comportamiento es similar para todos los autores disminuyendo hacia aguas abajo.



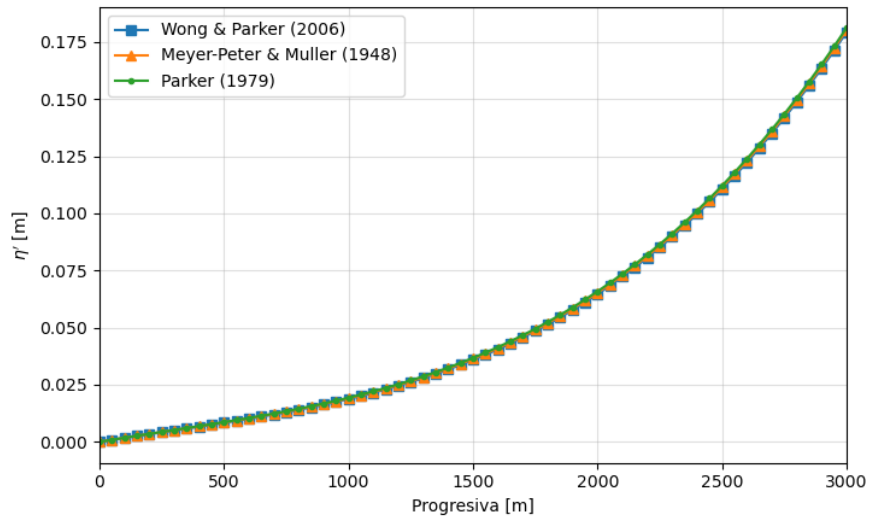


Figura 25.- Resultados de variación del lecho obtenidos en la modelación distintas fórmulas empíricas para calcular  $q_b$ .

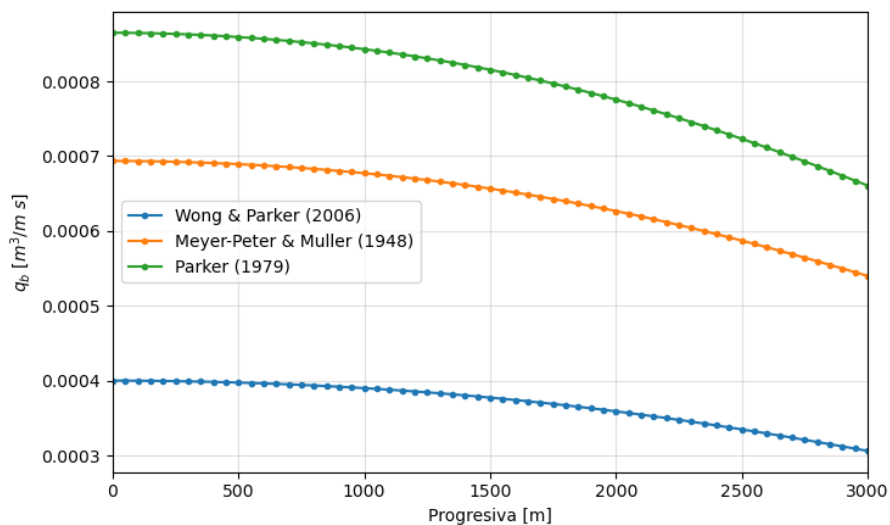


Figura 26.- Resultados de transporte unitario de sedimentos de fondo obtenidos en la modelación distintas fórmulas empíricas para calcular  $q_b$ .

Luego, se modeló utilizando las fórmulas para el cálculo de transporte de fondo en suspensión propuestas por García & Parker (1991) y Engelund & Fredsoe (1976). Los resultados de variación del lecho se presentan en la Figura 27 donde se observa que la zona de sedimentación es similar para ambos autores y la elevación del lecho se mantiene en el mismo orden de magnitud. Luego, en la Figura 28 se evidencia que con la ecuación de García & Parker se obtiene un transporte de sedimentos ligeramente mayor respecto a la ecuación de Engelund & Fredsoe, pero del mismo orden de magnitud.

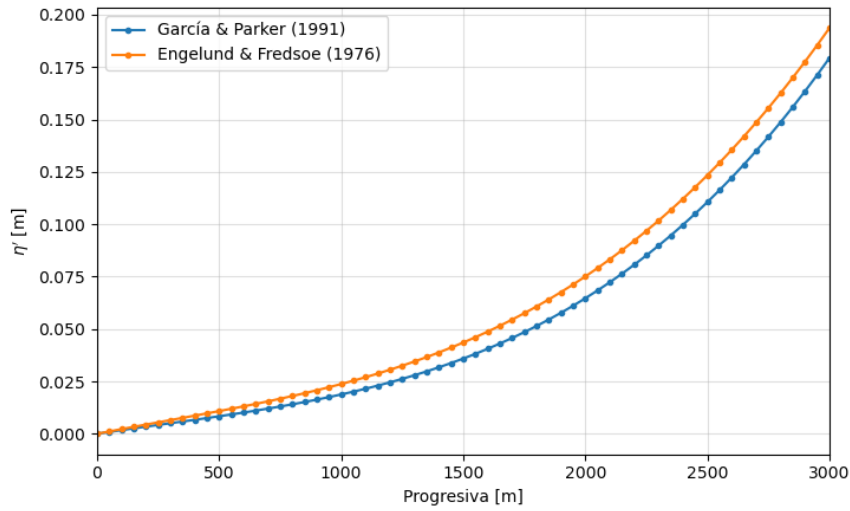


Figura 27.- Resultados de variación del lecho obtenidos en la modelación distintas fórmulas empíricas para calcular  $q_s$ .

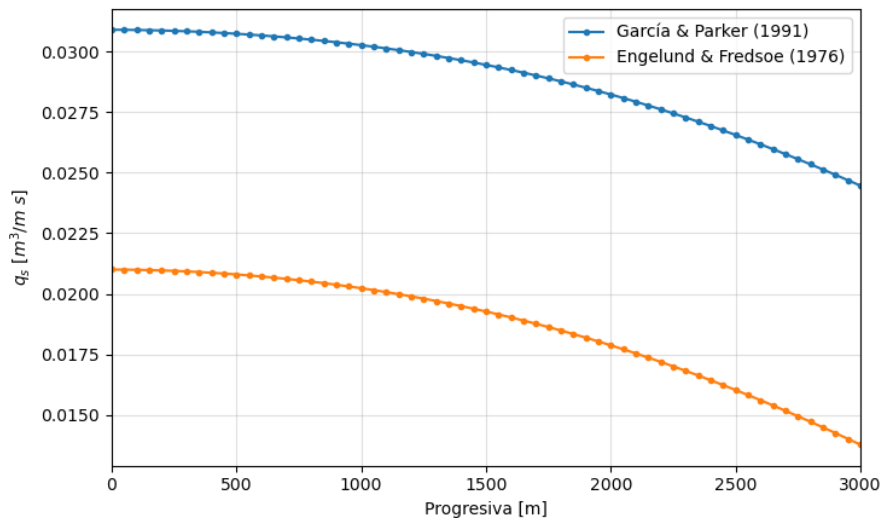


Figura 28.- Resultados de transporte unitario de sedimentos de fondo en suspensión obtenidos en la modelación distintas fórmulas empíricas para calcular  $q_s$ .

También se verificó para la condición desarrollada la suposición de condición de transporte en equilibrio ( $\frac{\partial q_s}{\partial x} = 0$ ) y se observaron variaciones del caudal sólido máximas del orden del 1% para un  $\Delta x = 50 \text{ m}$ .

Finalmente, cabe destacar que las fórmulas para el cálculo del transporte de sedimentos de fondo en suspensión presentan diferentes consideraciones teóricas. Engelund & Fredsoe (1976) considera que el transporte de sedimentos de fondo es nulo cuando  $\theta_s < 0.06 - \frac{\beta p \pi}{6}$ , en la Ec. 44. En cambio, con García & Parker (1991) bajo dichas condiciones se obtiene un valor distinto de cero. En consecuencia, las fórmulas presentan diferencias marcadas para condiciones del flujo con baja

energía. Luego, cuando el flujo tiene la suficiente energía como para transportar volúmenes de sedimentos considerables, las fórmulas dan del mismo orden de magnitud.

#### 3.4.4. Resultados obtenidos variando el nivel del embalse

Considerando como valores fijos  $D_{50} = 1.50 \text{ mm}$ ,  $q = 1 \text{ m}^2/\text{s}$  y  $S_0 = 0.15 \%$ , la ecuación de García & Parker (1991) para estimar el transporte de sedimentos en suspensión y la ecuación de Wong & Parker (2006) para el transporte de fondo, se modelaron cuatro condiciones del flujo al variar el tirante  $y_f$ :

- Escalón en el lecho aguas abajo, representando actividad de extracción de áridos y nivel del embalse bajo ( $y_f = 0.50 \text{ m}$ )
- Nivel del embalse bajo con cota 32 m, donde el caudal no es lo suficientemente alto para que se genere el remanso y el tirante final es igual al tirante normal ( $y_f = 0.80 \text{ m}$ )
- Nivel medio del embalse con cota 33.5 m ( $y_f = 2 \text{ m}$ )
- Nivel de cota del labio vertedero 35.3 m ( $y_f = 3.8 \text{ m}$ ).

La variación del lecho obtenida se presenta en la Figura 29.

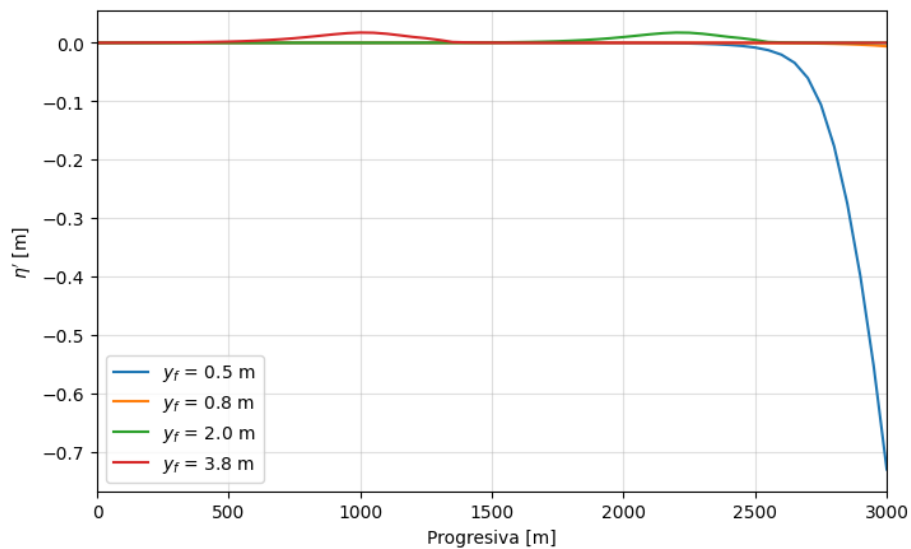


Figura 29.- Resultados de variación del lecho obtenidos en la modelación con  $y_f$  variable.

Además, a modo de comprobación se graficó la variación de la tensión de corte  $\tau$  a lo largo del área de estudio. Tal como se observa en la Figura 30, el comportamiento del lecho es consistente con lo obtenido en la Figura 29. La tensión de corte es mayor en las zonas donde hay erosión y disminuye en las zonas de sedimentación.

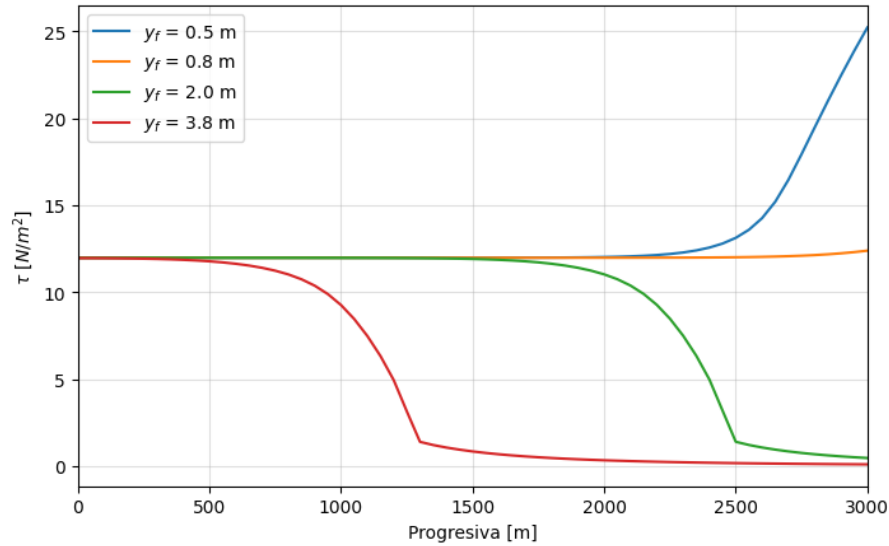


Figura 30.- Resultados de variación de la tensión de corte obtenidos en la modelación con  $y_f$  variable.

A continuación, tal como se observa en la Tabla 8, se calcularon los valores de  $R_{ep}$  y  $\theta_T$  asociados a los resultados de la modelación con  $y_f$  variable en las progresivas 3000, 2500, 1500 y 500.

Luego, para cada  $y_f$  se ingresó con las variables calculadas al ábaco de Shields-Parker (García, 2007). En la Figura 31 se observan los resultados obtenidos para la modelación con  $y_f = 0.5 m$  y en la Figura 32 con  $y_f = 0.8 m$ , donde en todas las progresivas analizadas hay transporte de sedimentos y se generan dunas. En la Figura 33 se observan los resultados obtenidos para la modelación con  $y_f = 2 m$ , donde el lecho es fijo en la progresiva 3000 y hay transporte de sedimentos con dunas para el resto de las ubicaciones. Finalmente, en la Figura 34 se muestra que para un  $y_f = 3.8 m$  solo hay transporte de sedimentos y dunas en la progresiva 500. Ello logra ilustrar la importante influencia del nivel del embalse en las condiciones de transporte del área de estudio.

Tabla 8.- Valores de  $R_{ep}$  y  $\tau^*$  obtenidos en las progresivas 2500, 1500 y 500 en la modelación con  $y_f$  variable.

Progresiva	$R_{ep}$	$\theta_T$			
		$y_f = 0.5 m$	$y_f = 0.8 m$	$y_f = 2 m$	$y_f = 3.8 m$
3000	229	1.02	0.49	0.02	0.00
2500	229	0.52	0.49	0.06	0.01
1500	229	0.49	0.49	0.48	0.03
500	229	0.49	0.49	0.49	0.48

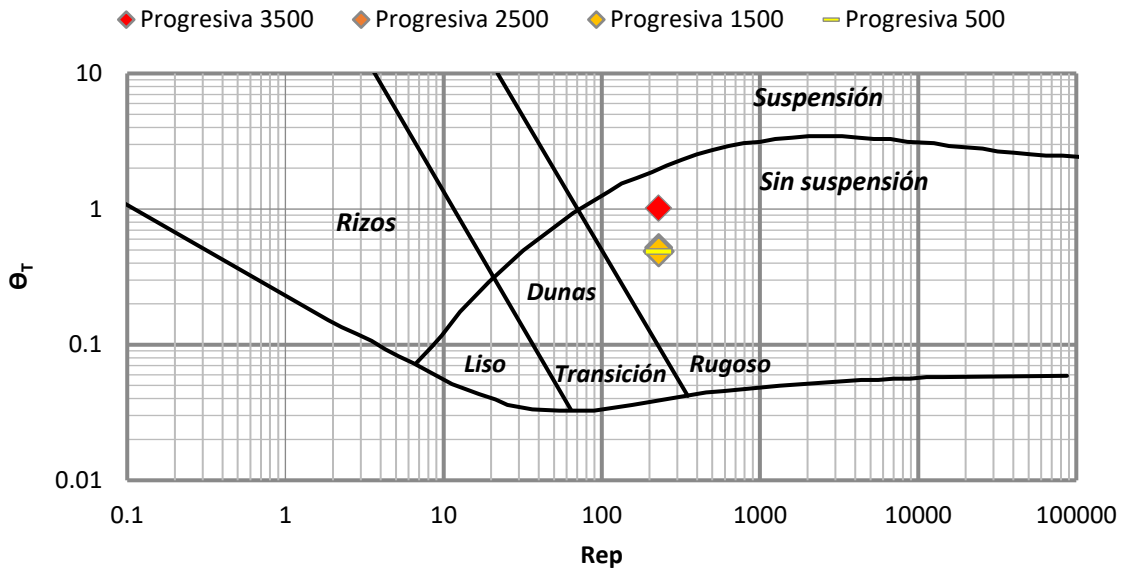


Figura 31.- Ábaco de Shields-Parker con resultados de la modelación en distintas progresivas con  $y_f = 0.5 \text{ m}$

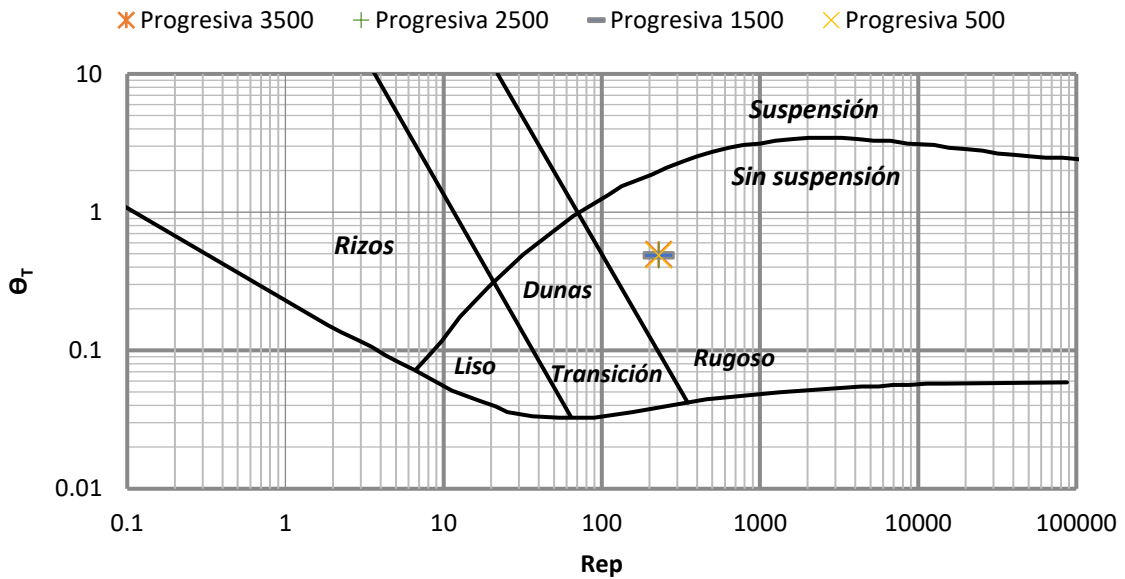


Figura 32.- Ábaco de Shields-Parker con resultados de la modelación en distintas progresivas con  $y_f = 0.8 \text{ m}$

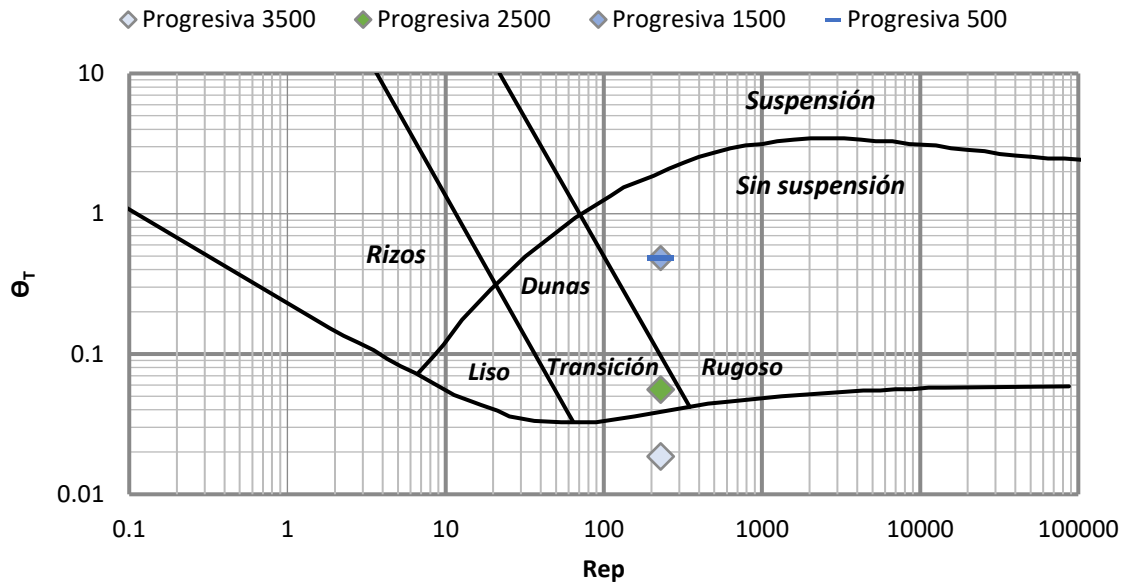


Figura 33.- Ábaco de Shields-Parker con resultados de la modelación en distintas progresivas con  $y_f = 2$  m

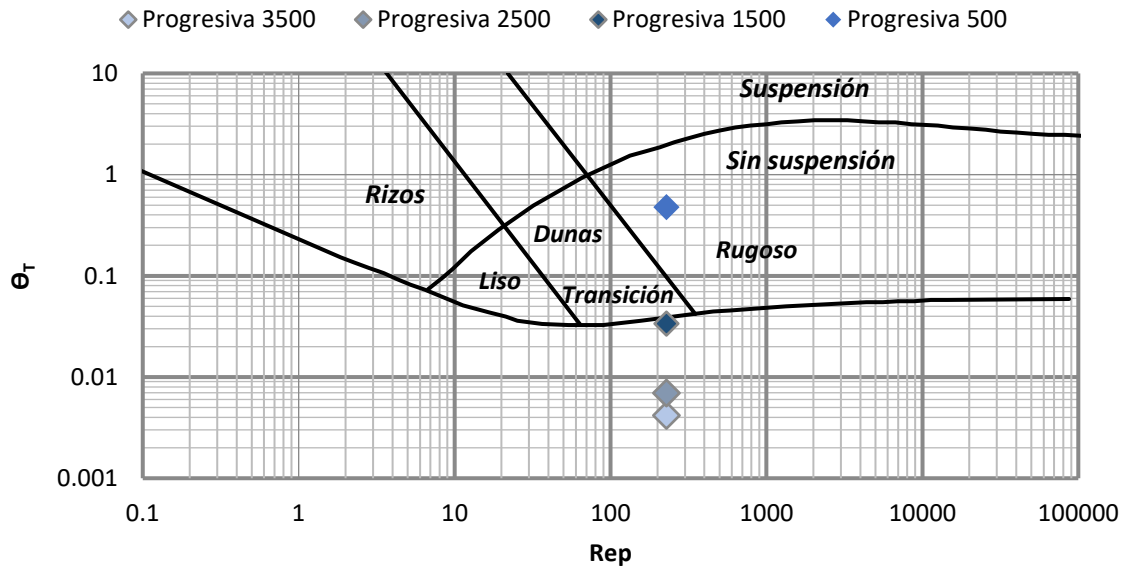


Figura 34.- Ábaco de Shields-Parker con resultados de la modelación en distintas progresivas con  $y_f = 3.8$  m

Además, es posible graficar la variación de la relación entre la velocidad de corte y la velocidad media del flujo ( $u^*/U_{med}$ ) a lo largo de  $x$ , tal como se observa en la Figura 35. El rango de variación de dicha relación coincide con lo propuesto por la bibliografía (García, 2007).

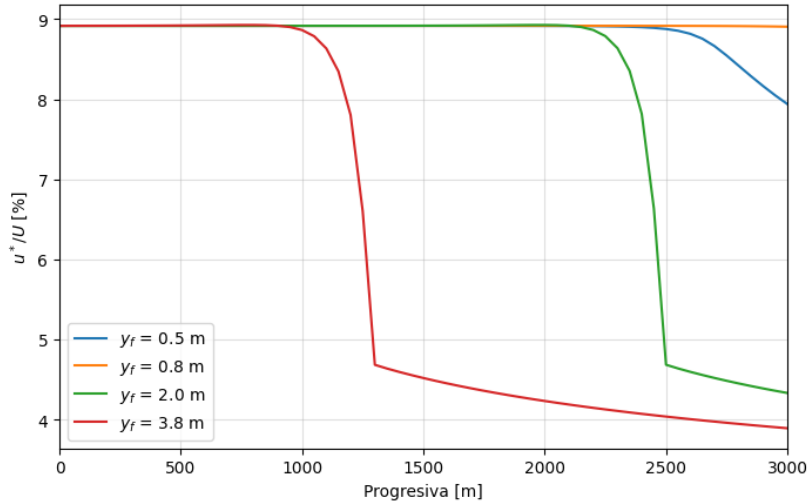


Figura 35.- Relación entre la velocidad de corte y la velocidad media del flujo a lo largo de  $x$ , para  $q = 1 \text{ m}^2/\text{s}$  con  $y_f$  variable.

Este gráfico es válido para las condiciones de modelación mencionadas anteriormente ( $D_{50} = 1.50 \text{ mm}$ ,  $S_0 = 0.15 \%$  y  $q = 1 \text{ m}^2/\text{s}$ ) y permite estimar a partir de un dato de  $U_{med}$  medido en el campo la  $u^*$  a través de la Ec. 34 en una progresiva dada. Luego, calculando  $R_{ep}$  con la Ec. 40 y  $\theta_T$  a partir de la Ec. 27 y la Ec. 48 es posible determinar la ausencia o presencia de transporte de sedimentos ingresando al ábaco de Shields-Parker.

Finalmente, en la Figura 38 se presentan los resultados de transporte total unitario de sedimentos bajo distintos escenarios de  $y_f$ . Allí se puede observar que para niveles altos del embalse  $q_T$  tiende a cero hacia aguas abajo, y para niveles bajos el transporte de sedimentos aumenta.

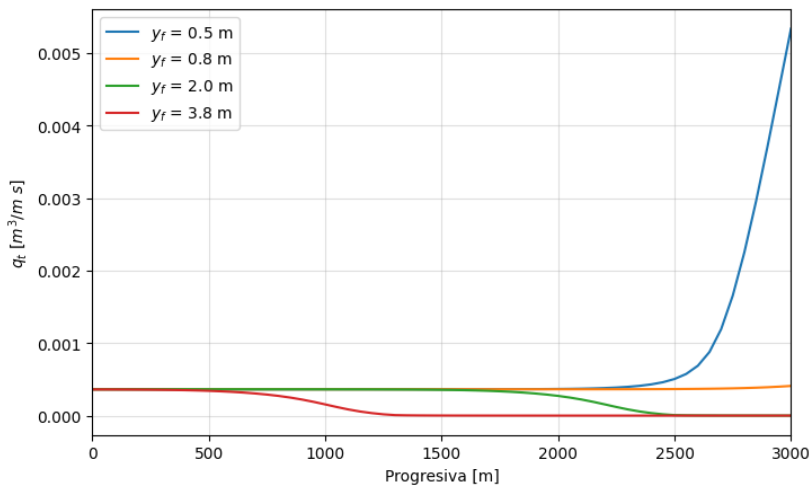


Figura 36.- Resultados de transporte total unitario de sedimentos obtenido en la modelación con  $y_f$  variable.

### 3.4.5. Resultados obtenidos variando el tamaño de las partículas de sedimento de fondo

Considerando como valores fijos  $y_f = 2 \text{ m}$ ,  $S_0 = 0.15 \%$  y  $q = 1 \text{ m}^2/\text{s}$ , la ecuación de García & Parker (1991) para estimar el transporte de sedimentos en suspensión y Wong & Parker (2006) para el transporte de fondo, se realizó una modelación variando el diámetro de sedimento esperado de acuerdo a las características del San Antonio. Se consideraron  $D_{50_1} = 1 \text{ mm}$ ,  $D_{50_2} = 1.5 \text{ mm}$  y  $D_{50_3} = 2 \text{ mm}$  y se obtuvo la variación del lecho para cada caso representada en la Figura 37.

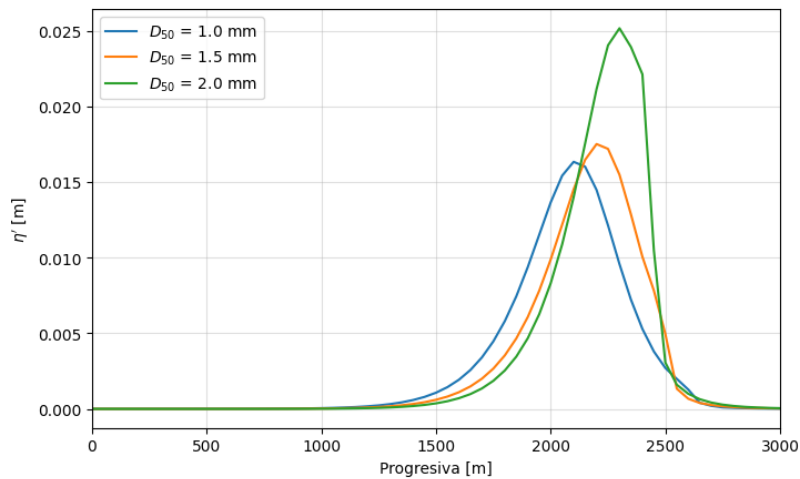


Figura 37.- Resultados de variación del lecho obtenidos en la modelación con  $D_{50}$  variable.

Además, se representa en la Figura 38 la variación en el transporte de sedimento total unitario a lo largo del cauce para los distintos  $D_{50}$ . Allí se observa que a mayor diámetro medio, mayor es el transporte de sedimentos que se genera.

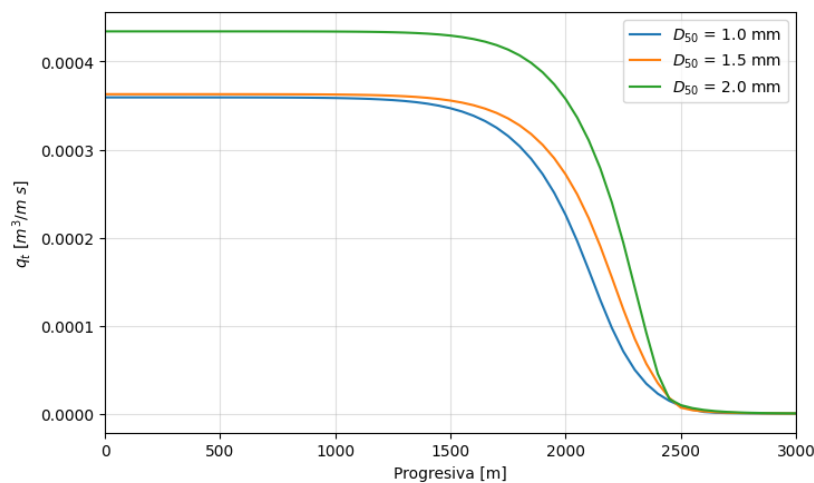


Figura 38.- Resultados de transporte total unitario de sedimentos obtenido en la modelación con  $D_{50}$  variable.

### 3.4.6. Resultados obtenidos variando la pendiente de fondo del lecho

En este caso se buscó determinar la influencia de la topografía del lecho representada por la pendiente de fondo. Se modelaron tres pendientes: una actual que se estimó como  $S_0 = 0.15 \%$ ,



una previa a los procesos de sedimentación generados por efecto del embalse a lo largo de su vida útil de  $S_0 = 0.20 \%$ , y una pendiente futura producto de sedimentación aguas abajo de  $S_0 = 0.10 \%$ . Se consideraron como valores fijos  $y_f = 2 \text{ m}$ ,  $D_{50} = 1.50 \text{ mm}$  y  $q = 1 \text{ m}^2/\text{s}$ , la ecuación de García & Parker (1991) para estimar el transporte de sedimentos en suspensión y Wong & Parker (2006) para el transporte de fondo.

En la Figura 39 se presenta la variación del lecho obtenida en cada uno de los casos analizados, evidenciando que a mayor pendiente mayor es la sedimentación producida y más aguas abajo ocurre la misma.

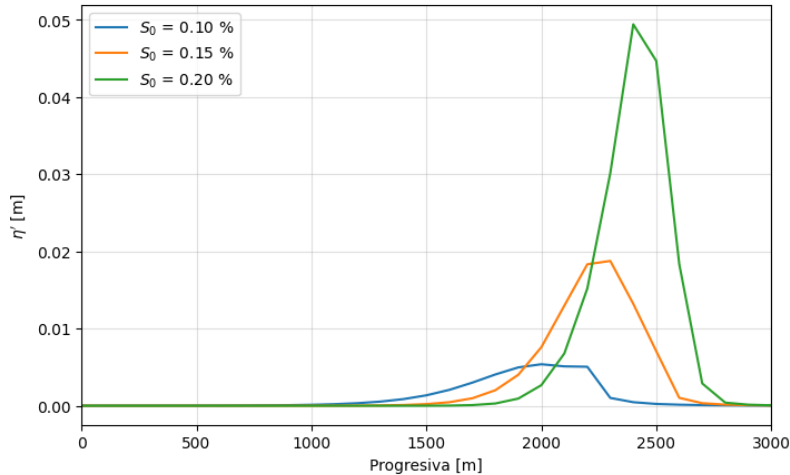


Figura 39.- Variación del lecho obtenida en la modelación con  $S_0$  variable.

Luego, en la Figura 40 se representa la variación en el transporte de sedimento total unitario a lo largo del cauce para los distintas pendientes del lecho. Se puede observar que al aumentar  $S_0$  aumenta el transporte de sedimentos generado.

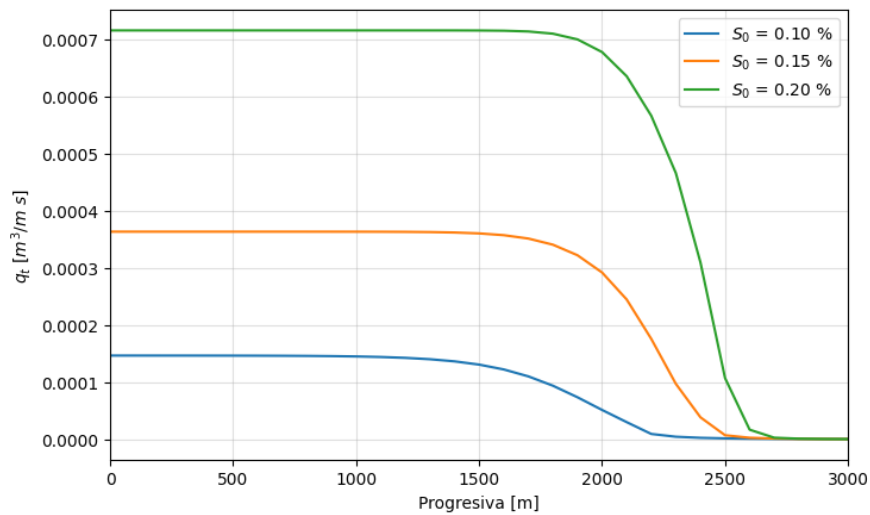


Figura 40.- Resultados de transporte total unitario de sedimentos obtenidos en la modelación con  $S_0$  variable.

### 3.4.7. Resultados obtenidos variando las condiciones hidrológicas e hidráulicas

Luego, se modelaron distintas condiciones hidrológicas e hidráulicas para evaluar la influencia del caudal por unidad de ancho. Como dicha variable se encuentra asociado al tirante, se plantearon tres valores de  $q$ , representando condiciones de estiaje y dos crecidas ordinarias de distinta magnitud, tal como se observa en la Tabla 9. Para cada condición, se consideraron situaciones de embalse bajo, medio y a nivel de cota vertedero, considerando una pendiente de fondo fija de como  $S_0 = 0.15 \%$  y un  $D_{50} = 1.50 \text{ mm}$ . Además, se utilizó la ecuación de García & Parker (1991) para estimar el transporte de sedimentos en suspensión y la ecuación de Wong & Parker (2006) para el transporte de fondo.

Tabla 9.- Condiciones de modelación al variar  $y_f$  y  $q$ .

Condición	$q \text{ [m}^2/\text{s]}$	$y_f \text{ [m]}$		
1. Estiaje	0.35	0.5	0.8	2 3.8
2. Crecida ordinaria 1	1.00	0.5	0.8	2 3.8
3. Crecida ordinaria 2	2.00	0.8	2	3.8

A continuación, en la Figura 41 se presentan los resultados para el escenario de nivel bajo del embalse generado por una hipotética extracción de áridos aguas abajo ( $y_f = 0.50 \text{ m}$ ). No se modeló la condición 3 con un  $y_f = 0.5 \text{ m}$  debido a que el tirante crítico para la condición de caudal presentada es  $y_c = 1.71 \text{ m}$  y en consecuencia con dicho  $y_f$  el flujo es supercrítico. Esto no suele ocurrir en los ríos naturales, que solo se comportan como supercríticos en espacios muy pequeños, donde tienden a erosionar rápidamente y vuelven a comportarse como subcríticos.

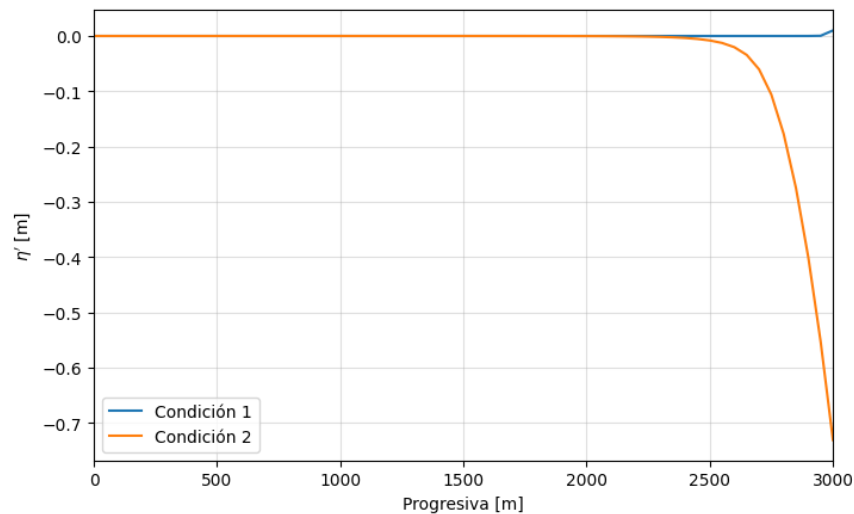


Figura 41.- Variación del lecho bajo las condiciones 1 y 2 en el escenario  $y_f = 0.50 \text{ m}$ . La condición 3 no se representa porque es supercrítica.

En la Figura 43 se grafican los resultados obtenidos para el escenario de  $y_f = 0.8 \text{ m}$  (que representa un nivel bajo del embalse), en la Figura 42 para el escenario de niveles medios del embalse ( $y_f = 2 \text{ m}$ ) y en la Figura 44 para nivel de cota vertedero ( $y_f = 3.8 \text{ m}$ ).

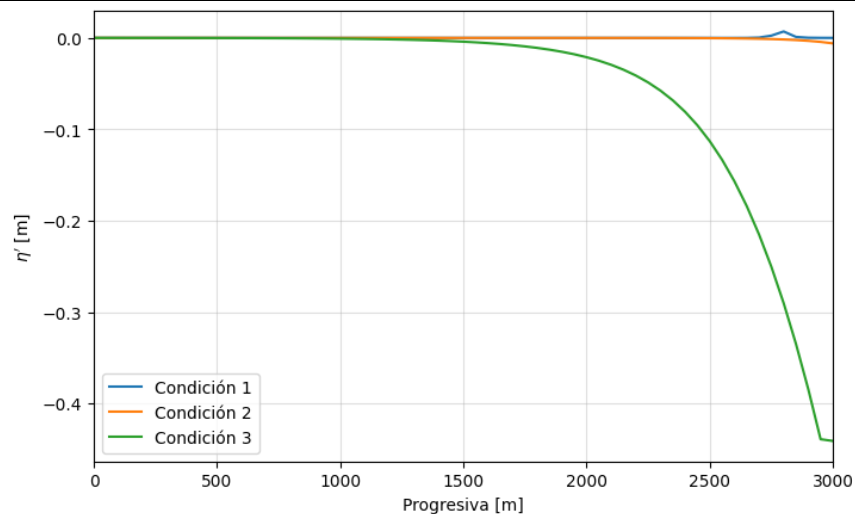


Figura 42.- Variación del lecho bajo las distintas condiciones, en el escenario  $y_f = 0.8$  m.

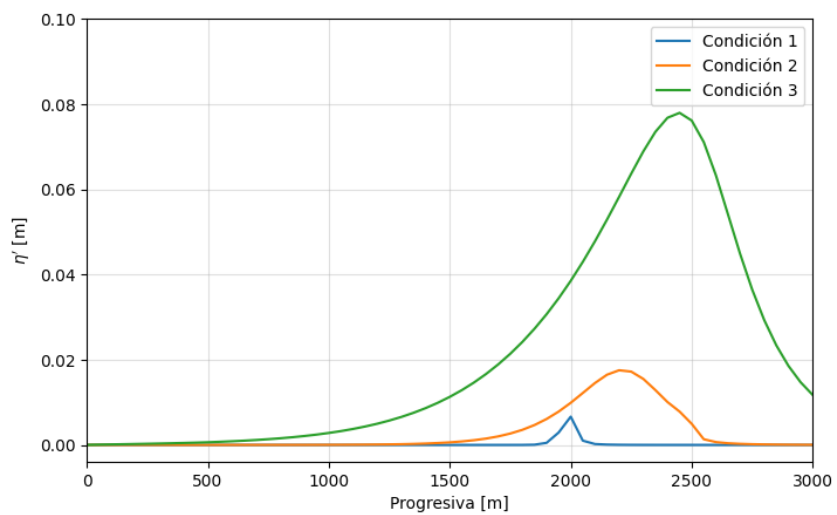


Figura 43.- Variación del lecho bajo las distintas condiciones, en el escenario  $y_f = 2$  m.

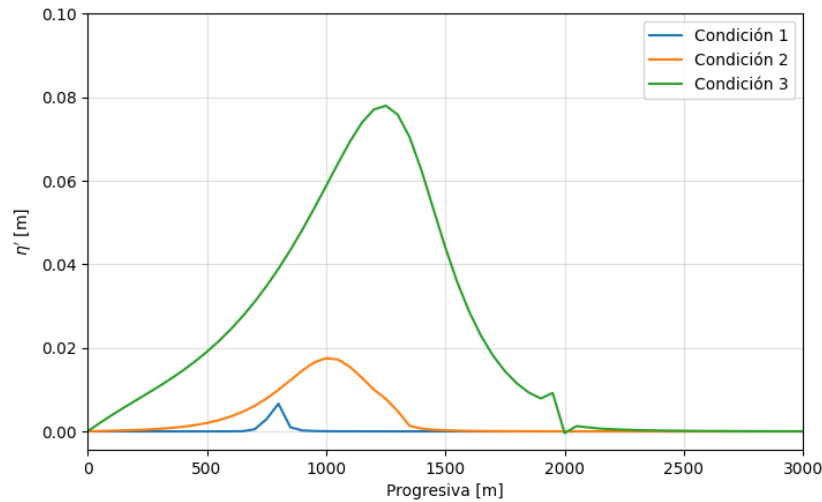


Figura 44.- Variación del lecho bajo las distintas condiciones, en el escenario  $y_f = 3.8$  m.

### 3.5. Análisis de resultados y discusión

Como ya se mencionó anteriormente, para el desarrollo del modelo conceptual se considera que aguas arriba de la zona modelada el flujo es uniforme, el caudal líquido es constante y el transporte de sedimentos se encuentra en equilibrio. El embalse genera una curva de remanso y a medida que aumenta su nivel disminuyen las velocidades, generándose así un proceso de sedimentación, elevando el lecho. Al cambiar el fondo, cambia la hidrodinámica y esto genera un cambio en el transporte de sedimentos, modificando el fondo. Este proceso se modeló a partir de la ecuación de Exner y consideraciones de flujo cuasi permanente utilizando una programación con Python desarrollada a tal fin, y presenta algunas simplificaciones, por lo que los resultados obtenidos pueden utilizarse solo como estimaciones los procesos que existen en el sitio de estudio.

Para versiones posteriores del modelo, se propone determinar de manera detallada el coeficiente de forma  $r_o$ , considerar que el lecho al inicio del evento puede no ser liso y presentar formas de fondo o zonas de sedimentación de erosión.

En este modelo conceptual se considera que el flujo es a régimen permanente en cuanto al caudal que ingresa al tramo de estudio, pero las variaciones del lecho generadas por los procesos de transporte de sedimentos modifican la hidrodinámica del flujo. En versiones posteriores, se podría trabajar con una variación del caudal con el tiempo, a partir de incorporar el hidrograma de la crecida modelada. Además, se podría calcular el transporte de fondo, de fondo en suspensión y transporte total utilizando fórmulas desarrolladas por otros autores. En esta instancia, se utilizaron ecuaciones de Wong & Parker (2006), Meyer-Peter & Muller (1948) y Parker (1979) para el cálculo del transporte de sedimento de fondo  $q_b$  y García & Parker (1991) y Engelund & Fredsoe (1976) para el transporte de sedimento de fondo en suspensión  $q_b$ . Los resultados dieron del mismo orden de magnitud, y las zonas de sedimentación y erosión del lecho fueron coincidentes entre los autores.

Respecto a la aplicación del modelo en el río San Antonio, se obtuvo que para las mayores crecidas simuladas (en régimen subcrítico) el transporte de sedimentos de fondo en suspensión predomina frente al transporte de fondo, variando hasta en 3 órdenes de magnitud. Los efectos más importantes de sedimentación y erosión con niveles del embalse bajos o medios se dan en el tramo

comprendido entre las progresivas 1500-3000 m, es decir entre la zona del Parque La Quinta y el Puente Cassaffousth. Cuando el nivel del embalse llega al labio del vertedero y ocurre una crecida, los efectos se trasladan hacia aguas arriba, en la zona del Balneario La Hoya. Ello se puede relacionar con el manejo del embalse, actividad en la cual se debería tener en cuenta no solo la cantidad de agua sino también su calidad y la cantidad de sedimentos. Resulta necesario determinar cómo el manejo afecta a la sedimentación en el embalse ya que como se mencionó anteriormente, las zonas de sedimentación van a variar de acuerdo a la cota de espera que presente el embalse ante un evento.

Las variables dominantes en la dinámica del transporte de sedimentos en la zona de estudio son el nivel del embalse, las condiciones hidrológicas e hidráulicas (caudal y tirante o velocidad), la topografía (definida por la pendiente de fondo) y las características del sedimento transportado (representado por el diámetro característico). Conociendo estas variables y aplicando el modelo conceptual desarrollado es posible definir la presencia o ausencia del transporte de sedimentos y formas de fondo a través del ábaco de Shields-Parker, definir zonas de erosión y sedimentación, estimar la variación del transporte de sedimentos unitario a lo largo del cauce, entre otras aplicaciones.

Las simulaciones realizadas muestran que la erosión, y en consecuencia el ingreso de sedimentos al embalse, ocurre en condiciones de niveles muy bajos del embalse (tirante normal o tirante menor generado por extracciones de áridos de gran magnitud) o en crecidas significativas, y su efecto es más marcado de acuerdo a la magnitud del evento. Cuando el embalse presenta niveles bajos y ocurre una crecida, hay transporte de sedimentos en todo el tramo de estudio y se generan formas de fondo (dunas). Luego, al aumentar el nivel del embalse, la zona donde se transporta sedimento se traslada hacia aguas arriba. Además, los caudales bajos no generan una variación en el lecho significativa. Cabe destacar que si bien las variaciones en el lecho son pequeñas (del orden de los cm), son las estimadas para un único evento de crecida con una duración de 4 hs, y luego debería extenderse a los múltiples eventos que suceden a lo largo del año hidrológico en la zona de estudio.

Respecto a la topografía, un aumento en la pendiente del lecho del cauce implica un incremento del transporte de sedimentos y de la sedimentación aguas abajo.

La característica del sedimento influye en las zonas de sedimentación y la cantidad de sólido transportado, ya que a medida que se reduce el tamaño del grano la sedimentación ocurre más aguas abajo y, además, el transporte de sedimentos es menor.

## Capítulo 4: Metodología utilizada para el relevamiento de campo de variables que controlan el transporte de sedimentos

### 4.1. Introducción

En el capítulo 3 se determinaron las variables más importantes que controlan el transporte de sedimentos a relevar en la zona de estudio. Estas son: las condiciones hidrológicas (determinadas a su vez por procesos hidrometeorológicos) e hidráulicas, el nivel del embalse, la topografía y las características del sedimento. Las condiciones hidrológicas e hidráulicas se encuentran vinculadas y se analizarán en conjunto, ya que las condiciones hidrológicas generan variaciones en el nivel del embalse y luego estos cambios definen las condiciones hidráulicas del río San Antonio en la zona de estudio.

Se determinó con el modelo conceptual que los efectos más importantes de sedimentación y erosión con niveles del embalse bajos o medios se dan en el tramo comprendido entre el Parque La Quinta y el Puente Cassaffouth. Consecuentemente se trabajó allí en campo, dividiendo el área de estudio en tres zonas, tal como se puede observar en la Figura 45.

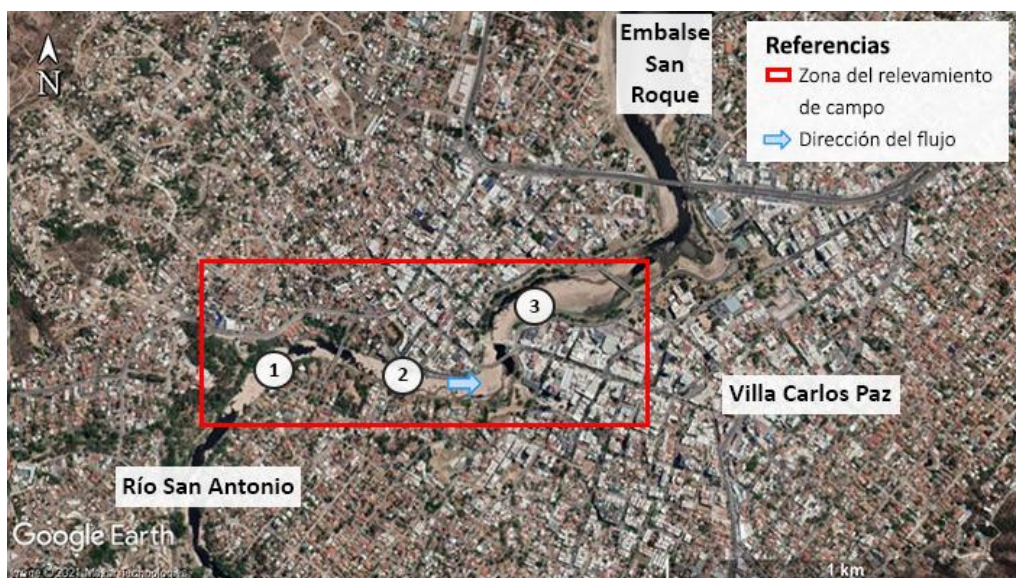


Figura 45.- Zonas relevadas en campo en el río San Antonio.

A continuación, se presenta la metodología utilizada para el relevamiento de cada una de las variables que controlan el transporte de sedimentos durante los eventos de crecidas.

### 4.2. Relevamiento de condiciones hidrometeorológicas, hidrológicas e hidráulicas

#### a. Condiciones hidrometeorológicas

La variable hidrometeorológica relevada fue la precipitación (lluvia) en la cuenca de aporte del embalse San Roque. Para ello se recopiló información de estaciones oficiales del INA-CRSA, APRHi, MAGyA, junto a datos de estaciones meteorológicas de bajo costo y pluviómetros de la red MATTEO. Las mismas se presentan en la Figura 46.



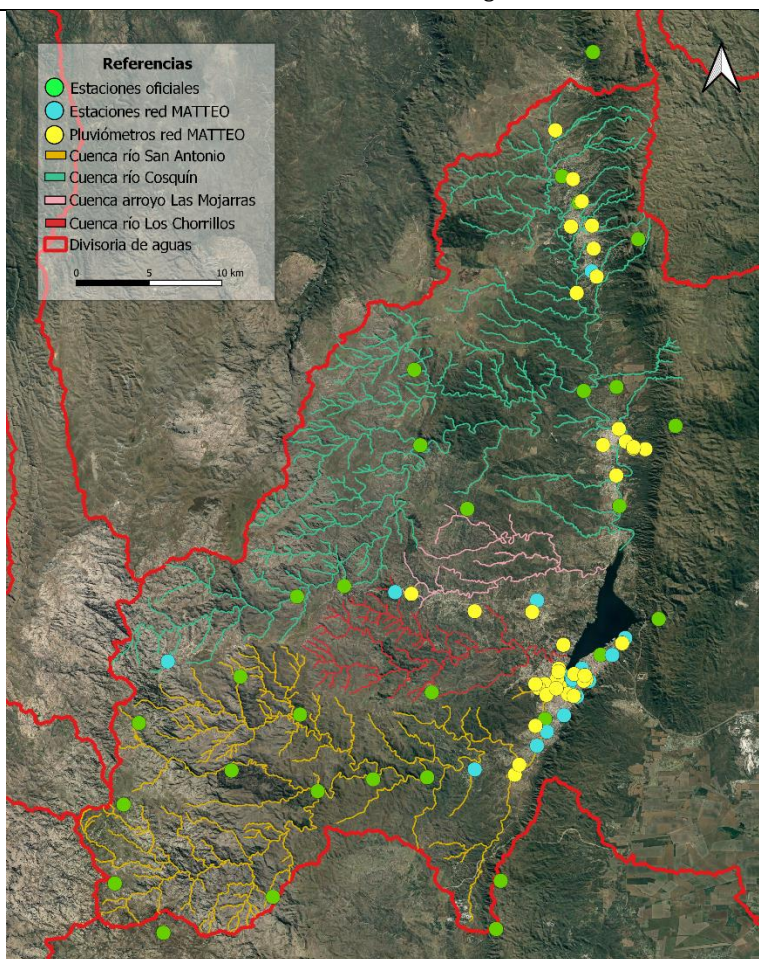


Figura 46.- Estaciones meteorológicas oficiales y de la red MATTEO (estaciones meteorológicas y pluviómetros) utilizadas.

Las estaciones oficiales del INA-CRSA se ubican en el Camino del Cuadrado, Pampa de Olaen, Villa Giardino, Villa Caeiro, Las Junturas, Santa Rosa, Pan de Azúcar, Barrio El Canal, Barrio Santa Rita, COSAG, Santo Tomás, Puesto Pereyra (Los Gigantes), La Casita, Cañada Larga (Copina), El Galón, Confluencia El Cajón, Puesto Garay, Confluencia Malambo, Las Ensenadas, La Hoyada, La Quebrada, El Cajón, San Bernardo y Observatorio Bosque Alegre. De la APRHi hay estaciones instaladas en Huerta Grande, La Cumbre, Las Mojarras, Los Chorrillos y Los Chorrillos Sur, mientras que las del MAYG se ubican en Cosquín-Molinari y Huerta Grande.

Los pluviómetros y estaciones meteorológicas automáticas de la red MATTEO están distribuidos en escuelas, organismos y residencias particulares. Los mismos se detallan en la Tabla 10.

Tabla 10.- Constituyentes de la red MATTEO en Punilla.

Escuela/Organismo/Residente	Localidad - Barrio	Instrumento
Instituto Bilingüe Dante Alighieri	Villa Carlos Paz	Estación meteorológica
Marcela Bustos	Villa Carlos Paz	Estación meteorológica
Familia Garcia Berra	Villa Carlos Paz	Estación meteorológica
Escuela Carlos Nicandro Paz	Villa Carlos Paz	Estación meteorológica

Capítulo 4: Metodología utilizada para el relevamiento de campo de variables que controlan el transporte de sedimentos – Tesis de maestría Ing. Rocío Bianchi

IPEM 190 Dr. Pedro Carande Carro	Villa Carlos Paz	Estación meteorológica
IPEM 316 “Eva Duarte de Perón”	Villa Carlos Paz	Estación meteorológica
Escuela José de San Martín	Villa Carlos Paz	Estación meteorológica
Instituto Industrial Cristo Obrero	Villa Carlos Paz	Estación meteorológica
Colegio Costa Azul	Villa Carlos Paz	Estación meteorológica
Familia Catalini-Monsu	Villa Carlos Paz	Estación meteorológica
Municipalidad de Villa Carlos Paz	Villa Carlos Paz	Estación meteorológica
Aula Ambiental de Villa Carlos Paz	Villa Carlos Paz	Estación meteorológica
Centro Educativo Terapéutico San Francisco de Asís	Villa Carlos Paz	Estación meteorológica y pluviómetro
Escuela Isla de Los Estados	Villa Carlos Paz	Pluviómetro
Familia Ravagli Caceres	Villa Carlos Paz	Pluviómetro
Santiago Berioi	Villa Carlos Paz - B° Jose Muñoz	Pluviómetro
Familia Giachero	Villa Carlos Paz	Pluviómetro
Familia Abed Hernandez	Villa Carlos Paz - B° Jose Muñoz	Pluviómetro
Familia Berra Vannay	Villa Carlos Paz - B° Centro Norte – Cucú	Pluviómetro
Familia Garcia Papa	Villa Carlos Paz	Pluviómetro
Familia Herrero Díaz	Villa Carlos Paz	Pluviómetro
Familia Resolani	Villa Carlos Paz	Pluviómetro
Bruno Menegozzo	Villa Carlos Paz	Pluviómetro
Franco Strappazon	Villa Carlos Paz	Pluviómetro
Familia Bustamante	Villa Carlos Paz - B° Miguel Muñoz	Pluviómetro
Familia Bernardi-Paintner	Villa Carlos Paz - B° Las Malvinas	Pluviómetro
Laura Colladón	Villa Carlos Paz - B° El Fantasio	Pluviómetro
Carlos Nieto	Villa Carlos Paz - La Quinta Cuarta Sección	Pluviómetro
Lucia Abed	Villa Carlos Paz	Pluviómetro
Sofia Resumi	Villa Carlos Paz – Costa Azul	Pluviómetro
Santa Cruz Lago	Villa Carlos Paz	Estación meteorológica
Escuela Mercedes San Martín De Balcarce	Villa Icho Cruz	Estación meteorológica
Hotel Diferencial Dante Delich	San Antonio de Arredondo	Estación meteorológica
Santino Llavil y Familia	San Antonio de Arredondo	Pluviómetro
Flia Prandi - Varillas	San Antonio de Arredondo	Pluviómetro
Guzmán María Mercedes	Santa Cruz del Lago	Pluviómetro
Esc. Nuestra Señora del Valle	Los Gigantes	Estación meteorológica
Esc. Ricardo Rojas	Tanti – El Durazno	Estación meteorológica
Flia. Navarro	Tanti	Pluviómetro
Flia. Liagre	Tanti	Pluviómetro



Nicolás Luciano Ferraretto	Santa María de Punilla	Pluviómetro
Esc. Juan Bautista Bustos Anexo	Cosquín	Pluviómetro
Flia. Viglietti	Cosquín	Pluviómetro
Flia. Toloza	Cosquín	Pluviómetro
Flia. Llanes	Cosquín	Pluviómetro
Flia. Pérez	Cosquín	Pluviómetro
Flia. Rosa Ceballos	Cosquín	Pluviómetro
Veronica Watralik	Cosquín	Pluviómetro
Esc. Capitán Juan de Zevallos	Valle Hermoso	Estación meteorológica
Flia. Bianchi	Valle Hermoso	Pluviómetro
Valeria Becerra	Valle Hermoso	Pluviómetro
Escuela Especial Dr. Emilio Meincke	La Falda	Pluviómetro
Sofía Pellegrini	La Falda	Pluviómetro
Raúl Foresta	La Falda	Pluviómetro
Francisco Lopez	Huerta Grande	Pluviómetro
Gabriel Farri	Villa Giardino	Pluviómetro
Eugenia Pederer	Villa Giardino	Pluviómetro

La cuenca presenta registros históricos de precipitaciones. A modo de ejemplo, se consideraron registros históricos de dos de las estaciones del INA CRSA ubicadas en la cuenca alta (El Galpón, 500) y cuenca baja del río San Antonio (Barrio El Canal, 600). Asumiendo que con lluvias mayores a 20 mm se generan crecidas en el río San Antonio, se calculó la cantidad de números de días con lluvia  $\geq 20$  mm y la precipitación mensual promedio, tal como se observa en la Tabla 11.

Tabla 11.- Análisis de precipitaciones históricas en las estaciones 500 y 600 INA CRSA.

Estación	500	600	500	600
Mes	Promedio mensual [mm]		Número de días con lluvia $\geq 20$ mm	
Enero	130	105	2	2
Febrero	144	108	3	2
Marzo	114	79	2	1
Abril	58	53	1	1
Mayo	26	18	0	0
Junio	8	8	0	0
Julio	8	7	0	0
Agosto	8	11	0	0
Septiembre	24	23	0	0
Octubre	60	53	1	1
Noviembre	121	96	2	2
Diciembre	165	98	3	1
<b>Total Anual</b>	<b>814</b>	<b>637</b>	<b>13</b>	<b>9</b>

#### b. Condiciones hidrológicas

Las variables hidrológicas relevadas fueron el caudal líquido del río San Antonio y el nivel del embalse San Roque.

Los registros de caudal líquido disponible se clasifican entre registros provenientes de mediciones cuasi-instantáneas y datos continuos. Los datos continuos están representados por los hidrogramas del río San Antonio y del caudal total ingresado al embalse provistos por APRHi, generados a partir de datos de sensores de nivel instalados en los ríos San Antonio y Cosquín y el Dique San Roque que registran cada 10 minutos. Con dichos datos y una curva Nivel-Caudal calibrada, se generan los hidrogramas de los ríos tributarios al San Roque y se realiza el manejo del embalse a tiempo real.

Las mediciones cuasi-instantáneas de caudal se desarrollaron en la sección presentada en la Figura 47 (ubicada en la zona 2 del río San Antonio) con un Perfilador de Corriente Acústico Doppler (ADCP en sus siglas en inglés).



Figura 47.- Ubicación de la sección de aforo con ADCP en la zona 2 del río San Antonio.

El ADCP permite realizar mediciones de alta resolución espacial y temporal del flujo. El Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés) utiliza este instrumento de manera generalizada desde hace más de 20 años, constituyendo las mediciones efectuadas con ADCP, el 82% aproximadamente de todas las mediciones de caudal que el USGS realiza desde un bote o puente (Tarrab, 2014). En la provincia de Córdoba, fue utilizado en la confluencia de los ríos Tercero (Ctalamochita) y Saladillo (Herrero, 2014), río Carcarañá (Diaz Lozada, 2019), río Tercero (Heredia Ligorria, 2017), entre otros.

El instrumento determina la velocidad del flujo utilizando el efecto Doppler, emitiendo una onda acústica a una frecuencia específica que luego es reflejada por partículas en suspensión en el flujo (como sedimentos, plancton, algas, etc.). La onda reflejada posee una frecuencia distinta y es detectada por el instrumento. Conociendo la frecuencia emitida y recibida se determina la velocidad relativa entre el flujo y el instrumento mediante la ecuación clásica del efecto Doppler. Para el relevamiento de la presente tesis se utilizó un ADCP YSI/SonTek RiverSurveyor S5® de 3 MHz que se

observa en la Figura 48 y cuyas características son (Sontek, 2013): (a) medición de velocidad desde los 0.3 m hasta los 5 m y profundidades hasta los 15 m; (b) tamaño de celda variable entre los 0.02 m y 0.5 m seleccionado automáticamente en función de la velocidad y profundidad de flujo; (c) cuatro sensores de 3MHz con un ángulo de 25° respecto a la vertical utilizados para medir la velocidad relativa entre el instrumento y el flujo en modo coherente o incoherente definido automáticamente en función de las profundidades y velocidades del flujo; (d) un sensor vertical de 1 MHz para medir profundidades.

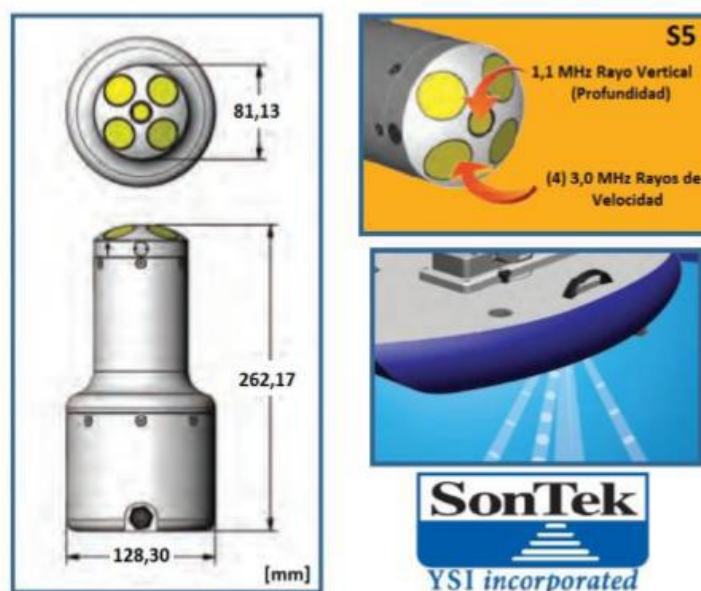


Figura 48.- Descripción del ADCP SonTek S5 (Sontek, 2013)

Las mediciones se realizaron con un pequeño bote controlado con una soga desde el puente Mansilla, haciendo cruces transversales a la dirección del flujo (transecta) con una velocidad menor a la velocidad del flujo. La metodología recomendada establece que se debe efectuar un número par de transectas totalizando un tiempo de medición efectiva (sin contar los tiempos muertos que el instrumento no está midiendo) de 720 segundos (Mueller, Wagner, Rehmel, Oberg, & Rainville, 2013). En los márgenes se debe tener un mínimo de 3 celdas en la vertical para realizar la extrapolación de los caudales en la misma. El instrumento puede ser comandado desde una computadora, utilizando para la medición y visualización de los resultados el software RiverSurveyor Live. Este programa permite configurar el instrumento y registra toda la información enviada por el equipo, generando resultados en forma de tablas, gráficos e imágenes, permitiendo además exportar los resultados a otros programas para un análisis más detallado, tales como Microsoft Excel o Matlab (Heredia Ligorria, 2017). Posteriormente se utilizó el software QRev (Mueller, 2016), una herramienta utilizada para detectar errores cometidos durante la medición y procesar los datos. El programa da como resultado, entre otras utilidades, el perfil de velocidades medio en la sección, que será de suma utilidad en la presente tesis.

La información de la variación del nivel del embalse se obtuvo a partir de un sensor de nivel instalado por la APRHi en el dique San Roque. Además, se relevaron visualmente los puntos de influencia del efecto remanso del embalse en el río San Antonio.

Hasta la actualidad, se registran niveles históricos de niveles del embalse San Roque desde el año 1947 hasta el 2021. Con ellos, se elaboró el gráfico de la Figura 49, donde se pueden observar los percentiles 25, 75, 50 (media) y 95 (correspondiente a situaciones extraordinarias) a lo largo del año.

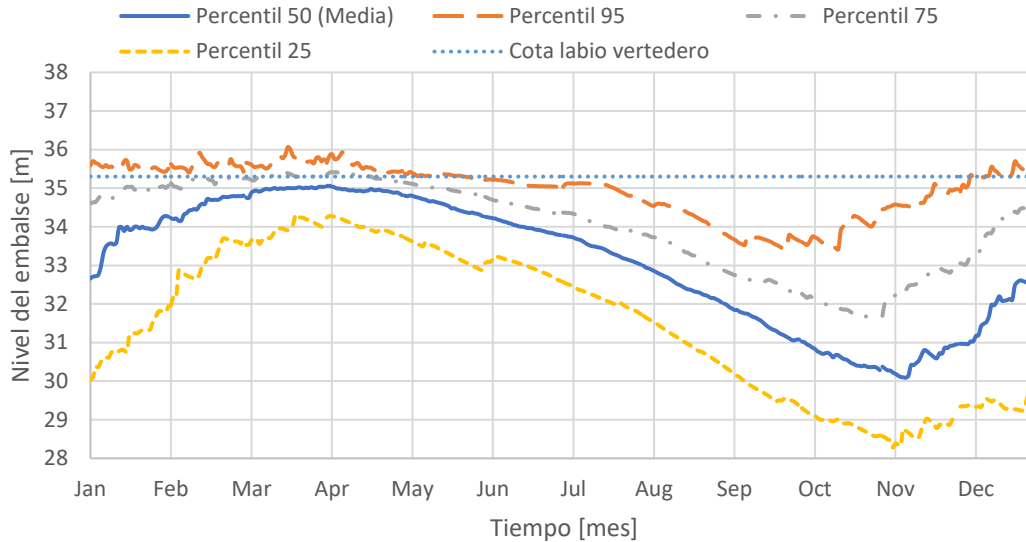


Figura 49.- Variación del nivel del embalse San Roque en el tiempo.

Se puede definir que en condiciones medias la zona de la desembocadura del río San Antonio en el embalse San Roque a partir del Puente Central queda expuesta desde septiembre hasta finales de noviembre (debido a que la cota es inferior a 32 m). En consecuencia, en estos meses es posible aplicar la metodología de relevamiento de campo en condiciones de estiaje y resulta conveniente extraer los áridos del lecho, aprovechando que los mismos no se encuentran sumergidos. A su vez, cualquier crecida en el período mencionado puede generar grandes tasas de transporte.

De acuerdo a los valores obtenidos en la Tabla 11 y en la Figura 49, alrededor de 12 veces por año se generarán crecidas con potencial para transportar sedimentos, asumiendo que ello ocurre con una precipitación media en la cuenca de 20 mm. Considerando que en el capítulo 3 se definió que para condiciones bajas del embalse San Roque (que generalmente ocurren entre septiembre y diciembre como muestra la Figura 49) en el río San Antonio se generará erosión en el lecho y para condiciones medias y altas habrá sedimentación, se puede afirmar que habrá en promedio anualmente alrededor de 5 eventos con erosión y 7 con sedimentación.

### c. Condiciones hidráulicas

Las condiciones hidráulicas relevadas fueron las velocidades de escurrimiento y tirantes del cauce. Para ello, se utilizaron distintas técnicas experimentales: medición de velocidades y tirantes con ADCP (desarrollada en la sección “Condiciones hidrometeorológicas”), estimación de la velocidad superficial del flujo con trazadores y estimación del tirante del cauce con imágenes capturadas en la zona.

La estimación de la velocidad superficial consiste en el seguimiento de trazadores transportados por el flujo (ramas, residuos, transportados superficialmente por el río), contando el tiempo que tardan



en recorrer una distancia conocida. Para ello, se definió una sección de control en la zona 2 del río San Antonio que se observa en la Figura 50, con una longitud de 10.5 m.



Figura 50.- Sección de medición de velocidades en el Río San Antonio y puntos fijos.

En consecuencia, la velocidad superficial del flujo  $v_s$  se estima considerando la relación entre una distancia conocida  $x_t$  y el tiempo  $t_t$  que tarda el trazador en recorrerla, a partir de la Ec. 57.

$$v_s = \frac{x_t}{t_t} \quad \text{Ec. 57}$$

Para definir los tirantes de agua se recurrió a dos métodos: la estimación mediante fotografías y la medición con distanciómetro desde el puente Mansilla, ubicado en la progresiva  $x = 2000 \text{ m}$  del modelo conceptual desarrollado en el capítulo 3 (ver Figura 23).

Para la estimación de niveles de agua con fotografías se definieron los puntos fijos de la Figura 50, desde los cuales se capturan imágenes. Luego, se realiza una comparación de las variaciones del cauce en distintos eventos y se aproxima un tirante.

Para definir el tirante midiendo con el distanciómetro, se relevaron con un GPS New G1 las coordenadas ortométricas de la base del puente Mansilla en un punto fijo situado en el cuarto poste de luz gris (desde margen derecha), tal como se observa en la Figura 51. La elevación de dicho punto resultó de 668.61 m y en promedio el lecho del río en la sección se ubica a 662 m. A partir de ello, se realizaron mediciones con distanciómetro desde el punto fijo, relevando la elevación del pelo de agua bajo distintas condiciones de flujo.



Figura 51.- Punto fijo relevado con GPS en el Puente Mansilla.

Además, se relevaron alturas de la superficie del agua en la escala del Puente Juncal (B° El Canal en las coordenadas 31°26'53.1"S, 64°30'57.1"O), ubicado 1800 m aguas arriba del Puente Los Gigantes, considerado como inicio del área modelada en el capítulo 3 (ver Figura 23).

Finalmente, se recopiló información en redes sociales (TortoloImágenes, 2020)) y medios de comunicación (Carlos Paz En Vivo, 2021) (Carlos Paz En Vivo, 2020) (El Doce, 2020) (TortoloImágenes, 2020) (Diario La nueva Mañana, 2017) sobre las repercusiones e impactos en el área de estudio (inundación del perilago, destrozos, etc.) generados por los eventos extraordinarios analizados.

### 4.3. Relevamiento topográfico

En época de estiaje, donde el río presenta caudales menores a 1 m<sup>3</sup>/s, el lecho queda expuesto. Aprovechando esta condición favorable, se relevó el fondo con fotografías (satelitales y obtenidas en campo) para realizar un análisis general de la situación y luego con un vehículo aéreo no tripulado (VANT) para generar una ortofoto y un Modelo Digital de Elevaciones (DEM, por sus siglas en inglés). Es importante destacar que generalmente en estiaje quedan expuestas formas de fondo en la zona de estudio. La hipótesis con la cual se trabaja aquí es que luego de la última crecida que genera transporte de fondo y que eleva significativamente el nivel del embalse, el lento descenso del mismo durante el estiaje no altera las formas de fondo generadas durante ese evento. Esta situación, que en campo ocurre naturalmente, es la que se reproduce en los modelos físicos cuando se busca evaluar las formas de fondo generadas sin alterarlas al reducir el flujo.

En los casos en que las formas de fondo quedaron expuestas, se seleccionaron dunas representativas para caracterizarlas (longitud y altura) con topografía convencional, se realizaron perfiles longitudinales y transversales del lecho con GPS y un análisis del DEM generado para estimar el volumen de sedimento en la zona de estudio y determinar las características geométricas de todas las formas de fondo existentes.

En los casos de que el río aumente su caudal en crecida luego del estiaje (con nivel del embalse bajo) y luego disminuya el mismo rápidamente, las formas de fondo generadas en el evento se destruyen,

quedando expuesto un lecho liso. En consecuencia, se realizó un análisis de DEMs (comparando la situación antes y después del evento de crecida) para determinar el cambio en los perfiles longitudinales y el volumen de sedimentación o erosión en cada zona.

Finalmente, en época de crecidas, se caracterizaron las formas de fondo del cauce a partir de mediciones dinámicas utilizando el ADCP y se utilizaron fórmulas empíricas para aproximar la geometría esperada de acuerdo al evento.

A continuación se desarrolla cada una de las técnicas utilizadas para caracterizar la topografía del cauce del río San Antonio, de acuerdo a las condiciones hidráulicas e hidrológicas del mismo. Además, se presentan estimaciones de las características de las formas de fondo utilizando formas empíricas.

#### a. Relevamiento de imágenes

Como primera aproximación, se trabajó con imágenes satelitales provistas por Google Earth Pro en épocas de estiaje, en las cuales se observa el lecho del río expuesto. Allí, se pudo obtener un registro histórico de la variación en las características geométricas de las formas de fondo y posteriormente asociarlas a un evento de crecida determinado. En el caso de observar dunas en las imágenes, se aproximó la longitud de las mismas considerando dos longitudinales de 150 m (L1 en la zona 1 y L2 en la zona 2) tal como se observa en la Figura 52, capturada el día 15/10/2020.



Figura 52.- Perfiles longitudinales considerados para la estimación de longitud de formas de fondo mediante análisis de imágenes satelitales.

#### b. Relevamiento topográfico con GPS

Se realizaron perfiles longitudinales y transversales en el lecho del río. Para ello se utilizó un GPS New G1 (especificaciones del instrumento disponibles aquí: <http://geobauen.com.ar/wp-content/uploads/2021/01/NewG1Spanish.pdf>).

#### c. Relevamiento topográfico con VANT

Para el relevamiento se utilizó un dron DJI Phantom 3. Durante la campaña del evento del 25/03/2020 se relevaron las zonas 1 y 2 promediando una altitud media de vuelo de 73.6 m,



cubriendo una superficie de 0.247 km<sup>2</sup> y tomando 298 imágenes. En las campañas de los eventos del 16/03/2021 y 13/10/2021, se relevaron las zonas 1, 2 y 3, cubriendo una superficie de 0.247 km<sup>2</sup>, promediando una altitud media de vuelo de 73.6 m. Como resultado, se obtuvieron ortofotos y Modelos Digitales de Elevación (DEM).

Con los DEM generados en el relevamiento con VANT se realizaron dos análisis. En principio, se trazaron perfiles longitudinales a lo largo de las zonas 1, 2 y 3 tomando como referencia el perfil longitudinal propuesto en la Figura 53 para definir la pendiente y las formas de fondo en el cauce.



Figura 53.- Perfil longitudinal a lo largo de la zona de estudio en el río San Antonio.

Luego, en un análisis posterior se trazaron distintos perfiles longitudinales en el ancho del cauce. En la zona 1 se trazaron 10 longitudinales de 260 m, tal como se observa en la Figura 54, denominados del 1 al 10 de izquierda en dirección al flujo.

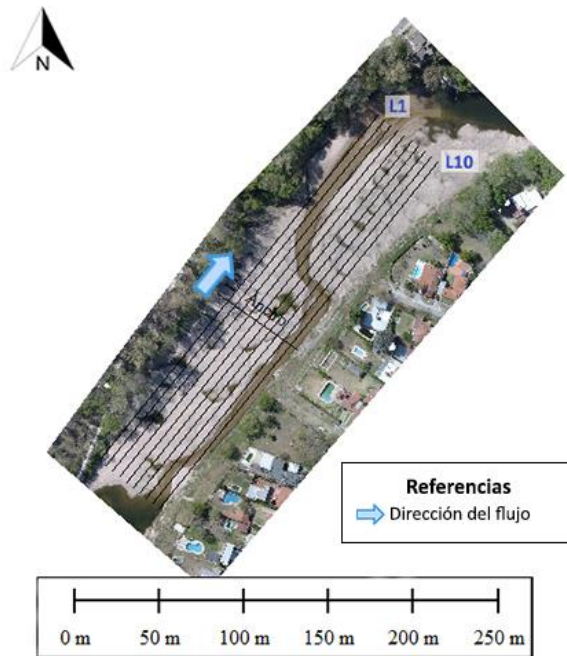


Figura 54.- Longitudinales para caracterizar las formas de fondo en la zona 1.

En la zona 2 se trazaron 8 longitudinales, denominadas del 1 al 8, de izquierda a derecha en dirección al flujo, tal como se observa en la Figura 55. La longitud de las líneas es de aproximadamente 300 m.

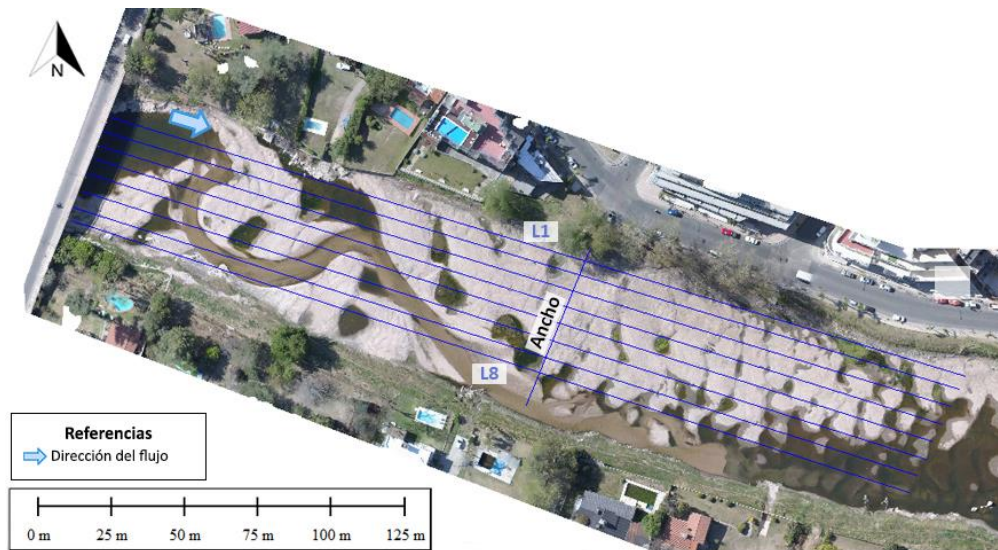


Figura 55.-Longitudinales para caracterizar las formas de fondo en la zona 2.

En la zona 3 se trazaron 4 longitudinales con un rango de longitudes entre 210-240m, tal como se observa en la Figura 56, denominados de izquierda a derecha en dirección al flujo.



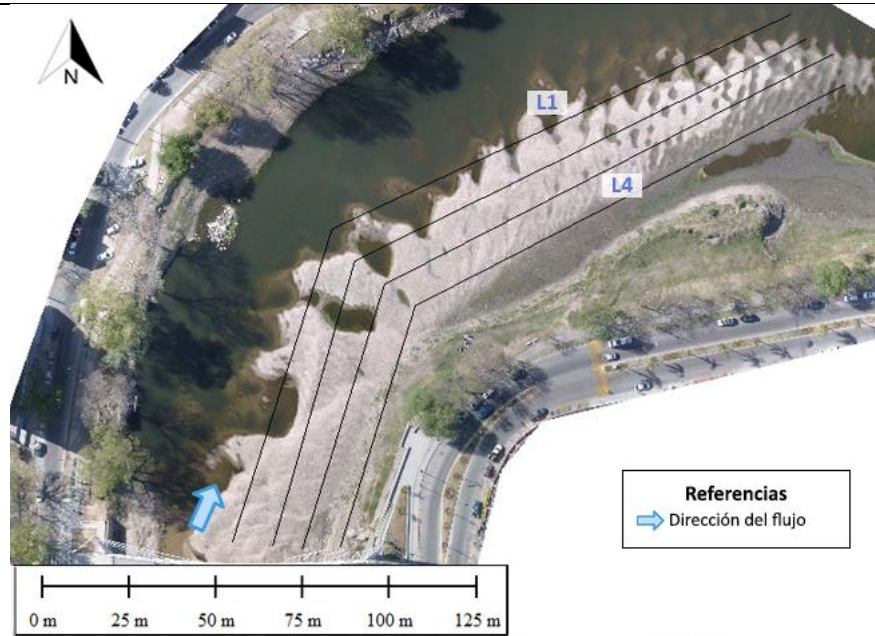


Figura 56.- Longitudinales para caracterizar las formas de fondo en la zona 3.

d. Relevamiento topográfico convencional

Para comprobar los resultados obtenidos con el análisis del DEM en presencia de formas de fondo se realizó un relevamiento topográfico convencional. Para ello, se utilizó regla topográfica y nivel y se relevaron dunas representativas midiendo desde valle a valle, determinando altura, longitud y empinamiento.

e. Relevamiento topográfico con ADCP

Las mediciones con ADCP se realizaron aplicando el método dinámico, que consiste en el relevamiento en diferentes puntos de la sección de perfiles longitudinales del lecho. Así, es posible caracterizar geoméricamente un tren de dunas, definiendo altura, longitud y factor de forma. Se recorrió con el instrumento longitudinalmente el río en sentido del flujo (ida) y contrario al flujo (vuelta) desde el Puente Mansilla una distancia aproximada de 30 a 50 m, tal como se observa en la Figura 57.



Figura 57.- Esquema de mediciones dinámicas con ADCP en la sección de estudio.

f. Estimación de características de las formas de fondo con fórmulas empíricas

Conociendo las características hidráulicas y sedimentológicas de la sección de estudio (como el tirante medio  $y_m$  y el diámetro medio del sedimento del lecho  $D_{50}$ ) es posible aproximar el rango de altura de las dunas ( $\Delta_{max} - \Delta_{min}$ ) y la longitud de las mismas ( $\lambda$ ) a partir de las siguientes formulas empíricas:

$$\Delta_{min} = \frac{y_m}{6} \quad (\text{García, 2007}) \quad \text{Ec. 58}$$

$$\Delta_{máx} = 2.5y_m \left( \frac{D_{50}}{y_m} \right)^{0.3} \quad (\text{Julien \& Klaassen, 1995}) \quad \text{Ec. 59}$$

$$\lambda = 6.25 y_m \quad (\text{Julien \& Klaassen, 1995}) \quad \text{Ec. 60}$$

#### 4.4. Relevamiento de características de la granulometría del lecho y del transporte de sedimentos

Respecto a los sedimentos del lecho del río San Antonio en la zona de estudio, los relevamientos se concentraron en la caracterización granulométrica de los mismos y la estimación de su transporte. A continuación se desarrolla cada una de las metodologías implementadas.

a. Características del sedimento

Para conocer la granulometría del material del fondo se extrajeron muestras en las tres zonas de estudio (Z1, Z2 y Z3) utilizando distintos criterios: (a) muestreo en la cresta y valle de dunas características; (b) muestreo a lo largo de una sección longitudinal del cauce; (c) muestreo a lo largo de una sección transversal del cauce, tal como recomienda en la TWRI 3C-2 de la USGS (Edwards & Glysson, 1999). En todos los casos, se utilizó pala y se almacenó la muestra en una bolsa o recipiente con boca grande con su respectiva etiqueta.

Para el ensayo granulométrico se utiliza el método mecánico del tamizado con diferentes tamices. En este caso, se utilizó la serie desarrollada en la Tabla 12.

Tabla 12.- Tamices utilizados en los ensayos granulométricos realizados en la presente tesis.

Denominación tamiz según ASTM	Medida Tamiz [mm]
<b>3/4</b>	19
<b>5/8</b>	16
<b>3</b>	6.3
<b>4</b>	4.75
<b>10</b>	2
<b>12</b>	1.7
<b>16</b>	1.18
<b>30</b>	0.6
<b>40</b>	0.425
<b>60</b>	0.25
<b>100</b>	0.15
<b>200</b>	0.075
<b>Pasante T200</b>	0.063

En la parte superior, donde se encuentra el tamiz de mayor diámetro, se agrega el material original (suelo o sedimento mezclado) y la columna de tamices se somete a vibración y movimientos rotatorios intensos mediante una máquina destinada a tal fin o agitación manual. Luego de algunos minutos de agitación, se separa la columna de tamices, se toman los pesos de material retenido en cada uno con una balanza de precisión y se los registra en una planilla. Conociendo el peso total de la muestra ( $P_T$ ) y el peso del material retenido en cada tamiz ( $R_i$ ), se puede determinar el porcentaje pasante por cada uno de ellos mediante la Ec. 61.

$$\%_{pasante} = 100 - \sum R_i P_T \times 100 \quad \text{Ec. 61}$$

El porcentaje pasante se representa luego en una curva granulométrica, a partir de la cual se determinan los parámetros más importantes:  $D_{90}$ ,  $D_{50}$ ,  $D_{16}$ ,  $D_{84}$  y el desvío geométrico estándar  $\sigma_g$  que se calcula a partir de la Ec. 62.

$$\sigma_g = \sqrt{\frac{D_{84}}{D_{16}}} \quad \text{Ec. 62}$$

Donde:

$D_{16}$  = Tamaño del sedimento del lecho correspondiente al 16% pasante

$D_{50}$  = Diámetro medio del sedimento del lecho

$D_{84}$  = Tamaño del sedimento del lecho correspondiente al 84% pasante

$D_{90}$  = Tamaño del sedimento del lecho correspondiente al 90% pasante

#### b. Transporte de sedimentos

Para determinar la presencia o ausencia de transporte de sedimentos se aplicó el método del lazo con ADCP. Luego, para estimar el transporte de sedimentos se utilizaron tres metodologías: mediciones estacionarias y dinámicas con ADCP y aplicación de fórmulas empíricas. Finalmente, para calcular el volumen de sedimentos transportados durante un evento, se realizó un análisis de modelos digitales de elevación. Cada una de las metodologías se detalla a continuación.

##### *Mediciones de lazo para determinar presencia o ausencia de transporte de sedimentos*

El método del lazo ("Loop Method") se utiliza para determinar la presencia o ausencia de transporte de fondo en un río, para luego realizar la corrección correspondiente a las mediciones de caudal líquido cuando no se dispone de GPS (SonTek, 2013). Tal como se observa en la Figura 58, el método consiste en realizar el recorrido de la sección midiendo con el ADCP desde una margen hacia la otra del río, en ida y vuelta, volviendo al mismo punto inicial. Si los puntos inicial y final reportados por el instrumento utilizando como referencia el Bottom Track (seguimiento de fondo) no coinciden, existe un movimiento de fondo. A pesar de ello, en realidad los puntos son iguales, por lo cual coincidirán tomando como referencia el recorrido del GPS.



Figura 58.- Esquema del método del lazo con ADCP en la sección de estudio en el río San Antonio.

Luego, de acuerdo a la Ec. 63, la velocidad de fondo móvil media de la sección ( $V_{mb}$ ) estará dada por la relación entre la distancia entre la posición inicial y final reportada por el instrumento ( $D_{up}$ ) y el tiempo de medición para completar los dos cruces ( $T$ ).

$$V_{mb} = \frac{D_{up}}{T} \quad \text{Ec. 63}$$

Una de las desventajas del método del lazo es que asume que la velocidad de fondo es constante en toda la sección. En consecuencia, Novillo (2020) propuso una metodología que permite calcular la velocidad de fondo en tramos sucesivos de la sección para obtener la distribución de la velocidad de las partículas del fondo en distintas progresivas de la sección. Esta metodología fue utilizada en la presente tesis, y se basa en discretizar el movimiento del seguimiento de fondo conociendo sus sucesivas posiciones. Como también se conoce en qué tiempo se alcanza cada una de dichas posiciones, se elige un intervalo de tiempo  $\Delta t_i$  constante y se mide la diferencia de posición de seguimiento de fondo  $D_i$ , calculando una velocidad de fondo  $v_{mbi}$  en dicho tramo mediante la Ec. 64. También se tiene en cuenta el desplazamiento real del instrumento (medido por el GPS) el cual se resta a la trayectoria obtenida con referencia Bottom Track, para descartar el movimiento real del aparato en dirección del flujo durante la medición.

$$v_{mbi} = \frac{D_i}{\Delta t_i} \quad \text{Ec. 64}$$

Esta metodología fue validada utilizando series sintéticas, que representan el recorrido del instrumento, equivalentes a las mediciones tipo de lazo realizadas (según GPS el punto de partida y el de llegada deberían coincidir, y para BT en caso de existir movimiento de fondo son diferentes) (Novillo, 2020).

#### *Mediciones estacionarias para estimar el transporte de sedimentos*

Durante una medición estacionaria se mide con el ADCP en una posición fija un tiempo determinado. Cuando hay transporte de fondo, las trayectorias del instrumento con las dos formas de referenciación (GPS y seguimiento de fondo o Bottom Track) no coinciden. El GPS indica que el ADCP está fijo, mientras que la referencia por seguimiento de fondo muestra que el instrumento se traslada hacia aguas arriba (Heredia Ligorria, 2017). Conociendo la distancia recorrida por

seguimiento de fondo y el tiempo de medición, se calcula una velocidad de las partículas cercanas al fondo, denominada “ $V_{mb}$ ” (“Moving bed velocity”).

En este caso, en la campaña del 02/02/2021 se realizaron mediciones estacionarias de corta duración desde el Puente Mansilla en tres ubicaciones distintas, tal como se observa en la Figura 59.



Figura 59.- Esquema de las mediciones estacionarias con ADCP en la sección de estudio en el río San Antonio, el día 02/02/2021.

#### Mediciones dinámicas para estimar el transporte de sedimentos

Tal como se mencionó en la sección de “Relevamiento topográfico”, durante las mediciones dinámicas se obtienen perfiles longitudinales del lecho. En el caso de contar con dos o más perfiles en la misma ubicación, pero en distintos tiempos, se puede estimar el transporte de fondo mediante la técnica de seguimiento de formas de fondo. La misma consiste en comparar el desplazamiento de las formas de fondo en sucesivos perfiles, asumiendo que la migración de dunas puede asimilarse a la traslación sin cambio de forma. Por comparación se obtiene la Ec. 65, que vincula la carga de fondo  $g_{sf}$  con la velocidad de migración de la duna  $v_d$  y su altura  $\Delta$ , considerando además la porosidad del sedimento del lecho  $\lambda_p$  y el factor de forma  $\alpha$ .

$$g_{sf} = \alpha(1 - \lambda_p)\Delta v_d \quad \text{Ec. 65}$$

Tal como se observa en la Figura 57, las mediciones dinámicas se realizan recorriendo longitudinalmente el río en sentido del flujo (ida) y contrario al flujo (vuelta). Luego, como las trayectorias en ida y vuelta no son exactamente iguales, se proyectan a una recta de dirección arbitraria, para luego comparar el desplazamiento de cada duna y calcular su velocidad de avance como el cociente entre el desplazamiento promedio entre cresta y valles y el intervalo de tiempo en el que se produjo el movimiento de las crestas. Finalmente, mediante la Ec. 65 se obtiene el transporte de sedimento de fondo.

#### Fórmulas empíricas para estimar el transporte de sedimentos

A partir de la caracterización de las formas de fondo (por alguno de los métodos desarrollados en la metodología de la sección “Relevamiento topográfico”) y la medición o estimación de las características hidráulicas de la sección, es posible calcular el transporte de sedimentos del cauce utilizando fórmulas empíricas.



La tasa de transporte de carga del lecho por las dunas puede estimarse como el volumen de material transportado por unidad de superficie del lecho y por unidad de tiempo por una duna en migración (Simons, Richardson, & Nordin, 1965). Si considera en un modelo simplificado que una duna tiene forma triangular, teniendo en cuenta la velocidad de onda de la duna  $v_d$ , la altura de la duna  $\Delta$  y la porosidad del sedimento del lecho  $\lambda_p$  considerada como 0.4, se puede utilizar la Ec. 66 para determinar el transporte unitario de fondo  $q_b$  (Engel & Lau, 1980), (Havinga, 1983).

$$q_b \cong \frac{1}{2} \Delta v_d (1 - \lambda_p) \quad \text{Ec. 66}$$

La celeridad de la duna es función del número de Froude  $Fr$ , y se puede estimar a partir de la velocidad del flujo  $U$  y el tirante medio del cauce  $y_m$  con la Ec. 67 (Kondap & Garde, 1973):

$$c = U \times 0.021 \times Fr^3 \quad \text{Ec. 67}$$

En consecuencia, en los casos de contar con la información suficiente, se calculó el transporte fondo unitario y el transporte de fondo total  $g_{sf}$  multiplicándolo por el ancho del cauce.

$$g_{sf} = q_b \times b \quad \text{Ec. 68}$$

#### *Análisis de modelos digitales de elevación*

En los eventos en los cuales se pudo generar un modelo digital de elevación con VANT (como se desarrolla en la sección de “Relevamiento topográfico con VANT”) con formas de fondo que se conservaron hasta el periodo de estiaje, se realizó una estimación del volumen de sedimentos presente en el lecho del río, calculando el volumen de cada perfil longitudinal trazado (Ver perfiles de la zona 1 en la Figura 54, perfiles de la zona 2 en la Figura 55 y perfiles de la zona 3 en la Figura 56) ( $V_{pl}$ ) a partir de la longitud de la duna  $\lambda$ , altura  $\Delta$  y factor de forma  $\alpha$ , mediante la Ec. 69:

$$V_{pl} = \lambda \Delta \alpha \quad \text{Ec. 69}$$

Para el cálculo se tuvieron en cuenta las formas de fondo cuyo tamaño era mayor a 0.10 m considerando la precisión del relevamiento. La longitud de la duna se consideró como la diferencia entre dos valles consecutivos y la altura de la duna como el promedio de la diferencia de altura entre la cresta y los valles. Se utilizó un factor de forma de  $\alpha=0.60$ , a partir de promediar los valores de  $\alpha=0.50$  (duna triangular, con la cresta en la mitad de la longitud) y  $\alpha=0.66$  (duna irregular, con la cresta cercana a la cara aguas abajo). Solo se consideraron las progresivas de los perfiles que no se encuentran sumergidas.

Luego, el volumen total de los sedimentos  $V_t$  se calculó multiplicando el volumen unitario de cada longitudinal por su ancho de influencia  $b$  y considerando la porosidad del sedimento del lecho  $\lambda_p = 0.40$  recomendada por la bibliografía, a través de la Ec. 70:

$$V_t = V_{pl} (1 - \lambda_p) b \quad \text{Ec. 70}$$

A su vez, a partir del análisis de perfiles longitudinales se caracterizó la geometría de las formas de fondo: la altura de duna ( $\Delta$ ) como la diferencia entre la altura de cresta y valle, la longitud de la duna ( $\lambda$ ) como la distancia entre valles, y el empinamiento ( $\Delta/\lambda$ ) calculado como la relación entre la altura y la longitud de la duna (Latosinski, Szupiany, Guerrero, Amsler, & Vionnet, 2017).

Cuando las formas de fondo no se conservaron, se realizó la diferencia entre los volúmenes de perfiles anteriores al evento (con dunas) y posteriores (con lecho liso) para determinar el volumen



de sedimentación/erosión. En caso de resultar positivo, el volumen implica erosión en el perfil transversal y si da negativo hay sedimentación.

## Capítulo 5: Resultados del relevamiento de campo realizado durante crecidas

### 5.1. Introducción

En el capítulo 4 se presentó la metodología para realizar el relevamiento de campo en función de las condiciones hidrológicas del tramo estudiado del Río San Antonio. En este capítulo se presentarán los resultados obtenidos en los relevamientos realizados durante las condiciones de crecida. En algunos casos, se comenzó a relevar un evento teniendo información hidrometeorológica, hidrológica y/o hidráulica, y luego en consecuencia se realizaron relevamientos topográficos, de características de la granulometría y transporte de sedimento. En otros casos la motivación para el estudio de la crecida fue la observación de la topografía del lecho, por lo que luego se relevaron las condiciones hidrometeorológicas, hidrológicas, hidráulicas, características de la granulometría y el transporte de sedimento.

### 5.2. Resultados obtenidos

Se realizaron un total de nueve relevamientos en el río San Antonio. A modo resumen en la Tabla 13 se presentan las características relevadas en cada caso y a continuación se desarrolla cada uno de los eventos.

Tabla 13.- Resumen de las características relevadas por evento.

Evento hidrológico	Relevamiento de condiciones hidrometeorológicas, hidrológicas e hidráulicas	Relevamiento topográfico	Relevamiento de características de la granulometría y transporte de sedimento
Evento 20/11/2011 Evento 27/09/2017	Precipitación Nivel del embalse	De imágenes	
Evento 30/01/2021	Precipitación Hidrograma Nivel del embalse Imágenes Medición con ADCP	Mediciones dinámicas	Transporte de sedimentos: Método del Lazo y Mediciones estacionarias.
Evento 02/02/2021	Precipitación Hidrograma Nivel del embalse Imágenes Medición con ADCP		Transporte de sedimentos: Método del Lazo.
Evento 13/10/2021	Precipitación Hidrograma Nivel del embalse Imágenes	Con VANT	Caracterización granulométrica de sección longitudinal
Evento 09/11/2021	Precipitación Hidrograma Nivel del embalse Imágenes		

	Velocidad superficial		
<b>Evento 10/11/2021</b>	Precipitación		
	Hidrograma		
	Nivel del embalse		
	Imágenes		
	Velocidad superficial		
<b>Evento 10/12/2021</b>	Precipitación	Fórmulas empíricas	Caracterización granulométrica de sección transversal
	Hidrograma		
	Nivel del embalse		
	Imágenes		
	Velocidad superficial		
<b>Evento 23/01/2022</b>	Precipitación		
	Hidrograma		
	Nivel del embalse		
	Imágenes		
	Velocidad superficial		

A continuación se describen las observaciones realizadas en cada evento.

Evento 20/11/2011

*Relevamiento topográfico*

Analizando imágenes satelitales del día 30/11/2011 se puede observar un lecho liso generado en el cauce (Figura 60), de acuerdo a la hipótesis planteada en esta tesis, como producto del paso de un hidrograma de crecidas (con una disminución rápida del nivel del tirante del río) y con el nivel del embalse bajo. Estas condiciones hidrológicas serían, a priori, las más favorables para el ingreso de sedimentos al embalse.



Figura 60.- Imágenes satelitales del Río San Antonio el día 30/11/2011.

*Relevamiento de condiciones hidrometeorológicas, hidrológicas e hidráulicas.*

Como hipótesis se asume que el lecho liso observado se generó debido a una disminución rápida del tirante del río en la rama descendente del hidrograma de crecidas, que destruyó las formas de fondo generadas en las condiciones de máximo escurrimiento del hidrograma ya que el nivel del embalse estaba bajo y no generaba efectos de remanso en el tramo de estudio. De acuerdo a los

registros, la última crecida significativa de la cuenca antes de la captura de la fotografía fue el día 21/11/2011. No se encuentra disponible el caudal generado, pero sí hay información hidrometeorológica que se presenta en la Figura 61.

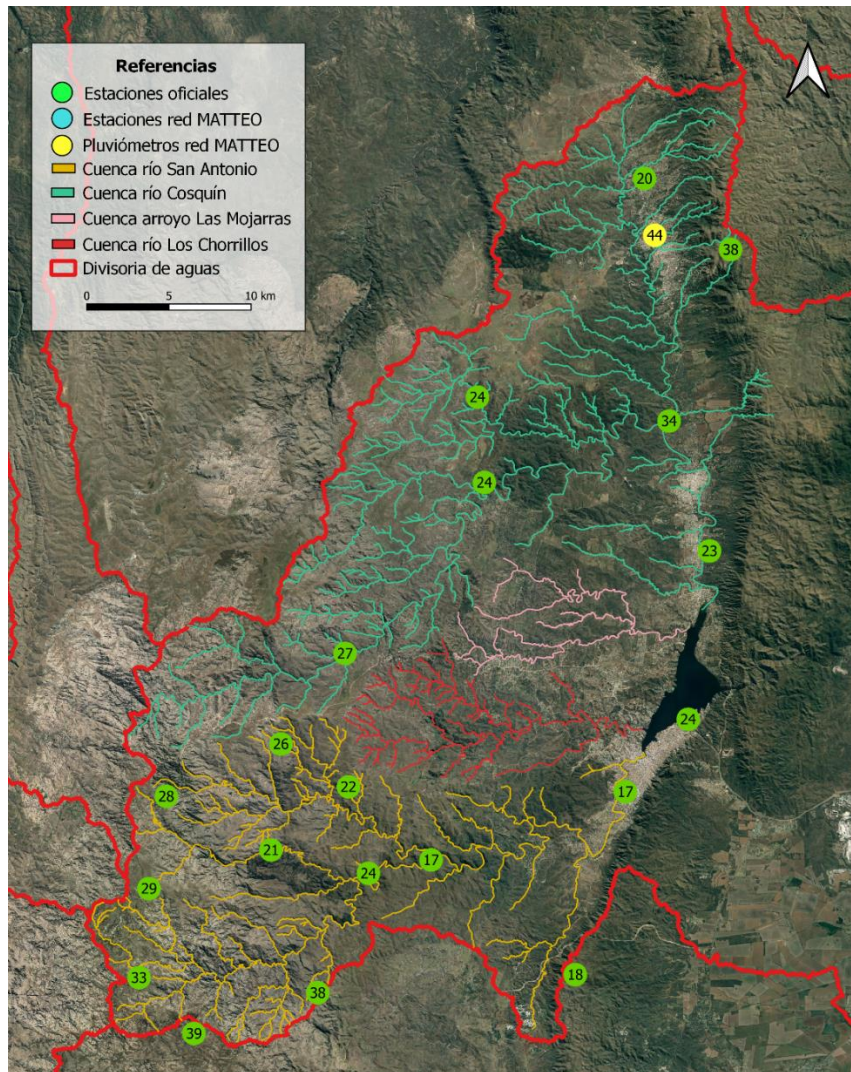


Figura 61.- Reporte meteorológico de precipitación acumulada desde el 20/11/2011 a las 00:00 hs. al 21/11/2011 a las 00:00 hs, recopilando información de estaciones meteorológicas oficiales y de la red MATTEO (estaciones meteorológicas y pluviómetros).

Como consecuencia del evento, tal como se observa en la Figura 111, el nivel del embalse aumentó 0.60 m (desde el 19/11 al 22/11/2011), alcanzando la cota 32 m el 22/11/2011. Para dicha altura las zonas 1 y 2 de estudio que se observan en la imagen quedan expuestas, coincidiendo con lo obtenido en el relevamiento topográfico.



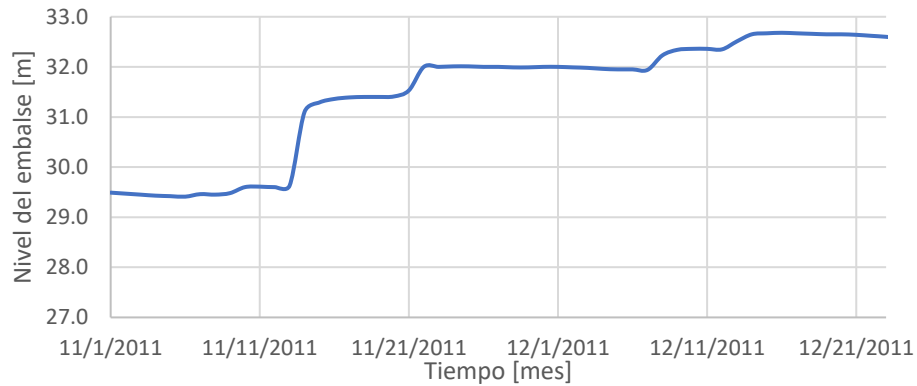


Figura 62.- Niveles del embalse, período 01/11-31/12/2011.

Evento 27/09/2017

#### *Relevamiento topográfico*

Analizando imágenes satelitales de día 18/11/2017 se observa un lecho liso, tal como se muestra en la Figura 63. De acuerdo a lo obtenido en el modelo conceptual del capítulo 3, la zona de estudio fue erosionada debido a que el nivel del embalse en época de estiaje es bajo.



Figura 63.- Imágenes satelitales del Río San Antonio del día 18/11/2017.

#### *Relevamiento de condiciones hidrometeorológicas, hidrológicas e hidráulicas.*

Como hipótesis se asume que el lecho liso observado se generó debido a una disminución rápida del tirante del río en la rama descendente del hidrograma de crecidas, que destruyó las formas de fondo generadas en las condiciones de máximo escurrimiento del hidrograma ya que el nivel del embalse estaba bajo y no generaba efectos de remanso en el tramo de estudio. De acuerdo a los registros, la última crecida significativa de la cuenca antes de la captura de la fotografía fue el día 27/09/2017.

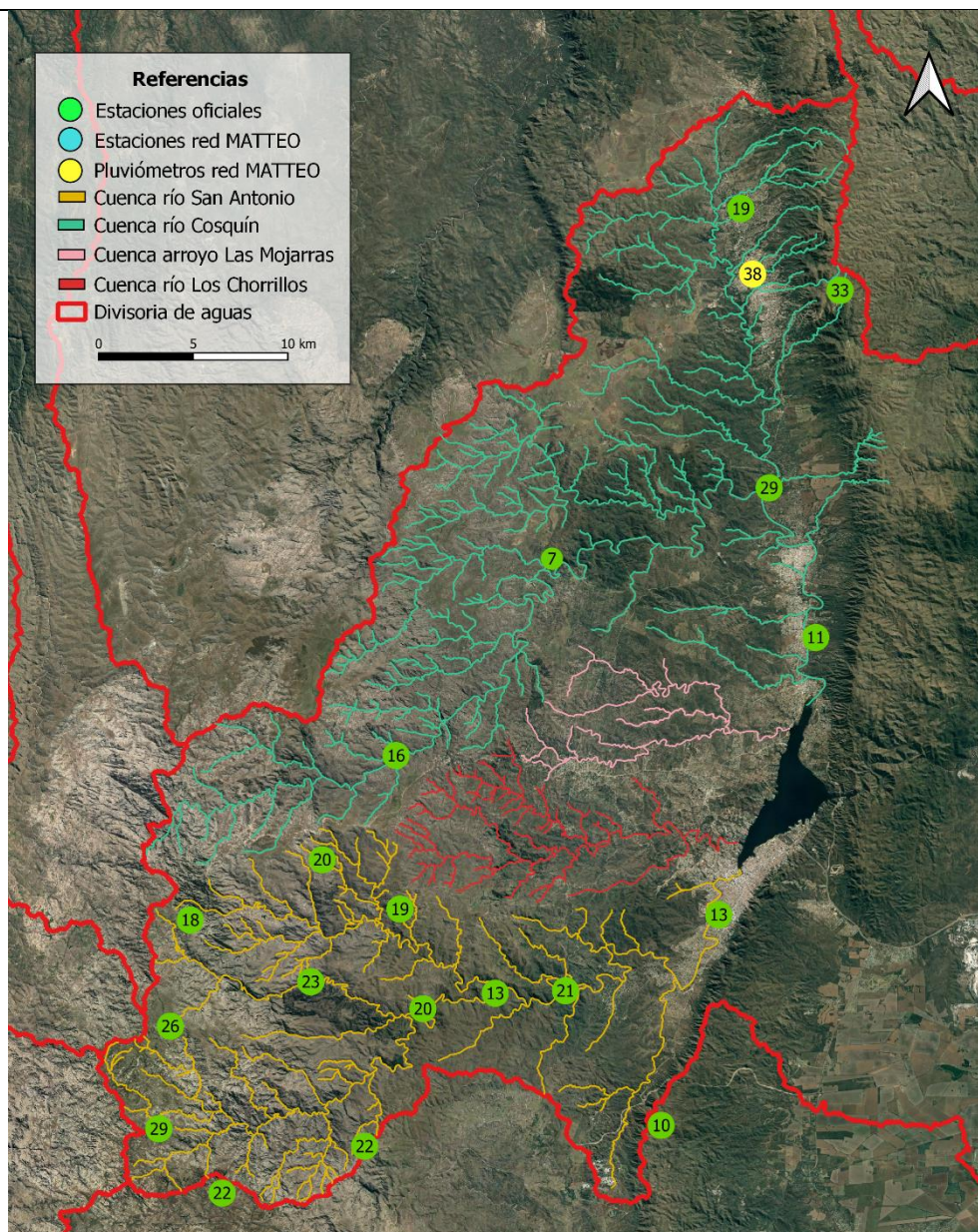


Figura 64.- Reporte meteorológico de precipitación acumulada desde el 26/09/2017 a las 00:00 hs. al 27/09/2017 a las 00:00 hs, recopilando información de estaciones meteorológicas oficiales y de la red MATTEO (estaciones meteorológicas y pluviómetros).

Como consecuencia del evento se generó en el río San Antonio un  $Q_{pico}=41 \text{ m}^3/\text{s}$  y aumentó 0.35 m el nivel del embalse, que luego fue disminuyendo nuevamente de forma progresiva, tal como se observa en la Figura 111.

Cabe destacar que previamente el 21/07/2017 ocurrió un evento que generó un  $Q_{pico}=293 \text{ m}^3/\text{s}$  pero como hipótesis se considera el evento más próximo al relevamiento realizado el 18/11/2017.



Evento 30/01/2021

*Relevamiento de condiciones hidrometeorológicas, hidrológicas e hidráulicas*

El día 30/01/2021 ocurrió un evento de tormenta en la cuenca de estudio, que inició aproximadamente a las 03:30 hs y finalizó a las 08:00 hs. El reporte meteorológico se presenta en la Figura 65.

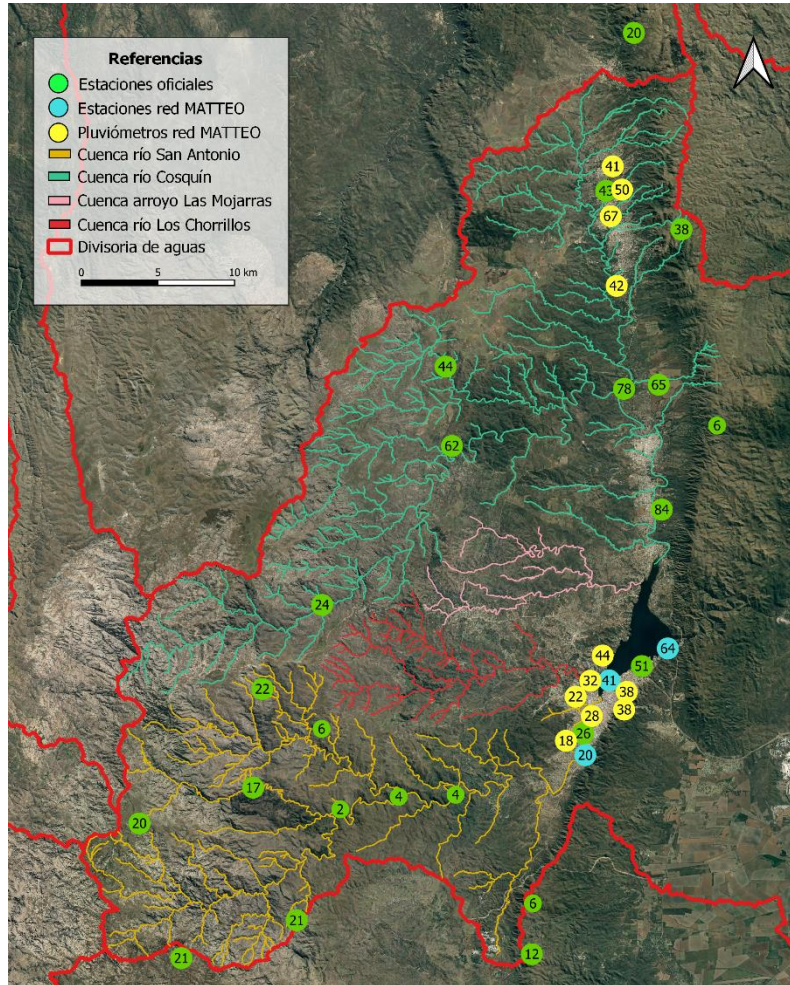


Figura 65.- Reporte meteorológico del evento ocurrido el 30/01/2021, recopilando información de estaciones meteorológicas oficiales y de la red MATTEO (estaciones meteorológicas y pluviómetros).

El mismo día, se realizó una campaña de aforo con ADCP en el puente Mansilla, donde se midió un caudal líquido de  $Q=35.43 \text{ m}^3/\text{s}$ , más de 9 veces mayor al módulo del río. Los resultados generales se presentan en la Tabla 14, mientras que el perfil medio de velocidades (obtenido con el software Qrev) en la Figura 66.

Tabla 14.- Resultado de las mediciones de caudal líquido de la campaña del 30/01/2021,  $Q=35.43 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Evento	Ancho [m]	Área [m <sup>2</sup> ]	Prof. Media [m]	U [m/s]	Q [m <sup>3</sup> /s]	q [m <sup>2</sup> /s]	Incertidumbre [%]	COV [%]
<b>30/01/2021</b>	42.99	36.59	0.89	0.97	35.43	0.82	5.6	3.62

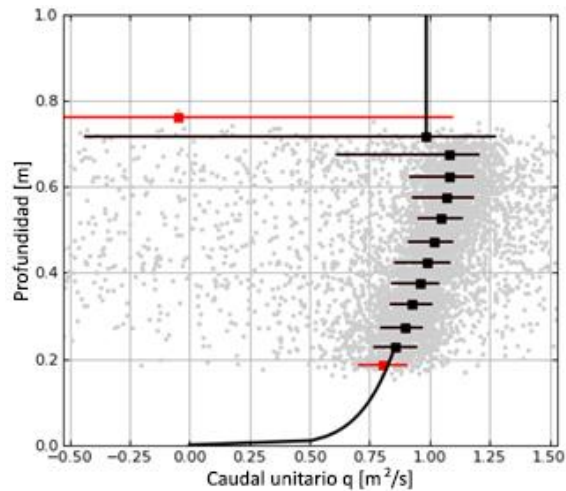


Figura 66.- Perfil medio de velocidades durante la medición del 30/01/2021,  $Q=35.43 \text{ m}^3/\text{s}$ .

La campaña se realizó entre las 18:00 hs. y 19:10 hs. En esta franja horaria, la cota del Embalse San Roque se encontraba en 33.42 m y el efecto remanso del embalse sobre el río llegaba aproximadamente al punto  $31^{\circ}25'13.27''\text{S}$ ,  $64^{\circ}30'32.74''\text{O}$ .

#### Relevamiento topográfico

Días después del evento se realizaron dos mediciones dinámicas para la caracterización de dunas, cuya trayectoria se representa en la Figura 67.

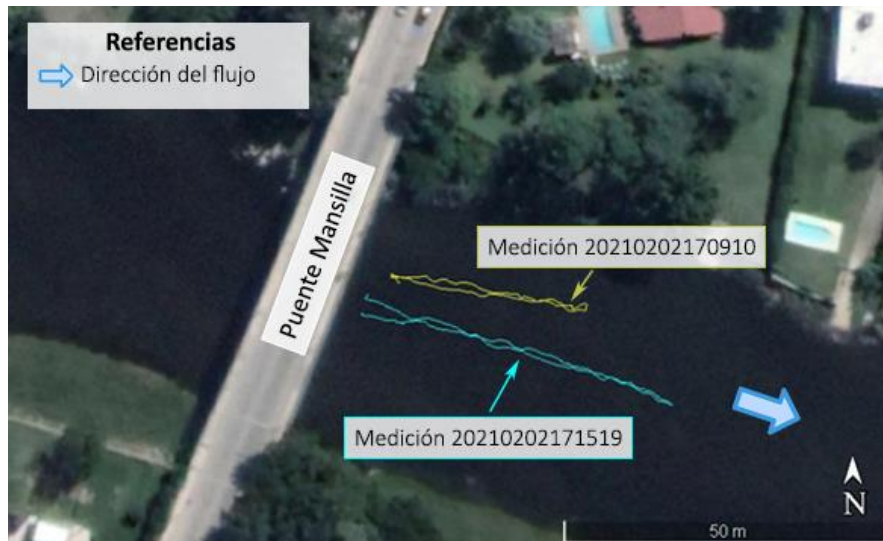


Figura 67.- Mediciones dinámicas realizadas en la campaña del 30/01/2021,  $Q=35.43 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Los resultados obtenidos de longitud de duna, altura de duna y factor de forma de las mediciones realizadas se presentan en la Tabla 15.



Tabla 15.- Caracterización de dunas mediante análisis dinámico de la campaña del 02/02/2021,  $Q=45.82 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Medición	20210202170910			20210202171519			
	Duna	$\lambda_{\text{prom}}$ [m]	$\Delta_{\text{prom}}$ [m]	Factor de Forma	$\lambda_{\text{prom}}$ [m]	$\Delta_{\text{prom}}$ [m]	Factor de Forma
1		2.58	0.13	0.58	2.95	0.18	0.62
2		2.91	0.06	0.61	2.69	0.15	0.68
3		1.91	0.1	0.59	1.75	0.1	0.6
4		1.62	0.09	0.67	2	0.17	0.65
5		1.35	0.07	0.73	2.36	0.13	0.65
6		1.62	0.12	0.57	2.48	0.1	0.68
7		1.98	0.11	0.65	1.97	0.1	0.68
8					2.46	0.15	0.7
<b>Promedio</b>		<b>2</b>	<b>0.1</b>	<b>0.63</b>	<b>2.33</b>	<b>0.13</b>	<b>0.66</b>

*Relevamiento de características y transporte de sedimentos: Transporte de sedimentos*

El día del evento se realizó una medición de lazo que resultó válida para las condiciones hidráulicas del cauce. En la parte superior de la Figura 68 se puede observar la "V" característica que forma el recorrido con seguimiento de fondo (BT), indicando la presencia de transporte de fondo y, en la parte inferior, la batimetría de la sección espejada, junto con la velocidad del agua en escala cromática. En la

Tabla 16 se observan los resultados numéricos de esta medición dados por el software.

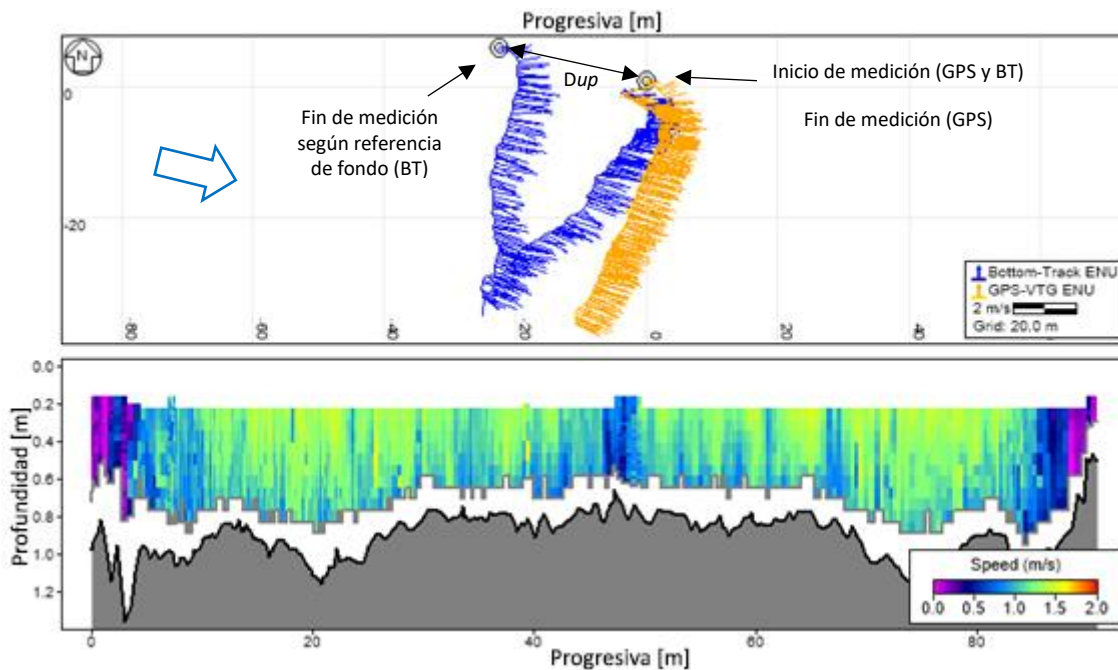


Figura 68.- Resultado del método del lazo de la campaña del 30/01/2021,  $Q=35.43 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Tabla 16.- Resultados del método del lazo de la campaña del 30/01/2021,  $Q=35.43 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Q [m <sup>3</sup> /s]	D <sub>up</sub> [m]	Tiempo [seg]	V <sub>mb</sub> [m/s]	Velocidad del Flujo [m/s]	% de datos de seguimiento de fondo descartados (BT)	Comentarios
32.81	23.40	295	0.08	0.92	4.42	El Loop indica que hay movimiento de fondo.

Considerando que la medición del lazo fue válida se aplicó la metodología descrita de optimización para obtener el perfil de velocidades de las partículas del fondo en la sección, a partir de una  $V_{mb \text{ max}} = 0.26 \text{ m/s}$ . A modo comparativo, el perfil se superpuso con los resultados obtenidos en las tres mediciones estacionarias de corta duración se indican en la Tabla 17.

Tabla 17.- Resultados de las mediciones estacionarias cortas de la campaña del 30/01/2021,  $Q=35.43 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Medición	Distancia recorrida BT-Track [m]	Distancia recorrida BT-DMG [m]	Distancia recorrida GPS-Track [m]	Distancia recorrida GPS - DMG [m]	Tiempo [s]	V <sub>mb</sub> [m/s]
1	46.79	13.14	36.73	1.87	478	0.02
2	50.89	19.15	31.55	1.76	333	0.05
3	77.93	45.13	28.44	1.26	312	0.14

Tal como se observa en la Figura 69, las mediciones puntuales realizadas con el método estacionario están en concordancia con el perfil de velocidades determinado anteriormente.

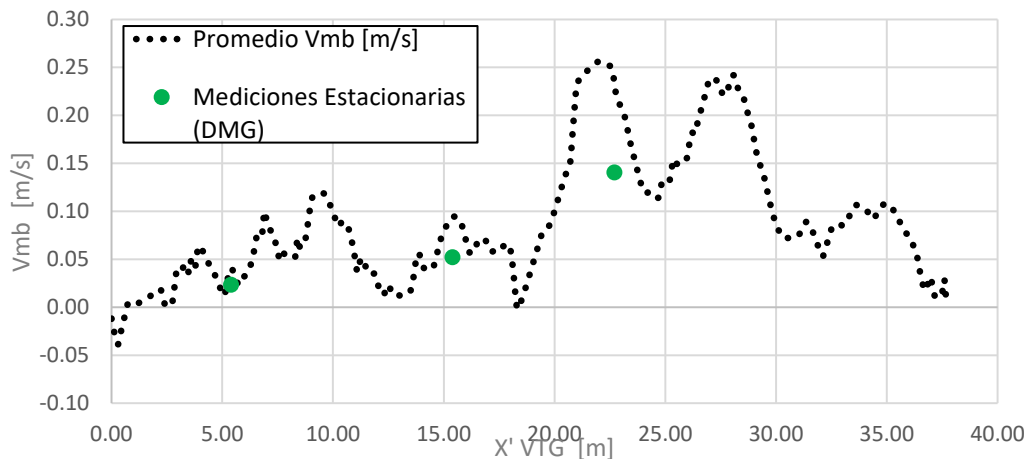


Figura 69.- Perfil de velocidades obtenido con el método del lazo y valores de  $V_{mb}$  puntual determinados con mediciones estacionarias de la campaña del 30/01/2021,  $Q=35.43 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Finalmente, se estimó el transporte de sedimentos a través de las fórmulas empíricas presentadas y se obtuvo una tasa de transporte de sedimento de fondo por unidad de ancho de  $q_b = 0.00002 \text{ m}^2/\text{s}$ , y un transporte total fondo de  $Q_b = 0.00083 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Evento 02/02/2021

*Relevamiento de condiciones hidrometeorológicas, hidrológicas e hidráulicas*

El día 01/02/2021 comenzó aproximadamente a las 15:00 hs un evento de tormenta en la cuenca de estudio. El reporte meteorológico de lluvia precipitada entre el 01/02/2021 09:00 hs hasta el 02/02/2021 09:00 hs se presenta a continuación en la Figura 70.

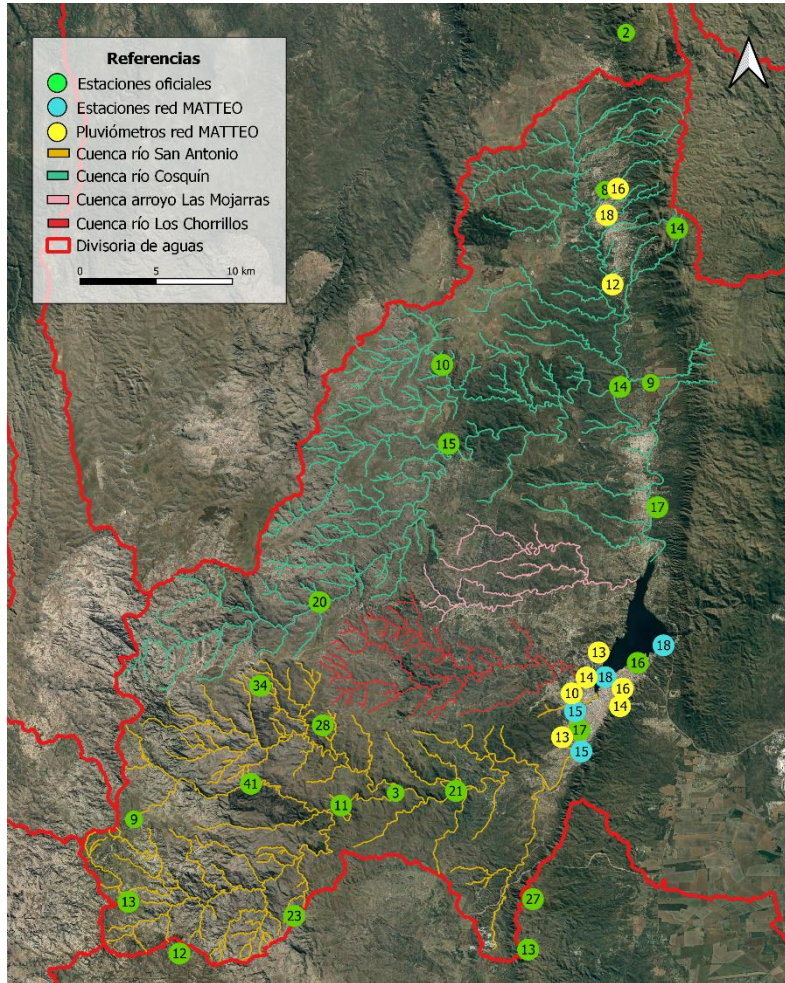


Figura 70.- Reporte meteorológico de lluvia precipitada entre el 01/02/2021 09:00 hs hasta el 02/02/2021 09:00 hs, recopilando información de estaciones meteorológicas oficiales y de la red MATTEO (estaciones meteorológicas y pluviómetros).

El mismo día, se realizó una campaña de aforo con ADCP en la sección del puente Mansilla donde se midió un caudal líquido de  $Q=45.82 \text{ m}^3/\text{s}$ , aproximadamente 13 veces mayor al módulo del río. Los resultados generales obtenidos se presentan en la Tabla 18, mientras que el perfil medio de velocidades relevado en la Figura 71.

Tabla 18.- Resultado de las mediciones de caudal líquido de la campaña del 02/02/2021,  $Q=45.82 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Campaña	Ancho [m]	Área [m <sup>2</sup> ]	Prof. Media [m]	U [m/s]	Q Líquido [m <sup>3</sup> /s]	q [m <sup>2</sup> /s]	Incertidumbre [%]	COV [%]
02/02/2021	41.81	65.05	1.35	0.70	45.82	1.09	5.1	2.36

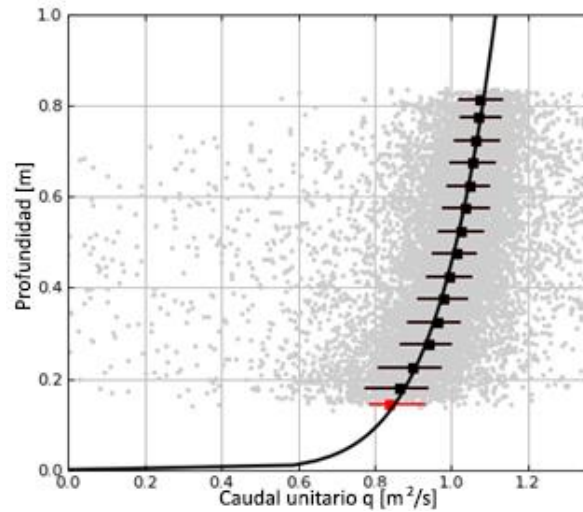


Figura 71.- Perfil medio de velocidades durante la medición.

La campaña se realizó entre las 16:55 hs. y 17:35 hs. En esta franja horaria, la cota del Embalse San Roque se encontraba en 34.34 m y el efecto remanso del embalse sobre el río llegaba aproximadamente al punto de coordenadas  $31^{\circ}25'26.79''S$ ,  $64^{\circ}30'44.15''O$ .

Se relevaron los niveles de agua en el Puente Juncal en el rango horario del aforo. A las 15:50 hs el nivel fue de 1.6 m y a las 18:15 de 1.55 m.

#### Relevamiento de características y transporte de sedimentos

Se realizó una medición con el método del lazo que resultó válida para las condiciones de la sección pero, como se observa en la parte superior de la Figura 72, no se generó la “V” característica que forma el recorrido con seguimiento de fondo (BT), indicando entonces la ausencia de transporte de fondo. En la parte inferior de la Figura 72, se muestra la batimetría de la sección espejada, junto con la velocidad del agua en escala cromática. En la Tabla 19 se observan los resultados numéricos de esta medición dados por el software.

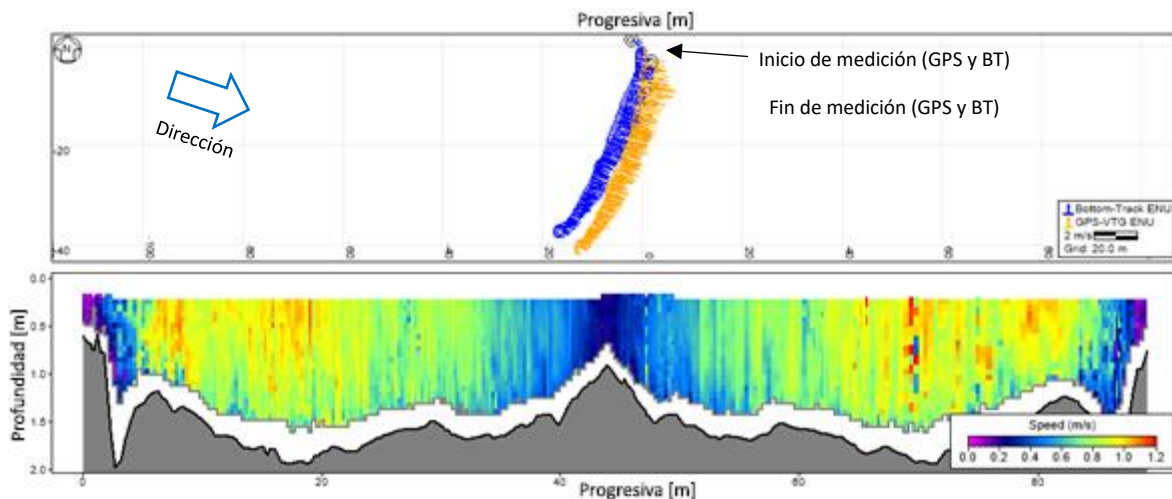


Figura 72.- Resultado del método del lazo de la campaña del 02/02/2021,  $Q=45.82 m^3/s$ .



Tabla 19.- Resultados del método del lazo de la campaña del 02/02/2021,  $Q=45.82 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Q [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]	D <sub>up</sub> [m]	Tiempo [seg]	V <sub>mb</sub> [m/s]	Velocidad del Flujo [m/s]	% de datos de seguimiento de fondo descartados (BT)	Comentarios
45.82	2.65	313	0.01	0.72	1.92	La V <sub>mb</sub> es menor a la velocidad mínima criterio.

Durante la campaña, debido al resultado obtenido, se evaluó la posibilidad de estar midiendo en la zona de valles de las formas de fondo y que en consecuencia no haya transporte. Por lo tanto, se aplicó nuevamente el método del lazo unos metros aguas abajo de la primera medición, como se observa en la Figura 73. Sin embargo, los resultados fueron similares y se confirmó la ausencia de transporte de fondo.



Figura 73.- Ubicación de las mediciones realizadas con el método del lazo durante la campaña del 02/02/2021,  $Q=45.82 \text{ m}^3/\text{s}$ .

#### Análisis de resultados

En la Figura 74 se observan los perfiles de velocidad medidos en las campañas del 30/01/2021 y del 02/02/2021. Aun cuando los valores de caudal son comparables, se observan grandes diferencias en la forma del perfil, con velocidades máximas de alrededor de 0.8 m/s durante el día 02/02/2021 y velocidades superiores a 1.20 m/s el día 30/01/2021. Ello influye directamente en la velocidad de transporte de fondo en la sección y avala la ausencia de transporte de sedimentos detectada en campo.

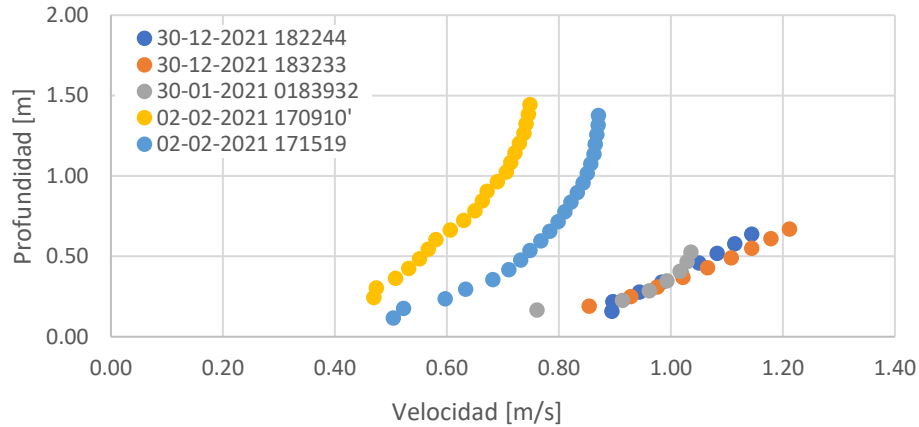


Figura 74.- Perfiles de velocidad obtenidos en las campañas del 30/01/2021 y 02/02/2021.

### Evento 13/10/2021

#### Relevamiento topográfico

En este evento específico, se considera como hipótesis que se formaron formas de fondo, pero fueron destruidas al disminuir el nivel del río San Antonio de forma rápida. En consecuencia, días después de la crecida, quedó el cauce expuesto, evidenciando un fondo liso. Por lo tanto, se realizó un relevamiento visual y con VANT para caracterizar la topografía.

#### Relevamiento de imágenes

En la zona 2, quedaron expuestas zonas con arena y sin formas de fondo, tal como se puede observar en la Figura 75, donde se compara la diferencia en el punto fijo 2 antes del evento de crecida (a), donde había formas de fondo y después (b), donde se observa el lecho liso.



Figura 75.- Imágenes del punto fijo 2 (a) antes del evento (24/09/2021) y (b) después del evento de crecida (20/10/2021)

En la zona 3, desde el punto fijo 4 se puede observar que al ensancharse el cauce la crecida no ocupó todo el ancho del río, quedando en la margen izquierda una barranca con formas de fondo. Sin embargo, tal como se observa en la Figura 76, en el resto del cauce los sedimentos fueron transportados. Durante la campaña anterior (relevamiento del evento del 16/03/2021), se relevaron grandes bancos de arena debajo del puente Peatonal, que como se evidencia fueron removidos por la crecida.



Figura 76.- Imágenes del punto fijo 4 (a) antes del evento (24/09/2021) y (b) después del evento de crecida (14/10/2021)

#### Relevamiento topográfico con VANT

El relevamiento permitió generar una ortofoto con resolución de 2.4 cm/px y un posterior modelo digital de elevaciones con resolución 4.8 cm/px, para la zona 1 (Figura 116) y zonas 2 y 3 (Figura 133). En dichas figuras se evidencia el lecho plano observado en campo.

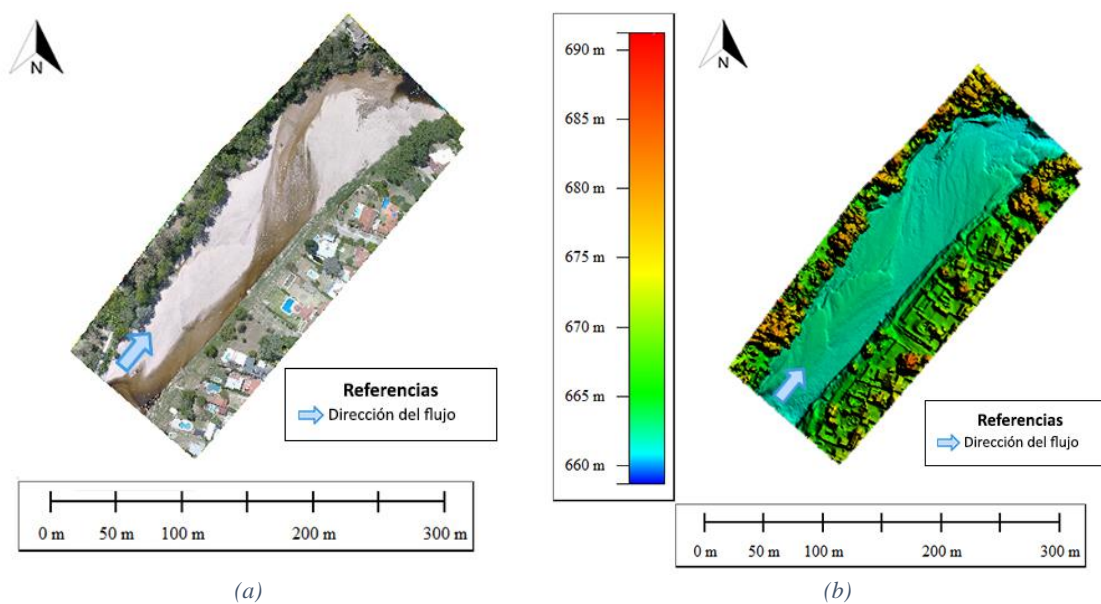


Figura 77.- (a) Ortofoto y (b) Modelo Digital de Elevaciones, generados con el VANT en la zona 1.

a)

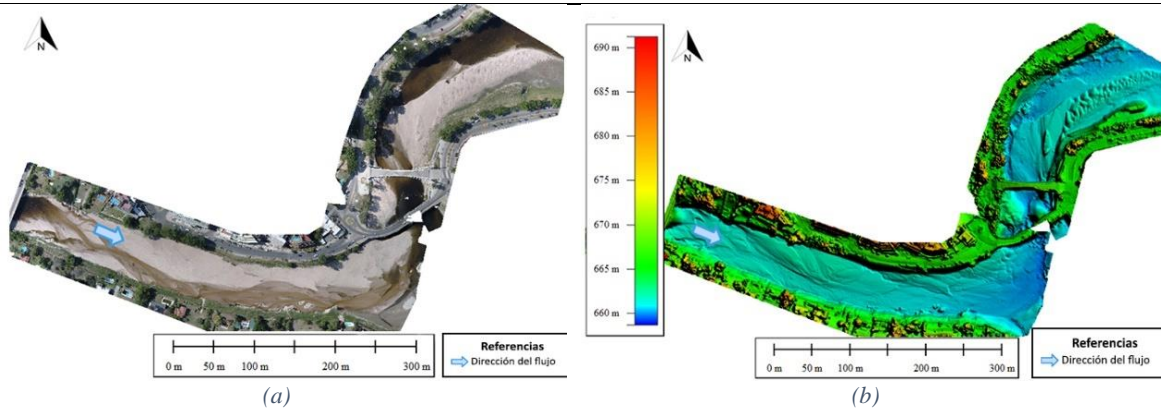


Figura 78.- (a) Ortofoto y (b) Modelo Digital de Elevaciones, generados con el VANT en las zonas 2 y 3.

### Análisis del DEM

En la Figura 79 se presenta el perfil longitudinal del lecho del cauce en la zona 1, donde se observa una pendiente creciente de 0.35% y no se detectan formas de fondo. La longitud del perfil se encuentra acotada debido a que las progresivas restantes se encuentran sumergidas.

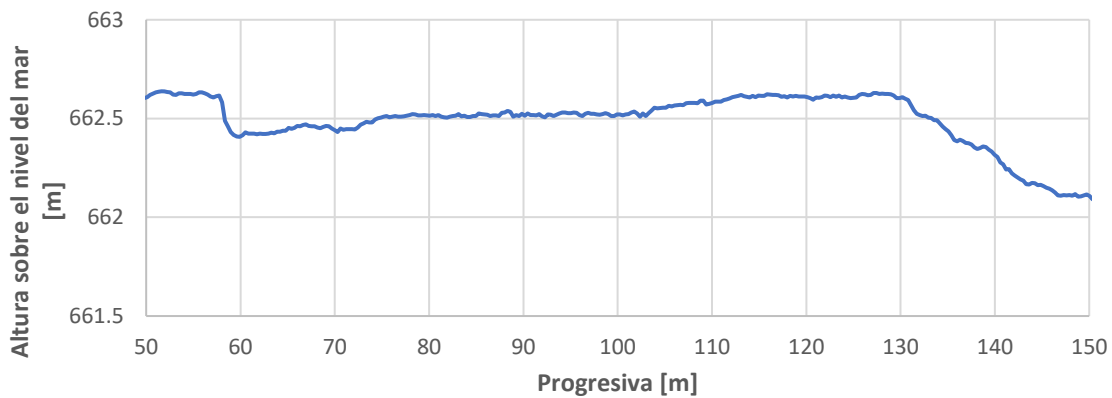


Figura 79.- Perfil longitudinal del lecho del cauce en la zona 1.

En la Figura 80 se observa el perfil longitudinal del lecho expuesto en la zona 2, que presenta una pendiente negativa del 0.40% sin formas de fondo significativas.

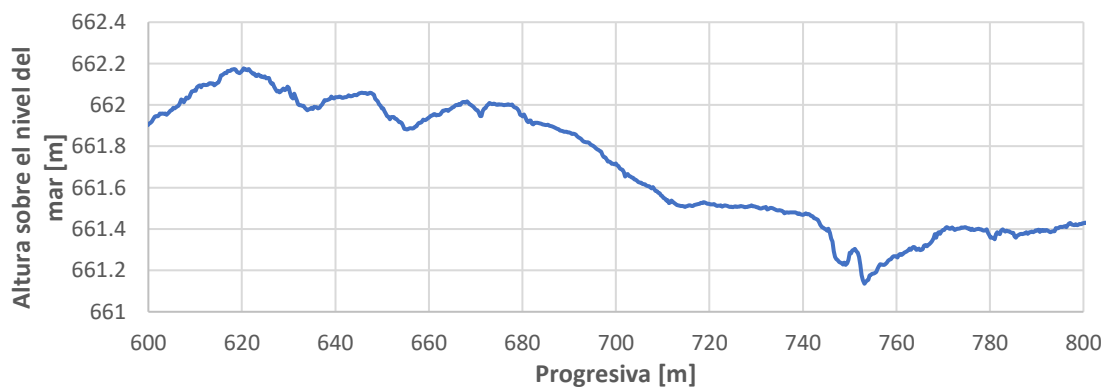


Figura 80.- Perfil longitudinal del lecho del cauce en la zona 2.



En la Figura 81 se observa el perfil longitudinal del lecho expuesto en la zona 3, que es liso entre las progresivas 1030-1050, y está seguido por formas de fondo significativas hacia aguas abajo. Estas dunas, de acuerdo a lo visto en campo, son las relevadas y generadas en el evento del 16/03/2021 (que se desarrollará luego) que no fueron alcanzadas por el nivel del agua durante la crecida analizada en este caso y en consecuencia no fueron desarmadas. La pendiente tiende a disminuir hacia aguas abajo, siendo del 0.70% a partir de la progresiva 1075.

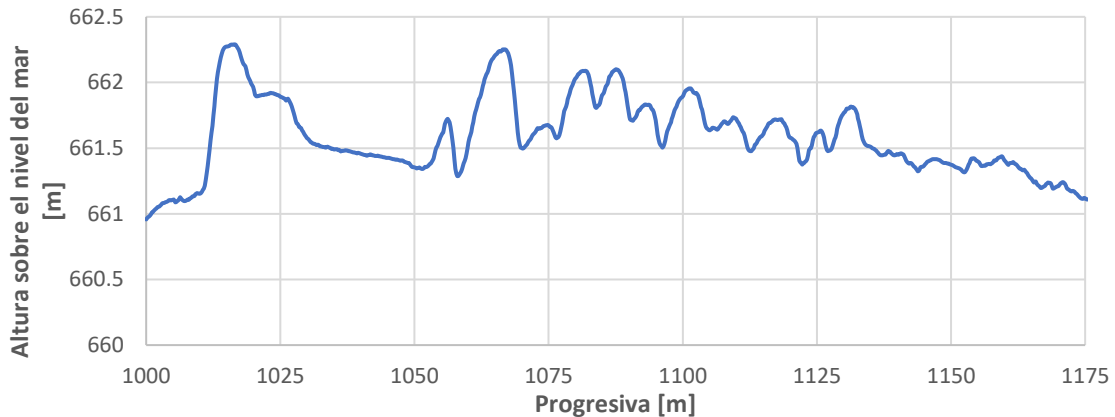


Figura 81.- Perfil longitudinal del lecho del cauce en la zona 3.

*Relevamiento de características y transporte de sedimentos: Características de sedimentos*

Tal como se observa en la Figura 82, en la zona 1 se extrajeron dos muestras (MI y MII), mientras que en la zona 2 cinco muestras (M1, M2, M3, M4, M5) y en la zona 3 una muestra (Z3). En todos los casos, se eliminaron los primeros 2cm del lecho.



Figura 82.- Muestras de sedimento extraídas durante la campaña.

Las curvas granulométricas obtenidas en las zonas 1 y 3 se representan en la Figura 83. Allí, se puede observar que no hay una variabilidad significativa en los resultados de la MI y MII y en consecuencia puede considerarse el promedio de ambas como resultado representativo de la zona. Además, el tamaño de las partículas de la zona 3 es levemente superior al tamaño obtenido en la zona 1.

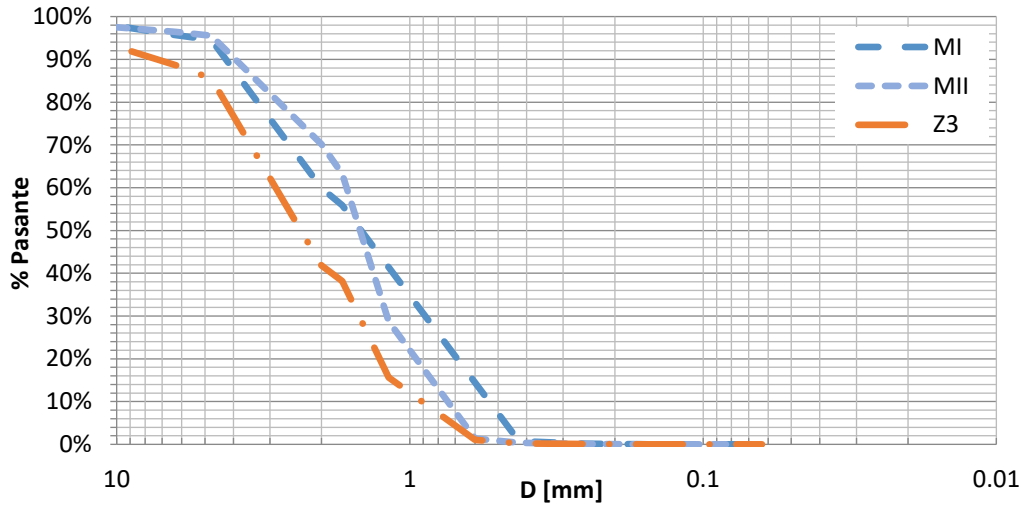


Figura 83.- Curvas granulométricas del material del fondo para las muestras extraídas de la zona 1.

Las curvas granulométricas de la zona 2 se presentan en la Figura 84. En este caso, se puede observar que hay una variabilidad significativa a lo largo del perfil longitudinal del cauce y en consecuencia hay una incertidumbre asociada al lugar de extracción de la muestra.

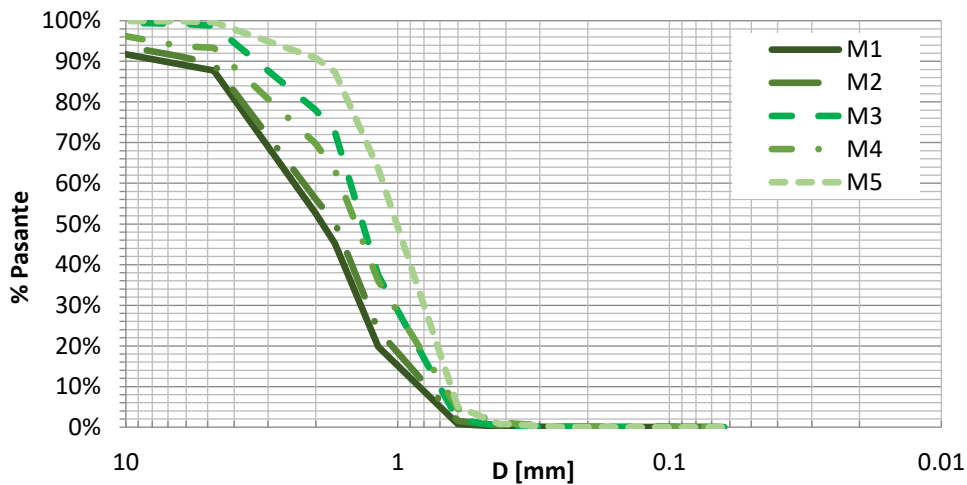


Figura 84.- Curvas granulométricas del material del fondo para las muestras extraídas de la zona 2.

Finalmente, los parámetros característicos obtenidos para las muestras analizadas se presentan en la Tabla 20.

Tabla 20.- Parámetros representativos obtenidos para las muestras del evento del 13/10/2021.

Parámetro	MI	MII	Promedio Z1	M1	M2	M3	M4	M5	Z3
<b>D<sub>90</sub> [mm]</b>	4.39	4.15	4.29	6.82	5.30	3.63	4.36	1.93	7.83
<b>D<sub>50</sub> [mm]</b>	1.61	1.50	1.55	1.90	1.69	1.37	1.45	1.05	2.52
<b>D<sub>16</sub> [mm]</b>	1.01	0.91	0.95	1.06	0.98	0.83	0.81	0.71	1.19
<b>D<sub>84</sub> [mm]</b>	3.91	3.50	3.74	4.46	4.31	2.85	3.66	1.63	4.66
<b>og</b>	1.97	1.96	1.98	2.05	2.10	1.85	2.12	1.51	1.97

*Relevamiento de características hidrometeorológicas, hidrológicas e hidráulicas*

Como hipótesis se asume que el lecho liso observado se generó debido a una disminución rápida del tirante del río en la rama descendente del hidrograma de crecidas, que destruyó las formas de fondo generadas en las condiciones de máximo escurrimiento del hidrograma ya que el nivel del embalse estaba bajo y no generaba efectos de remanso en el tramo de estudio. Dicho evento ocurrió durante la madrugada del día 13/10/2021 y el reporte meteorológico se presenta en la Figura 85.

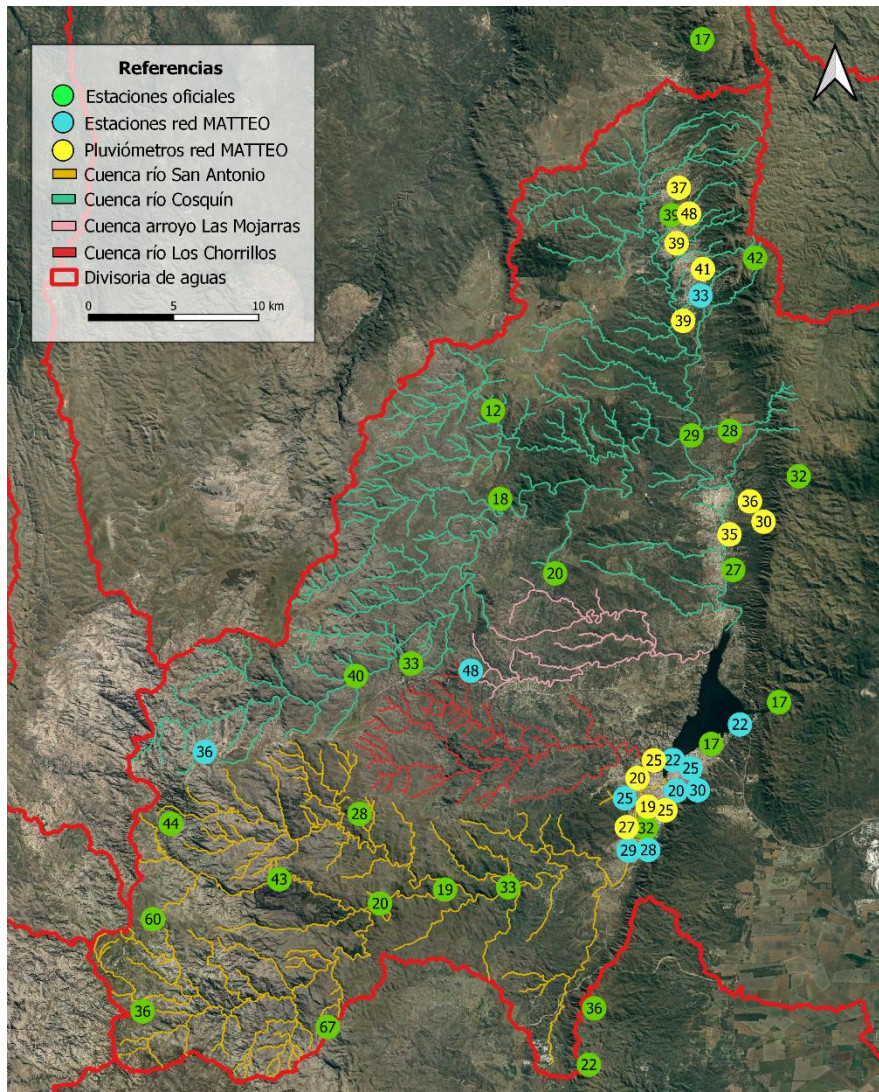


Figura 85.- Reporte meteorológico de lluvia precipitada entre el 12/10/2021 09:00 hs hasta el 13/10/2021 09:00 hs, recopilando información de estaciones meteorológicas oficiales y de la red MATTEO (estaciones meteorológicas y pluviómetros).

Consecuentemente, creció el río San Antonio llegando a un  $Q_{pico}=100 \text{ m}^3/\text{s}$  e ingresando al embalse desde todos sus tributarios un  $Q_{pico}=220 \text{ m}^3/\text{s}$ . En los momentos previos a la crecida, el embalse San Roque presentaba un nivel de 31.83 m (12/10/2021 21:00hs). Luego de su finalización, el nivel alcanzó 32.21 m (14/10/2021 14:30 hs), evidenciando un aumento de 0.38 m. La variación de niveles y caudales previos y posteriores al evento se presentan en la Figura 86.



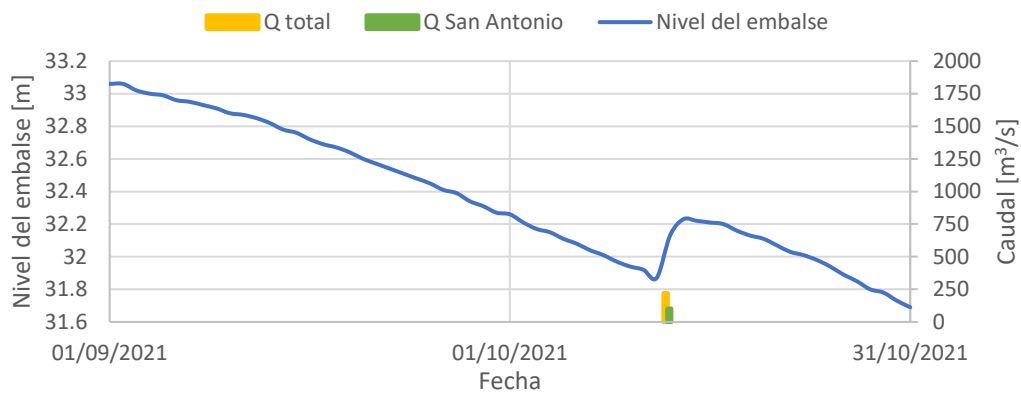


Figura 86.- Hidrograma de tributarios al embalse San Roque y niveles de embalse, periodo 01/03-29/06/2021.

Ciudadanos capturaron la imagen de la Figura 87, donde se puede estimar un tirante de aproximadamente 1 m.



Figura 87.- Imagen captada desde el punto fijo 1 el día 13/10/2021.

Además, en los medios de comunicación se difundió la noticia de la crecida. En Carlos Paz en vivo realizaron una filmación de la zona 3 durante la crecida donde se pueden observar las características del flujo y los impactos de la crecida. El video está disponible en YouTube (Carlos Paz En Vivo, 2021).



Figura 88.- Video de la crecida ocurrida en el río San Antonio el día 13/10/2021 (Carlos Paz En Vivo, 2021).

Evento 09/11/2021

*Relevamiento de condiciones hidrometeorológicas, hidrológicas e hidráulicas.*

Durante la tarde del día 09/11/2021 ocurrió un evento de precipitación en la cuenca de estudio, tal como se observa en el reporte meteorológico del 09/11/2021 09:00 hs hasta el 10/11/2021 09:00 hs de la Figura 89.

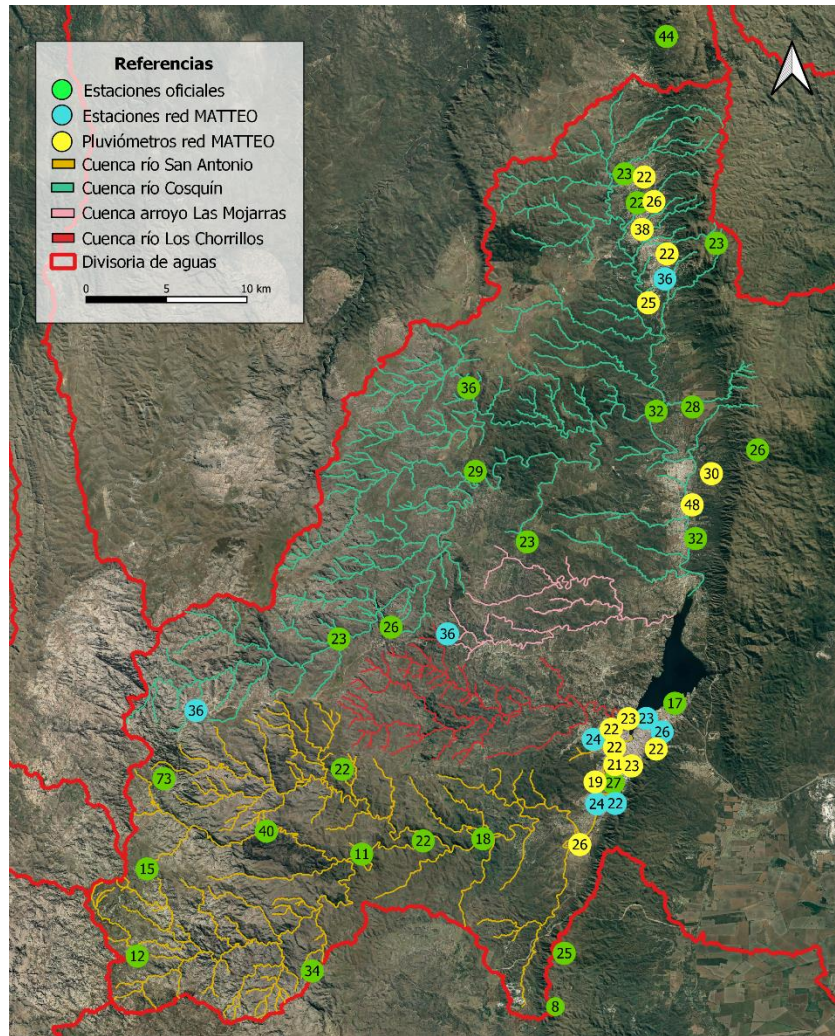


Figura 89- Reporte meteorológico de lluvia precipitada entre el 09/11/2021 09:00 hs hasta el 10/11/2021 09:00 hs, recopilando información de estaciones meteorológicas oficiales y de la red MATTEO (estaciones meteorológicas y pluviómetros).

Las precipitaciones generaron una crecida en el río San Antonio con un  $Q_{pico}=200 \text{ m}^3/\text{s}$  alrededor de las 18:00 hs, con un ancho estimado del cauce de 42 m. Al inicio del evento de crecida (10:00 hs) el nivel del embalse era de 31.70 m y alcanzó el día 10/11/2021 los 32.12 m a las 12:00 hs. Los hidrogramas (tanto del río de análisis como del caudal total ingresante al embalse) y la variación de nivel se presentan en la Figura 90.



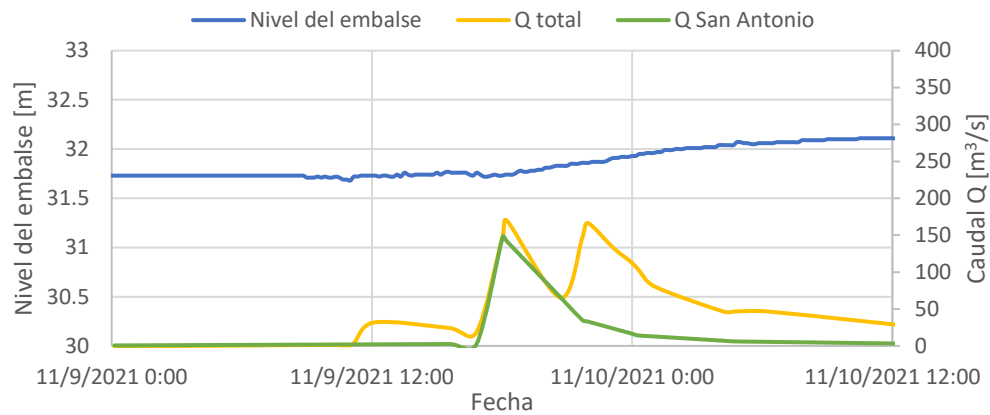


Figura 90.- Hidrograma de aporte de tributarios (Q Total) al embalse San Roque y niveles de embalse, período 09/11/2021 00:00 hs-10/11/2021 12:00 hs.

El 09/22/2021 a las 19:00 hs, cuando el caudal era de aproximadamente  $100 \text{ m}^3/\text{s}$ , ciudadanos relevaron imágenes en los puntos fijos 1 y 2 (Figura 91). Allí, se observa que el tirante es de aproximadamente 1 m. Además, la velocidad superficial máxima se estimó de 1.3 m/s mediante trazadores y a partir de ese valor se estimó la velocidad media de 1.1 m/s.



Figura 91.- Imágenes capturadas durante el evento de crecida del día 09/11/2021, 19:00 hs en (a) punto fijo 1 hacia aguas arriba, (b) punto fijo 2 hacia aguas arriba y (c) punto fijo 2 hacia aguas abajo.

Además, un ciudadano de Villa Carlos Paz compartió en las redes sociales un video filmado desde el puente Central del momento exacto en el cual llegó la crecida del río San Antonio a dicho puente y cubrió prácticamente la totalidad del cauce (Daniel Alejandro, 2021).



(a)

(b)

Figura 92.- Captura del video de la crecida en el río San Antonio ocurrida el día 9/11/2021 (a) minuto 0:36 y (b) minuto 2:46 (Daniel Alejandro, 2021).

Evento 10/11/2021

*Relevamiento de condiciones hidrometeorológicas, hidrológicas e hidráulicas.*

Desde las 09:00 hs del día 10/11/2021 hasta las 09:00 hs del día 11/11/2021 en la cuenca de estudio se reportaron las láminas de lluvia presentadas en la Figura 93.



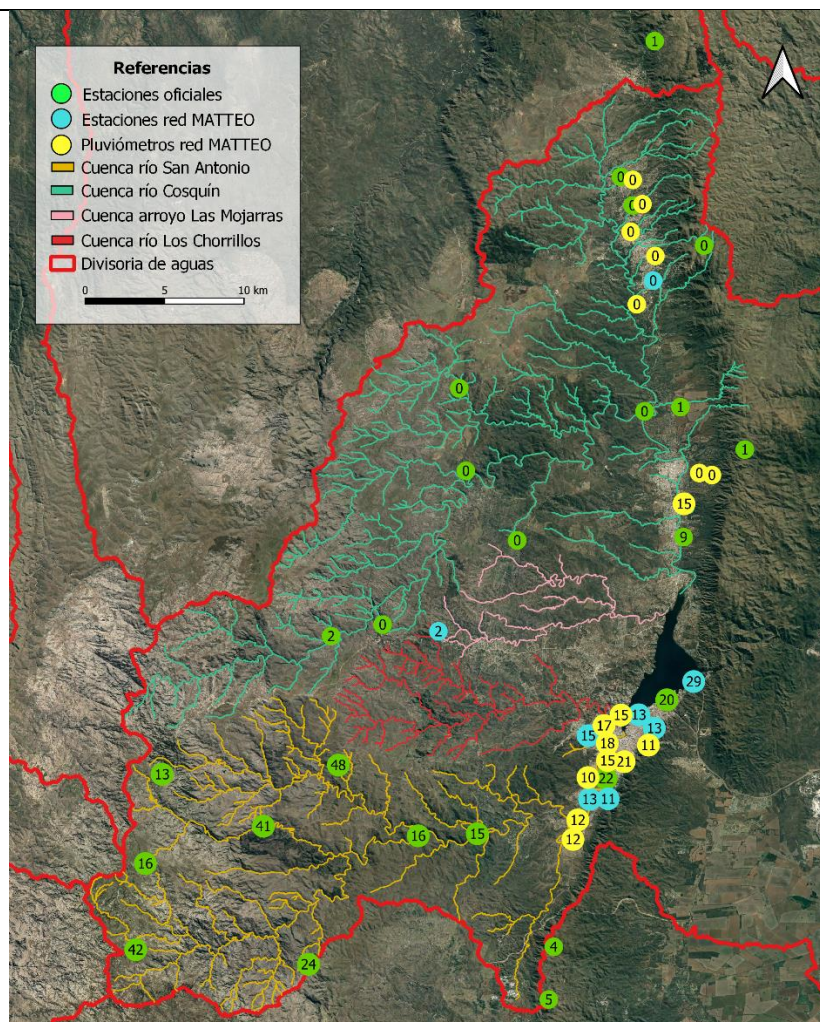


Figura 93.- Reporte meteorológico de lluvia precipitada entre el 10/11/2021 09:00 hs hasta el 11/11/2021 09:00 hs, recopilando información de estaciones meteorológicas oficiales y de la red MATTEO (estaciones meteorológicas y pluviómetros).

Las precipitaciones generaron una crecida con un  $Q_{pico}=310 \text{ m}^3/\text{s}$  alrededor de las 20:00 hs en el río San Antonio (cuyo ancho se estima como 42 m) y un  $Q_{pico}=344 \text{ m}^3/\text{s}$  de todos los tributarios al embalse a la misma hora, con un nivel del embalse de 32.19 m, que alcanzó los 32.68 m el 12/11/2021 a las 00:00 hs. Ello se representa en la Figura 94.

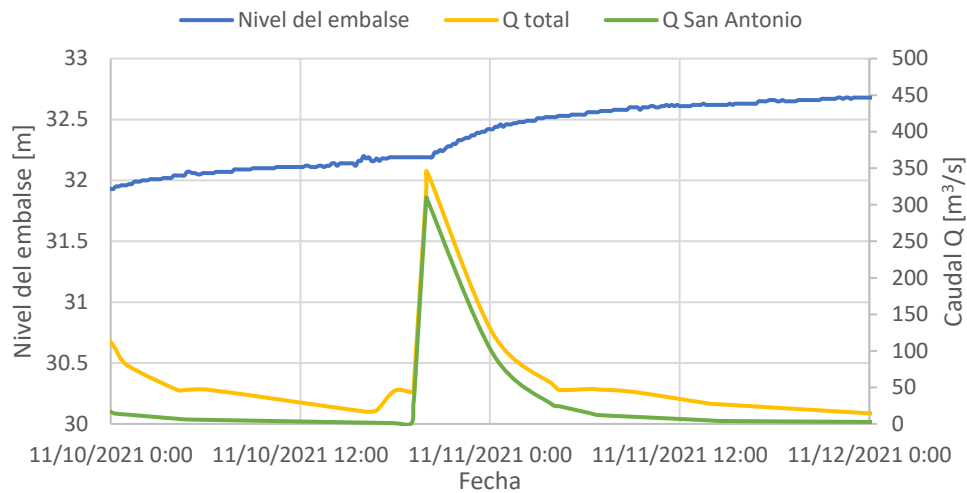


Figura 94.- Hidrograma de tributarios al embalse San Roque y niveles de embalse, período 10/11-12/11/2021.

Ciudadanos relevaron las imágenes de la Figura 91 en el punto fijo 2 a las 21:30 hs, cuando el caudal era de aproximadamente 220 m³/s. Allí se observa que el tirante es de aproximadamente 1.30 m. Además, la velocidad superficial máxima estimada con trazadores fue de 1.96 m/s, y una media de 1.80 m/s.



(a) (b)  
Figura 95.- Imágenes de capturadas en los puntos fijos (a) 2 y (b) 3 durante el evento de crecida del día 10/11/2021, 21:30 hs.

### Evento 10/12/2021

*Relevamiento de condiciones hidrometeorológicas, hidrológicas e hidráulicas.*

Durante la madrugada del día 10/12/2021 ocurrió un evento de lluvia en la cuenca alta. En la Figura 96 se observa el reporte de lámina precipitada desde las 09:00hs del día 09/12/2021 a las 09:00hs del día 10/12/2021.



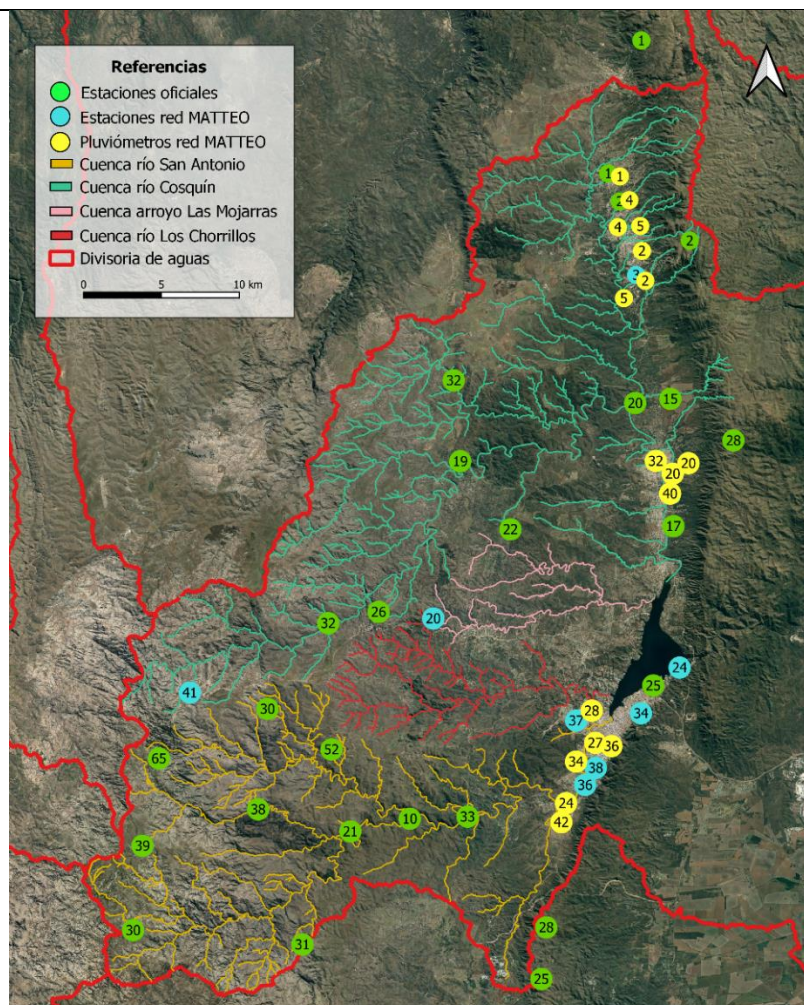


Figura 96.- Reporte de lámina precipitada desde las 09:00hs del día 09/12/2021 a las 09:00hs del día 10/12/2021 en la cuenca de estudio.

Ello generó un  $Q_{pico}$  en el río San Antonio de alrededor de  $250 \text{ m}^3/\text{s}$  a las 09:30 hs (con un ancho estimado de 42 m), un  $Q_{pico}=275 \text{ m}^3/\text{s}$  del total de tributarios al embalse San Roque aproximadamente en el mismo horario y un nivel de 32.11 m. Luego, el embalse alcanzó los 32.60 m el 11/12/2021 a las 12:00 hs, tal como se observa en la Figura 97.

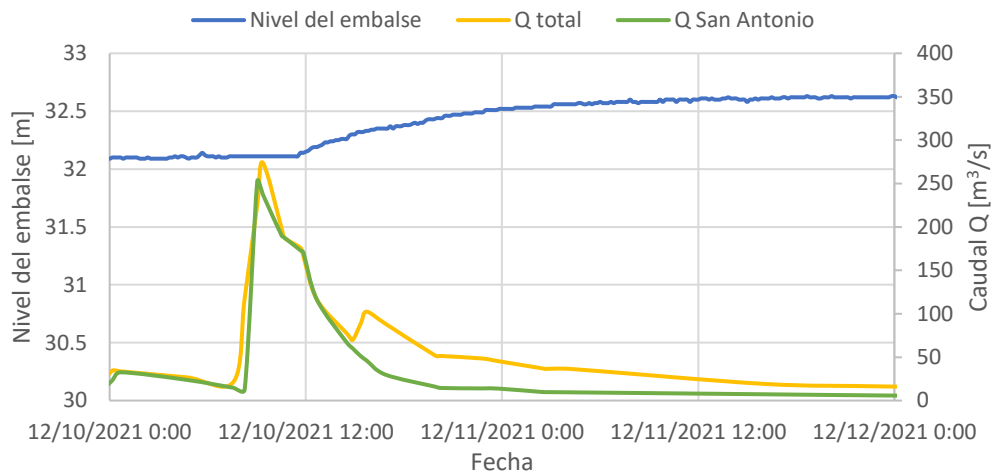


Figura 97.- Hidrograma de tributarios al embalse San Roque y niveles de embalse, período 10/11-12/11/2021.

Ciudadanos relevaron imágenes en el punto fijo 2 (hacia aguas arriba y aguas abajo) presentadas en la Figura 98, el día 10/12/2021 a las 10:40 hs, cuando el caudal era de alrededor de 185 m<sup>3</sup>/s. Allí, se observa que el tirante es de aproximadamente 1 m. Además, mediante trazadores se estimó una velocidad media de 1.55 m/s (uniforme a lo largo del ancho) y una velocidad máxima de 1.61 m/s en la margen izquierda.

A la hora de la medición de la velocidad, la altura en el puente Juncal (B° El Canal) era de 2.8 m. Durante el pico de la crecida, el nivel máximo llegó a 3 m. Esta crecida corresponde a una máxima ordinaria, que ocurre con un tiempo de recurrencia de 1 año.



Figura 98.- Imágenes de capturas el punto fijo 2 durante el evento de crecida del día 10/12/2021 10:40 hs, (a) hacia aguas arriba (b) hacia aguas abajo.

#### Relevamiento topográfico

Conociendo el tirante y las características del sedimento (que se desarrollarán luego) es posible estimar el tamaño de las formas de fondo a partir de partir de las fórmulas empíricas presentadas en el capítulo 4. Como resultado, se obtuvo un rango de altura de dunas de 0.36-0.17 m y una longitud de 6.25 m.

*Relevamiento de características de la granulometría del lecho*

Se realizó la extracción de muestras en una sección transversal aguas abajo del Puente Mansilla, tal como se observa en la Figura 99. Las curvas granulométricas obtenidas se presentan en la Figura 100, mientras que los principales parámetros en la Tabla 21. En general, se observa que hay una variación en el tamaño de las partículas de sedimento a lo largo de la sección transversal.



Figura 99.- Sección transversal de muestreo de sedimentos durante la campaña del evento del 10/12/2020.

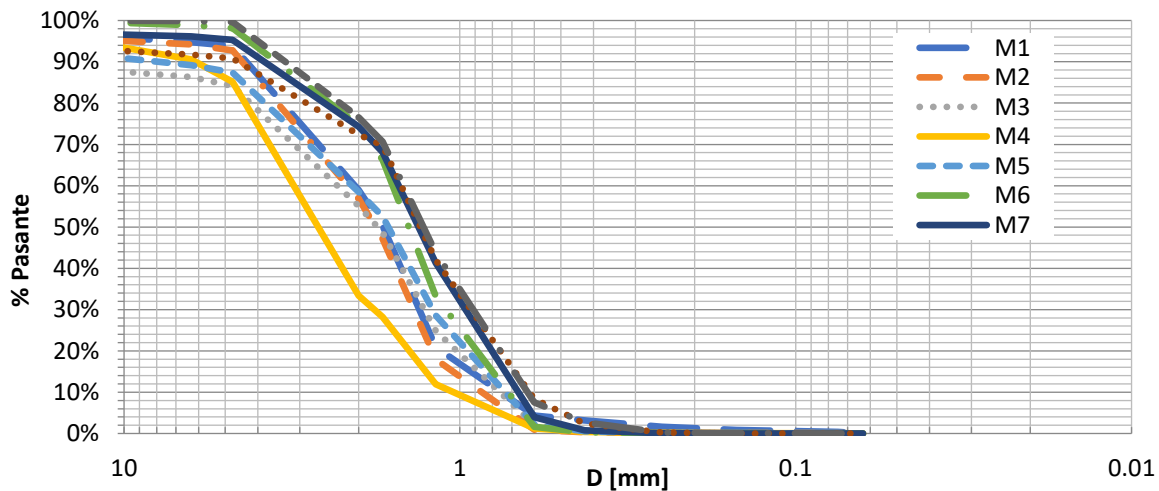


Figura 100.- Curvas granulométricas obtenidas en la sección transversal analizada del Río San Antonio, Zona 2.

Tabla 21.- Parámetros característicos obtenidos en la sección transversal analizada del Río San Antonio, Zona 2. La ubicación de los puntos se observa en la Figura 101.

	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	Prom.
<b>Dist. desde margen izq [m]</b>	0	7	14	21	28	35	42	49	56	-
<b>D<sub>90</sub> [mm]</b>	4.45	4.54	16.75	6.14	8.59	3.79	4.05	4.62	3.60	4.57
<b>D<sub>50</sub> [mm]</b>	1.70	1.79	1.76	2.88	1.65	1.44	1.35	1.33	1.30	1.59



<b>D<sub>16</sub> [mm]</b>	1.01	1.11	0.96	1.31	0.90	0.86	0.79	0.73	0.74	0.88
<b>D<sub>84</sub> [mm]</b>	3.97	4.08	4.73	4.69	4.43	3.09	3.27	3.73	2.88	2.76
<b>σg</b>	1.99	1.92	2.23	1.89	2.21	1.89	2.04	2.26	1.98	1.77

Para un análisis más sencillo de los resultados obtenidos, se realizó el esquema representando el diámetro medio ( $D_{50}$ ) característico de cada punto de muestreo a lo largo de la sección transversal.

Al crecer el río el día 10/11/2021, el cauce quedó completamente cubierto de agua, teniendo velocidades altas en el centro y menores velocidades en las márgenes. De acuerdo a los resultados obtenidos, hay un aumento del tamaño del sedimento desde los márgenes hacia el centro del cauce, en concordancia con el incremento de las velocidades.

Al finalizar la crecida, el río disminuyó su tirante lentamente, quedando solo cubiertos los puntos de muestreo 5, 7, 8 y 9, donde no se observa una tendencia clara de variación de tamaño de grano. En los puntos 7, 8 y 9 se observó transporte de sedimento fino de fondo al momento del muestreo.

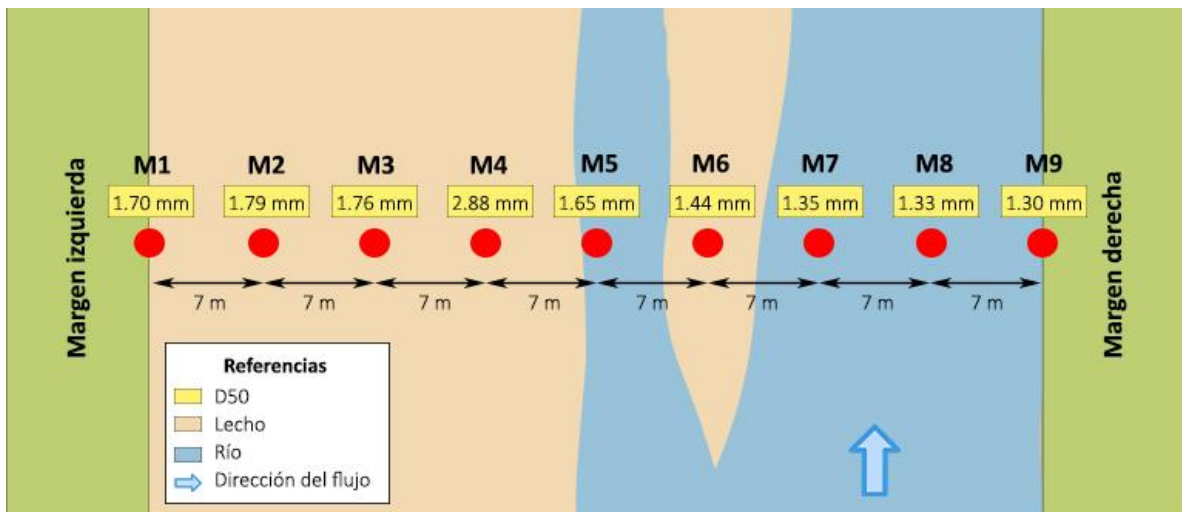


Figura 101.- Esquema de distribución del diámetro medio a lo largo de la sección transversal.

Evento 23/01/2022

*Relevamiento de condiciones hidrometeorológicas, hidrológicas e hidráulicas.*

El día 22/01/2022 alrededor de las 21:00 hs ocurrió un evento de precipitación en la cuenca alta. El reporte meteorológico de lluvia precipitada entre el 22/01/2022 09:00 hs hasta el 23/01/2022 09:00 hs se presenta en la Figura 102.

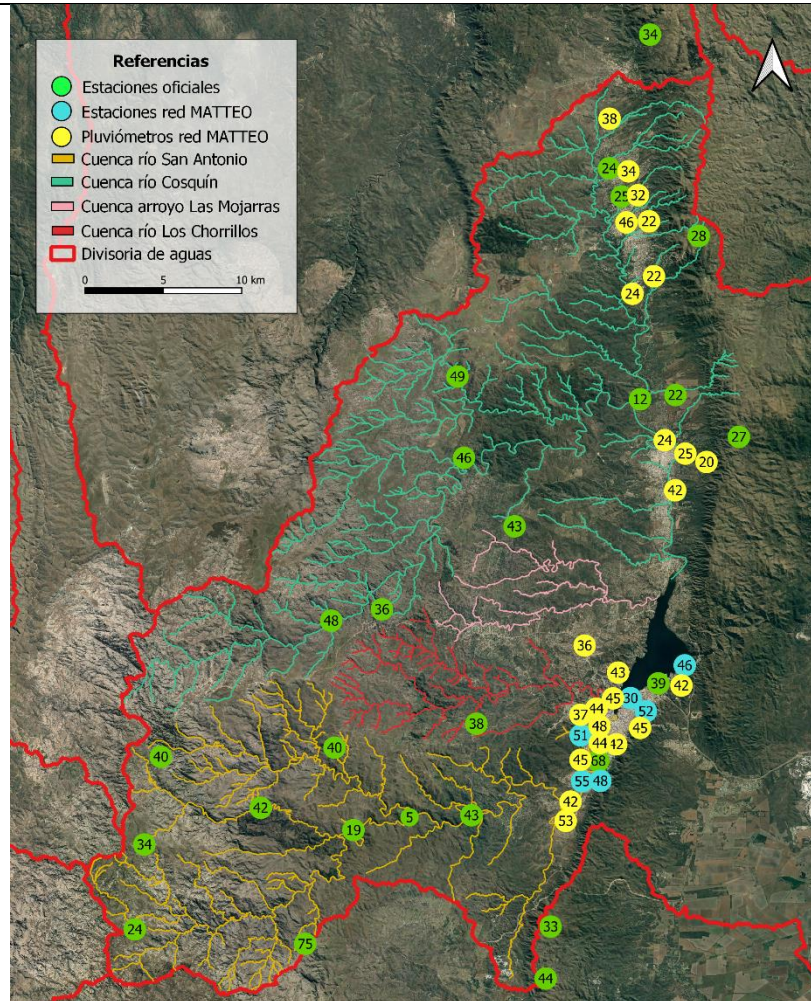


Figura 102.- Reporte meteorológico de lluvia precipitada entre el 22/01/2022 09:00 hs hasta el 23/01/2022 09:00 hs, recopilando información de estaciones meteorológicas oficiales y de la red MATTEO (estaciones meteorológicas y pluviómetros).

Ello generó un  $Q_{pico}$  en el río San Antonio de alrededor de  $150 \text{ m}^3/\text{s}$  a las 06:00 hs y un  $Q_{pico}=350 \text{ m}^3/\text{s}$  del total de tributarios al embalse San Roque a las 11:15 hs. El embalse pasó de tener un nivel de 33.50 m el 23/01/2022 a las 06:00 hs a alcanzar la cota de 34.30 m el 24/01/2022 a las 07:40 hs. respectivos hidrogramas y niveles se presentan en la Figura 103.

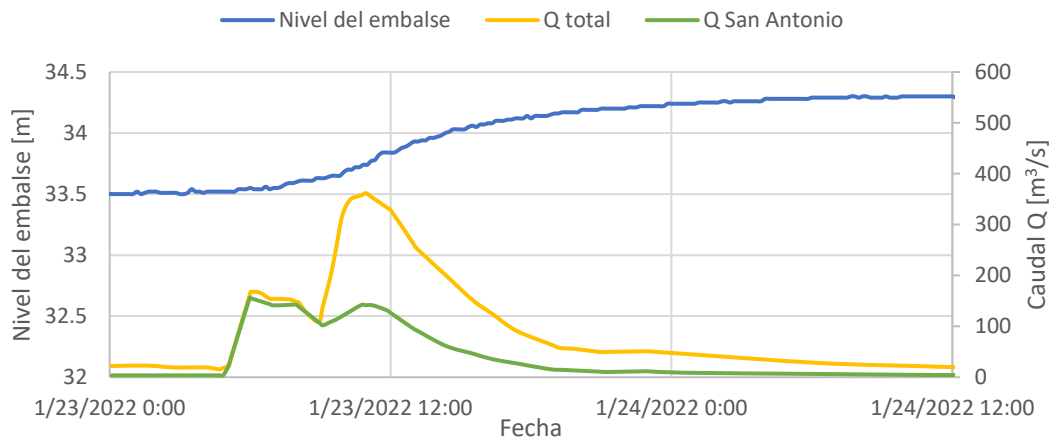


Figura 103.- Hidrograma de tributarios al embalse San Roque y niveles de embalse, período 23/01/2022 00:00 hs - 14/01/2022 12:00 hs.

Ciudadanos relevaron imágenes en los puntos fijos 1 y 2 (hacia aguas arriba y aguas abajo) presentadas en la Figura 98, a las 13:20 hs, cuando el caudal líquido era de alrededor de 100 m<sup>3</sup>/s. Además, mediante trazadores se estimó una velocidad media de 1.17 m/s a las 13:20 hs. Si bien las velocidades en la sección son bastante homogéneas, las velocidades máximas se dan en la margen izquierda.



Figura 104.- Imágenes capturadas durante el evento de crecida del día 23/01/2022 13:20 hs, desde el punto fijo 1 (a) hacia aguas arriba (b) hacia aguas abajo y punto fijo 2 (c) hacia aguas arriba y (d) hacia aguas abajo.

Además, se relevó el nivel de la superficie libre del agua en el puente Mansilla en el punto de referencia, que resultó de  $663.15 \pm 0.05$  m. En consecuencia, el tirante es de  $1.15 \pm 0.05$  m a las 13:20 hs.



### 5.3. Análisis de resultados y discusión

En este capítulo se presentan resultados de implementar la metodología de relevamiento de información hidrometeorológica, hidrológica, hidráulica, topografía y sedimentos durante crecidas.

Respecto a la información hidrológica e hidrometeorológica, se recopiló información de redes oficiales de medición y ciencia ciudadana, donde resulta evidente el aumento de la cantidad de estaciones meteorológicas a lo largo de los años, logrando una mejor caracterización espacial de los eventos de precipitación que presentan alta variabilidad. Gracias a la implementación de la ciencia ciudadana (red MATTEO) en la cuenca de estudio prácticamente se duplica la información relevada. Los datos de nivel del embalse son de acceso libre y la influencia de la variable es muy importante, por lo tanto contar con dicha información resulta muy valioso. A su vez, debido a la reciente existencia de sensores de nivel en los principales tributarios al embalse San Roque, se logra caracterizar el hidrograma de los eventos de crecida.

Parte de la información hidráulica cuasi-instantánea se relevó con ADCP. Esta técnica baja incertidumbre, pero su implementación requiere una logística importante para estar en la zona de estudio durante la crecida, traslado del instrumento y capacitación de agentes de medición, implicando altos costos. Por ello, luego se aplicaron técnicas experimentales más sencillas, estimando la velocidad con trazadores y el tirante con imágenes o midiendo con distanciómetro, dando buenos resultados. Además, la sencillez de la técnica hace que pueda ser aplicada por una persona no capacitada técnicamente, disminuyendo costos y logística.

Respecto a la topografía, con ADCP se logró caracterizar un conjunto de dunas, pudiendo establecer la altura, longitud, velocidad, y factor de forma de duna predominante en la condición hidráulica medida.

A través de muestras tomadas en el cauce se pudo determinar que hay una variación significativa del tamaño de sedimento del lecho a lo largo de una sección transversal, atribuido al cambio de velocidades en la misma sección. En las márgenes, las velocidades y el tamaño de las partículas son menores, mientras que en las zonas centrales del cauce donde las velocidades son mayores el diámetro característico de los sedimentos aumenta.

A través del método del lazo con el ADCP se logró identificar en campo la presencia o ausencia de transporte de fondo y estimar un perfil de velocidades medio del fondo en la sección, que estuvo en concordancia con los resultados obtenidos en las mediciones estacionarias de corta duración.

## Capítulo 6: Resultados del relevamiento de campo realizado durante estiaje

### 6.1. Introducción

En el capítulo 4 se presentó la metodología para realizar el relevamiento de campo en función de las condiciones hidrológicas del tramo estudiado del Río San Antonio. En este capítulo se presentarán los resultados obtenidos en los relevamientos realizados durante la época de estiaje donde el río San Antonio disminuye en tres órdenes de magnitud su caudal y deja expuesto el lecho. En los casos donde el nivel del embalse San Roque disminuye lentamente, quedan expuestas en la zona de estudio las formas de fondo generadas durante la última crecida que generó transporte de sedimentos. Esto resulta una condición particular muy favorable para este estudio, similar a lo que ocurre en modelos de laboratorio de fondo móvil bajo escenarios controlados. Cuando se busca representar formas de fondo u hoyas de erosión en un modelo físico, una vez que se alcanza el estado de equilibrio de la situación que se quiere analizar, se genera una inundación del modelo y luego se desagota muy lentamente para evitar la deformación de las formas de fondo y erosiones.

Para el análisis bajo estas condiciones, primero se relevan y analizan los datos topográficos junto a características del sedimento y luego se vinculan a condiciones hidrológicas e hidráulicas antecedentes.

### 6.2. Resultados obtenidos

Se realizaron relevamientos relacionados a cuatro eventos en el río San Antonio bajo distintas condiciones hidrometeorológicas, hidrológicas e hidráulicas. A modo resumen en la Tabla 13 se presentan las características relevadas en cada caso y a continuación se desarrolla cada uno de los eventos.

Tabla 22.- Resumen de las características relevadas por evento.

Año	Evento	Relevamiento topográfico	Relevamiento de características de granulometría y transporte de sedimentos	Relevamiento de condiciones hidrometeorológicas, hidrológicas e hidráulicas
Año 2009	25/03/2009	Fotográfico		Precipitación Nivel del embalse
Año 2017	21/03/2017	Fotográfico		Precipitación Hidrograma Nivel del embalse



<b>Año 2020</b>	<b>25/03/2020</b>	Fotográfico Convencional Con VANT	Caracterización granulométrica de valle y cresta Cálculo de volumen transportado	Precipitación Hidrograma Nivel del embalse Imágenes
<b>Año 2021</b>	<b>16/03/2021</b>	Convencional Con GPS Con VANT	Caracterización granulométrica de valle y cresta Cálculo de volumen transportado	Precipitación Hidrograma Nivel del embalse Imágenes

Año 2009

*Relevamiento topográfico*

Analizando las imágenes satelitales del día 20/08/2009, se observan pequeñas formas de fondo (Figura 105) con una longitud en la zona 1 de L1=3.7 m y en la zona 2 de L2=4.1 m. Esas formas de fondo no se generaron para las condiciones de escurrimiento del día del registro de la imagen, sino que están asociadas a las condiciones hidrometeorológicas, hidrológicas e hidráulicas de la última crecida del periodo de lluvia 2008-2009 que generó transporte de fondo en el área de estudio.



Figura 105.- Imágenes satelitales del Río San Antonio el día 20/08/2009.

*Relevamiento de condiciones hidrometeorológicas, hidrológicas e hidráulicas.*

Los días 4-5/03/2009 y 25/03/2009 en la cuenca de estudio ocurrieron los últimos eventos significativos de precipitación del año hidrológico 2008-2009, que se asocian a las crecidas que generaron las formas de fondo relevadas. En la Figura 106 se presenta el reporte hidrometeorológico del primer evento, y en la Figura 107 del segundo evento.

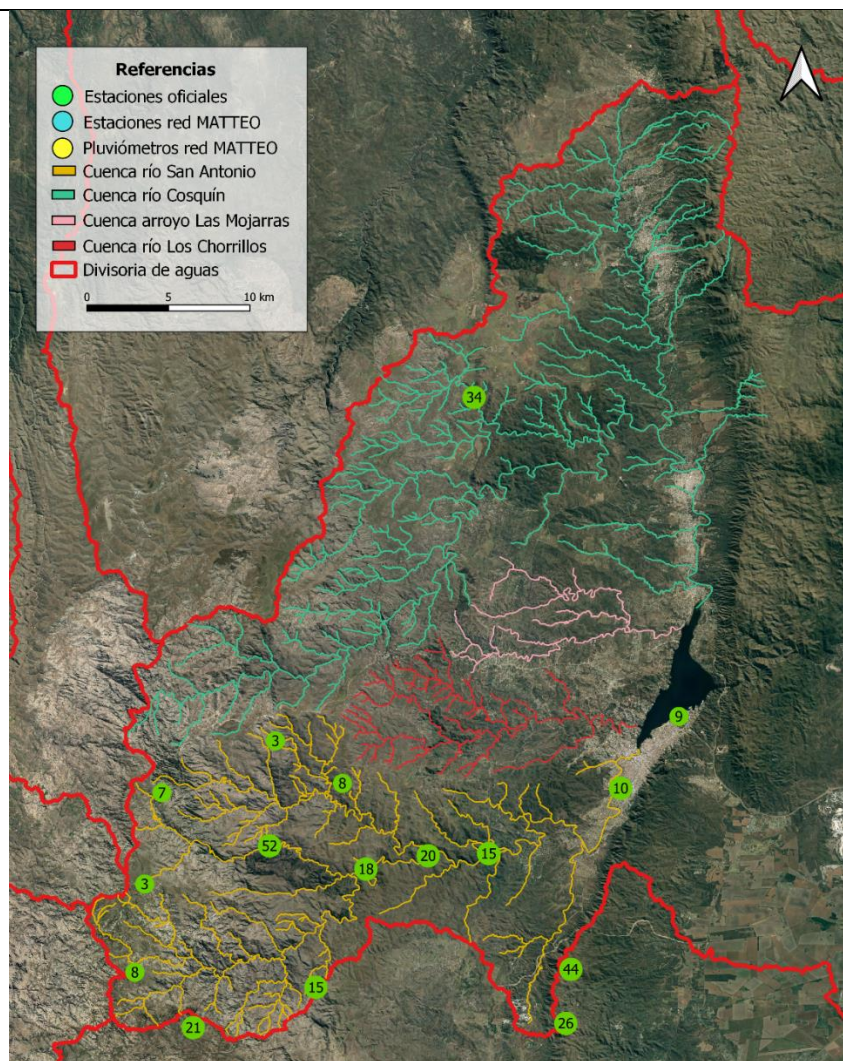


Figura 106.- Reporte meteorológico del evento ocurrido durante los días 04-05/03/2009, recopilando información de estaciones meteorológicas oficiales.

No se encuentran disponibles los hidrogramas de la crecida en la zona de estudio ocasionados por el evento. Sin embargo, tal como se observa en la Figura 108, aumentó el nivel del embalse hasta alcanzar la cota del labio vertedero (35.3 m). Luego, hubo un desembalse progresivo a lo largo del año logrando que las formas de fondo generadas en el evento del 25/03/2009 quedaran expuestas sin sufrir modificaciones.



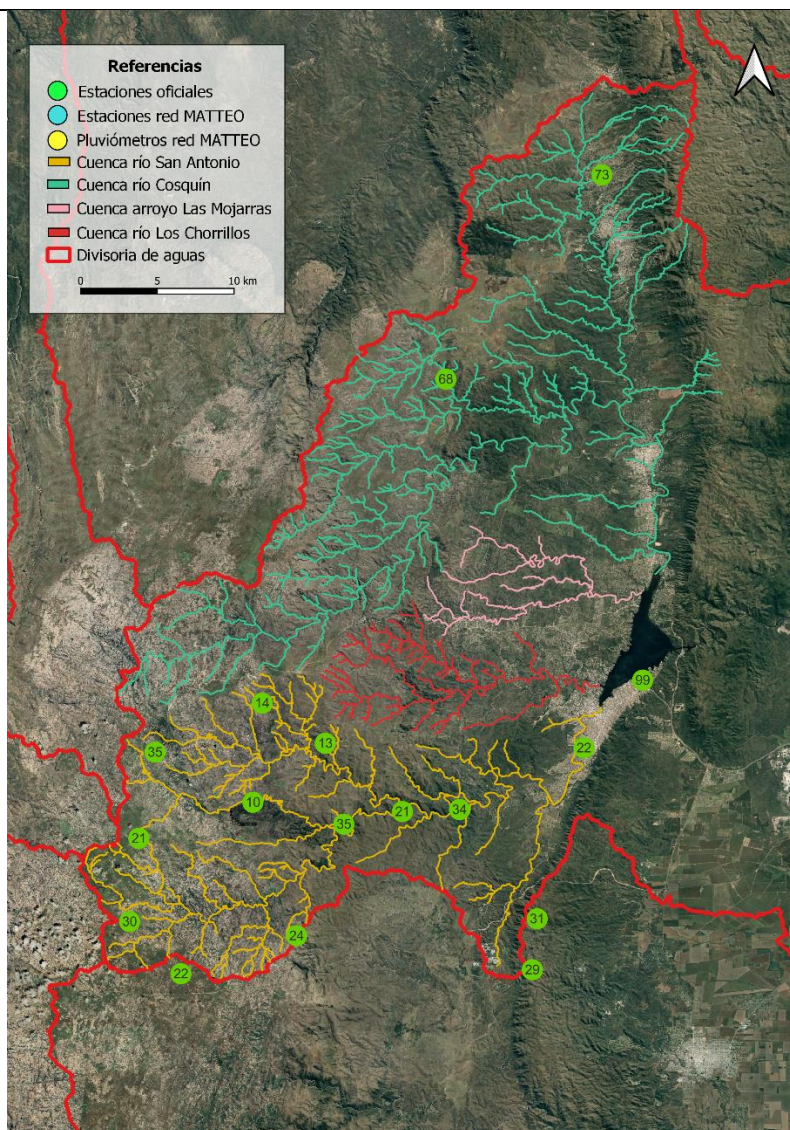


Figura 107.- Reporte meteorológico del evento ocurrido el 25/03/2009, recopilando información de estaciones meteorológicas oficiales.

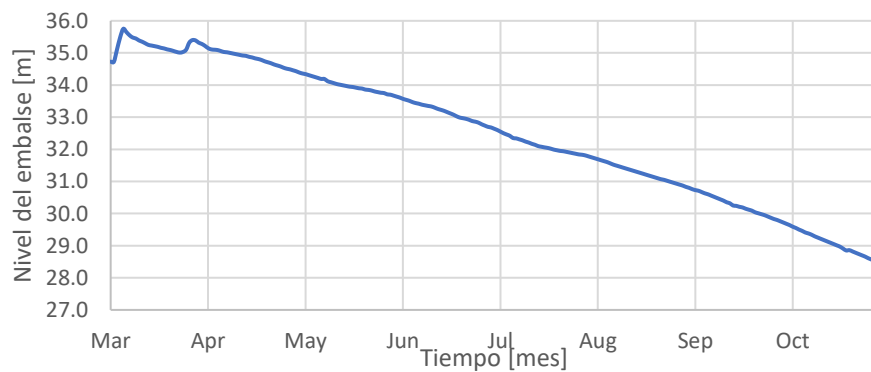


Figura 108.- Nivel del embalse San Roque, período 01/03-01/11/2009.

Año 2017

*Relevamiento topográfico*

Analizando imágenes satelitales de Google Earth en la época de estiaje del año 2017 se observan formas de fondo. Como se muestra en la Figura 109, para las condiciones del lecho expuestas el día 31/08/2017 se obtuvo una L1=6.25m en la zona 1 y L2=7.5m en la zona 2.



Figura 109.- Imágenes satelitales del Río San Antonio del día 31/08/2017.

*Relevamiento de condiciones hidrometeorológica, hidrológicas e hidráulicas.*

Como hipótesis se asume que las formas de fondo relevadas en el día 31/08/2017 se generaron en la última crecida significativa de la cuenca ocurrida desde el 31/03/2017 a las 00:00 hs, hasta el 04/04/2017 a las 00:00 hs, (eventos de precipitación secuenciales). En la Figura 110 se presenta el reporte de la precipitación acumulada en el período mencionado.



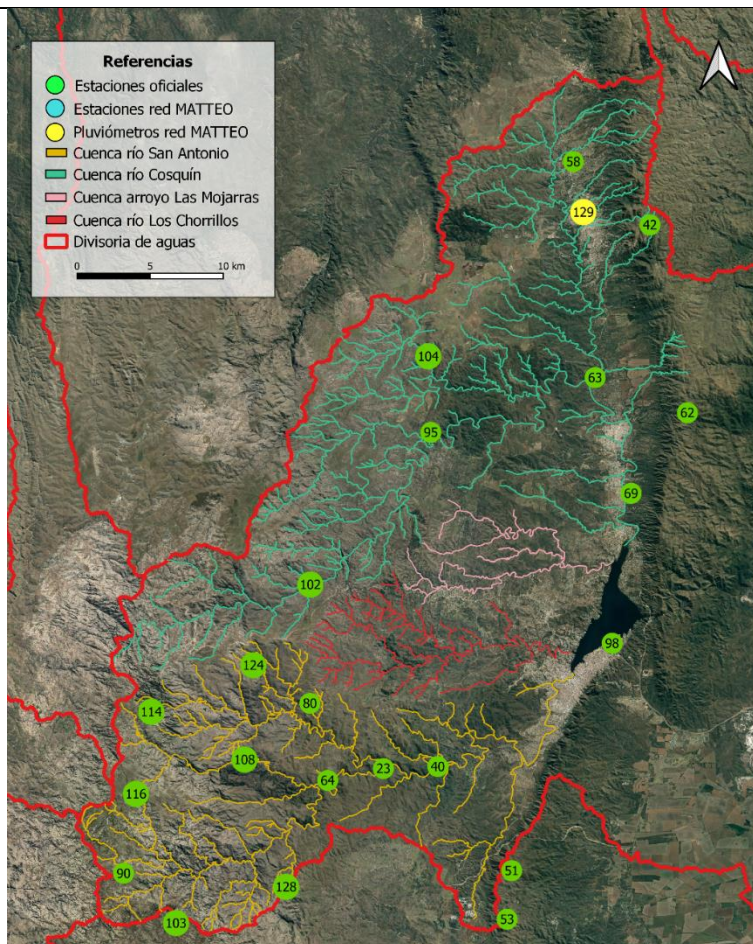


Figura 110.- Reporte meteorológico de precipitación acumulada desde el 31/03/2017 a las 00:00 hs. al 04/04/2017 a las 00:00 hs, recopilando información de estaciones meteorológicas oficiales y de la red MATTEO (estaciones meteorológicas y pluviómetros).

No hay registros de caudal del río San Antonio en las fechas analizadas. Sin embargo, de acuerdo a la estación del INA-CRSA de Villa Caieiro, el río Cosquín tuvo un  $Q_{pico}=660 \text{ m}^3/\text{s}$  el 02/04/2017 a las 15:13 hs. Considerando que el área de la cuenca del Cosquín es aproximadamente el doble del área de la cuenca del San Antonio y que sus características son similares, mediante técnicas de regionalización de caudales se estimó un  $Q_{pico}=330 \text{ m}^3/\text{s}$  en la misma fecha para el río de estudio. Como consecuencia del evento, el embalse San Roque alcanzó un nivel de 35.98 m el día 03/04/2017, y luego desembalsó progresivamente a lo largo del año, tal como se observa en la Figura 111.



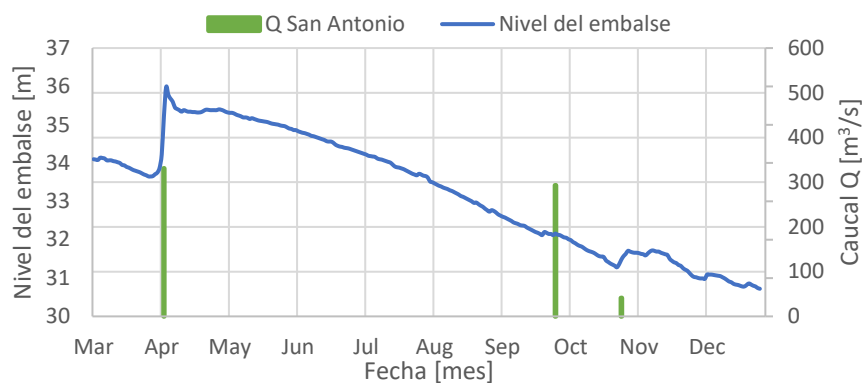


Figura 111.- Hidrograma del río San Antonio y niveles de embalse, período 01/03-31/12/2017.

La crecida generada por el evento analizado fue publicada por el diario La Nueva Mañana, junto a imágenes como la que se puede observar en la Figura 112 (Diario La nueva Mañana, 2017)



Figura 112.- Crecida del río San Antonio del día 04/04/2017 (Diario La nueva Mañana, 2017).

Año 2020

#### Relevamiento topográfico

Durante el mes de agosto (época de estiaje del río San Antonio, con un caudal de  $0.20 \text{ m}^3/\text{s}$  aproximadamente) como consecuencia del lento desembalse del San Roque, quedaron expuestas en la zona de estudio las dunas generadas por la crecida de marzo, tal como se observa en la Figura 114.

Como primera aproximación, a partir de imágenes satelitales capturadas el día 12/08/2020 se estimó la longitud de las dunas en las zonas 1 y 2, tal como se observa en la Figura 113, resultando  $L1=15 \text{ m}$  y  $L2=13.6 \text{ m}$ .



Figura 113.- Imágenes satelitales del Río San Antonio del día 12/08/2020.

Luego, en campo se relevó el fondo del río con un vehículo aéreo no tripulado (VANT) y se caracterizaron mediante topografía convencional dunas representativas.



Figura 114.- Dunas observadas en la zona 1 (a) y zona 2 (b), río San Antonio.

#### Relevamiento topográfico convencional

En las zonas 2 y 3 se midieron las alturas y longitud de las dunas descritas en la Tabla 23. Durante la visita al lugar de estudio se observó que el tamaño de las formas de fondo va disminuyendo hacia aguas abajo, siendo más altas y de mayor longitud en la zona 2 en comparación a la zona 3. Sin embargo, el empinamiento (relación entre la altura y la longitud de la forma de fondo) en promedio se mantiene en el orden de 0.04. A modo ilustrativo, se presentan fotografías de algunas de las dunas relevadas en la Figura 115.

Tabla 23.- Resultados relevamiento convencional de dunas en las zonas 2 y 3.

Duna	Zona	$\Delta$ [m]	$\lambda$ [m]	$\Delta/\lambda$ [m/m]
1	2	0.70	15	0.04
2	2	0.80	18	0.04
3	3	0.20	5	0.04
4	3	0.25	5	0.05
5	3	0.22	5	0.04



Duna 1



Duna 4

Figura 115.- Dunas relevadas en las zonas 1 y 2.

#### Relevamiento topográfico con VANT

El relevamiento con VANT permitió generar una ortofoto (Figura 116 a) y un posterior modelo digital de elevaciones (Figura 116 b) de las zonas 1 y 2.

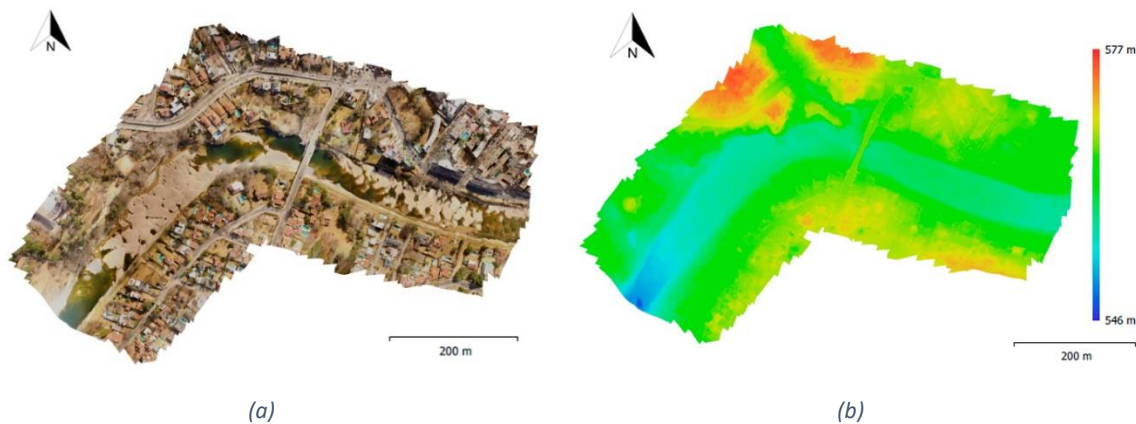


Figura 116.- (a) Ortofoto generada con el VANT en las zonas 1 y 2; (b) DEM generado con el VANT en las zonas 1 y 2.

#### Análisis del DEM

Analizando el perfil longitudinal sobre el eje del río (suponiendo una situación de crecida) de la Figura 117, se puede observar que la zona 1 tiene una pendiente creciente en sentido del escurrimiento del flujo del orden de 1.5% hasta los 250 m, luego se reduce a 0.45% hasta los 350 m y vuelve a aumentar a valores cercanos al 4% hasta los 400 m.



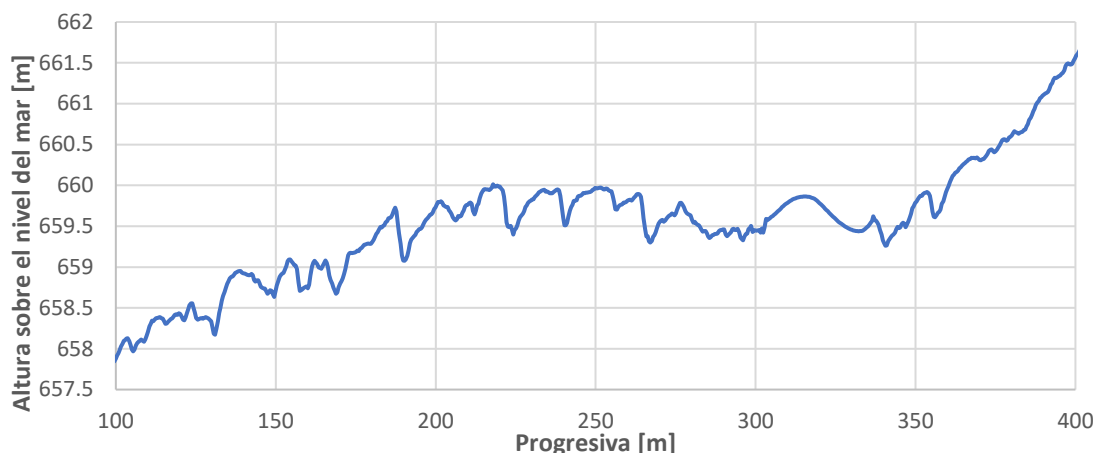


Figura 117.- Perfil longitudinal en el eje del río (cuando está crecido) en la zona 1.

En la zona 2 ( Figura 118) se pueden identificar claramente formas de fondo, algo que no se aprecia fácilmente en el perfil de la zona 1. Tiene una pendiente ascendente de aproximadamente 1% hasta los 550 m. Luego comienza a disminuir, con una pendiente negativa del 1.25% hasta los 700 m. Para el análisis de las formas de fondo se substraee la pendiente media como se ilustra en la figura siguiente.

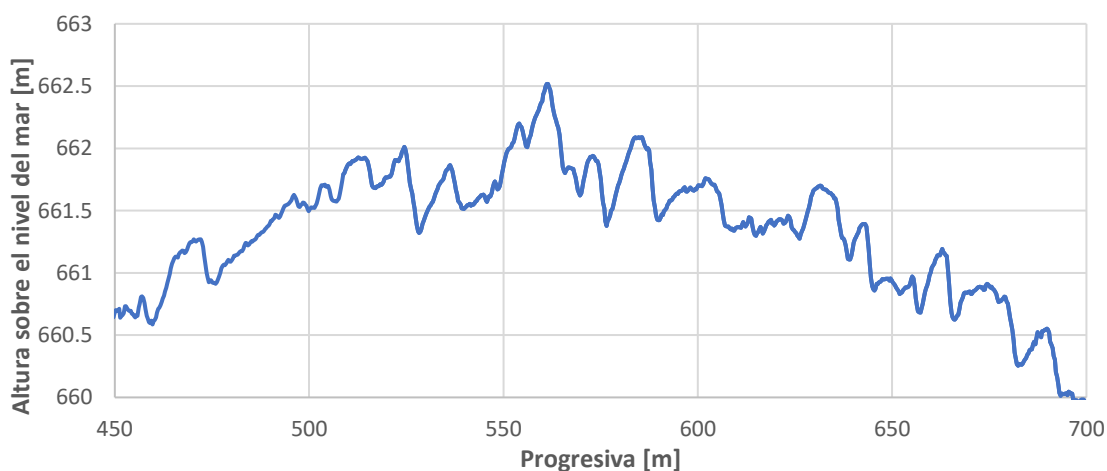


Figura 118.- Perfil longitudinal en el eje del río (cuando está crecido) en la zona 2.

Los resultados promedio de longitud, altura y empinamiento de las dunas en cada una de las zonas se detallan en la Tabla 24.

Tabla 24.- Longitud, altura y empinamiento de dunas en las zonas de estudio.

	$\lambda_{\text{promedio}}$ [m]	$\Delta_{\text{promedio}}$ [m]	$\Delta/\lambda_{\text{promedio}}$ [m/m]
Zona 1	11.33	0.36	0.03
Zona 2	13.86	0.43	0.03

Tal como se puede ver en la Tabla 26, las dunas de la zona 2 presentan una longitud promedio que se encuentra dentro del rango relevado con la topografía convencional en campo y una altura levemente menor a la determinada in situ.

*Relevamiento de características de granulometría y transporte de sedimentos:*

Durante la campaña se tomaron muestras del lecho que permitieron trazar la curva granulométrica y obtener las propiedades características del sedimento. Tal como se observa en la Figura 119, en la zona 1 se tomaron tres muestras (M1, M2 y M3) de forma aleatoria en el cauce, mientras que en la zona 3, se tomó una muestra en la cresta de una duna y en el valle (C y V respectivamente). Además, se comprobó que la zona presenta una uniformidad de sedimentos en la profundidad con una calicata.



Figura 119.- Ubicación espacial de las muestras de sedimento extraídas durante la campaña de relevamiento del evento del 25/03/2020.

Las curvas granulométricas obtenidas en la zona 1 se presentan en la Figura 120. En general, las muestras presentan valores similares, por lo que se podría considerar como representativo al promedio.

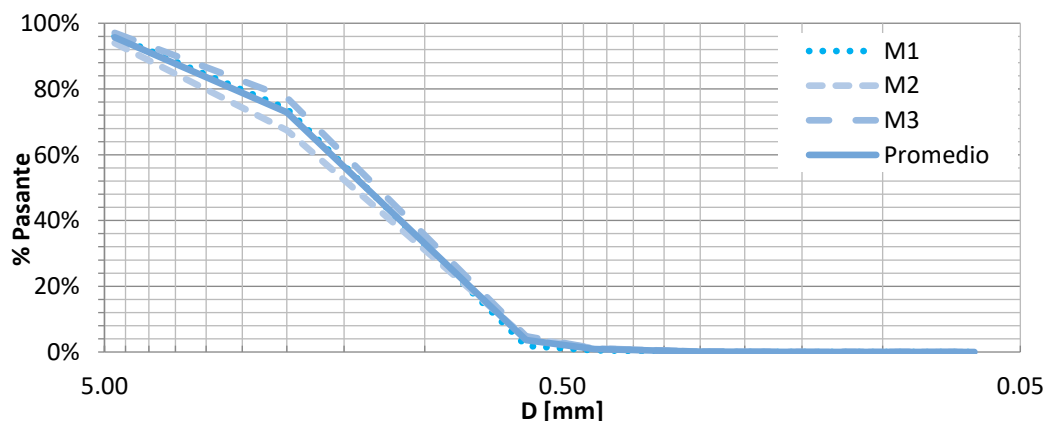


Figura 120.- Curvas granulométricas del material del fondo para las muestras extraídas de la zona 1.



Las curvas granulométricas obtenidas en la zona 3 se presentan en la Figura 121. Nuevamente ocurre que, en general, las muestras presentan valores similares, por lo que se podría considerar como representativo al promedio.

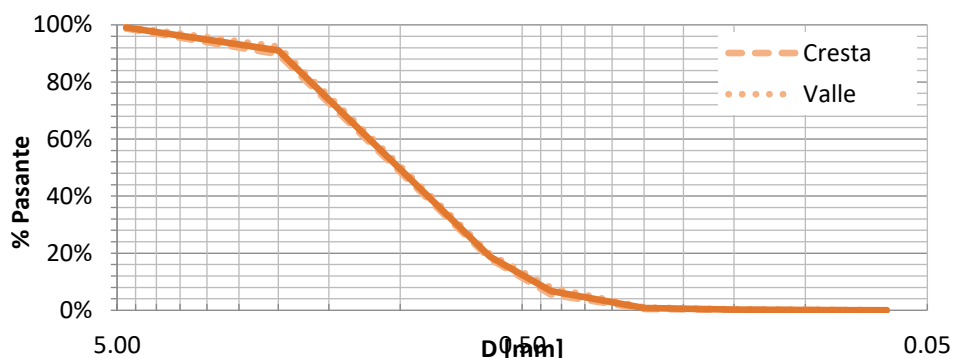


Figura 121.- Curvas granulométricas del material del fondo para las muestras extraídas de la zona 3.

A modo de resumen, se presentan en la Tabla 25 los parámetros característicos de todas las muestras analizadas. Allí, se pone en evidencia que el tamaño de las partículas del lecho va disminuyendo hacia aguas abajo (desde la zona 1 hacia la zona 3), influenciado por un aumento en la sección del cauce y una disminución de la velocidad.

Tabla 25.- Parámetros característicos del material del fondo para las muestras extraídas de las zonas 1 y 3.

Parámetro	M1	M2	M3	Promedio Z2	C	V	Promedio Z3
D <sub>90</sub> [mm]	3.99	4.34	3.76	4.06	2.09	1.95	1.98
D <sub>50</sub> [mm]	1.54	1.61	1.47	1.54	1.23	1.18	1.20
D <sub>16</sub> [mm]	0.87	0.86	0.82	0.85	0.57	0.55	0.56
D <sub>84</sub> [mm]	3.25	3.72	2.92	3.34	1.89	1.84	1.86
$\sigma_g$	1.93	2.08	1.89	1.98	1.82	1.84	1.82

A partir del análisis de perfiles longitudinales del DEM se estimó en cada una de las zonas un volumen de sedimento acumulado. Los resultados se detallan en la Tabla 26.

Tabla 26.- Volumen total promedio de los sedimentos acumulados las zonas de estudio.

	Volumen por unidad de ancho total [m <sup>3</sup> /m]	Ancho total [m]	Volumen total [m <sup>3</sup> ]
Zona 1	500.54	57.7	1681.02
Zona 2	685.28	47.2	2448.85

En la zona 1 a partir de un ancho del tramo analizado de 57.7 m, una longitud de 260 m y una porosidad del sedimento de 0.4, el volumen total de sedimentos de fondo calculado a partir de las formas de fondo resultó de aproximadamente 1700 m<sup>3</sup> para un área del cauce de 15000 m<sup>2</sup>, lo que representa una relación de 0.11 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>. Luego, considerando en la zona 2 un ancho del tramo analizado de 47.2 m, una longitud de 300 m y la misma porosidad que en la zona 1, el volumen total

de sedimentos de fondo calculado resultó de aproximadamente  $2500 \text{ m}^3$  para un área de  $14160 \text{ m}^2$ , lo que representa una relación de  $0.18 \text{ m}^3/\text{m}^2$ . Es decir que, asumiendo un camión arenero con capacidad de  $4 \text{ m}^3$ , sería posible extraer en la zona 1 unos 425 camiones y en la zona 2 unos 625 camiones de arena, generados como producto del último evento de crecida del año hidrológico, para evitar el ingreso de los sedimentos al embalse San Roque y la consecuente pérdida de su capacidad de almacenamiento.

*Relevamiento de condiciones hidrometeorológicas, hidrológicas e hidráulicas.*

Por hipótesis se considera que la topografía y características de la granulometría del lecho relevadas se encuentran asociadas al evento ocurrido durante la madrugada del día 25/03/2020, desde aproximadamente las 00:00 hs hasta las 18:00 hs. El correspondiente reporte meteorológico se presenta en la Figura 122.

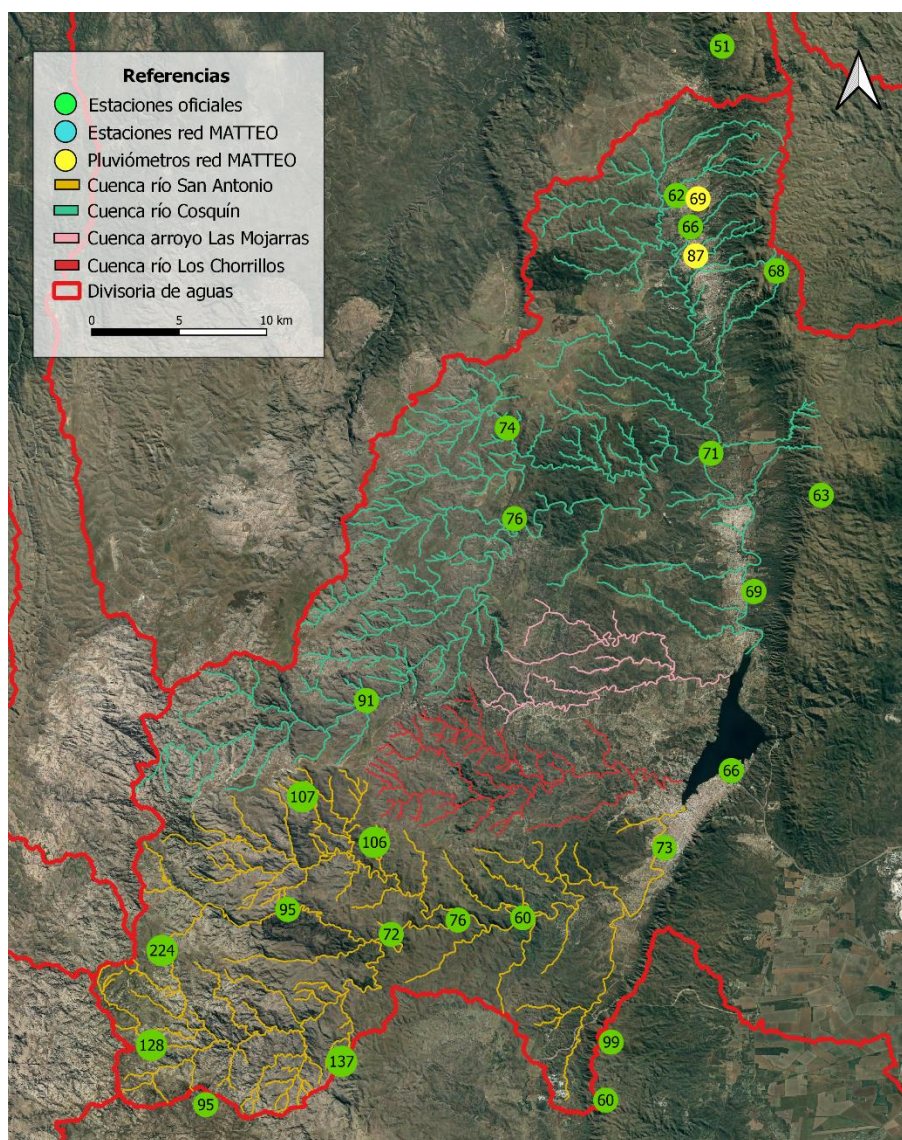


Figura 122.- Reporte meteorológico del evento ocurrido el 25/03/2020, recopilando información de estaciones meteorológicas oficiales y de la red MATTEO (estaciones meteorológicas y pluviómetros).

En consecuencia, en el río San Antonio se registró un  $Q_{pico}=560 \text{ m}^3/\text{s}$ , 140 veces superior al módulo medio del río e ingresó al embalse desde todos sus tributarios un  $Q_{pico}=700 \text{ m}^3/\text{s}$ . Este evento tuvo ciertas particularidades ya que fue el último de la temporada y generó el aumento de 0.56 m en el nivel del San Roque, superando así la cota de vertedero (de 35.30 m), para luego disminuir lentamente a lo largo del año, tal como se puede observar en la Figura 123.

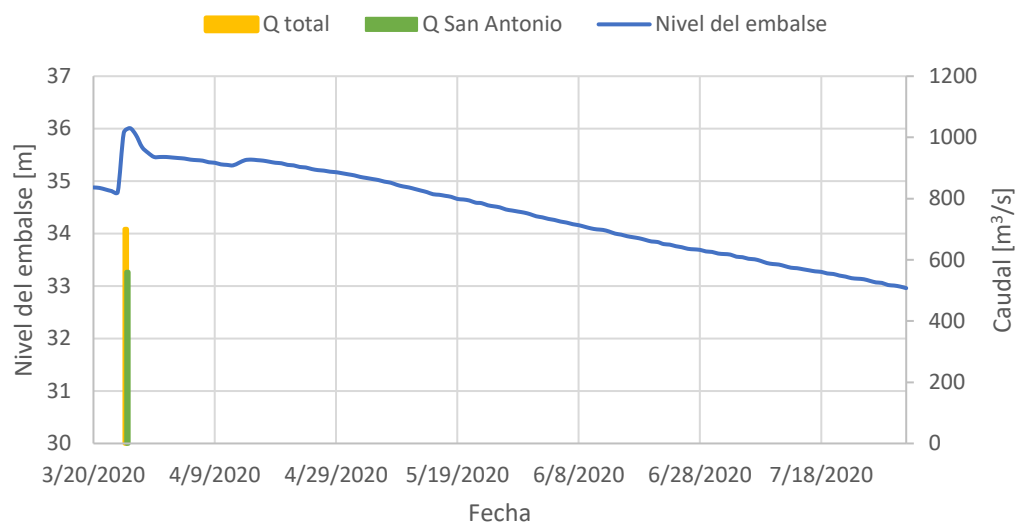


Figura 123.- Hidrograma de tributarios al embalse San Roque y niveles de embalse, período 20/03-01/08/2020.

La crecida generada durante el evento analizado se difundió en las redes sociales. Se publicó en YouTube un video de la crecida del San Antonio y una captura del mismo se presenta en la Figura 124, donde se observa el gran caudal transportado (Carlos Paz En Vivo, 2020)



Figura 124.- Crecida del río San Antonio del día 25/03/2020 (Carlos Paz En Vivo, 2020)

La disminución del nivel del embalse San Roque junto a la exposición de las formas de fondo en el cauce del río San Antonio y su bajo caudal fue noticia en los medios de comunicación de la provincia de Córdoba y las redes sociales.



El noticiero de Canal Doce entrevistó al Ing. Carlos Catalini (INA-CIRSA), que comentó sobre la problemática, mostró imágenes de la bajante del río San Antonio y dio sus opiniones sobre la situación estudiada (Figura 125). El reportaje fue publicado el 6 de octubre del 2020 y está disponible en la plataforma YouTube (Eldoce, 2020).



Figura 125.- Entrevista canal Doce referida a la bajante del río San Antonio, Córdoba (Eldoce, 2020)

Los ciudadanos Lautaro Varela y Luis Tortolo realizaron un vuelo con un VANT sobre el Río San Antonio, desde el puente Uruguay hasta el puente Mansilla. Allí se observan los bajos niveles de caudal, formas de fondo, zonas de deposición de sedimentos en la cola del embalse del Dique San Roque y una isla formada por sedimentos acumulados cercana al Puente Uruguay. El video se encuentra disponible en YouTube (Tortololmágenes, 2020).



Figura 126.- Imagen capturada por un VANT el día 14/10/2020 sobre el río San Antonio en (a) puente Mansilla, (b) puente Central y (c) puente Uruguay. (Tortololmágenes, 2020)

Año 2021

*Relevamiento topográfico*

Como se ve en la Figura 127, en la época de estiaje de 2021 quedaron expuestas formas de fondo en el río San Antonio que, de acuerdo a la hipótesis considerada, se generaron en el último evento de crecida de la temporada. Aprovechando esta situación, se realizó un relevamiento topográfico con GPS y VANT en las tres zonas de estudio y un relevamiento convencional en las dunas de las zonas 1 y 2.



(a) (b)  
Figura 127.- Formas de fondo en el área de estudio (a) zona 1; (b) zona 3.

*Relevamiento topográfico convencional*

En las zonas 1 y 2 se midieron las alturas y longitud de las dunas descritas en la Tabla 27. Se advirtió que el tamaño de las formas de fondo va disminuyendo hacia aguas abajo, siendo más altas y de mayor longitud en la zona 1 en comparación a la zona 2. A su vez, el empinamiento (relación entre la altura y la longitud de la forma de fondo) varía en cada caso.

Tabla 27.- Resultados relevamiento convencional de dunas en las zonas 1 y 2.

Duna	Zona	$\Delta$ [m]	$\lambda$ [m]	$\Delta/\lambda$ [m/m]
I	1	0.70	22	0.03
II	1	1.60	23	0.07
III	1	1.05	22	0.05
1	2	0.78	24.3	0.03
2	2	0.54	18	0.03
3	2	0.90	17	0.05
4	2	0.53	11	0.05
5	2	0.40	9.70	0.04
6	2	0.55	9.40	0.06

A modo ilustrativo, se presentan las fotografías de las dunas relevadas en la Figura 128.





Figura 128.- Dunas relevadas (a) en la zona 1; (b y c) en la zona 2.

### Relevamiento topográfico con GPS

El perfil transversal y longitudinal relevado en la zona 1 (generado en condiciones de crecida) se observa en la Figura 129. En el perfil longitudinal presenta 148m, y en él se pueden identificar las formas de fondo en el tramo, junto a una pendiente creciente en sentido del escurrimiento del flujo del orden de 0.62%.

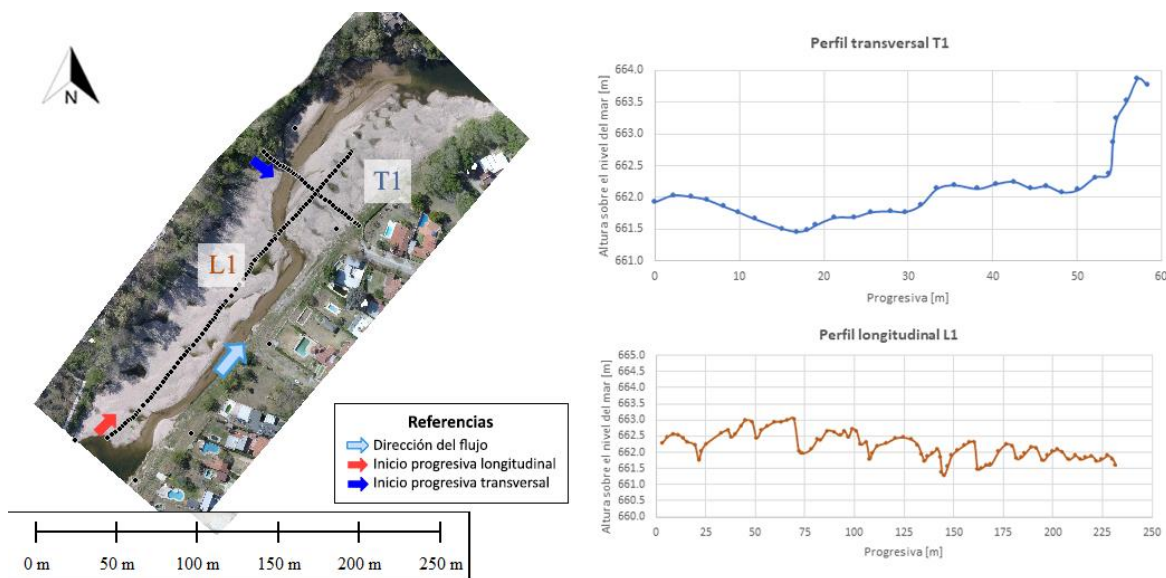


Figura 129.- Perfiles relevados en la zona 1.

El perfil transversal y longitudinal relevado en la zona 2 se observa en la Figura 130. Éste último tiene una longitud de 305m, presenta una pendiente creciente en sentido del escurrimiento del flujo del orden de 0.18% y permite identificar las formas de fondo existentes en el tramo.

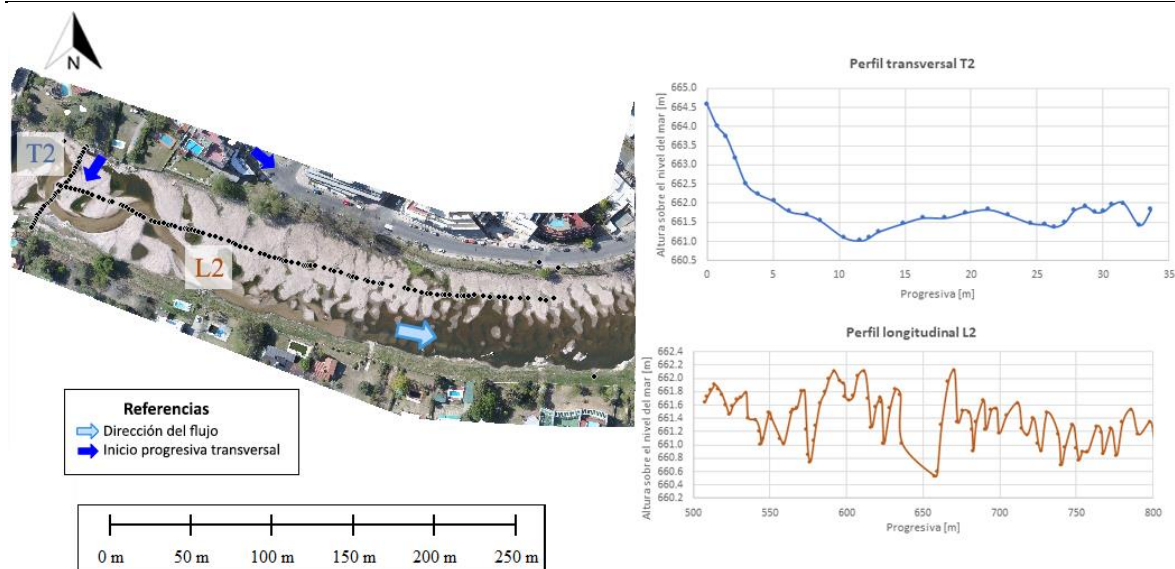


Figura 130.- Perfiles relevados en la zona 2.

El perfil transversal y longitudinal relevados en la zona 3 se observan en la Figura 131. Éste último tiene una longitud de 155m, presenta una pendiente creciente en sentido del escurrimiento del flujo del orden de 0.61% y permite identificar las formas de fondo existentes en el tramo.

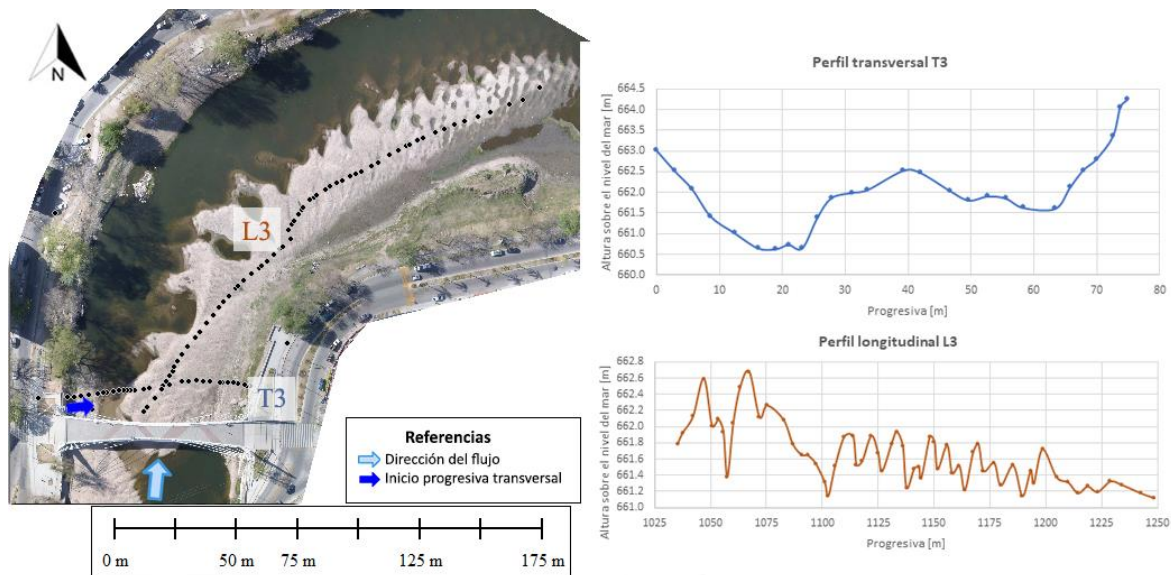


Figura 131.- Perfiles relevados en la zona 3.

### Relevamiento topográfico con VANT

El relevamiento permitió generar una ortofoto con resolución de 2.4 cm/px y un posterior modelo digital de elevaciones con resolución 4.8 cm/px, para la zona 1 (Figura 116) y zonas 2 y 3 (Figura 133).

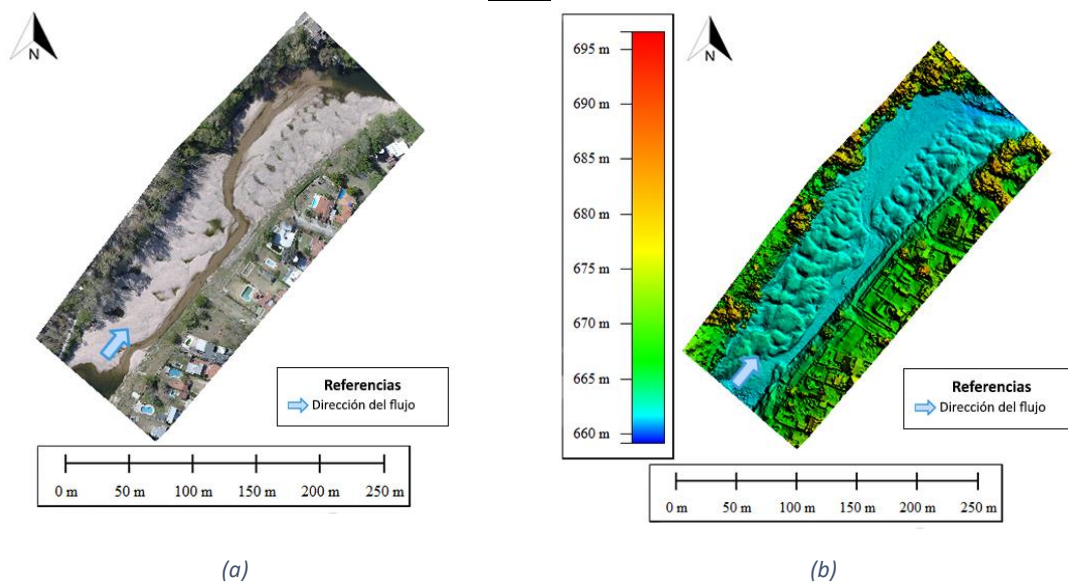


Figura 132.- (a) Ortofotografía y (b) Modelo Digital de Elevaciones, generados con el VANT en la zona 1.

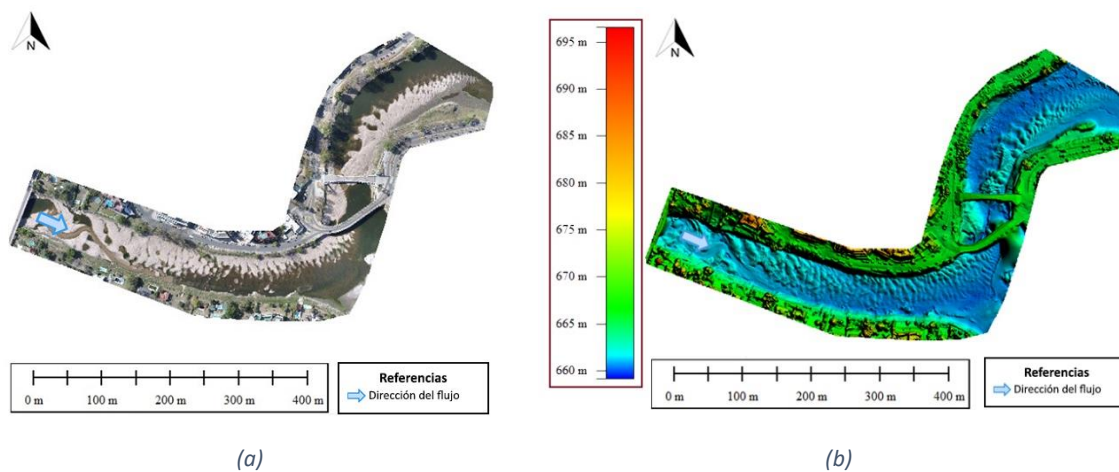


Figura 133.- (a) Ortofotografía y (b) Modelo Digital de Elevaciones, generados con el VANT en las zonas 2 y 3.

### Análisis del DEM

Los valores promedio obtenidos de longitud, altura y empinamiento promedio de las dunas calculados a partir del análisis de los perfiles longitudinales se detallan en la Tabla 28.

Tabla 28.- Longitud, altura y empinamiento de dunas en las zonas de estudio.

	$\lambda_{\text{promedio}}$ [m]	$\Delta_{\text{promedio}}$ [m]	$\Delta/\lambda_{\text{promedio}}$ [m/m]
Zona 1	14.06	0.41	0.03
Zona 2	9.87	0.35	0.04
Zona 3	15.10	0.37	0.03



Tal como se puede ver en la Tabla 28 el orden de magnitud de la geometría de las dunas coincide con lo relevado mediante topografía convencional. En consecuencia, se verifica la representatividad del DEM generado.

Luego, se solapó el DEM generado en la presente campaña y al evento posterior (13/10/2021, desarrollado en el capítulo 5) con el objetivo de comparar secciones longitudinales en cada zona para evidenciar los cambios del lecho. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 29, donde se observa que durante el evento del 13/10/2021 en las zonas 1 y 3 predominó la erosión, y en la zona 2 la sedimentación.

Tabla 29.- Volumen de sedimentación/erosión obtenidos en las zonas de estudio como consecuencia del evento del 13/10/2021.

Zona	Volumen de erosión/ sedimentación [m3]	Condición
1	1030.6	Erosión
2	-3094.4	Sedimentación
3	784.23	Erosión

#### Relevamiento de características y transporte de sedimentos: Características de sedimentos

Tal como se observa en la Figura 134, en la zona 1 se extrajeron muestras de cresta y valle de la duna DII (M1, M2), en la zona 2 muestras de cresta y valle (M3, M4) junto a una costra generada en el valle (M4-C). Finalmente, en la zona 3, se extrajo una muestra (M5) en la cresta de una duna ubicada en la sección aguas arriba (a 25 m del Puente Peatonal) y otra (M6) correspondiente a la cresta de una duna en la sección aguas abajo del tramo.



Figura 134.- Muestras de sedimento extraídas durante la campaña del evento del 13/03/2021.

Las curvas granulométricas obtenidas para cada una de las muestras de la Zona 1 se observan en la Figura 135. En este caso, la cresta presenta sedimentos de mayor tamaño respecto al valle.

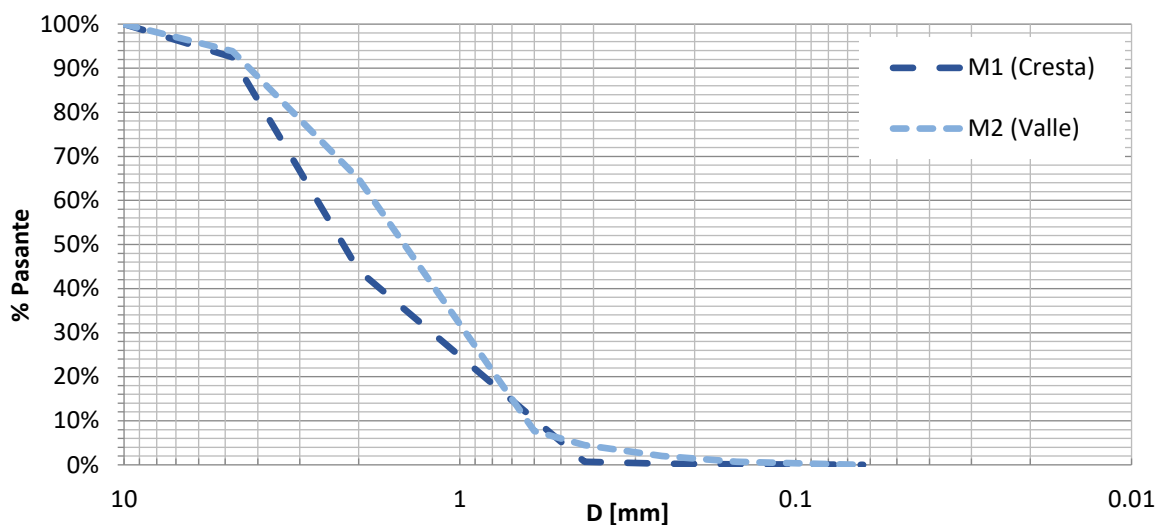


Figura 135.- Curvas granulométricas del material del fondo para las muestras extraídas de la zona 1.

Las curvas granulométricas obtenidas para cada una de las muestras de la Zona 2 se presentan en la Figura 136. En este caso, se puede observar que el valle posee un tamaño de partícula mayor respecto a la cresta, opuesto a lo obtenido en la zona 1. A su vez, la costra presenta una menor granulometría respecto al resto de las muestras, por efecto de sedimentación de finos en el agua estancada en los valles.

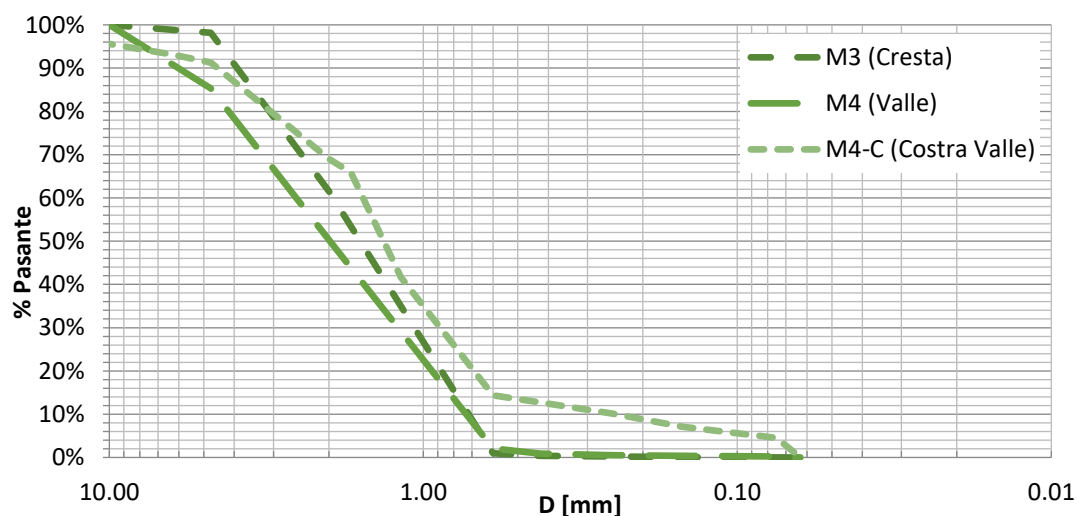


Figura 136.- Curvas granulométricas del material del fondo para las muestras extraídas de la zona 2.

Las curvas granulométricas de las muestras extraídas en la zona se presentan en la Figura 137 donde se puede observar una clara disminución del tamaño de los sedimentos hacia aguas abajo (de M5 a M6).



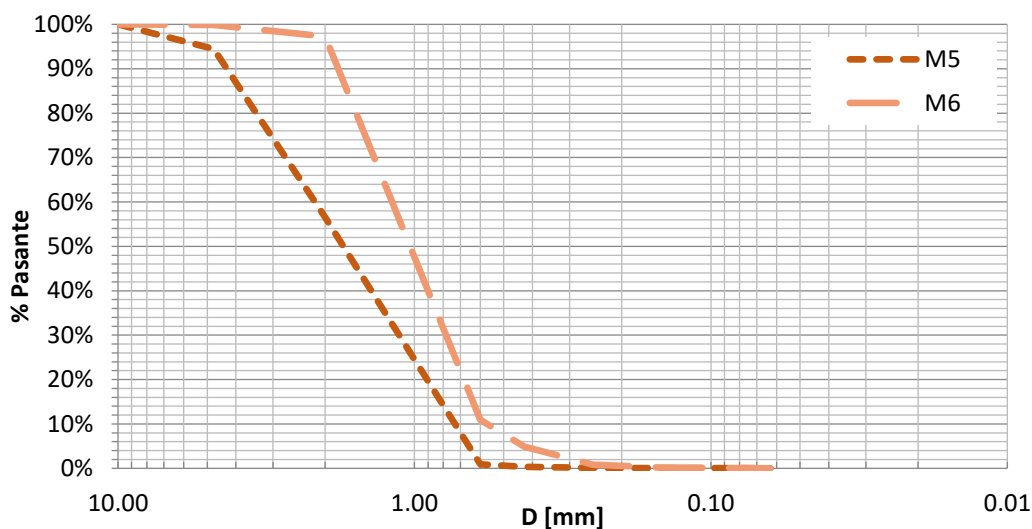


Figura 137.- Curvas granulométricas del material del fondo para las muestras extraídas de la zona 3.

A modo comparativo, se presentan en la Tabla 30 los parámetros representativos de las muestras extraídas.

Tabla 30.- Parámetros representativos obtenidos del material del fondo para las muestras extraídas del evento del 16/03/2021.

Parámetro	M1	M2	M3	M4	M4-C	M5	M6
<b>D<sub>90</sub> [mm]</b>	4.61	4.39	4.14	5.12	4.59	4.42	1.88
<b>D<sub>50</sub> [mm]</b>	2.21	1.64	1.73	1.99	1.36	1.83	1.23
<b>D<sub>16</sub> [mm]</b>	0.98	0.80	0.95	1.00	0.63	0.98	0.68
<b>D<sub>84</sub> [mm]</b>	4.27	3.82	3.69	4.65	3.85	3.99	1.78
<b>σ<sub>g</sub></b>	2.09	2.18	1.97	2.15	2.46	2.02	1.62

Considerando el D<sub>50</sub> como valor a comparar, se podría afirmar que la granulometría en las zonas 1, 2 y en la sección aguas arriba de la zona 3 (M5) son similares, habiendo entonces allí una uniformidad de sedimentos. Luego, aguas abajo de la zona 3, la sección se ensancha y comienzan a depositarse sedimentos más finos.

Respecto a las muestras tomadas en cresta y valle de dunas, no se evidencian diferencias significativas entre ambas. Solo las zonas del valle con acumulación de agua y posterior acumulación presentan costras con sedimentos más finos.

Luego, a partir del análisis de perfiles longitudinales del DEM generado, se calculó el volumen de sedimentos en cada zona tal como se detalla en la Tabla 31.

Tabla 31.- Volumen total promedio de los sedimentos de las zonas de estudio.

	<b>Volumen por unidad de ancho total</b> <b>[m<sup>3</sup>/m]</b>	<b>Ancho total</b> <b>[m]</b>	<b>Volumen total</b> <b>[m<sup>3</sup>]</b>
Zona 1	488.14	57.7	1630.83
Zona 2	466.33	47.2	1635.04
Zona 3	209.58	40.0	1257.46

De acuerdo a los resultados obtenidos, el volumen total de sedimentos de fondo calculado a partir de las formas de fondo en la zona 1 resultó de aproximadamente 1600 m<sup>3</sup> para un área del cauce de 15000 m<sup>2</sup>, lo que representa una relación de 0.11 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>. En la zona 2 se obtuvo un volumen de 1600 m<sup>3</sup> para un área de 14160 m<sup>2</sup>, lo que representa una relación de 0.12 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> y en la zona 3 un volumen 1250 m<sup>3</sup> para un área del cauce de 14000 m<sup>2</sup>, es decir una relación de 0.09 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.

Consecuentemente, en la zona 1 sería posible extraer 408 camiones de arena (asumiendo una capacidad de 4 m<sup>3</sup>), en la zona 2 también 408 camiones y en la zona 3 unos 314, generados como producto del último evento de crecida del río San Antonio, para evitar el ingreso de los sedimentos al embalse San Roque y la consecuente pérdida de su capacidad de almacenamiento.

*Relevamiento de características hidrometeorológicas, hidrológicas e hidráulicas.*

Las características relevadas se asocian al evento ocurrido durante los días 15-16/03/2021, cuyo reporte de precipitación se observa en la Figura 138. Comenzó alrededor de las 20:00 hs del día 15/03 y finalizó el 16/03 a las 09:00 hs.

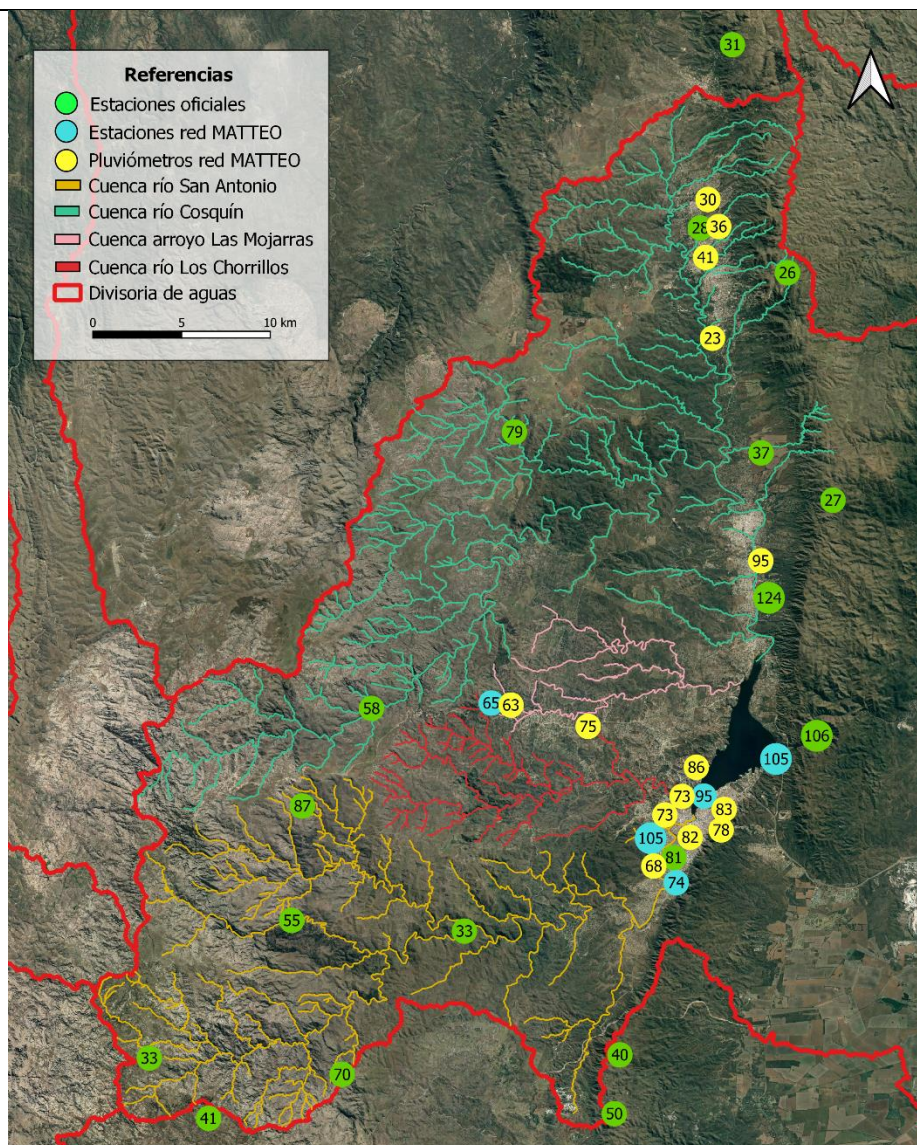


Figura 138.- Reporte meteorológico de lluvia precipitada entre el 15/03/2021 09:00 hs hasta el 16/03/2021 09:00 hs, recopilando información de estaciones meteorológicas oficiales y de la red MATTEO (estaciones meteorológicas y pluviómetros).

La precipitación generó la mayor crecida del año hidrológico 2020-2021 en la cuenca, con aproximadamente un  $Q_{pico}=610 \text{ m}^3/\text{s}$  en el río San Antonio, 152 veces superior a su módulo medio e ingresó en total al embalse desde todos sus tributarios un  $Q_{pico}=1340 \text{ m}^3/\text{s}$ , aumentando el nivel del embalse de 35.33 m hasta 36.60 m, superando la cota de vertedero. Tal como se puede observar en la Figura 139, dicho evento fue el último importante de la temporada y luego disminuyó el nivel lentamente a lo largo del año.



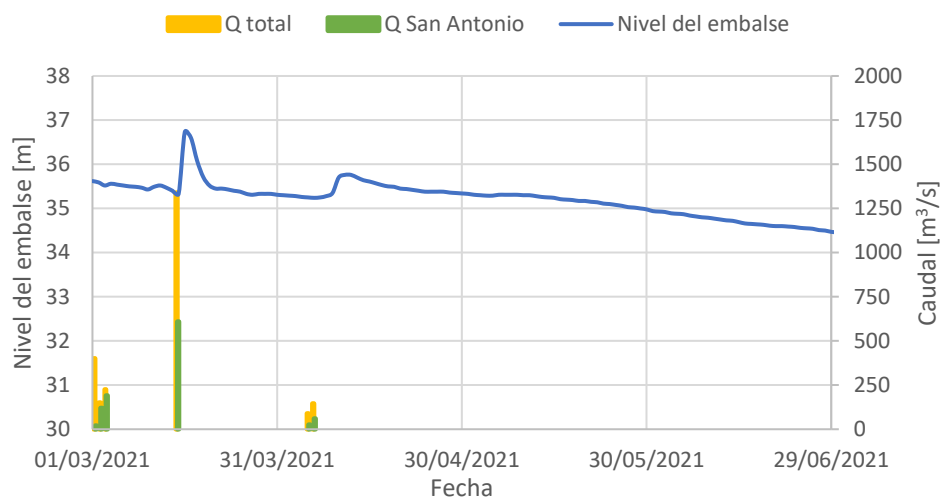


Figura 139.- Hidrograma de tributarios al embalse San Roque y niveles de embalse, período 01/03-29/06/2021.

El evento de crecida generó inundaciones en la zona céntrica y costanera de Villa Carlos Paz, tal como se observa en las imágenes de la Figura 140 recopiladas de las redes sociales (Municipalidad de Villa Carlos Paz, 2020).

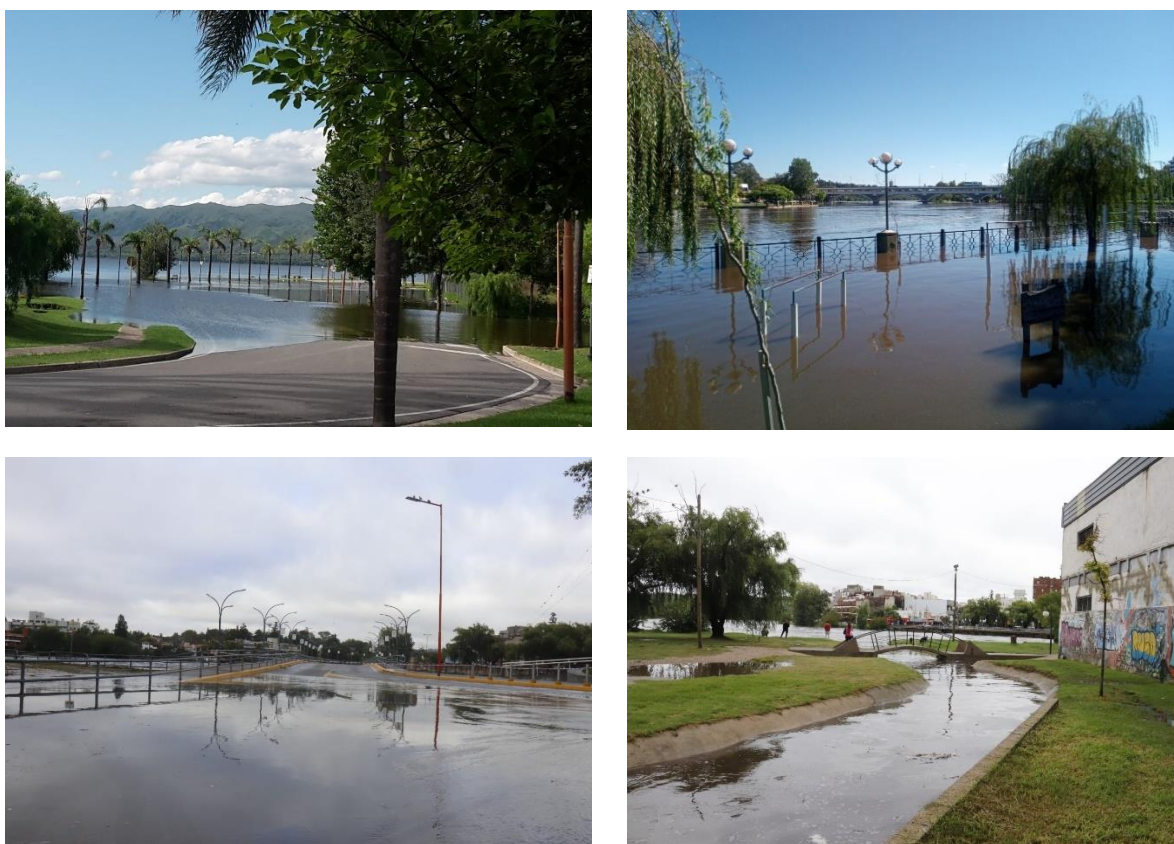


Figura 140.- Crecida del río San Antonio del día 16/03/2021 (Municipalidad de Villa Carlos Paz, 2020).

### 6.3. Análisis de resultados y discusión

En este capítulo se aplicó la metodología de relevamiento de información hidrometeorológica, hidrológica, hidráulica, topográfica y sedimentos luego de la ocurrencia de una crecida en época de estiaje. Las condiciones analizadas fueron muy particulares, generalmente reproducida en modelos físicos de laboratorio. En el caso de los relevamientos de eventos en los cuales se observaron formas de fondo, se dio la particularidad de que luego de alcanzar el máximo caudal líquido en el río San Antonio se produjo un lento desembalse que permitió conservar las dimensiones de las formas de fondo generadas por el flujo durante estos eventos.

Respecto a la información hidrometeorológica e hidrológica (precipitación, caudal y niveles de embalse), hidráulica (velocidades y profundidades del flujo), la metodología y la discusión es similar a la del capítulo 5, donde se obtuvieron resultados al relevar en campo durante las crecidas.

Respecto a la topografía, como primera aproximación se analizaron imágenes de Google Earth, donde solo en algunos años y períodos específicos (escasa resolución temporal en las imágenes previo al año 2020) se observan formas de fondo en el cauce (y se puede estimar la longitud de las mismas) o un lecho liso, topografía que luego se puede asociar a un evento de crecida o condición hidrológica. Durante los relevamientos topográficos realizados a partir del 2020, además de recurrir a imágenes satelitales para detectar la forma del lecho, se utilizaron fotografías en el lugar. Luego, con regla topográfica y nivel se midieron la longitud y altura de dunas representativas, con GPS y un VANT se trazaron perfiles longitudinales y transversales en el cauce y se generaron modelos digitales de elevación. Estos DEM permitieron, en el caso de la existencia de formas de fondo, estimar el volumen transportado de sedimentos en los eventos analizados y caracterizar por completo las formas de fondo generadas. En el caso de lecho liso, se logró estimar una tasa de sedimentación/erosión en la zona de estudio, detectando procesos predominantes.

Para caracterizar el tamaño y parámetros característicos de los sedimentos presentes en el lecho se realizaron numerosos ensayos granulométricos. A partir de los resultados obtenidos en las campañas desarrolladas y a modo resumen, se buscó correlacionar el diámetro medio de los sedimentos con su ubicación a lo largo de la zona de estudio, coincidente con el área de modelación del capítulo 3 (ver Figura 23) y el caudal líquido que transportó los granos. Para ello, se elaboró el gráfico de la Figura 141 que representa la distribución del diámetro medio de las partículas transportadas durante los eventos del 25/03/2020 ( $Q = 560 \text{ m}^3/\text{s}$ ) y 10/12/2021 ( $Q = 275 \text{ m}^3/\text{s}$ ), la Figura 142 del evento del 16/03/2021 ( $Q = 610 \text{ m}^3/\text{s}$ ) y la Figura 143 del evento del 13/10/2021 ( $Q = 220 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

Allí se observa como tendencia general que a mayor caudal líquido, mayor es el tamaño de los sedimentos del lecho transportados. Además, el diámetro medio de las partículas tiende a disminuir hacia aguas abajo al acercarse al embalse, producto de la reducción de la velocidad del flujo por el efecto remanso. Para el máximo caudal, se ve que el decrecimiento del tamaño de las partículas ocurre más aguas abajo, representando una mayor capacidad de transporte del flujo.

Se debe tener en cuenta que las muestras fueron extraídas en puntos representativos de cada zona del lecho, pero se comprobó en el presente trabajo que hay una variación significativa a lo largo de una sección transversal del cauce. A su vez, no se detectó una tendencia de variación en la granulometría en las zonas de valle y cresta de las dunas.



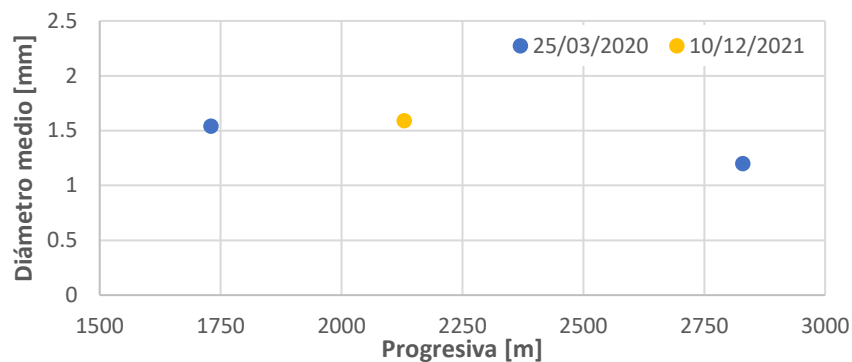


Figura 141.- Distribución del diámetro medio de las partículas transportadas durante los eventos de los días 25/03/2020 y 10/12/2021 en la zona de estudio.

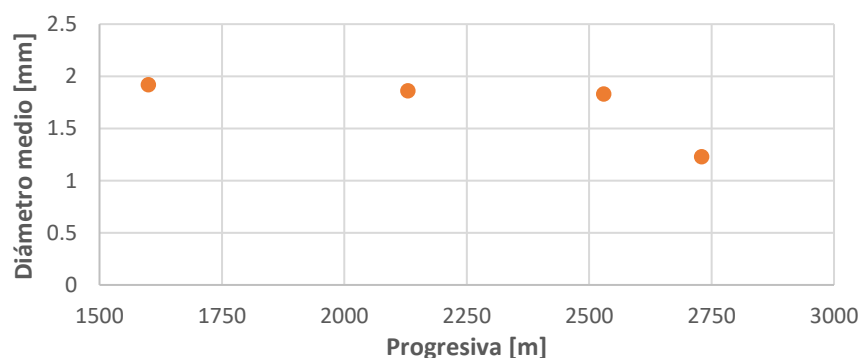


Figura 142.- Distribución del diámetro medio de las partículas transportadas durante el evento del día 16/03/2021 en la zona de estudio.

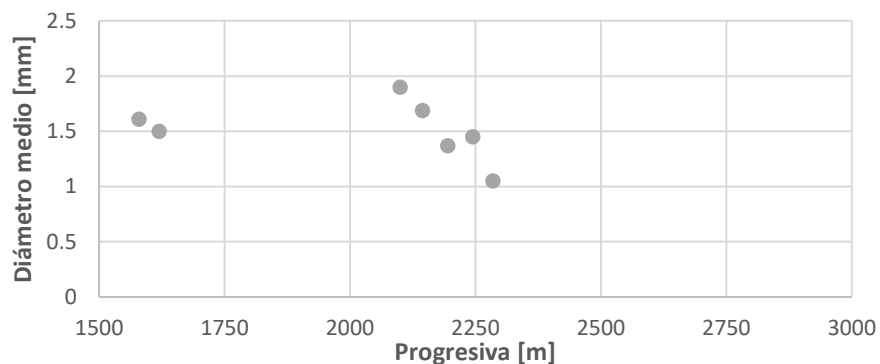


Figura 143.- Distribución del diámetro medio de las partículas transportadas durante el evento del día 13/10/2021 en la zona de estudio.

Luego se correlacionaron las condiciones hidráulicas del flujo con las formas de fondo generadas, que se presentan en la Tabla 32. Allí se observa que el empinamiento se mantiene del mismo orden de magnitud. Además, a partir de las Ec. 58, 59 y 60 se determinaron a través de fórmulas empíricas la longitud y altura de las formas esperadas, a partir de un tirante medio  $y_m$  obtenido a partir del modelo conceptual desarrollado y las condiciones hidrometeorológicas, hidrológicas, hidráulicas, topografía y características de la granulometría de los sedimentos relevadas en cada evento.

Tabla 32.- Resumen de características del flujo y formas de fondo obtenidas en campaña para distintos eventos.

Evento	Q [m <sup>3</sup> /s]	Nivel embalse [m]	Formas de fondo								
			Z1			Z2			Z3		
			$\lambda_{prom}$	$\Delta_{prom}$	$\Delta/\lambda$	$\lambda_{prom}$	$\Delta_{prom}$	$\Delta/\lambda$	$\lambda_{prom}$	$\Delta_{prom}$	$\Delta/\lambda$
25/3/20	560	34.79	11.33	0.36	0.03	13.86	0.43	0.03	5	0.22	0.04
30/1/21	35.4	33.42				2.16	0.11	0.05			
16/3/21	550	35.33	14.06	0.41	0.03	9.87	0.35	0.04	15.1	0.37	0.02

Graficando la relación entre el caudal líquido y las características geométricas de las dunas, se obtiene la Figura 144 a y Figura 144 b, donde se observa una clara correlación entre la longitud y altura de dunas con el caudal. Con caudales mayores, las formas de fondo generadas en el evento son mayores. Con caudales bajos, las longitudes de duna medidas y determinadas con fórmulas empíricas son similares. Al aumentar el caudal, las diferencias se vuelven más significativas.

Si bien no se relevaron en todas las campañas las formas de fondo en las tres zonas, la zona 2 parece ser representativa de lo que sucede en promedio en el área de estudio.

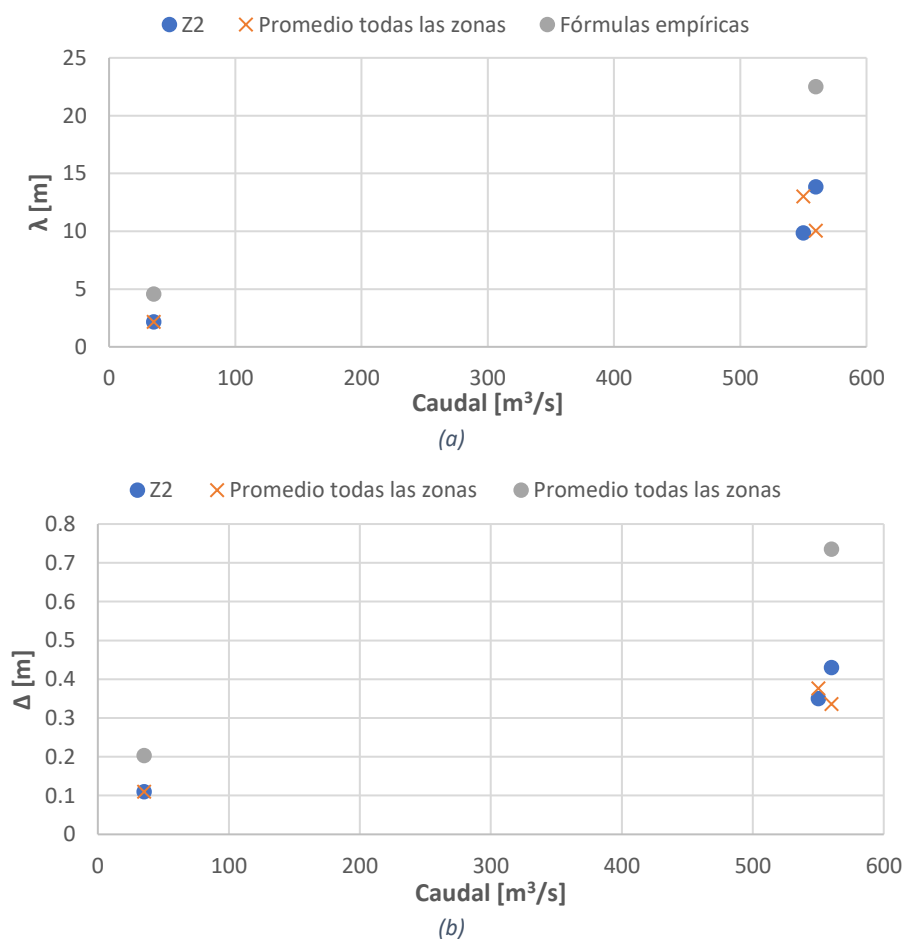


Figura 144.- Relaciones (a) caudal líquido-longitud de duna y (b) caudal líquido-altura de duna.

## Capítulo 7: Contraste entre los resultados del modelo y datos relevados

### 7.1. Introducción

En el capítulo 3 se determinaron las variables características más significativas que controlan el transporte de sedimentos y las que sería importante relevar en la zona de estudio, que incluyen las condiciones hidrológicas e hidráulicas, la topografía y las características granulométricas del sedimento. Luego, en el capítulo 4 se desarrolló la metodología experimental recomendada para relevar dichas variables y en los capítulos 5 y 6 se relevaron las mismas en distintos eventos que incluyen condiciones hidrológicas de crecidas y en estiaje. En este capítulo se utilizarán los datos relevados para modelar conceptualmente el tramo de estudio para cada evento, y de esa forma validar el modelo desarrollado para lograr una mejor comprensión de los procesos que controlan el transporte de sedimentos en el tramo del río San Antonio estudiado en su desembocadura en el Embalse San Roque.

### 7.2. Metodología

Tal como se desarrolló en la sección “Implementación del modelo” del capítulo 3 de la presente tesis, para implementar el modelo desarrollado se deben considerar como parámetros de entrada los presentados en la Tabla 4 y como variables de entrada las presentadas en la Tabla 33. Los valores de dichas variables fueron obtenidos a partir de los relevamientos de condiciones hidrometeorológicas, hidrológicas e hidráulicas (caudal líquido, nivel del embalse que define condiciones aguas abajo del tramo de estudio), topográficas y características granulométricas del sedimento para cada uno de los eventos desarrollados en el capítulo 5. Los eventos descritos en el capítulo 6 presentan caudales extraordinarios y el modelo conceptual no logra desarrollar lo que sucede debido a que el tramo de río estudiado cambia de régimen subcrítico a supercrítico.

*Tabla 33.- Variables de entrada del modelo conceptual del río San Antonio desarrollado aplicado para el estudio de transporte de sedimentos*

Variables	Comentario
$q$ $y_f$	Obtenidos en el relevamiento de condiciones hidrológicas e hidráulicas
$D_{50}$	Obtenido en el relevamiento de características del sedimento o estimado
$S_0$	Obtenido en el relevamiento topográfico o estimado

En los eventos donde el nivel del embalse era muy bajo y el efecto remanso no llegaba al puente Cassaffousth (condición de borde del modelo aguas abajo), se consideró como  $y_f$  el tirante normal, obtenido a partir de una modelación inicial del evento bajo las condiciones relevadas.

Como resultado de la modelación es posible obtener el transporte total de sedimentos unitario  $q_t$  a lo largo de la progresiva longitudinal del río y la variación del lecho del cauce representado por  $\eta'$  ocasionado por el transporte de sedimentos generado, lo que permite identificar si ocurre erosión y/o deposición del material del lecho. En este caso, en el modelo conceptual se utilizaron las

fórmulas de Wong & Parker (2006) para transporte de fondo y García & Parker (1991) para el transporte en suspensión.

En el caso de contar con información de velocidades de flujo promedio en la vertical  $U$  medida en campo para un evento, se elaboró un gráfico a partir de los resultados de la modelación que representa la relación entre  $u^*/U$  en la progresiva  $x$ . Con el gráfico y el valor de  $U$  es posible estimar la  $u^*$  a través de la Ec. 34 en una progresiva dada. Luego, conociendo la  $u^*$ , se calcula  $\theta_T$  a partir de la Ec. 27 y la Ec. 48, junto  $R_{ep}$  con la Ec. 40 para determinar la ausencia o presencia de transporte de sedimentos ingresando al ábaco de Shields-Parker presentado en la Figura 22. En el caso de haber transporte de sedimentos, se obtiene además si se prevé la ocurrencia de las formas de fondo y si predomina el transporte de fondo o el transporte en suspensión.

### 7.3. Resultados obtenidos: Eventos relevados en condición de crecida

Evento 27/09/2017

Se aplicó el modelo conceptual de los procesos de transporte de sedimentos utilizando como variables de entrada las presentadas en la Tabla 34.

Tabla 34.- Variables de entrada del modelo conceptual del río San Antonio aplicado en el evento del 27/09/2017.

Variables	Valor	Unidades	Comentario
$q$	0.97	$m^2/s$	Obtenido del hidrograma ( $q = \frac{41 m^3/s}{42 m}$ )
$y_f$	0.80	m	Tirante normal, determinado por una corrida inicial del modelo
$D_{50}$	1.50	mm	Media estimada de acuerdo a las características del cauce
$S_0$	0.15	%	Media estimada de acuerdo a las características del cauce

Como resultado se obtuvo el gráfico de la Figura 145 que representa la variación del caudal unitario a lo largo del cauce. Allí se observa que el transporte aumenta a partir de la progresiva 2500 (Puente Central) y predomina el transporte en suspensión.

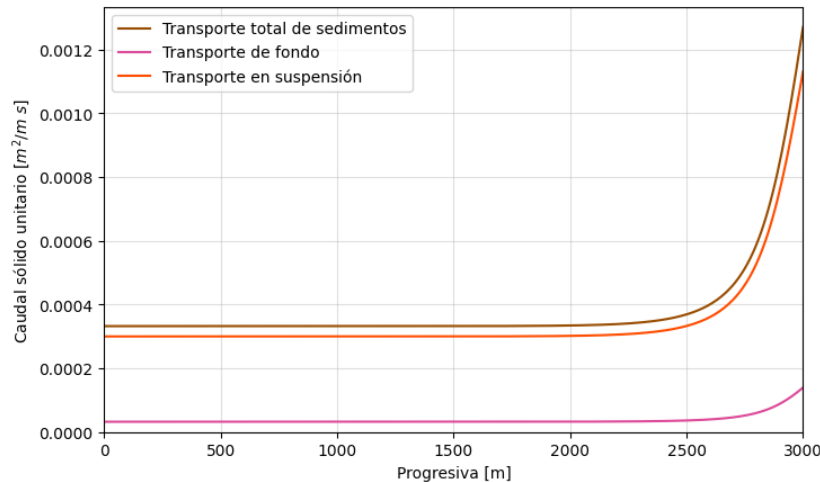


Figura 145.- Transporte unitario total de sedimentos a lo largo del área de estudio durante el evento del día 27/09/2017.

En la Figura 146 se representa la variación del lecho generada por el evento, considerando que inicialmente el lecho era liso. Allí se observa predomina la erosión a partir de la progresiva 2500, correspondiente al Puente Central.

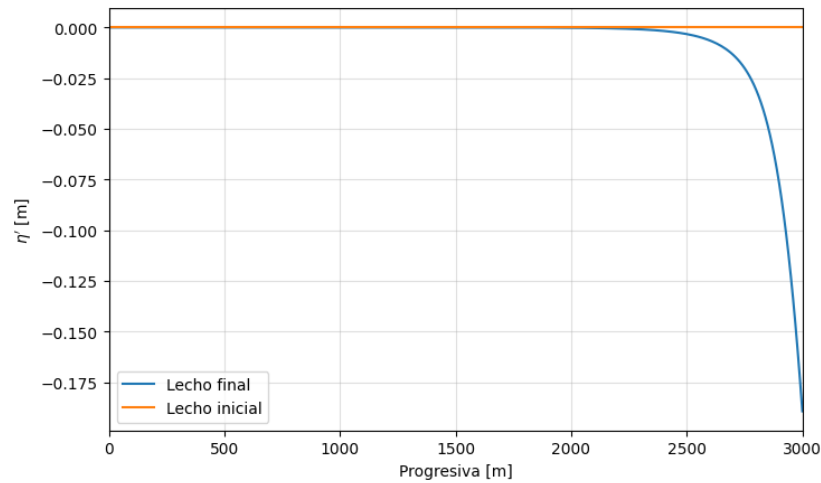


Figura 146.- Variación del lecho generada durante el evento del día 27/09/2017.

#### Evento 30/01/2021

Para el evento de crecida se aplicó el modelo conceptual de los procesos de transporte de sedimentos utilizando como variables de entrada las presentadas en la Tabla 35.

Tabla 35.- Variables de entrada del modelo conceptual del río San Antonio aplicado en el evento del 30/01/2021.

Variables	Valor	Unidades	Comentario
$q$	0.82	$m^2/s$	Medido con ADCP ( $q = \frac{35.43 m^3/s}{42.99 m}$ )
$y_f$	1.92	m	Nivel del embalse ( $33.42m - 31.5m$ )
$D_{50}$	1.50	mm	Media estimada de acuerdo a las características del cauce
$S_0$	0.15	%	Media estimada de acuerdo a las características del cauce

Como resultado se obtuvo el gráfico de la Figura 147, que representa la relación entre la velocidad de corte y la velocidad media del flujo a lo largo de x para las condiciones del evento analizado.



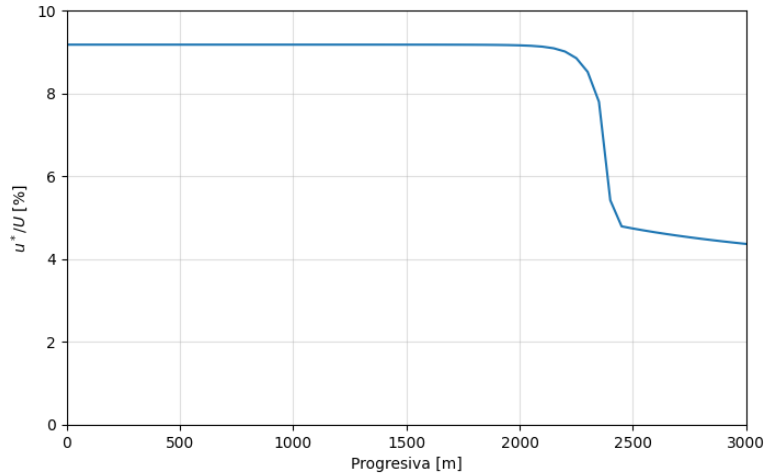


Figura 147.- Relación entre la velocidad de corte y la velocidad media del flujo a lo largo de  $x$  para las condiciones del evento del día 30/01/2021.

Para la progresiva  $x = 2000 \text{ m}$  donde se encuentra el Puente Mansilla, lugar donde se midió la  $U$ , se obtuvieron los resultados presentados en la Tabla 36. En dicha sección, de acuerdo al ábaco de Shields-Parker, hay transporte de sedimentos y predomina el transporte de fondo formando dunas. Esto coincide con lo observado en campo.

Tabla 36.- Resultados obtenidos para el Puente Mansilla bajo las condiciones del evento del día 30/01/2021.

Variables	Valor	Unidades
$\frac{u^*}{U}$	9.00	%
$U$	0.97	m/s
$u^*$	0.09	m/s
$\tau$	7.62	N/m <sup>2</sup>
$\theta_T$	0.31	
$Rep$	229.55	
Transporte de sedimentos	Si	
Formas de fondo	Dunas	

La Figura 148 representa gráficamente el transporte de sedimentos unitario en la zona de estudio, obtenido con el modelo conceptual. Allí se observa que el transporte disminuye abruptamente a partir de la zona del puente Mansilla ( $x = 2000 \text{ m}$ ). El transporte en suspensión predomina respecto al transporte de fondo. Sin embargo, en el Puente Mansilla hay un transporte significativo de sedimentos, que coincide con lo estimado a partir de mediciones con ADCP.

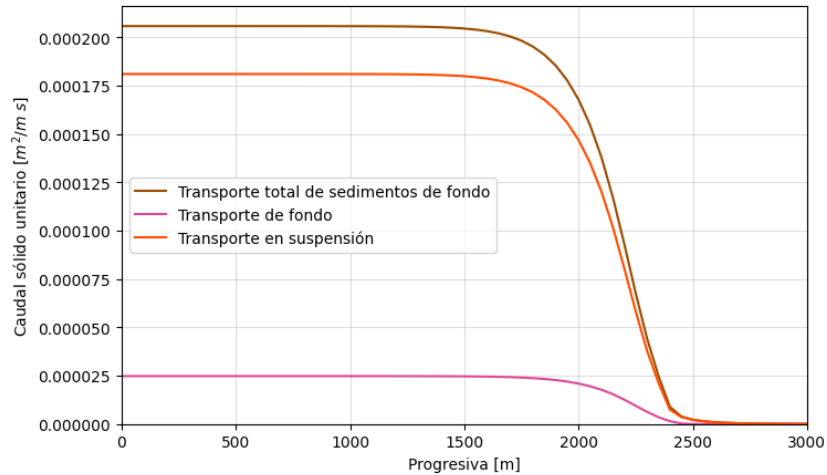


Figura 148.- Transporte unitario de sedimentos a lo largo del área de estudio durante el evento del día 30/01/2021.

Finalmente, la Tabla 34 representa la variación del lecho generada por el evento, considerando que inicialmente el lecho era liso. Allí se observa que la zona de sedimentación del material transportado se concentró entre la progresiva 1500 y 3000, con mayor influencia entre el Puente Mansilla y el Puente Central.

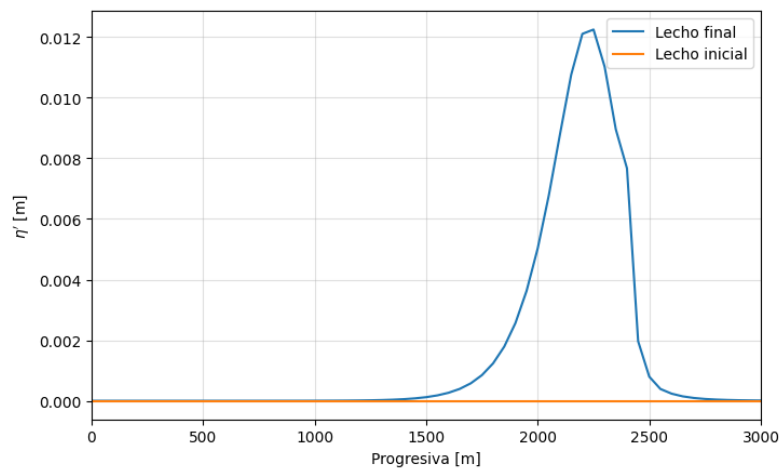


Figura 149.- Variación del lecho generada durante el evento del día 30/01/2021.

### Evento 02/02/2021

Se aplicó el modelo conceptual de los procesos de transporte de sedimentos utilizando como variables de entrada las presentadas en la Tabla 37.

Tabla 37.- Variables de entrada del modelo conceptual del río San Antonio aplicado en el evento del 02/02/2021.

Variabes	Valor	Unidades	Comentario
$q$	1.08	$m^2/s$	Medido con ADCP ( $q = \frac{45.82 m^3/s}{41.81 m}$ )
$y_f$	2.84	m	Nivel del embalse (34.34 m – 31.5 m)
$D_{50}$	1.50	mm	Media estimada de acuerdo a las características del cauce
$S_0$	0.15	%	Media estimada de acuerdo a las características del cauce

Como resultado se obtuvo el gráfico de la Figura 150, que representa la relación entre la velocidad de corte y la velocidad media del flujo a lo largo de  $x$  para las condiciones del evento analizado.

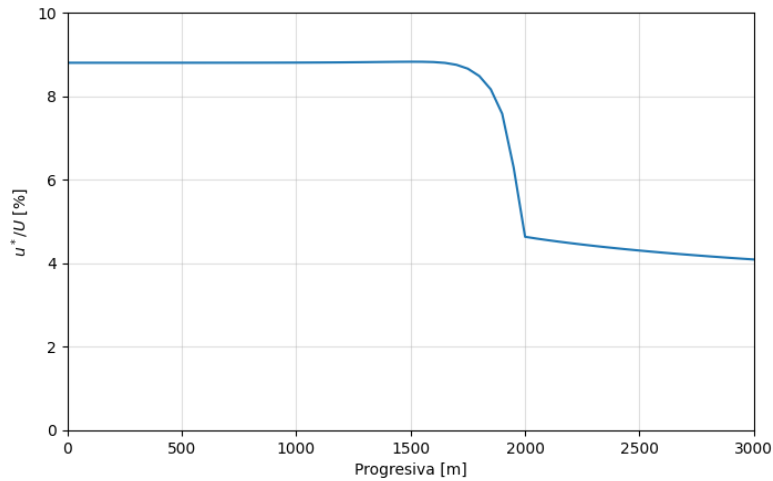


Figura 150.- Relación entre la velocidad de corte y la velocidad media del flujo a lo largo de  $x$  para las condiciones del evento del día 02/02/2021.

Para la progresiva  $x = 2000 \text{ m}$  donde se encuentra el Puente Mansilla, lugar donde se midió la  $U$ , se obtuvieron los resultados presentados en la Tabla 38. En dicha sección, de acuerdo al ábaco de Shields-Parker, hay transporte de sedimentos pero el punto se encuentra muy cercano al crítico. En consecuencia, es esperable que el transporte de sedimentos sea prácticamente nulo. Ello se verifica en la Figura 151, que representa gráficamente el transporte de sedimentos unitario en la zona de estudio obtenido con el modelo conceptual, donde se observa un transporte de sedimentos tiende a cero a partir del Puente Mansilla y que el transporte en suspensión predomina. Esto coincide con lo relevado en campo mediante el método del lazo con ADCP.

Tabla 38.- Resultados obtenidos para el Puente Mansilla bajo las condiciones del evento del día 02/02/2021.

Variables	Valor	Unidades
$\frac{u^*}{U}$	4.54%	%
$U$	0.7	m/s
$u^*$	0.03	m/s
$\tau$	1.01	N/m <sup>2</sup>
$\theta_T$	0.04	
$Rep$	229.55	
Transporte de sedimentos	Si	
Formas de fondo	Dunas	

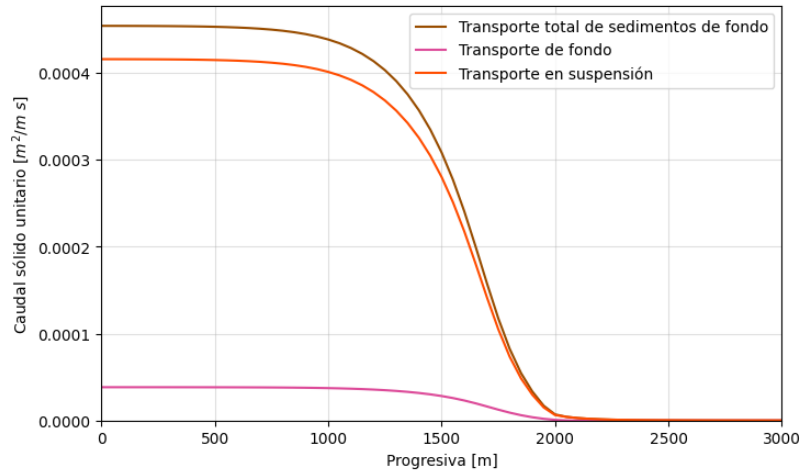


Figura 151.- Transporte unitario de sedimentos a lo largo del área de estudio durante el evento del día 02/02/2021.

Luego, la Figura 152 representa la variación del lecho generada por el evento, considerando que inicialmente el lecho era liso. Allí se observa que la zona de sedimentación del material transportado se concentró entre la progresiva 1000 y 2000, con mayor influencia en el Parque Estancia La Quinta.

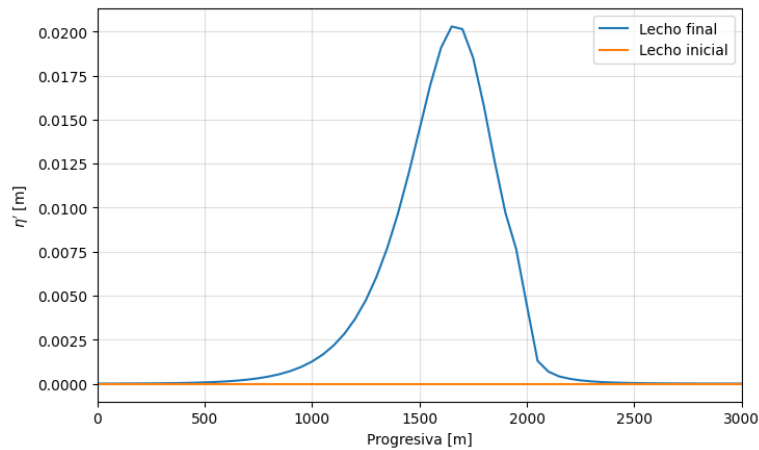


Figura 152.- Variación del lecho generada durante el evento del día 02/02/2021.

### Evento 13/10/2021

Se aplicó el modelo conceptual de los procesos de transporte de sedimentos utilizando como variables de entrada las presentadas en la Tabla 39.

Tabla 39.- Variables de entrada del modelo conceptual del río San Antonio aplicado en el evento del 13/10/2021.

Variables	Valor	Unidades	Comentario
$q$	2.38	$m^2/s$	Obtenido del hidrograma ( $q = \frac{100 m^3/s}{42 m}$ )
$y_f$	1.29	m	Tirante normal, determinado por una corrida inicial del modelo
$D_{50}$	1.63	mm	Media estimada de acuerdo a las muestras obtenidas del cauce
$S_0$	0.12	%	Media estimada de acuerdo al DEM obtenido

Como resultado se obtuvo el gráfico de la Figura 153 que representa la variación del caudal unitario a lo largo del cauce. Allí se observa que el transporte se mantiene del mismo orden, aumentando levemente hacia aguas abajo y predomina el transporte en suspensión.

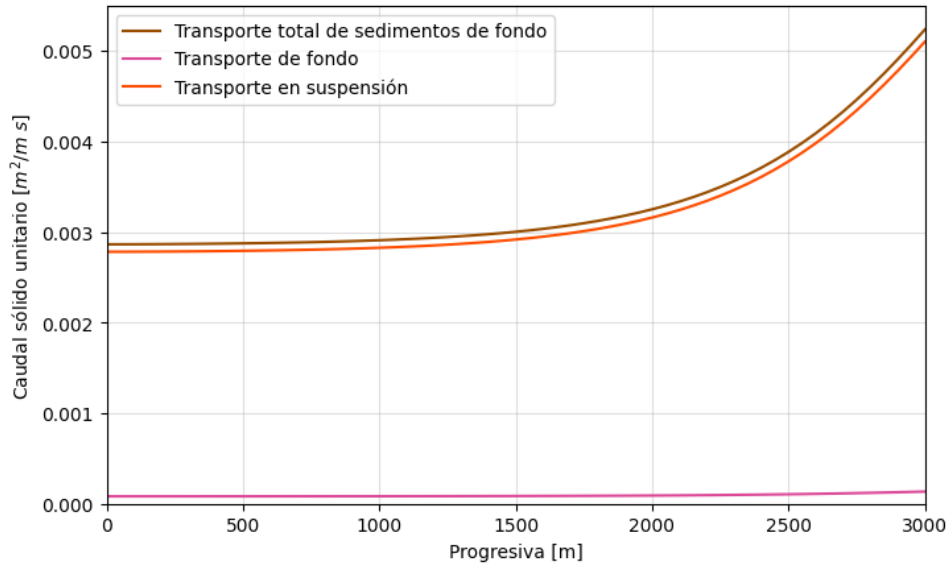


Figura 153.- Transporte unitario total de sedimentos a lo largo del área de estudio durante el evento del día 13/10/2021.

En la Figura 154 se representa la variación del lecho generada por el evento, considerando que inicialmente el lecho era liso. Allí se observa que predomina la erosión a partir de la progresiva 1000, aumentando hacia aguas abajo. Esto coincide parcialmente con lo observado, debido a que en campo se detectaron zonas de erosión entre las progresivas 1500-2000 y 2500-3000 y deposición entre las progresivas 2000-2500.

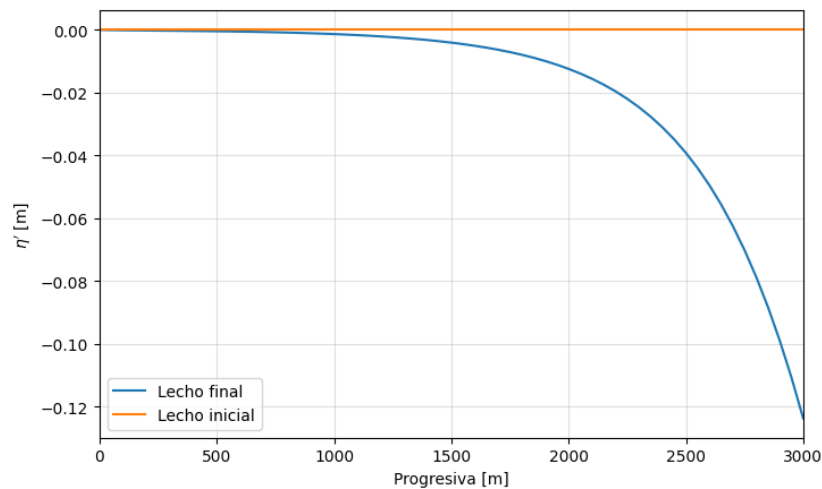


Figura 154.- Variación del lecho generada durante el evento del día 13/10/2021.

#### Evento 09/11/2021

Se aplicó el modelo conceptual de los procesos de transporte de sedimentos utilizando como variables de entrada las presentadas en la Tabla 40.



Tabla 40.- Variables de entrada del modelo conceptual del río San Antonio aplicado en el evento del 09/11/2021.

Variables	Valor	Unidades	Comentario
$q$	4.76	m <sup>2</sup> /s	Obtenido del hidrograma ( $q = \frac{200 \text{ m}^3/\text{s}}{42 \text{ m}}$ )
$y_f$	1.82	m	Tirante normal, determinado por una corrida inicial del modelo
$D_{50}$	1.50	mm	Media estimada de acuerdo a las características del cauce
$S_0$	0.15	%	Media estimada de acuerdo a las características del cauce

Como resultado se obtuvo el gráfico de la Figura 155, que representa la relación entre la velocidad de corte y la velocidad media del flujo a lo largo de x para las condiciones del evento analizado.

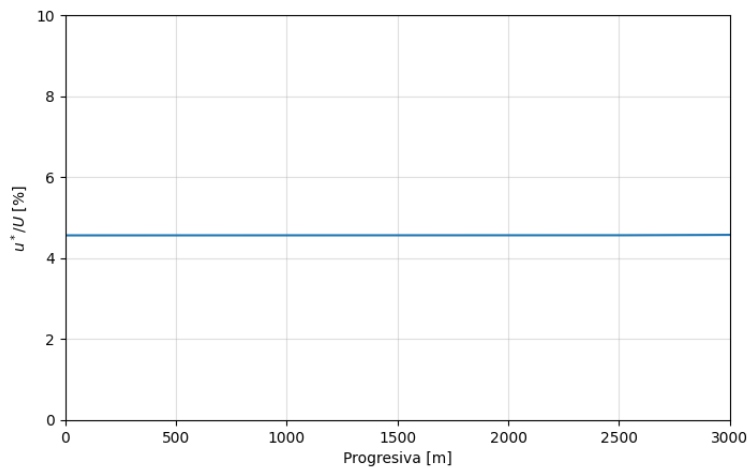


Figura 155.- Relación entre la velocidad de corte y la velocidad media del flujo a lo largo de x para las condiciones del evento del día 09/11/2021.

Para la progresiva  $x = 1850 \text{ m}$  donde se encuentra la sección donde se estimó la  $U$ , se obtuvieron los resultados presentados en la Tabla 41. En dicha sección, de acuerdo al ábaco de Shields-Parker, hay transporte de sedimentos y se forman dunas.

Tabla 41.- Resultados obtenidos para el Puente Mansilla bajo las condiciones del evento del día 09/11/2021.

Variables	Valor	Unidades
$\frac{u^*}{U}$	4.48	%
$U$	1.10	m/s
$u^*$	0.05	m/s
$\tau$	2.43	N/m <sup>2</sup>
$\theta_T$	0.10	
$Rep$	229.55	
Transporte de sedimentos	Si	
Formas de fondo	Dunas	

En la Figura 156 se representa gráficamente el transporte total de sedimentos unitario en la zona de estudio, obtenido con el modelo conceptual. Allí se observa que el transporte se mantiene prácticamente constante en todo el tramo de estudio.

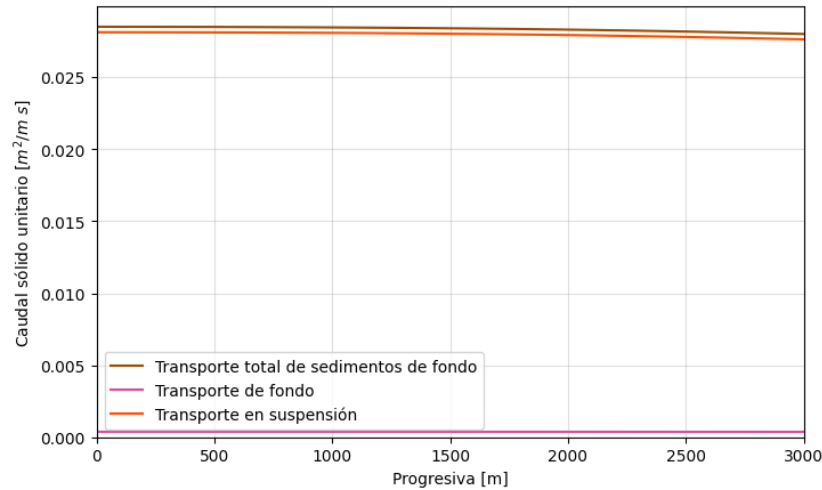


Figura 156.- Transporte unitario de sedimentos a lo largo del área de estudio durante el evento del día 09/11/2021.

En la Figura 157 se representa la variación del lecho generada por el evento, considerando que inicialmente el lecho era liso. Allí se observa que hubo sedimentación en prácticamente todo en tramo, con mayor influencia desde el Puente Central hasta el Puente Cassaffousth.

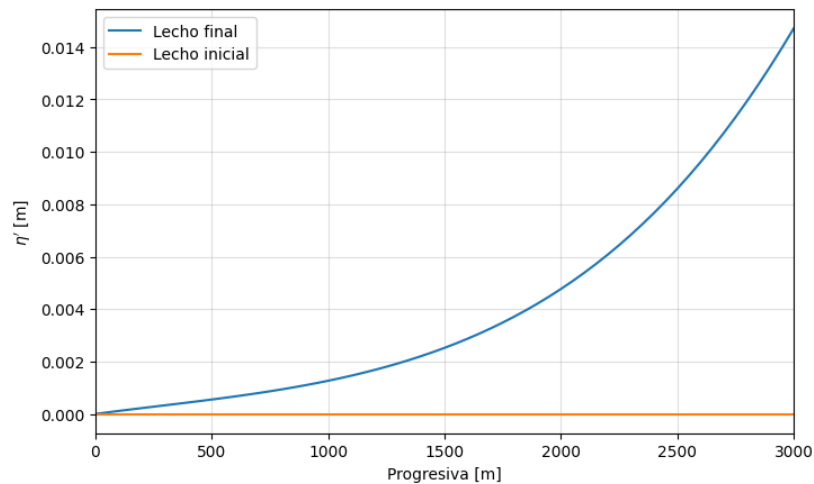


Figura 157.- Variación del lecho generada durante el evento del día 09/11/2021.

### Evento 10/11/2021

Se aplicó el modelo conceptual de los procesos de transporte de sedimentos utilizando como variables de entrada las presentadas en la Tabla 42.

Tabla 42.- Variables de entrada del modelo conceptual del río San Antonio aplicado en el evento del 10/11/2021.

Variables	Valor	Unidades	Comentario
$q$	7.38	$m^2/s$	Obtenido del hidrograma ( $q = \frac{310 m^3/s}{42 m}$ )
$y_f$	1.92	m	Tirante normal, determinado por una corrida inicial del modelo
$D_{50}$	1.50	mm	Media estimada de acuerdo a las características del cauce
$S_0$	0.15	%	Media estimada de acuerdo a las características del cauce

Como resultado se obtuvo el gráfico de la Figura 158, que representa la relación entre la velocidad de corte y la velocidad media del flujo a lo largo de  $x$  para las condiciones del evento analizado.

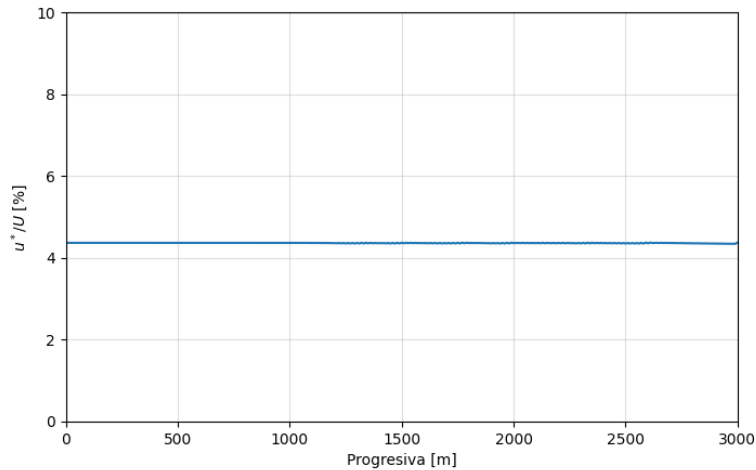


Figura 158.- Relación entre la velocidad de corte y la velocidad media del flujo a lo largo de  $x$  para las condiciones del evento del día 10/11/2021.

Para la progresiva  $x = 1850 \text{ m}$ , donde se encuentra la sección de control donde se midió la  $U$ , se obtuvieron los resultados presentados en la Tabla 43. En dicha sección, de acuerdo al ábaco de Shields-Parker, hay transporte de sedimentos, predomina el transporte de fondo y se generan dunas.

Tabla 43.- Resultados obtenidos para el Puente Mansilla bajo las condiciones del evento del día 10/11/2021.

Variables	Valor	Unidades
$\frac{u^*}{U}$	4.29	%
$U$	1.80	m/s
$u^*$	0.08	m/s
$\tau$	5.96	N/m <sup>2</sup>
$\theta_T$	0.25	
$R_{ep}$	229.55	
Transporte de sedimentos	Si	
Formas de fondo	Dunas	

En la Figura 159 se representa gráficamente el transporte total de sedimentos unitario en la zona de estudio, obtenido con el modelo conceptual. Allí se observa que el transporte se mantiene prácticamente constante en todo el tramo de estudio y predomina el transporte en suspensión.

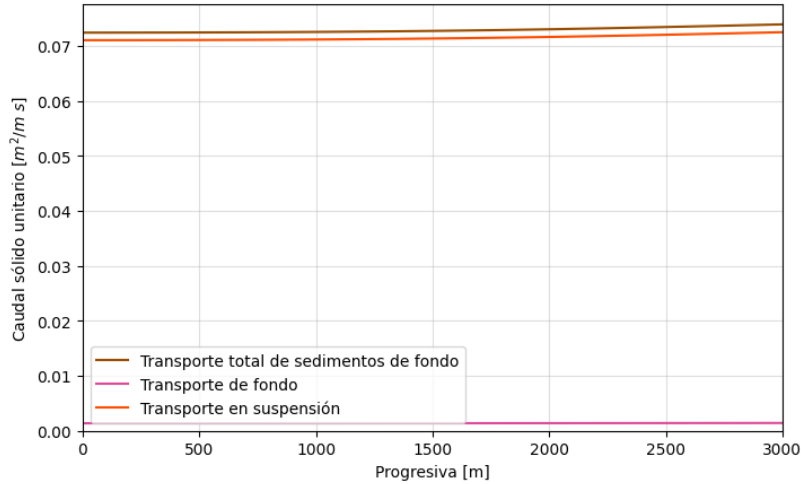


Figura 159.- Transporte unitario de sedimentos a lo largo del área de estudio durante el evento del día 10/11/2021.

En la Figura 160 se representa la variación del lecho generada por el evento, considerando que inicialmente el lecho era liso. Allí se observa una sedimentación en prácticamente todo el tramo.

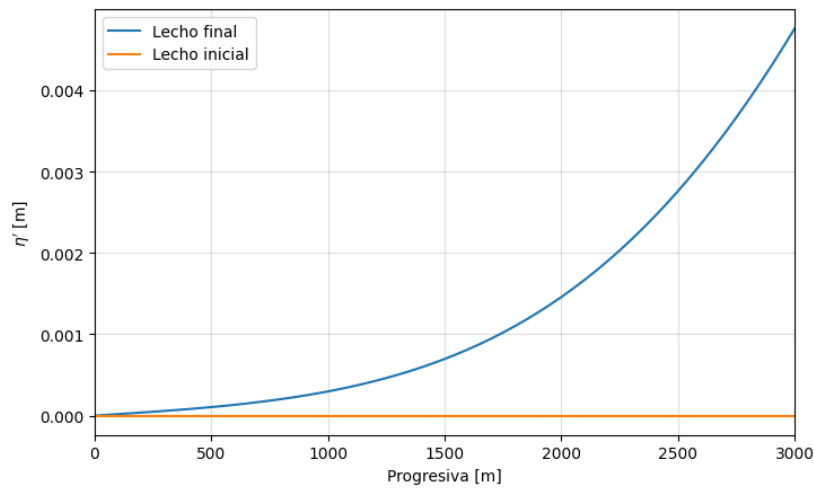


Figura 160.- Variación del lecho generada durante el evento del día 10/11/2021.

### Evento 10/12/2021

Para determinar la presencia o ausencia de transporte de sedimentos se aplicó el modelo conceptual de los procesos de transporte de sedimentos utilizando como variables de entrada las presentadas en la Tabla 44.

Tabla 44.- Variables de entrada del modelo conceptual del río San Antonio aplicado en el evento del 10/12/2021.

Variables	Valor	Unidades	Comentario
$q$	5.95	m <sup>2</sup> /s	Obtenido del hidrograma ( $q = \frac{250 \text{ m}^3/\text{s}}{42 \text{ m}}$ )
$y_f$	1.70	m	Tirante normal, determinado por una corrida inicial del modelo
$D_{50}$	1.59	mm	Media obtenida en el relevamiento de características del sedimento
$S_0$	0.15	%	Media estimada de acuerdo a las características del cauce

Como resultado se obtuvo el gráfico de la Figura 161, que representa la relación entre la velocidad de corte y la velocidad media del flujo a lo largo de  $x$  para las condiciones del evento analizado.

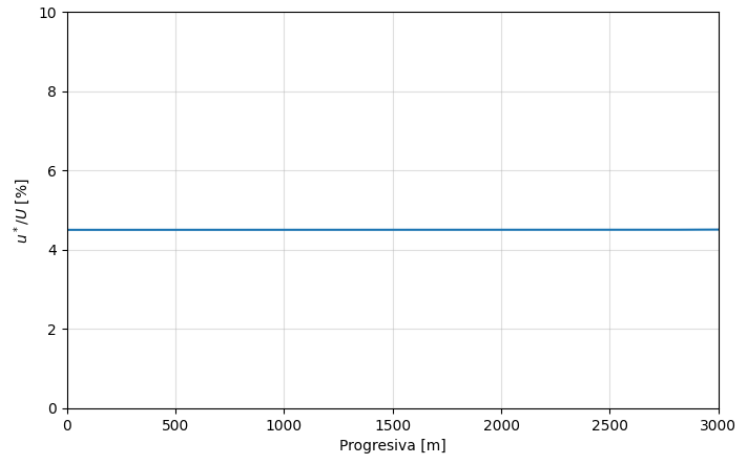


Figura 161.- Relación entre la velocidad de corte y la velocidad media del flujo a lo largo de  $x$  para las condiciones del evento del día 10/12/2021.

Para la progresiva  $x = 1850 \text{ m}$ , donde se encuentra la sección de medición de velocidad  $U$ , se obtuvieron los resultados presentados en la Tabla 45. En dicha sección, de acuerdo al ábaco de Shields-Parker, hay transporte de sedimentos, predomina el transporte de fondo y se forman dunas.

Tabla 45.- Resultados obtenidos para el Puente Mansilla bajo las condiciones del evento del día 10/12/2021.

Variables	Valor	Unidades
$\frac{u^*}{U}$	4.42	%
$U$	1.55	m/s
$u^*$	0.07	m/s
$\tau$	4.70	N/m <sup>2</sup>
$\theta_T$	0.18	
$R_{ep}$	250.52	
Transporte de sedimentos	Si	
Formas de fondo	Dunas	

En la Figura 162 se representa gráficamente el transporte de sedimentos unitario en la zona de estudio, obtenido con el modelo conceptual. Allí se observa que el transporte en el tramo se mantiene prácticamente constante, predominando el transporte en suspensión.



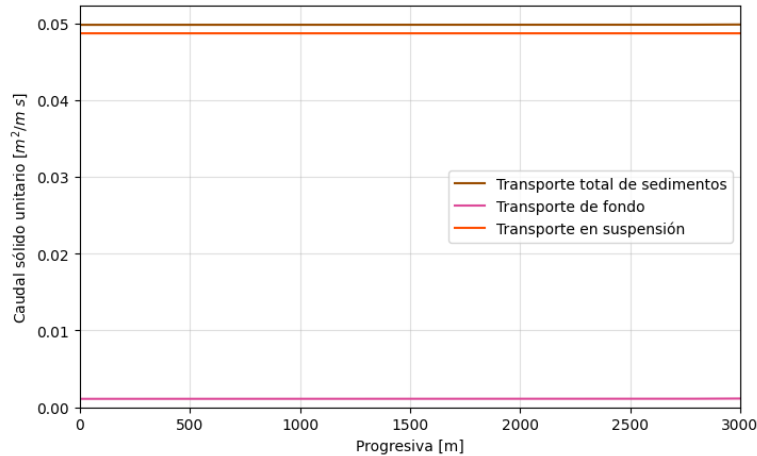


Figura 162.- Transporte unitario de sedimentos a lo largo del área de estudio durante el evento del día 10/12/2021.

En la Figura 163 se representa la variación del lecho generada por el evento, considerando que inicialmente era liso. Allí se observa que hubo sedimentación en prácticamente todo el tramo.

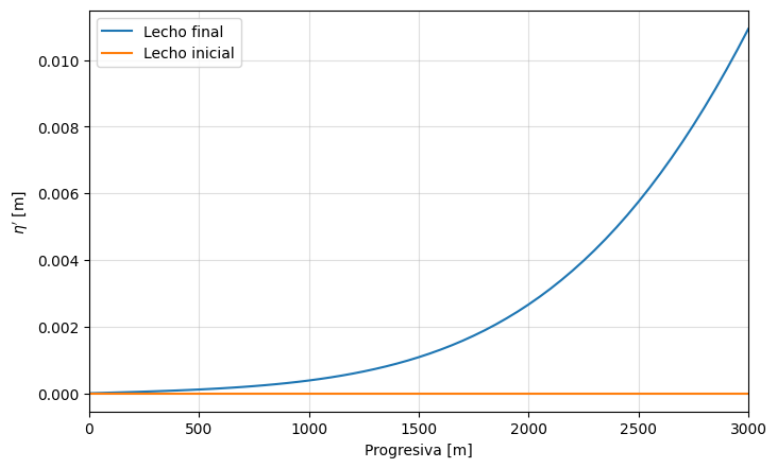


Figura 163.- Variación del lecho generada durante el evento del día 10/12/2021.

### Evento 23/01/2022

Se aplicó el modelo conceptual de los procesos de transporte de sedimentos utilizando como variables de entrada las presentadas en la Tabla 46.

Tabla 46.- Variables de entrada del modelo conceptual del río San Antonio aplicado en el evento del 23/01/2022.

Variablen	Valor	Unidades	Comentario
$q$	3.57	$m^2/s$	Obtenido del hidrograma ( $q = \frac{150 m^3/s}{42 m}$ )
$y_f$	2.00	m	Nivel del embalse ( $33.5m - 31.5m$ )
$D_{50}$	1.50	mm	Media estimada de acuerdo a las características del cauce
$S_0$	0.15	%	Media estimada de acuerdo a las características del cauce

Como resultado se obtuvo el gráfico de la Figura 164, que representa la relación entre la velocidad de corte y la velocidad media del flujo a lo largo de  $x$  para las condiciones del evento analizado.

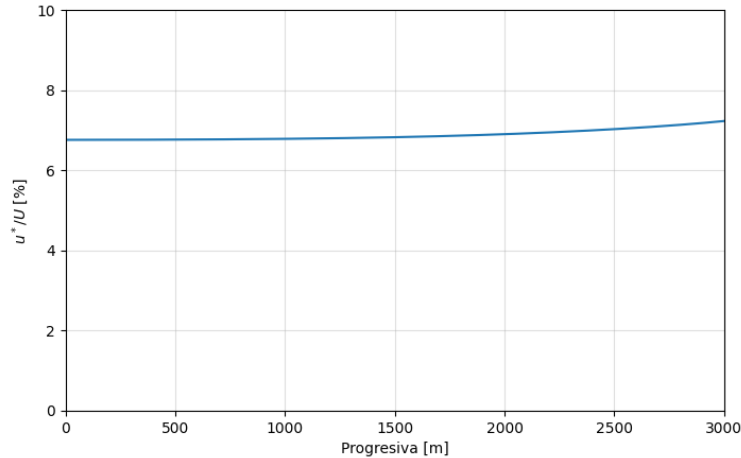


Figura 164.- Relación entre la velocidad de corte y la velocidad media del flujo a lo largo de  $x$  para las condiciones del evento del día 23/01/2022.

Para la progresiva  $x = 1850 \text{ m}$  donde se encuentra la sección de control donde se midió la  $U$ , se obtuvieron los resultados presentados en la Tabla 47. En dicha sección, de acuerdo al ábaco de Shields-Parker, hay transporte de sedimentos y se forman dunas.

Tabla 47.- Resultados obtenidos para el Puente Mansilla bajo las condiciones del evento del día 23/01/2022.

Variables	Valor	Unidades
$\frac{u^*}{U}$	6.66	%
$U$	1.17	m/s
$u^*$	0.08	m/s
$\tau$	6.06	N/m <sup>2</sup>
$\theta_T$	0.25	
$R_{ep}$	229.55	
Transporte de sedimentos	Si	
Formas de fondo	Dunas	

En la Figura 165 se representa gráficamente el transporte de sedimentos unitario en la zona de estudio, obtenido con el modelo conceptual. Allí se observa que el transporte predominante es el de suspensión, y que el mismo va disminuyendo hacia aguas abajo.

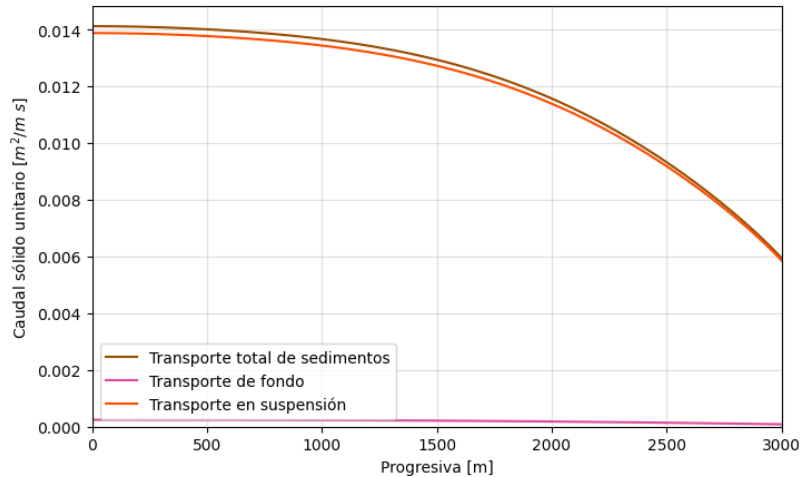


Figura 165.- Transporte unitario de sedimentos a lo largo del área de estudio durante el evento del día 23/01/2022.

En la Figura 166 se representa la variación del lecho generada por el evento, considerando que inicialmente el lecho era liso. Allí se observa que hubo sedimentación en prácticamente todo el tramo, aumentando la misma hacia aguas abajo.

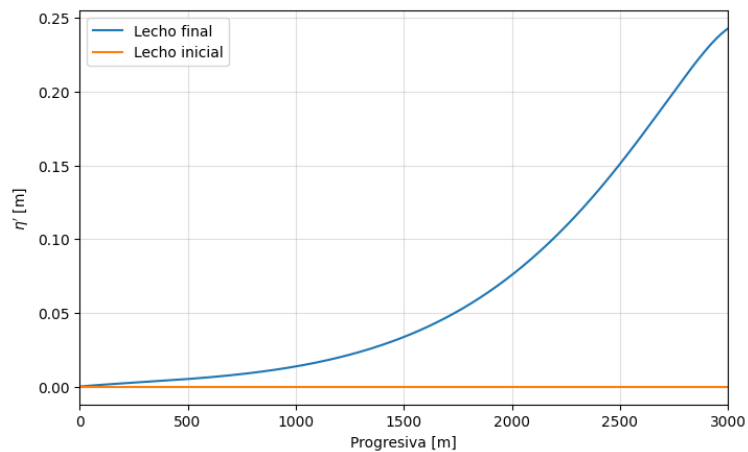


Figura 166.- Variación del lecho generada durante el evento del día 23/01/2022.

## 7.4. Análisis de resultados y discusión

Aplicando el modelo conceptual desarrollado en el capítulo 3 de la presente tesis con las variables obtenidas en el relevamiento de campo, fue posible determinar la variación del transporte de sedimentos a lo largo del tramo y la variación en la elevación del lecho (erosión o sedimentación). A modo de resumen, en la Tabla 48 se presentan los principales resultados obtenidos y un contraste entre lo obtenido en el modelo conceptual y datos relevados en campo.

Tabla 48.- Resumen de resultados de la simulación (transporte de sedimentos y variación del lecho) y contraste entre modelo conceptual y datos relevados

Evento	$q$ [m <sup>2</sup> /s]	$y_f$ [m]	Transporte de sedimentos	Variación del lecho	Contraste entre el modelo conceptual y relevamiento de campo
27/09/2017	0.97	0.59	Aumenta a partir de la progresiva 2500	Erosión del lecho a partir de la progresiva 2500	No se pudo contrastar
30/01/2021	0.82	1.92	Disminuye abruptamente a partir de la progresiva 2500	Sedimentación entre las progresivas 1500-2750	Coinciden zonas de transporte y sedimentación
02/02/2021	1.01	2.84	Disminuye abruptamente a partir de la progresiva 2000	Sedimentación entre las progresivas 750-2250	Coinciden zonas de transporte y sedimentación
13/10/2021	2.38	1.29	Constante en todo el tramo	Erosión a partir de la progresiva 1500	Coinciden parcialmente las zonas de erosión y deposición
09/11/2021	4.76	1.82	Prácticamente constante en todo el tramo	Sedimentación en todo el tramo	No se pudo contrastar
10/11/2021	7.38	1.92	Prácticamente constante en todo el tramo	Sedimentación en todo el tramo	
10/12/2021	5.95	1.70	Prácticamente constante en todo el tramo	Sedimentación en todo el tramo	
23/01/2022	3.57	2	Disminuye hacia aguas abajo	Sedimentación en todo el tramo	

Los resultados de presencia/ausencia de transporte de sedimentos a lo largo de la zona de estudio concuerdan con lo obtenido en eventos a través del método del lazo con el ADCP. En el caso de no haber podido estimar el transporte de sedimentos en campo, no pudo realizarse una comparación. Respecto a la variación del lecho, solo pudo ser verificado en los casos donde se desarrollaron modelos digitales de elevación cuando el caudal del río es bajo. Deberían desarrollarse y aplicarse técnicas que puedan ser utilizadas para determinar la variación del lecho en crecida. Sin embargo, en los eventos comparables, el modelo fue representativo de lo que ocurre en la realidad.

La ventaja de aplicar el modelo conceptual es que permite determinar la existencia de transporte de sedimento y su variación en eventos en los cuales no fue posible medir con ADCP y se cuenta con información de fácil obtención recopilada a través de hidrogramas y niveles de embalses provistos por estaciones oficiales. Además, permite determinar si como consecuencia del evento se generó erosión y deposición, junto a las zonas afectadas por los procesos predominantes.

El modelo es unidimensional, cuasi permanente, con coeficientes de rugosidad considerados independiente de la profundidad y estimados con relaciones determinadas para el flujo uniforme y se encuentra limitado a las condiciones de flujo subcríticas. Cuando la crecida generada y el nivel del embalse existente generan un cambio de régimen, el modelo no logra representar lo que sucede.

## Capítulo 8: Conclusiones y recomendaciones

---

### 8.1. Introducción

En esta tesis se realizaron avances en el estudio de la dinámica del transporte de sedimentos en el ingreso a cuerpos de agua lénticos, específicamente se ha estudiado un tramo del río San Antonio en la desembocadura del embalse San Roque, ubicado en Córdoba, Argentina. A continuación, se resumen las principales conclusiones alcanzadas a lo largo de la tesis.

### 8.2. Principales conclusiones en relación a la producción de sedimentos en la cuenca del río San Antonio

En la presente tesis se estimó la erosión hídrica de suelos para la cuenca del embalse San Roque a partir de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (USLE), uno de los métodos empíricos más utilizados para la estimación de la producción de sedimentos. Se obtuvo una tasa de erosión total de  $1.92 \text{ Hm}^3/\text{año}$ , con mayores valores de erosión en las cuencas de los ríos Cosquín y San Antonio. Dicho valor fue comparado con otros estudios realizados en la cuenca donde se obtuvo una tasa de erosión de  $0.86 \text{ Hm}^3/\text{año}$  a partir del método de (Djorovic & Gavrilovic, 1974) y un análisis de batimetrías existentes del embalse que resultó en una tasa de  $0.35 \text{ Hm}^3/\text{año}$ .

Las diferencias entre los resultados obtenidos entre las distintas metodologías aplicadas pueden ser consecuencia de las simplificaciones que presenta el método USLE, como no considerar la deposición de sedimentos a lo largo de la cuenca y la incertidumbre asociada en la definición de cada uno de los parámetros intervinientes. Por ejemplo, el método no considera la litología de la cuenca, la variación de la cobertura vegetal a lo largo del año (influenciada por los incendios forestales recurrentes en la cuenca alta y media) y en el largo plazo (debido al cambio de uso de suelo en la cuenca media y baja), ni la influencia de la variación en la magnitud y recurrencia de las precipitaciones en la cuenca debido al cambio climático que interfiere en la capacidad de carga de sedimentos por parte de los arroyos y ríos. Sin embargo, el método de USLE permite llegar a conclusiones cualitativas y evaluar la distribución de la producción de sedimentos en la zona de estudio. La cuenca del río Cosquín presenta una producción baja-media de sedimentos, posee una fuente muy importante de arena en la cuenca alta, pero en la zona cercana al río principal hay una zona de menor producción de sedimentos, quedando el Cosquín desvinculado del área fuente predominante, disminuyendo así la deposición de sedimentos en dicho cuerpo de agua. En cambio, el área fuente de sedimentos de la cuenca del San Antonio es mayor y la morfometría de la cuenca y la red hace que los sedimentos generados lleguen de forma más directa al embalse San Roque.

Estas afirmaciones coinciden con los resultados obtenidos al analizar secciones transversales del embalse mediante las batimetrías existentes, donde se evidencia una mayor influencia de la sedimentación en la desembocadura del río San Antonio. Además, ello se verifica con observaciones de campo y mediante una recopilación de imágenes históricas aportadas por ciudadanos de Villa Carlos Paz, donde se pudieron evidenciar los cambios en el lecho del San Antonio y las acumulaciones de sedimentos en el ingreso al San Roque.

Con el análisis cuantitativo y cualitativo de la producción de sedimentos de la cuenca de estudio, se pudo definir que se están generando sedimentos en la cuenca y parte de ellos son transportados



por los arroyos y ríos, acumulándose luego en el embalse San Roque. Esta acumulación de sedimentos resulta evidente y genera una disminución de la vida útil del embalse. En consecuencia, resulta fundamental el estudio de la dinámica del transporte de los sedimentos para la implementación de medidas de gestión de dichos sedimentos, tendientes a evitar la colmatación del cuerpo de agua.

### **8.3. Principales conclusiones y recomendaciones en relación a la modelación de la dinámica del aporte de sedimentos en cuerpos de agua**

Para comprender la dinámica del transporte de sedimentos en cuerpos de agua en la zona de estudio y respaldar hipótesis, se puede recurrir a modelos conceptuales sencillos. En el caso de la presente tesis, se elaboró un modelo conceptual con bases físicas con el objetivo de determinar zonas de sedimentación/erosión, cambios generados con variaciones en las condiciones de contorno y definir las variables que gobiernan los procesos físicos involucrados en el estudio para relevarlas en campo y, a futuro, elaborar modelos computacionales de detalle.

El modelo fue desarrollado en Python y representa de forma simple los procesos que determina la morfodinámica de la evolución del lecho de un río de ancho fijo y caudal constante que desemboca en un lago representado por una condición de borde de nivel de superficie libre. Este modelo es unidimensional y permite representar el transporte de sedimentos del lecho por fondo y suspensión, teniendo en cuenta las siguientes suposiciones: a) el flujo es turbulento e incompresible, a régimen permanente; b) prevalece la distribución hidrostática de presiones porque las líneas de corriente son paralelas; c) la pérdida de carga en una sección con flujo gradualmente variado es la misma que para un flujo uniforme que tiene la velocidad y radio hidráulico de la sección (el coeficiente de rugosidad estimado para flujo uniforme aplica a flujo gradualmente variado); d) la pendiente del canal es baja; e) el canal es prismático, tiene alineamiento y forma constantes; f) la distribución de velocidad en la sección transversal es fija (los coeficientes de distribución de velocidades son constantes); g) el coeficiente de rugosidad es independiente de la profundidad del flujo y constante a través del tramo del canal; h) la carga de fondo de sedimento se encuentra en equilibrio; i) en la sección aguas arriba hay disponibilidad de sedimentos para transportar.

El modelo requiere como variables de entrada características del flujo, fluido, sedimento y tramo de río analizado, junto a parámetros del esquema de la modelación. Presenta tres partes: un modelo hidrodinámico, un modelo de transporte de sedimentos y un modelo de evolución del lecho. Se considera que el flujo es a régimen permanente en cuanto al caudal que ingresa al tramo de estudio. Sin embargo, las variaciones del lecho generadas por los procesos de transporte de sedimentos modificarán la hidrodinámica del flujo. En consecuencia, se podría definir el modelo como cuasi permanente.

Con el modelo conceptual desarrollado se determinó que las variables más influyentes en la dinámica del transporte de sedimentos en la desembocadura de cuerpos de agua lénticos son las condiciones hidrológicas e hidráulicas (nivel del embalse, caudal y tirante o velocidad), la topografía (definida por la pendiente de fondo) y las características del sedimento transportado, representado por el diámetro característico. En consecuencia, para un estudio puntual en la zona de interés, se deben relevar datos de dichas características en campo.

Además, fue posible predecir que en el caso de la desembocadura del río San Antonio en el embalse San Roque predomina el transporte de sedimentos de fondo en suspensión respecto a los sedimentos de fondo. Los efectos más importantes de sedimentación y erosión con niveles del embalse bajos o medios se dan en el tramo comprendido entre la zona del Parque La Quinta y el Puente Cassaffousth. Cuando el nivel del embalse llega al labio del vertedero y ocurre una crecida, los efectos se trasladan hacia aguas arriba, en la zona del Balneario La Hoya. Este aspecto debería ser también considerado en el manejo óptimo del embalse, actividad en la cual se debería tener en cuenta no solo la cantidad y calidad de agua sino también la cantidad de sedimentos que ingresan al embalse. En este caso resulta necesario determinar cómo el manejo afecta a la sedimentación en el embalse ya que, como se mencionó anteriormente, las zonas de sedimentación van a variar de acuerdo a la cota de espera que presente el embalse ante un evento.

Las simulaciones realizadas muestran que la erosión, y en consecuencia el ingreso de sedimentos al embalse, ocurre en condiciones de niveles muy bajos del embalse (tirante normal o tirante menor generado por extracciones de áridos de gran magnitud) o en crecidas significativas, y su efecto es más marcado de acuerdo a la magnitud del evento. Cuando el embalse presenta niveles bajos y ocurre una crecida, hay transporte de sedimentos en todo el tramo de estudio y se generan formas de fondo (dunas). Luego, al aumentar el nivel del embalse, la zona donde se transporta sedimento se traslada hacia aguas arriba y no hay transporte en las zonas cercanas al embalse.

El modelo conceptual generado puede aplicarse en otras zonas de estudio, cambiando solo las variables de entrada. En consecuencia, se está trabajando en el registro del código computacional para que pueda utilizarse como una herramienta sencilla, de libre acceso y consistente para la gestión de los sedimentos en cuerpos de agua.

#### **8.4. Principales conclusiones y recomendaciones en relación al relevamiento de condiciones hidrológicas, hidráulicas, nivel del embalse, topografía y características de la granulometría del lecho**

Luego de definir las variables que gobiernan los procesos del transporte de sedimentos en la zona de estudio, se desarrollaron metodologías experimentales para su relevamiento en campo de acuerdo a las condiciones del flujo y la tecnología disponible.

La información hidráulica relevada se puede clasificar en cuasi-instantánea y continua. La información hidrológica e hidráulica cuasi-instantánea se relevó con ADCP, técnica que presenta gran confiabilidad y precisión, pero su implementación requiere una logística importante para estar en la zona de estudio durante la crecida, traslado del instrumento y capacitación de agentes de medición, implicando altos costos. Por ello, para incrementar la información disponible también se aplicaron técnicas más sencillas, estimando la velocidad con trazadores y el tirante con imágenes capturadas durante el evento o midiendo con distanciómetro, dando buenos resultados. Además, la sencillez de la técnica hace que pueda ser aplicada por una persona no capacitada técnicamente, disminuyendo costos y logística.

La información hidrológica continua consiste en hidrogramas de crecida y registros de nivel del embalse, ambos provistos por la APRHi, de acceso libre y con gran resolución temporal. Además, el dato del nivel del embalse brinda información acerca de las condiciones del embalse previas al

evento de crecida que, como se determinó en el modelo conceptual, determinan directamente la presencia o ausencia de transporte de sedimentos.

Para obtener información hidrometeorológica se recopilaron datos de lluvia provistos por redes oficiales de medición y de ciencia ciudadana. El aumento de la disponibilidad de información a lo largo de los años resultó evidente: se instalaron nuevas estaciones oficiales y se implementó el proyecto de ciencia ciudadana MATTEO que prácticamente duplicó la cantidad de datos existentes. Contar con información hidrometeorológica e hidrológica de forma libre resulta muy valioso y permite caracterizar la zona de estudio con gran claridad.

Durante el relevamiento topográfico se utilizaron cinco técnicas, de acuerdo a las condiciones hidráulicas e hidrológicas del cauce. En época de estiaje, donde el río presenta caudales menores a  $1 \text{ m}^3/\text{s}$ , el lecho queda expuesto. Aprovechando esta condición favorable para el estudio, se relevó el fondo con fotografías (satelitales y obtenidas en campo) para realizar un análisis general de la situación y luego con un vehículo aéreo no tripulado (VANT) para generar una ortofoto y un Modelo Digital de Elevaciones (DEM, por sus siglas en inglés). Cuando luego de la crecida el embalse queda con un nivel alto, inundando el área de análisis, el lento descenso del mismo durante el estiaje no altera las formas de fondo generadas en el último evento que produce transporte de sedimentos de la temporada. En estos casos, cuando las formas de fondo quedaron expuestas, se seleccionaron dunas representativas para caracterizar con topografía convencional, se realizaron perfiles longitudinales y transversales del cauce con GPS y se realizó un análisis del DEM generado para estimar el volumen de sedimento en la zona de estudio y determinar las características geométricas de todas las formas de fondo existentes. En caso de que el río aumente su caudal en crecida y luego disminuya el mismo rápidamente, las formas de fondo generadas en el evento se desarman, quedando expuesto un lecho liso. En consecuencia, se realizó un análisis de DEMs (comparando la situación antes y después del evento de crecida) para determinar el cambio en los perfiles longitudinales y el volumen de sedimentación o erosión en cada zona. En época de crecidas, se caracterizaron las formas de fondo del cauce a partir de mediciones dinámicas utilizando el ADCP y se utilizaron fórmulas empíricas para aproximar la geometría esperada de acuerdo a las características hidráulicas generadas por el evento. Con la aplicación de dichas técnicas se pudo caracterizar un conjunto de dunas, estableciendo la altura, longitud, velocidad y factor de forma de duna predominante en las condiciones hidráulicas medidas.

Respecto al relevamiento de las características de la granulometría del lecho, se realizó una caracterización granulométrica de los mismos (analizando con el método mecánico del tamizado muestras extraídas en perfiles longitudinales y transversales del cauce) y una estimación de su transporte a partir de mediciones estacionarias con ADCP (con el cual se obtiene una velocidad de las partículas cercanas al fondo), mediciones dinámicas con ADCP (con el cual se logra estimar el transporte de fondo mediante la técnica de seguimiento de fondo) y aplicación de fórmulas empíricas de diversos autores.

A través de muestras tomadas en el cauce se pudo determinar que hay una variación significativa del tamaño de sedimento a lo largo de las secciones transversales del cauce, acompañando el cambio de velocidades en la misma sección. En las márgenes, las velocidades y el tamaño de las partículas son menores, mientras que en las zonas centrales del cauce donde las velocidades son mayores el diámetro característico de los sedimentos aumenta. Además, se obtuvo variación en el

tamaño de los sedimentos en secciones longitudinales del lecho, disminuyendo el diámetro característico del sedimento hacia aguas abajo producto de la reducción de la velocidad del flujo por el efecto remanso del embalse. Se observó que hay una tendencia general de que al aumentar el caudal, se incrementa el tamaño de los sedimentos transportados en el evento. A su vez, no se detectó una tendencia de variación en la granulometría en las zonas de valle y cresta de las dunas.

Luego, a través del método del lazo con el ADCP se logró identificar en campo la presencia o ausencia de transporte de fondo y estimar un perfil de velocidades medio del fondo en la sección, que estuvo en concordancia con los resultados obtenidos en las mediciones estacionarias de corta duración.

### **8.5. Principales conclusiones y recomendaciones para el manejo de sedimentos en el tramo del río San Antonio en su desembocadura al embalse San Roque**

Bajo condiciones hidrológicas e hidráulicas medias, la zona de la desembocadura del río San Antonio en el embalse San Roque localizada aguas arriba del Puente Central queda expuesta desde septiembre hasta finales de noviembre (debido a que la cota del embalse es inferior a 32 m). Los resultados obtenidos mediante el uso del modelo conceptual y los relevamientos en campo muestran que el ingreso de los sedimentos al cuerpo de agua léntico se da en las primeras crecidas del año hidrológico. Por ello, se recomienda a los organismos de gestión de los Recursos Hídricos permitir la extracción controlada de áridos en la zona del río comprendida entre Balneario La Hoya y el Puente Central de Villa Carlos Paz durante dicho período, aprovechando que los mismos no se encuentran sumergidos y su extracción es sencilla al quedar al descubierto la mayor parte del cauce. La extracción permitirá disminuir la progresiva colmatación del embalse y le dará utilidad a los sedimentos transportados que presentan en promedio un diámetro medio de 1.50 mm, propio de la arena zarandeada comercializada.

### **8.6. Trabajos futuros**

Se sugiere extender este estudio a otros cuerpos de agua en la provincia de Córdoba con el objetivo de tener herramientas para implementar políticas públicas en relación a la gestión de los sedimentos en ríos y embalses, y de esa forma evitar la colmatación de los embalses o la agradación del lecho en ríos u arroyos que pueden generar como consecuencia inundaciones, variaciones en las líneas de ribera, entre otros.

---

## Anexo

---

### Código del Modelo Conceptual desarrollado en el Capítulo 3 de la presente tesis

```

# **Modelo conceptual de los procesos de transporte de sedimentos**

## Librerías requeridas

import numpy as np
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
from mpl_toolkits.axes_grid1 import host_subplot

## Definición de las variables de entrada

""" *Características del flujo* """

""" Caudal por unidad de ancho (m2/s) `q` y tirante aguas abajo (m) `y_f` """

q = 1
y_f = 1

""" *Características del tramo analizado* """

""" Pendiente de fondo del lecho (m/m) `S0` y Longitud del tramo (m) `Lm`. """

S0 = 0.0015
Lm = 3000

"""*Características del fluido* """

""" Densidad del agua (kg / m3) `rho_w` y viscosidad cinemática del agua ( m2 /
s ) `v`. """

rho_w = 1000
v = 1.018E-6

"""*Características del sedimento del lecho* """

""" Diametro medio del sedimento (m) `D`, Densidad del sedimento (kg/m3)
`rho_s` y porosidad del sedimento `porosidad` """

D = 0.0015
rho_s = 2650
porosidad = 0.4

""" *Parámetros del esquema de modelación* """

""" Tiempo de modelación (h) `tm`, time step Δt (s) `deltat` y step `deltax` """

```



```

tm = 4
deltat = 0.01 * 60 * 60
deltax = 10

""" *Otros parámetros* """

""" Asceleración de la gravedad (m/s^2) `g` y constante `A` """

g = 9.806
A = 0.00000013

""" *Cálculo de constantes y vectores* """

""" Cálculo de la gravedad específica sumergida del sedimento `R`, time array
`t`, vector x `x`, cantidad de pasos en la dirección x `n`, lecho inicial (m)
`eta0`, número de Reynolds del grano `Rep` y velocidad de caída de los sedimentos
(m/s) (Jimenez & Madsen, 2003) `ws`. """

R = (rho_s - rho_w) / rho_w
t = np.arange(0, tm * 60 * 60 + deltat * 0.1, deltat)
x = np.arange(0, Lm+0.1*deltax, deltax)
eta0 = x * S0
n = len(x)

## Modelo hidrodinámico

""" Cálculo del parámetro de Shields de grano (función "titas_calc") y total
(función "titat_calc") mediante la ecuación de Engelund-Hansen (1967). """

def titas_calc(y, q, D):
    return 2.5**(1/3) * q**2 / (g * R * D**(2/3) * 8.1**2 * y**(7/3))
def titat_calc(titas):
    if titas <= 0.06:
        return titas
    elif titas >= 0.6:
        return titas
    else:
        return ((titas - 0.06) / 0.4)**0.5

"""Cálculo de la pendiente de energía."""

def Sf_calc(titat, y, D):
    return (R * D * titat) / y

"""Cálculo del número de Froude."""

def Fr2_calc(y, q):
    return q**2 / (g * y**3)

"""Ecuación de flujo gradualmente variado para una condición de flujo aguas abajo
`y_f` y la cota a lo largo del lecho `eta`. """

```

```

def y_calc(y, q, D, eta):
    y = np.array([y])
    titas = np.array([])
    titat = np.array([])
    Sf = np.array([])
    Fr2 = np.array([])
    for i in np.arange(1, n):
        titas = np.concatenate([titas, [titas_calc(y[i-1], q, D)]]
        titat = np.concatenate([titat, [titat_calc(titas[i-1])]]
        Sf = np.concatenate([Sf, [Sf_calc(titit[i-1], y[i-1], D)]]
        Fr2 = np.concatenate([Fr2, [Fr2_calc(y[i-1], q)]]
        y = np.concatenate([y, [y[i-1] + (eta[i-1] - eta[i] + Sf[i-1] * deltax) /
(1 - Fr2[i-1])]]])
        titas = np.concatenate([titas, [titas_calc(y[-1], q, D)]]
        titat = np.concatenate([titat, [titat_calc(titas[i-1])]]
    return y, titas, titat

"""Obtención del tirante y los parámetros de Shields de grano y total para la
condición inicial de flujo aguas abajo y cota de lecho."""

y_, titas, titat = y_calc(y_f, q, D, eta0)

## Cálculo del transporte total de sedimentos del lecho y evolución del lecho

""" Iteración a lo largo del tiempo para obtener el tirante y los parámetros de
Shields de grano y total para el tiempo `tm`. """

def entrainment_GP(y, q, D, Rep, ws):
    """ Cálculo del esfuerzo cortante del grano """
    taus = y**(-7/3) * (2.5 * D)**(1/3) * rho_w * q**2 / 8.1**2
    """ Cálculo de la velocidad de corte de grano """
    ucortes = (taus / rho_w)**0.5
    """ Cálculo de la Variable de similitud para sedimento uniforme """
    Zu = ucortes * Rep**0.6 / ws
    """ Cálculo del Entrainment con la fórmula de García & Parker (1991). """
    return A * Zu**5 / (1 + A * Zu**5 / 0.3), taus, ucortes, Zu

def entrainment_EF(titas):
    """ Calculo del Entrainment con la fórmula de Engelund and Fredsoe (1976).
    """
    beta = 1
    p = (1 + ((beta * np.pi / 6) / (titas - 0.06))**4)**(-0.25)
    Pb = ((titas - 0.06 - beta * p * np.pi / 6) / (0.027 * (R + 1) * titas))**0.5
    Pb = np.where(np.isnan(Pb), 0., Pb)
    return 0.65 / (1 + Pb**(-1))**3, p, Pb

def qt_calc(y_f, y, titas, titat, q, D, eta0, MPM=0, Ent=0):
    qb_matriz = list()
    qbs_matriz = list()
    E_matriz = list()
    taus_matriz = list()
    ucortes_matriz = list()
    Zu_matriz = list()

```

```

p_matriz = list()
Pb_matriz = list()
ws_matriz=list()
eta0 = np.flip(eta0)
Rep = (g * R * D)**0.5 * D / v
ws = (R * g * D)**0.5 * (0.954 + (17.49 / Rep))**(-1)
for k in np.arange(0, len(t)):
    """ Cálculo del transporte de fondo (MPM) """
    if MPM == 0:
        """ Meyer Peter Muller modificado por Wong y Parker (2006). """
        qb = (g * R * D)**0.5 * D * 4.93 * (titas - 0.047)**(1.6)
    elif MPM == 1:
        """ Meyer Peter Muller (1948). """
        qb = (g * R * D)**0.5 * D * 8 * (titas - 0.047)**(1.5)
    elif MPM == 2:
        """ Parker (1979). """
        qb = (g * R * D)**0.5 * D * 11.2 * titas**(3/2) * (1-
0.03/titas)**(9/2)
    else:
        raise ValueError('Elegir 0, 1 o 2 para la fórmula de transporte de
sedimento de fondo (MPM).')
    qb = np.where(np.isnan(qb), 0, qb)
    qb_matriz.append(qb)
    """ Entrainment """
    if Ent == 0:
        E, taus, ucortes, Zu = entrainment_GP(y, q, D, Rep, ws)
        E_matriz.append(E)
        taus_matriz.append(taus)
        ucortes_matriz.append(ucortes)
        Zu_matriz.append(Zu)
        ws_matriz.append(ws)
    elif Ent == 1:
        E, p, Pb = entrainment_EF(titas)
        E_matriz.append(E)
        p_matriz.append(p)
        Pb_matriz.append(Pb)
    else:
        raise ValueError('Elegir 0 o 1 para la fórmula de Entrainment (E).')
    """ Cálculo de la velocidad de corte total """
    taut=titat*rho_w*g*R*D
    ucorte=(taut/rho_w)**0.5
    """ Cálculo del coeficiente de forma """
    r0 = 1 + 31.5 * (ucorte / ws)**(-1.46)
    """ Cálculo del Transporte de fondo en suspensión """
    qbs = q * E / r0
    qbs_matriz.append(qbs)
    """ Cálculo del Transporte total """
    qt = qb + qbs
    qt = np.flip(qt)
    """ Determinación de la posición del lecho para un nuevo instante
utilizando la ecuación de balance de masa de Exner (1925) y
el transporte total de sedimentos. """

```

```

    eta = np.concatenate([[eta0[0]], [eta0[j] + ((deltat / deltax) /
(porosidad - 1)) * (qt[j] - qt[j-1]) for j in np.arange(1, n)]]
    """ Nuevo tirante y parámetros de Shields """
    y, titas, titat = y_calc(y_f, q, D, np.flip(eta))
    eta0 = eta
    return y, eta, qt, qb, qbs, titat, np.array([qb_matriz, qbs_matriz, E_matriz,
taus_matriz, ucortes_matriz, Zu_matriz, p_matriz, Pb_matriz, ws_matriz])

y, eta, qt, qb, qs, titat_, matrices = qt_calc(y_f, y_, titas, titat, q, D, eta0,
MPM=0, Ent=0)

## Data visualization

### Plots

fig = plt.figure(figsize=(8,5), dpi=100)
ax = fig.add_subplot(1, 1, 1)
ax.plot(x, qt, color='#994d00', label='Transporte total de sedimentos de fondo')
ax.plot(x, np.flip(qb), color='#dd4a99', label='Transporte de fondo')
ax.plot(x, np.flip(qs), color='#ff4d00', label='Transporte en suspensión')
ax.set(
    xlabel='Progresiva [m]',
    ylabel='Caudal sólido unitario [m^2/m\ s]',
    xlim=(0, 3000),
    ylim=(0, None)
)
ax.grid(alpha=0.4)
plt.legend()
fig.savefig('grafico_1.png')
plt.show()

fig = plt.figure(figsize=(8,5), dpi=100)
ax = fig.add_subplot(1, 1, 1)
ax.plot(x, eta - np.flip(x * S0), label=f'Lecho final')
ax.plot(x, np.flip(x * S0) - np.flip(x * S0), label=f'Lecho inicial')
ax.set(
    xlabel='Progresiva [m]',
    ylabel='$\eta$ [m]',
    xlim=(0, 3000),
    ylim=(None, None),
)
ax.grid(alpha=0.4)
plt.legend()
fig.savefig('grafico_2.png')
plt.show()

fig = plt.figure(figsize=(8,5), dpi=100)
ax = fig.add_subplot(1, 1, 1)
ax.plot(x, 100 * (np.flip(titad_) * g * R * D)**0.5 / (q / np.flip(y)))
ax.set(
    xlabel='Progresiva [m]',
    ylabel=r'$\sigma^*/U\sigma$ [%]',
    xlim=(0, 3000),

```

```
#ylim=(None, None)
ylim=(0, 10),
)
ax.grid(alpha=0.4)
fig.savefig('grafico_3.png')
plt.show()

### Export results

df = pd.DataFrame(
    data = [x * S0, np.flip(eta), y, titat, np.flip(qb), np.flip(qs),
np.flip(qt)],
    columns = pd.Series(np.flip(x), name='x (m)'),
    index = ['eta_0', 'eta', 'y (m)', 'tita_t', 'q_b (m2/s.m)', 'q_b (m2/s.m)',
'q_t (m2/s.m)'],
)
df.T.to_excel('resultados.xlsx')
df.T.to_csv('resultados.csv')
```



## Bibliografía

- Adeogun, A. G., Salami, B. A., Ibitoye, B. A., Salami, A. W., & Ighagh, G. T. (2020). Sustainable management of erosion prone areas of upper watershed of Kainji hydropower dam, Nigeria. *Journal of King Saud University-Engineering Sciences*, 32(1), 5-10.
- Alatorre, L. C., Beguería, S., Lana-Renault, N., Navas, A., & García-Ruiz, J. M. (2012). Soil erosion and sediment delivery in a mountain catchment under scenarios of land use change using a spatially distributed numerical model. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 16, 1321-1334.
- Alewel, C., Pasquale, B., Katrin, M., & Panos, P. (2019). Using the USLE: Chances, challenges and limitations of soil erosion modelling. *International Soil and Water Conservation Research*, 203-225.
- Andreazzini, M. J., Degiovanni, S., Spalletti, P., & Irigoyen, M. (Marzo de 2014). Producción de Sedimentos en una Cuenca de Sierras Pampeanas, Córdoba, Argentina: Estimación para distintos escenarios. *Aqua-LAC*, 6(1), 38-49.
- Annandale, G., Morris, G. L., & Karki, P. (2016). *Extending the life of reservoirs: sustainable sediment management for dams and run-of-river hydropower*. The World Bank.
- Barbeito, O. (2000). *Inundaciones repentinas. Sierras de Córdoba*. Córdoba.
- Barbeito, O., & Ambrosino, S. (1997). *Aspectos hidrogeomorfológicos de base para la evaluación de la amenaza por inundaciones repentinas. Cuenca alta del río Suquia*. Córdoba: Proyecto Conicor.
- Beltramone, C. (2007). *Geomorfología fluvial del Río San Antonio, Provincia de Córdoba, Argentina* (Vol. 13). Argentina: Cuadernos del CURIHAM.
- Beltramone, C. (2009). Estudio de aporte de sedimentos del río San Francisco al embalse del dique La Falda. *Cuadernos del CURIHAM*, 51-57.
- Beltramone, C., Barbeito, O., & Ambrosino, S. (2003). Mapa geomorfológico de la porción central de las Sierras de Córdoba. *Congreso Argentino de Cuaternario y Geomorfología*, 221-228.
- Bianchi, A. R., & Cravero, S. C. (2010). *Atlas climático digital de la República Argentina*. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Estación Experimental Salta.
- Brownlie, W. R. (1983). Flow depth in sand-bed channels. *Journal of Hydraulic Engineering*(109 (7)), 959-990.
- Bussi, G., Rodríguez-Lloveras, X., Francés, F., Benito, G., Sánchez-Moya, Y., & Sopeña, A. (2013). Sediment yield model implementation based on check dam infill stratigraphy in a semiarid Mediterranean catchment. *Copernicus Publications on behalf of the European Geosciences Union*.
- Carlos Paz En Vivo. (Marzo de 2020). *Llegó una creciente al Río San Antonio*. Obtenido de [https://www.youtube.com/watch?v=69a00tBT\\_8A](https://www.youtube.com/watch?v=69a00tBT_8A)
- Carlos Paz En Vivo. (2021). *Alivio para el San Roque: llegó la creciente al centro de Carlos Paz*. Obtenido de [https://www.youtube.com/watch?time\\_continue=36&v=VjDekULPFs&feature=emb\\_logo](https://www.youtube.com/watch?time_continue=36&v=VjDekULPFs&feature=emb_logo)
- Carvalho, D. F., Durigon, V. L., Antunes, M. A., Almeida, W. S., & Oliveira, P. T. (2014). Predicting soil erosion using Rusle and NDVI time series from TM Landsat 5. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira*, 49, 215-224.
- CEPROCOR. (2016). *Batimetría y perfilado sísmico en el lago San Roque, Córdoba*.
- Codromaz Rojas, A. E., & Conde, A. A. (1985). Estimación del factor R de la ecuación universal de pérdida de suelo para el centro-este de la República Argentina. *Revista de la Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo*, 3, 85-94.
- Codromaz Rojas, A. E., & Saluso, J. H. (1988). Estimación del factor "R" de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos para algunas localidades del norte de la República Argentina. *Actas XII Congreso Argentina de la Ciencia del Suelo*, (págs. 215-216). Corrientes.

- Codromaz Rojas, A. E., Conde, A. A., & Moresco, R. F. (1976). Determinación del índice de erosividad de las lluvias para algunas localidades de Entre Ríos, Santa Fé y Buenos Aires. *INTA IDEA*, 33, 709-713.
- Colladon, L. (2004). *Estadísticas Meteorológicas. Temperaturas medias mensuales 1994–2003*.
- Corral, M., Baldissone, M., Farias, H. D., Rodríguez, A., & López, F. (2009). Balance Sedimentológico Simplificado para el Río Cuarto, Córdoba. *Cuarto Simposio sobre Hidráulica de Ríos, Salta, Argentina*.
- Daniel Alejandro. (Noviembre de 2021). *Crecida del Río San Antonio - 9-11-2021 - Villa Carlos Paz*. Obtenido de <https://www.youtube.com/watch?v=juZDaifcktU>
- Degiovanni, S., Villegas, M., & Ulla, J. P. (2013). Análisis de la Carga de Fondo y Dinámica de Transporte en el Río Cuarto, provincia de Córdoba, como base para una Minería de áridos sustentable. *Asociación Geológica Argentina*, 238-248.
- Derruau, M. (1970). *Geomorfología*. Barcelona, España: Ariel.
- Diario La nueva Mañana. (2017). *Alertan por fuertes crecidas en ríos serranos tras las lluvias*. Obtenido de <https://lmdiaro.com.ar/contenido/11815/alerta-por-la-crecida-de-los-rios-en-las-sierras>
- Djorovic, M., & Gavrilovic, S. (1974). *Quantitative classification of torrent waterways*. Institute for Forestry and Wood Industry.
- Eldoce. (2020). *Por la bajante del río San Antonio la municipalidad de Carlos Paz decidió drenar todo el cauce*. Obtenido de <https://www.youtube.com/watch?v=pXqoLatGau4>
- Engel, P., & Lau, Y. L. (1980). Computation of bed load using bathymetric data. *ournal of the Hydraulics Division*(106(3)), 639–380.
- Engelund, F., & Fredsoe, J. (1976). A Sediment Transport Model for Straight Alluvial Channels. *Nordic Hydrology*, 7, 293-306.
- Engelund, F., & Fredsoe, J. (1982). Sediment Ripples and Dunes. *Annual Reviews in Fluid Mechanics*, 14, 13-37.
- Engelund, F., & Hansen, E. (1967). *A Monograph on Sediment Transport in Alluvial Streams*. Copenhagen: Teknisk Vorlag.
- ESRI. (2016). ArcGis 10.8.
- Exner, F. M. (1925). Über die Wechselwirkung zwischen Wasser und Geschiebe in Flüssen. *Sitzber. Akad. Wiss Wien.*, 134.
- FAO-PNUMA-UNESCO. (1981). *Clasificación Provisional para la Evaluación de la Degradación de los Suelos*. Roma. Italia.
- Fournier, F. (1960). *Climat et érosion*. París: Presses Universitaire de France.
- Fournier, F. (1962). *Conservación de Suelos*. Consejo de Europa.
- Gaitán, J., Navarro, M. F., Tenti Vuegen, L., Pizarro, M. L., Carfagno, P., & Rigo, S. (2017). Estimación de la pérdida de suelo por erosión hídrica en la República Argentina. *Ed. INTA*, 72.
- García, M. H. (2007). *Sedimentation Engineering: processes, measurements, modeling and practice*. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 110.
- García, M. H., & Parker, G. (1991). Entrainment of Bed Sediment into Suspension. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 414-435.
- Gavrilovic, S. (1988). *The use of an empirical method (Erosion Potential Method) for calculating sediment production and transportation in unstudied or torrential streams*. England.
- GNU. (2022). Software Octave 7.1.0. *Software Octave*.

- Halac, S., Mengo, L., Guerra, L., Lami, A., Musazzi, S., Loizeau, J. L., . . . Piovano, E. L. (2020). Paleolimnological reconstruction of the centennial eutrophication processes in a sub-tropical South American reservoir. *Journal of South American Earth Sciences*, 103.
- Havinga, H. (1983). Discussion of 'Bed load discharge coefficient. *Journal of the Hydraulics Division. ASCE*, 109,, 157–160.
- Heredia Ligorria, A. I. (2017). *Caracterización del transporte de sedimentos en un tramo del Río Tercero (Ctalamochita) utilizando tecnología acústica Doppler*. Córdoba: Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba.
- IDECOR. (Febrero de 2022). *Mapas Córdoba: Geoportal IDE de la provincia de Córdoba*. Obtenido de <https://www.mapascordoba.gob.ar/>
- IGN. (2022). *MDE-Ar*. Obtenido de <https://www.ign.gob.ar/>
- INA-CIRSA. (2006). *Mitigación de la amenaza por inundaciones repentinas en las comunas del sur de Punilla, provincia de Córdoba*. Córdoba.
- INA-CIRSA. (2020). *Estudio del medio geológico, geomorfológico y biótico de los terrenos a anezar para la ampliación del ejido de la ciudad de Villa Carlos Paz*. Córdoba, Argentina.
- Jimenez, J. A., & Madsen, O. S. (2003). A Simple Formula to Estimate Settling Velocity of Natural Sediments. *Journal of Waterways, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 70-78.
- Lachhab, A., Booterbaugh, A., & Beren, M. (2015). Bathymetry and sediment accumulation of Walker Lake, PA using two GPR antennas in a new integrated method. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 245-255.
- Lafragua, J., Gutiérrez, A., Bahena, A., Moriel, G., & Fernández, S. (2006). Bathymetric curve (75 years old) validation, using the soil erosion transportation at Cuitzeo Lake Watershed. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 69.
- Marelli, H., Weir, E., Lattanzi, A., & Díaz, R. (1985). Técnicas de conservación de Suelos. (I. -E. Juárez, Ed.) *Serie Suelos y Agroclimatología*, III(2da Ed. ).
- Mengo, L., Halac, S., Faray, G., Costamagna, I., & Piovano, E. (2022). A sedimentary record of the environmental evolution and changes in trophic state of San Roque reservoir (Córdoba, Argentina) during the 20th-21th centuries. *Latin American Journal of Sedimentology and Basin Analysis*, 29 (1), 3-21.
- Meyer-Peter, E., & Muller, R. (1948). Formulas for bed load transport. *Proceedings of the 2nd Meeting of International Association for Hydraulic Structures Research*, 39-64.
- Mihu-Pintilie, A., Asandulesei, A., Nicu, I. C., Stoleriu, C. C., & Romanescu, G. (2016). Using GPR for assessing the volume of sediments from the largest natural dam lake of the Eastern Carpathians: Cujele Lake, Romania. *Environmental Earth Sciences*, 710.
- Montgomery, D. R. (2007). Soil erosion and agricultural sustainability. *PNAS, National Academy of Sciences of the USA*, 104(33), 13268-13272.
- Moore, I. D., & Burch, G. J. (1896). Physical Basis of the Length Slope Factor in the Universal Soil Loss Equation. *Soil Science Society of America*, 50, 1294-1298.
- Mosa, S. G., Núñez, V., & Boso, M. A. (2009). Colmatación de los embalses de generación Hidroeléctrica del Noroeste Argentino aplicación de nuevas Metodologías Batimétricas. *Aqua-LAC*, 93-104.
- Municipalidad de Villa Carlos Paz. (2020). *Página de Facebook del Municipio de Villa Carlos Paz*. Obtenido de <https://es-la.facebook.com/Municipiovcp>
- Naciones Unidas. (2022). *Objetivo 6: Garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos*. Obtenido de <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/water-and-sanitation/>

- Nda, M., Adnan, M. S., Yusoff, M. A., Jiya, G. S., & Ebenehi, I. Y. (2020). Sustainable Sediment Management in Reservoirs. *An Overview*.
- Novillo, L. A. (2020). *Optimización de metodologías experimentales para cuantificar el transporte de sedimentos de fondo en el Río Tercero utilizando ADCP*. Córdoba, Córdoba, Argentina.
- Odhiambo, B. K., & Boss, S. K. (2004). Integrated echo sounder, GPS, and GIS for reservoir sedimentation studies: Examples from two Arkansas lakes. *J. Am. Water Resour. Assn*, 40, 981-997.
- Pacina, J., Lendáková, Z., Stojdl, J., Matys Grygar, T., & Dolejs, M. (2020). Dynamics of sediments in reservoir inflows: a case study of the Skalka and Nechranice reservoirs, Czech Republic. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 258.
- Parker, G. (1979). Hydraulic geometry of active gravel bed rivers. *Journal of the Hydraulic Division, ASCE*, 1185-1201.
- Parker, G., García, M., Fukushima, Y., & Yu, W. (1987). Experiments on turbidity currents over an erodible bed. *Journal of Hydraulic Research*, 25(1), 123-147.
- Piovano, E. L., Zanon, G. A., & Ariztegui, D. (2006). *Marco geológico general. En: Bañados del río Dulce y Laguna Mar Chiquita (Córdoba, Argentina)*. Córdoba, Argentina: Bucher E.H.
- Pusetto, N., Piovano, E. L., Rodríguez, M. I., Ruiz, M., & Halac, S. R. (2020). Modelo conceptual del funcionamiento del embalse San Roque: dinámica sedimentaria y geoquímica. *Revista de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina*, 7(2).
- Reyna, S., Reyna, T., Lábaque, M., Riha, C., & Rafaelli, S. (2011). *Sedimentos en Embalses - Aplicación de modelos*. (H. D. Farías, J. D. Brea, & C. M. García, Edits.) Santiago del Estero, Argentina: Memorias del Quinto Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos.
- Risse, L. M., Nearing, M. A., Laflen, J. M., & Nicks, A. D. (1993). Error assessment in the universal soil loss equation. *Soil Science Society of America Journal*, 825.
- Romero Díaz, A., Alonso Sarriá, F., & Martínez Lloris, M. (2007). Erosion rates obtained from check-dam sedimentation (SE Spain). A multi-method comparison. *CATENA*, 71(1), 172-178.
- Romero Díaz, A., Martínez Lloris, M., & Belmonte Serrato, F. (2004). La construcción de diques de corrección hidrológica como política para retener la erosión y evitar el colmatación de presas en la cuenca del Segura (España). *Cuarta Conferencia Internacional sobre Degradación de Tierras*. Cartagena.
- Salas, H. P., & Lovera, E. F. (1994). Anegamientos e inundaciones en nuestra provincia (Córdoba) y su relación con el manejo de los suelos. *Rev. de la Sociedad Rural de Jesús María*, 82, 6-8.
- Sánchez, J. G., & Álvarez, J. A. (1997). *Morfología de ríos: Capítulo 11 del Manual de ingeniería de ríos*. Misiones: Instituto de Ingeniería de UNAM.
- Schmieder, O. (1921). Apunte Geomorfológico sobre la Sierra Grande de Córdoba. *Boletín Academia Nacional de Ciencias de Córdoba*, 25.
- Scian, B., & Pierini, J. O. (2013). Variability and trends of extreme dry and wet seasonal precipitation in Argentina. *A retrospective analysis. Atmósfera*, 3-26.
- Simons, D. B., Richardson, E. V., & Nordin, C. F. (1965). *Bedload equation for ripples and dunes*. Washington, D.C.: Professional Paper 462H.
- SonTek. (2013). *RiverSuveyor S5/M9 System Manual*.
- Tortololmágenes. (Octubre de 2020). *Dron Ramon, el río seco octubre 2020*. Obtenido de <https://www.youtube.com/watch?v=ohyA9N07K8E>
- UNESCO. (2010). *Procesos de erosión – sedimentación en cauces y cuencas* (Vol. 1). (J. D. Brea, & F. Balocchi, Edits.) Programa Hidrológico Internacional de la UNESCO para América Latina y el Caribe.

- USGS. (2022). *Earth Explorer*. Obtenido de <https://earthexplorer.usgs.gov/>
- Vázquez, J. B., Miatello, R. A., & Roqué, M. E. (1979). *Geografía Física de la Provincia de Córdoba*. Argentina: Boldt.
- Williams, J. R. (1995). The EPIC model. Computer models of watershed hydrology. *Water Resources Publications*, 909-1000.
- Wischmeier, W. H., & Smith, D. D. (1965). *Predicting rainfall-erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains* (Vol. 282). (U. D. Agriculture, Ed.) Washington DC: Agriculture Handbook.
- Wischmeier, W. H., & Smith, D. D. (1978). *Predicting rainfall erosion losses - a guide to conservation planning*. (Vol. 537). Washington DC: USDA/Science and Education Administration.
- Wischmeier, W. H., Johnson, C. B., & Cross, B. V. (1971). A soil erodibility nomograph for farmland and construction sites. *Journal of Soil and Water Conservation*, 189-191.
- Wong, M., & Parker, G. (2006). Reanalysis and correction of bed load relation of Meyer-Peter & Muller using their own database. *Journal of Hydraulic Engineering*, 132.