Autor: Ing. Civil Horacio Ferrada

“EVALUACION AMBIENTAL Y ANALISIS DE VULNERABILIDAD DE ESTRUCTURAS DE PUENTES FRENTE AL EMPLAZAMIENTO DE EMPRENDIMIENTOS PRIVADOS DENTRO DE LA CUENCA DEL ARROYO LAS AVISPA – RUTA NACIONAL N°7 km. 1069.51 CORREDOR BIOCEANICO”

Trabajo Final de Especialización

para optar al título de

Especialista en Ingeniería Ambiental

Facultad de Ingeniería

Universidad Nacional de Cuyo

Director: Ing. Gonzalo Davila

Diciembre, 2025

Evaluación ambiental y análisis de vulnerabilidad de estructuras de puentes frente al emplazamiento de emprendimientos privados dentro de la cuenca del Arroyo Las Avispa – Ruta Nacional N°7 km. 1069.51 corredor bioceánico"

Resumen

Este trabajo aborda la evaluación ambiental y el análisis de vulnerabilidad estructural de un puente ubicado en el km 1069.51 de la Ruta Nacional N°7, dentro del Corredor Bioceánico, en la cuenca del Arroyo Las Avispas. El objetivo principal es identificar los impactos provocados por emprendimientos privados —principalmente canteras de áridos— que alteran el escurrimiento natural del cauce mediante la deposición de materiales de rechazo, generando obstrucciones, erosión, y socavación en estribos y pilas del puente.

Se analizan los daños recurrentes en la infraestructura, las pérdidas económicas asociadas a intervenciones periódicas por parte del Estado, y los efectos sociales derivados de cortes y desvíos en una vía estratégica para el transporte de cargas. Además, se incorpora una evaluación ambiental estratégica que considera el uso del suelo, la geomorfología, la vegetación ribereña, y las emisiones generadas por las obras de mantenimiento.

El estudio propone integrar criterios técnicos, territoriales y ambientales para mejorar la planificación, regulación y resiliencia de infraestructuras viales frente a presiones antrópicas y eventos hidrometeorológicos extremos.

Palabras clave

Evaluación ambiental - indicadores – variables.

Prefacio

Este trabajo de investigación surge de la necesidad de abordar, desde una perspectiva técnica y ambiental, la creciente vulnerabilidad de infraestructuras viales frente a presiones antrópicas y eventos hidrometeorológicos extremos. La cuenca del Arroyo Las Avispas, ubicada en el Corredor Bioceánico sobre la Ruta Nacional N°7, constituye un caso representativo donde la interacción entre actividades extractivas no reguladas y fenómenos convectivos genera impactos significativos sobre la estructura de puentes y el entorno natural.

La metodología empleada articula herramientas de evaluación ambiental estratégica, análisis de riesgo hidrológico e hidráulico, y la definición de indicadores técnicos

orientados a cuantificar daños, estimar pérdidas económicas y establecer criterios de intervención. Desde un enfoque interdisciplinario, se integran variables estructurales, territoriales y ambientales que permiten abordar de manera integral la problemática planteada. En este contexto, **el presentante propone el desarrollo de un protocolo de evaluación de cauces en arroyos con características similares, con el objetivo de establecer una metodología replicable para la identificación de impactos económicos y socioambientales —tanto directos como indirectos— sobre estructuras de puentes**.

Este trabajo refleja el compromiso profesional con la mejora continua de la gestión ambiental y la resiliencia de las infraestructuras críticas, aportando evidencia técnica para fortalecer la articulación entre ingeniería, territorio y sostenibilidad.

Evaluación ambiental y análisis de vulnerabilidad de estructuras de puentes frente al emplazamiento de emprendimientos privados dentro de la cuenca del Arroyo Las Avispa – Ruta Nacional N°7 km. 1069.51 corredor bioceánico"

INDICE

Resumen 2

Palabras clave 2

Prefacio 2

Índice de tablas 8

Índice de figuras 10

Lista de siglas, abreviaturas y acrónimos 12

CAPÍTULO I 13

1.1. Introducción 13

1.1.1. Caracterización del problema 13

CAPÍTULO II 14

2.1. Objetivo General 14

2.2. Objetivos Específicos 14

2.3. Aplicación metodológica 14

2.4. Indicadores asociados 15

2.5. Metodología de evaluación 15

2.5.1. Marco Conceptual de la Evaluación 15

2.5.2. Dimensión Ambiental 15

2.5.3. Dimensión Social 15

2.5.4. Dimensión Económica 16

2.5.5. Dimensión Institucional 16

CAPITULO III 18

3.1. Marco Conceptual 18

3.1.1. Evaluación ambiental 18

9.1.2. Marco normativo vigente respecto a la explotación y extracción de áridos en Mendoza: 19

CAPITULO IV 19

4.1. Diseño hidrológico e hidráulico 19

4.1.1. Pautas para el diseño hidrológico 19

4.1.2. Parámetros físicos de la cuenca 19

4.1.3. Parámetros meteorológicos 20

4.1.4. Procesos hidrológicos modelados 20

4.1.5. Calibración y validación 20

4.1.6. Organización del modelo en HEC-HMS 20

4.1.7. Comparación de escenarios: actual vs. intervención antrópica (ver apéndice A)..... 22
4.1.8. Determinación parámetros físicos de la cuenca:..... 22
4.1.9. Parámetros físicos esenciales para caracterizar la cuenca..... 22
4.1.10. Subdivisión en subcuencas: criterios técnicos..... 23
4.1.11. Cuencas con datos de aforo: aprovechamiento hidrológico..... 23
4.1.12. Cuencas sin datos de aforo: construcción de curvas I-D-F..... 23
4.1.12.1. Metodologías disponibles..... 23
4.1.12.2. Tiempo de concentración (Tc)..... 24
4.1.12.3. Determinación de abstracciones (pérdidas)..... 24
4.1.12.4. Tormenta de diseño..... 24
4.1.12.5. Tránsito de crecidas..... 25
4.1.12.6. Transformación lluvia–caudal..... 25
4.1.12.7. Períodos de retorno..... 25
4.1.12.8. Modelos de Hidrograma Unitario Sintético (HUS)..... 26
4.2. Pautas para el diseño y verificación hidráulica de la estructura del puente:..... 27
4.2.1. Estudios Hidráulicos – Generalidades..... 27
4.2.2. Cálculos Hidráulicos..... 28
4.2.3. Estabilidad del Cauce y Riberas..... 28
4.2.4. Utilidad de la Verificación Hidráulica..... 28
4.2.5. Simular escenarios de crecida y escurrimiento concentrado..... 29
4.2.6. Definir caudales de diseño y tiempos de respuesta..... 29
4.3. Impacto de Eventos Antrópicos sobre la Dinámica Fluvial..... 29
CAPITULO V - Desarrollo del trabajo.....30
5.1.1. Introducción..... 30
5.1.2. Obtención de modelo digital de elevación (DEM)..... 31
5.1.3. Descripción de Tabla – Orden de Strahler y Parámetros de Horton:..... 34
5.1.4. Parámetros de Forma de la Cuenca:..... 38
5.1.5. Interpretación de la Curva Hipsométrica – A° Las Avispas..... 39
5.1.6. Hidrograma de crecida:..... 41
5.1.7. Determinación del número de curva (CN) – Metodología QGis..... 47
5.1.8. Datos meteorológicos:..... 50
5.1.9. Desagregación de Precipitación Máxima (Método Dick Peschke)..... 50
5.1.10. Cálculo de Intensidades de Precipitación..... 52
5.1.11. Gráfico de precipitaciones máximas diarias por año hidrológico..... 54

5.1.12. Aplicación de Coeficientes de Decaimiento Areal 55
5.1.13. Cálculo de Intensidades Máximas por Intervalo Horario 56
5.1.14. Parámetros estadísticos y función de Gumbel para curvas IDF 58
5.1.15. Determinación de los Hietogramas 59
5.1.16. Construcción del Mapa Topológico en HEC-HMS 62
5.1.17. Estimación de la escorrentía: 63
5.1.17.1. Método SCS Curve Number – Fundamentos: 63
5.1.18. Carga del Modelo Meteorológico en HEC-HMS 72
5.1.19. Especificaciones de Control en HEC-HMS - Control 1: 74
5.1.20. Configuración de Precipitaciones e Hietogramas en HEC-HMS (time series data): 75
5.1.21. Corrida del Modelo Hidrológico para Escenario de Diseño – TR 100 Años 80
5.1.22. Modelo Hidrológico HEC-HMS y Resultados 82
5.1.23. Conclusión del resultado del modelo hidrológico con HEC HMS – Cuenca Las Avispas 84
5.2. Introducción a la Modelación con HEC RAS 1D: 84
5.2.1. Preparación de Datos Base: 84
5.2.2. Configuración del Modelo en HEC-RAS 1D 84
5.2.3. Análisis de Velocidades y Erosión 85
5.2.4. Socavación en pilas y estribos: 85
5.2.5. 4. Resultados y Visualización 85
5.2.6. Conclusión y recomendaciones técnicas: 85
5.2.7. 5. Validación y Ajustes 85
5.3. Procesos y desarrollo de cálculo hidráulico con HEC-RAS v6.6: 86
5.3.1. Corrida del modelo hidráulico 89
5.3.2. Análisis de la corrida del modelo hidráulico del cauce sobre A° Las Avispas 90
5.3.2.1. Introducción 90
5.3.2.2. Análisis del perfil de velocidad del agua en sección transversal sobre eje de puente (ver figura 44): 90
5.3.2.3. Análisis espacial del perfil de velocidad en entorno de puente – Arroyo Las Avispas (ver figura 45): 91
5.3.2.4. Análisis de simulación del flujo – Aplicación RAS 3D Viewer (ver figura 46): 93
5.3.2.5. Análisis de la altura de agua o tirante del pelo de agua (ver figura 47): 94
5.3.2.6. Vista del perfil longitudinal – Conclusiones hidráulicas (ver figura 48): 95
5.3.3. Cálculo de erosión en el tramo del puente sobre el Arroyo Las Avispas (método Lischtvan-Lebediev): 98

5.3.3.1. Introducción: 98
5.3.3.2. Concepto de erosión: 98
5.3.3.3. Metodología de cálculo: 99
5.3.3.3.1. Criterio de Lischtvan-Lebediev (erosión general del fondo): 99
5.3.3.4. Caracterización del suelo del cauce: 101
5.3.3.5. Desarrollo del cálculo: 104
5.3.3.6. Batimetría y estimación de erosión general: 105
5.4. Conclusión desde el punto de vista del análisis hidráulico (régimen de flujo, rugosidad y riesgo de erosión): 106
CAPÍTULO VI – Valoración de los indicadores y variables analizadas 114
CAPITULO VII - CONCLUSIÓN 121
7.1. Cumplimiento de los objetivos específicos planteados 121
7.2. Lineamientos y líneas de investigación 123
7.3. Sugerencias para obras de mitigación y ordenamiento de ripieras 123
8. Referencias: 125

Índice de tablas

Tabla 1. Periodo de retorno asociada a obras de drenaje. 26
Tabla 2. Áreas de las subcuencas extraídas de QGis. 34
Tabla 3. Áreas de la cuenca extraídas de QGis. 34
Tabla 4. Datos morfométricos de la cuenca. 36
Tabla 5. Parámetros morfométricos de la cuenca. 38
Tabla 6. Relación con Parámetros Morfométricos. 41
Tabla 7. Condición de humedad. 43
Tabla 8. Referencia número de curva. Método Ven Te Chow. 44
Tabla 9. Valores de CN según método del número de curva de Ven Te Chow. 47
Tabla 10. Atributos de la cuenca y subcuenca. 50
Tabla 11. Valores de precipitaciones. 51
Tabla 12. Cálculo de las intensidades de precipitación. 53
Tabla 13. Cálculo de intensidades (precipitaciones máximas acumuladas). 57
Tabla 14. Valores de IDF. 59
Tabla 15. Datos morfológicos e hidrológicos para modelado de escorrentía. 60
Tabla 16. Cuenca 1 – Hietograma TR 100 años 61
Tabla 17. Cuenca 2 – Hietograma TR 100 años 61
Tabla 18. Cuenca 3 – Hietograma TR 100 años 61
Tabla 19. Cuenca 4 – Hietograma TR 100 años 62
Tabla 20. Cuenca 5 – Hietograma TR 100 años 62
Tabla 21. Cuenca 6 – Hietograma TR 100 años 62
Tabla 22. Cuenca 7 – Hietograma TR 100 años 62
Tabla 23. Valores de salida del modelo hidrológico en HEC HMS. 83
Tabla 25. Valores de volúmenes de salida de cada cuenca medidos en milímetros de lluvia acumulada del modelo hidrológico en HEC HMS. 83
Tabla 26. Valores de coeficiente de escorrentía en función a los valores obtenido en tabla 24 y 25 en HEC HMS. 83
Tabla 27. Valores de caudales de salida del modelo hidrológico en HEC HMS. 84
Tabla 28. Resumen de datos de salida 97
Tabla 29. Parámetros geotécnicos para M1 y M2 para la calicata Nº1. 102
Tabla 30. Parámetros geotécnicos para M1 y M2 para la calicata Nº2. 103
Tabla 31. Valores de x en funcion de dm. 105
Tabla 32. Valores de □ en funcion de la Recurrencia 105
Tabla 33. Batimetría y estimación de erosión general. 106
Tabla 34. Cuadro comparativo entre metodologías aplicadas. 109

Tabla 35. Matriz de impacto Ambiental..... 116
Tabla 36. Matriz de impacto Social. 117
Tabla 37. Matriz de impacto Económico. 118
Tabla 38. Matriz de impacto Institucional..... 119

.

Índice de figuras

Figura 1. Ubicación de la estructura de puente sobre A° Las Avispas (Latitud: 33° 4'41.23"S; Longitud: 69° 2'19.05"O). 31

Figura 2. Fuente: https://mghydro.com/watersheds/ 31

Figura 3. Delimitación de la cuenca Las Avispas. 32

Figura 4. Delimitación de las subcuencas con el modelo matemático de QGis (versión 3.34.7), mediante la aplicación de los complementos que posee el software. 32

Figura 5. Cálculo de la red de drenaje de cada subcuenca (orden de Strahler y Horton). 33

Figura 6. Calculo el cauce principal de la cuenca A° Las Avispas. 33

Figura 7. De dicho procesamiento se extrajeron datos de las tablas de atributos de archivo vectorial del software. 34

Figura 8. Ley de Horton del número de cauces. 36

Figura 9. Ley de Horton de longitud media del cauce. 37

Figura 10. Ley de Horton de áreas. 37

Figura 11. Curva hipsométrica. 40

Figura 12. Método de abstracciones del SCS - Fuente: Extracto de publicación de UDLAP (Universidad de las Américas Puebla, Méjico). 42

Figura 13. Mapa de cobertura vegetal para clasificación según método del número de curva de Ven Te Chow. 45

Figura 14. Complemento ArcGeek Calculator para determinación de CN. 48

Figura 15. Complemento Curve Number Generator para determinación de CN. 48

Figura 16. Luego se realizó la clasificación del raster y mediante el complemento “estadística de zona” se calculó cada CN para cada subcuenca. 49

Figura 17. Tabla de atributos con valores clasificados de CN. 49

Figura 18. Distancia a la estación meteorología de Cacheuta. 50

Figura 19. Gráfico de precipitaciones máximas diarias por año hidrológico. 54

Figura 20. Gráfico de coeficiente de reducción areal. 56

Figura 21. Gráfico de curvas IDF (TR = 25-50-100 Años). 59

Figura 22. Mapa topológico en HEC HMS. 63

Figura 23. Datos de entrada para cada subcuenca en HEC HMS. 64

Figura 24. Datos segunda solapa Loss en HEC HMS (índice de abstracción inicial y numero de curva). 65

Figura 25. Descomposición del almacenamiento en canal: prisma y cuña (Modelo Muskingum. 67

Figura 26. Configuración de tramo Reach-1 en HEC-HMS con ruteo Muskingum. 70

Figura 27. Modelado de Escorrentía Directa mediante Métodos de Transformación en HEC-HMS. 71

Figura 28. Modelo meteorológico HEC HMS. 73

Figura 29. Método de hidrograma especifico HEC HMS. 74
Figura 30. Especificaciones de control HEC HMS. 75
Figura 31. Precipitation gages – time series data en HEC HMS. 77
Figura 32. Precipitation gages – time windows HEC HMS. 78
Figura 33. Precipitation gages – table HEC HMS. 79
Figura 34. Hidrograma de salida para la subcuenca 1 en HEC HMS (a modo de ejemplo en representación de las demás subcuencas, las cuales serán representadas en la tabla de la figura 32). 80
Figura 35. Global summary datos de salida HEC HMS. 81
Figura 36. Hidrograma de salida HEC HMS. 81
Figura 37. Hidrograma de salida combinado HEC HMS (reach 3). 81
Figura 38. Vista pantalla de Open RAS Mapper. 87
Figura 39. Vista pantalla de datos de la geometría (Geometric Data). 87
Figura 40. Vista pantalla hidrograma para las condiciones de entrada en el tramo de estudio. .. 88
Figura 41. Vista de secciones transversales (incorporación de coeficiente N de Manning 0.035 generalizado para todo el cauce). 88
Figura 42. Datos de flujo constante (Stady Flow Data). 89
Figura 43. Análisis de flujo permanente (Steady Flow Analysis). 89
Figura 44. Análisis de la sección transversal (cross sections) ubicada sobre el eje de la estructura del puente en coincidencia con las pilas y estribos del puente (perfil de velocidad del agua). Se procesaron 157 perfiles transversales a lo largo del tramo en estudio (longitud del tramo de estudio 5495 metros). 91
Figura 45. Análisis espacial del perfil de velocidad en el tramo de estudio y particularmente en el sector de obstrucción de las ripieras e infraestructura del puente. 92
Figura 46. Análisis de simulación del flujo – Aplicación RAS 3D Viewer. 94
Figura 47. Análisis de la altura de agua o tirante del pelo de agua. 95
Figura 48. Vista del perfil longitudinal – Conclusiones hidráulicas. 96
Figura 49. Granulometría calicata Nº1. 102
Figura 50. Granulometría calicata Nº2. 103
Figura 51. Imagen satelital del año 2002 demarcación de las márgenes con color rojo. 111
Figura 52. Imagen satelital del año 2023 demarcación de las márgenes color verde. 112
Figura 53. Imagen satelital del año 2002 superpuesta con la imagen año 2023. 112
Figura 54. Imagen satelital del año 2002 superpuesta con la imagen año 2023 sector puente sobre A° Las Avispas. 113

Lista de siglas, abreviaturas y acrónimos

HEC-HMS: Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System (Modelo Hidrológico Computacional).

HEC-RAS: Hydrologic Engineering Center - River Analysis System (Modelo Hidráulico Computacional).

IGN: Instituto Geográfico Nacional (Argentina).

RN N°7: Ruta Nacional N°7.

A° Las Avispas: Arroyo Las Avispas.

SIG: Sistema de Información Geográfica.

I-D-F: Intensidad-Duración-Frecuencia.

SMN: Servicio Meteorológico Nacional.

INTA: Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.

TR: Período de Retorno (Tiempo de Recurrencia).

DEM: Modelo Digital de Elevación.

HUS: Hidrograma Unitario Sintético.

SCS: Soil Conservation Service (Parte del método para el Número de Curva).

CN: Número de Curva (Curve Number).

E.I.A.: Evaluación de Impacto Ambiental.

D.I.A.: Declaración de Impacto Ambiental.

DH: Dirección General de Hidráulica (De la Provincia de Mendoza).

UDLAP: Universidad de las Américas Puebla (Mencionado en la fuente de una figura).

QGis: Software de Sistema de Información Geográfica.

Km: Kilómetro.

CAPÍTULO I

1.1.Introducción

1.1.1. Caracterización del problema

La provincia de Mendoza se configura históricamente como un polo de extracción y comercialización de áridos de alta calidad, utilizados en obras de infraestructura vial y construcción civil. Esta actividad, concentrada principalmente en cauces aluvionales, ha evolucionado en paralelo al crecimiento urbano y a la expansión de emprendimientos privados, sin una regulación ambiental adecuada durante sus primeras décadas de desarrollo.

La explotación de ripieras en la región responde a la demanda sostenida de agregados como arena, grava y piedra triturada, esenciales para el desarrollo habitacional y vial. Sin embargo, la ausencia de normativas específicas en sus etapas iniciales ha generado impactos ambientales significativos, entre los que se destacan:

- Deterioro de cauces y lechos fluviales: La remoción intensiva de materiales altera la dinámica natural del escurrimiento, incrementa la erosión y afecta la calidad del agua y los hábitats acuáticos.
- Alteración paisajística: Las zonas intervenidas presentan depresiones profundas y modificaciones en la fisonomía del terreno, afectando la percepción visual y el equilibrio ecológico.
- Contaminación atmosférica: La generación de polvo durante la extracción y el transporte compromete la calidad del aire en áreas cercanas, con potenciales efectos sobre la salud y el ambiente.

Las primeras normativas ambientales en Mendoza surgieron de manera tardía y con un enfoque predominantemente orientado a la gestión de residuos industriales, sin contemplar de forma específica los impactos derivados de la explotación de áridos. En el ámbito provincial, la Ley 5961 (de Preservación del Medio Ambiente) y su decreto reglamentario 2109/94 establecen principios generales de protección ambiental, mientras que la Ley 8051 (de Evaluación de Impacto Ambiental) junto con el decreto 4376/96 introduce procedimientos para la evaluación de proyectos, aunque con limitada aplicación específica a las actividades extractivas en cauces aluvionales. A nivel nacional, la Ley 25.675 (Ley General del Ambiente) establece principios rectores para la política ambiental, mientras que la Ley 25.612 regula la gestión integral de residuos industriales, con escasa aplicabilidad directa a las ripieras.

En el ámbito provincial, la Ley 8434 y el Código de Procedimiento Minero (Ley N°9529) constituyen los marcos normativos más relevantes para la regulación de actividades extractivas. Más recientemente, la Resolución 19-DH-2020 de la Dirección General de Hidráulica introdujo modificaciones en los requisitos para la explotación de canteras en cauces, aunque persisten desafíos en su implementación y fiscalización.

La falta de un protocolo técnico específico para la evaluación de impactos en cauces afectados por actividades ripieras limita la capacidad de anticipar daños estructurales en infraestructuras como puentes, así como de estimar las pérdidas económicas y socioambientales asociadas. Esta situación demanda el desarrollo de herramientas metodológicas que permitan caracterizar, monitorear y mitigar los efectos de la

explotación de áridos sobre el entorno fluvial y las obras viales emplazadas en zonas vulnerables.

CAPÍTULO II

2.1. Objetivo General

Validar una metodología técnica para la evaluación de daños por erosión y socavación en estructuras de puentes y su entorno inmediato, en el marco de una gestión integral de cuencas, mediante la aplicación de modelos hidrológicos computacionales (HEC-HMS), utilizando la caracterización morfológica de la cuenca como dato de entrada, y modelos hidráulicos computacionales (HEC-RAS), con el fin de estimar niveles de erosión y socavación tanto generalizada sobre el cauce como puntual en la infraestructura del puente (pilas y estribos).

2.2.Objetivos Específicos

- Ajustar modelos hidrológicos e hidráulicos según las alteraciones provocadas por emprendimientos privados en la cuenca.
- Recalibración de modelos de predicción ante eventos convectivos y obstrucción del cauce.
- Determinación de curvas I-D-F en cuencas sin datos de aforo.
- Recopilación de datos hidrometeorológicos (SMN, INTA, comités de cuenca).
- Simulación de escenarios con y sin intervención antrópica.
- Variación en el escurrimiento superficial.
- Establecer correlaciones entre variables geomorfológicas, hidrológicas y de uso del suelo que inciden en los procesos erosivos.
- Análisis multivariable mediante SIG y relevamiento de campo.
- Identificación de zonas críticas por erosión y socavación.
- Cuantificar los impactos económicos y socioambientales derivados de la falta de regulación en la explotación de áridos.

2.3.Aplicación metodológica

- Diseño de un protocolo replicable para cauces fluviales sometidos a presión antrópica.
- Integración de variables estructurales, hidrológicas, geomorfológicas y territoriales.
- Validación mediante estudio de caso: puente sobre el Arroyo Las Avispas (RN N°7, km 1069.51).
- Tipo de uso del suelo vs intensidad erosiva.
- Pendiente, granulometría y cobertura vegetal (valor CN).
- Proximidad de actividades extractivas al cauce y a la infraestructura del puente.
- Estimación de costos directos (reparaciones, desvíos operativos).
- Evaluación de impactos indirectos (calidad ambiental, afectación logística).

2.4.Indicadores asociados

- Frecuencia de intervenciones estructurales (reparaciones y protecciones provisorias en pilas y estribos).
- Volumen de material erosionado y socavado.
- Costo acumulado de reparaciones.
- Alteración de parámetros hidráulicos (velocidad, caudal, sección útil de escurrimiento).
- Costo anual de intervenciones.
- Tiempo de corte de tránsito.
- Índice de alteración paisajística.
- Emisión de partículas y gases por maquinaria pesada.

2.5.Metodología de evaluación

2.5.1. Marco Conceptual de la Evaluación

La evaluación de impactos sobre infraestructuras viales emplazadas en cauces fluviales requiere un enfoque multidimensional que permita integrar variables técnicas, territoriales, sociales y normativas. En este trabajo, se propone una estructura conceptual basada en cuatro dimensiones clave: (i) dimensión ambiental, (ii) dimensión social, (iii) dimensión económica, (iv) dimensión institucional.

2.5.2. Dimensión Ambiental

Esta dimensión contempla los efectos que las actividades antrópicas —principalmente la explotación de áridos— generan sobre el entorno natural del cauce y su dinámica hidrosedimentológica. Se analizan:

- Alteración del escurrimiento superficial.
- Erosión de márgenes y socavación de lechos fluviales.
- Modificación de la geomorfología y pérdida de vegetación.
- Aumento de la carga sedimentaria y deterioro de la calidad del agua.
- Emisiones gaseosas y generación de residuos por intervenciones con maquinaria pesada.

2.5.3. Dimensión Social

Evalúa los impactos directos e indirectos sobre las comunidades y usuarios del corredor vial, considerando:

- Interrupciones en el tránsito por obras de emergencia.
- Riesgos operativos para el transporte de cargas y personas.
- Pérdida de conectividad territorial.

- Percepción social del deterioro ambiental y paisajístico.
- Conflictos por uso del suelo y ocupación de zonas aluvionales.

2.5.4. Dimensión Económica

Analiza los costos derivados de la falta de regulación y planificación ambiental, incluyendo:

- Inversión estatal en reparaciones periódicas y obras provisorias.
- Costos logísticos por desvíos y cortes de tránsito.
- Pérdidas económicas por deterioro de infraestructura crítica.
- Evaluación comparativa entre escenarios con y sin regulación extractiva.
- Valoración del pasivo ambiental acumulado.

2.5.5. Dimensión Institucional

Esta dimensión contempla el entramado normativo, la capacidad operativa de los organismos responsables y el grado de articulación entre actores públicos y privados en la gestión de cuencas hidrográficas. En el caso de Mendoza, se observa una evolución normativa fragmentada y una institucionalidad aún débil frente a la presión ejercida por emprendimientos extractivos sobre cauces fluviales.

Se identifican los siguientes aspectos críticos:

- Ausencia o debilidad de protocolos específicos para la evaluación de impactos en cauces intervenidos, especialmente en contextos de explotación de áridos y ocupación informal del territorio.
- Limitaciones en la fiscalización de actividades extractivas, tanto por falta de recursos técnicos como por vacíos normativos que dificultan la aplicación efectiva de medidas correctivas.
- Desactualización y fragmentación normativa, evidenciada en la coexistencia de leyes como la Ley 8434 (regulación de actividades extractivas), la Ley 9529 (Código de Procedimiento Minero de Mendoza), y la Resolución 19-DH-2020 (Dirección General de Hidráulica), sin una integración operativa que permita abordar los impactos de manera sistémica.
- Necesidad de incorporar criterios técnicos en la planificación territorial, incluyendo indicadores hidrológicos, geomorfológicos y de uso del suelo que permitan anticipar escenarios de riesgo y orientar decisiones estratégicas.
- Propuesta de fortalecimiento institucional mediante el desarrollo de protocolos replicables, que puedan ser adoptados por autoridades de cuenca o comités de cuenca, con capacidad de coordinar acciones entre organismos como la Dirección de Hidráulica, la Dirección de Protección Ambiental, municipios y entes viales.

Los comités de cuenca, como instancias de gobernanza participativa, tienen el potencial de articular saberes técnicos, normativos y comunitarios, promoviendo una gestión integrada del recurso hídrico y del territorio. Su fortalecimiento resulta clave para

implementar medidas de prevención, monitoreo y remediación en zonas vulnerables, como el caso del puente sobre el Arroyo Las Avispas.

Dimensión	Variable	Indicador
Ambiental	Emisiones por maquinaria	Emisiones totales de NOx, CO, CO_2 y PM10 (toneladas/año)
	Erosión del cauce	Niveles de erosión (profundidad media en cm/m por tramo afectado)
	Carga sedimentaria	Carga de sedimento en el torrente líquido (kg/m^3)
	Vegetación ribereña	Porcentaje de degradación de vegetación autóctona
	Taludes y barrancas	Número de eventos de desestabilización de taludes en barrancas laterales
	Proceso erosivo	Incremento o modificación del proceso erosivo (comparación interanual)
Social	Afectación al tránsito	Tiempo acumulado de corte o desvío (horas/año)
	Riesgo operativo	Número de incidentes viales asociados a deterioro estructural del puente
	Percepción comunitaria	Índice de percepción de riesgo ambiental (encuestas o entrevistas)
	Ocupación informal del territorio	Número de emprendimientos inmobiliarios no registrados en zona aluvional
Económica	Costos de reparación	Costo anual acumulado de intervenciones estructurales (USD/año)
	Obras provisorias	Frecuencia de obras de emergencia (número de intervenciones/año)
	Pérdidas logísticas	Pérdidas económicas por interrupción del corredor bioceánico (USD/año)
	Valor del pasivo ambiental	Estimación del pasivo ambiental acumulado (USD o m^2 degradados)
Institucional	Capacidad de fiscalización	Número de inspecciones realizadas vs planificadas (por año)
	Articulación normativa	Grado de actualización normativa (porcentaje de normas vigentes revisadas)
	Protocolos técnicos	Existencia y aplicación de protocolos específicos para cauces intervenidos
	Participación de comités de cuenca	Número de reuniones anuales y resoluciones emitidas
	Integración de criterios técnicos	Porcentaje de proyectos que incorporan criterios hidrológicos y geomorfológicos

CAPITULO III

3.1. Marco Conceptual

3.1.1. Evaluación ambiental

El artículo 41 de la Constitución Nacional Argentina establece que "todos los habitantes gozan del derecho a un ambiente sano, equilibrado y apto para el desarrollo humano y para que las actividades productivas satisfagan las necesidades presentes sin comprometer las de las generaciones futuras; y tienen el deber de preservarlo."

El gobierno Nacional sancionó la Ley Nacional 25.675 de Política Ambiental Nacional en el año 2002. Se establecen los presupuestos mínimos para el logro de una gestión sustentable y adecuada del ambiente, la preservación y protección de la diversidad biológica y la implementación del desarrollo sustentable. Establece en su artículo 8 que los instrumentos de la política y la gestión ambiental serán los siguientes:

1. El ordenamiento ambiental del territorio

2. La evaluación de impacto ambiental.

3. El sistema de control sobre el desarrollo de las actividades antrópicas.

4. La educación ambiental.

5. El sistema de diagnóstico e información ambiental.

6. El régimen económico de promoción del desarrollo sustentable.

La situación normativa en la provincia de Mendoza presenta la particularidad de ser anterior a la reforma constitucional del año 1994, pionera en la República Argentina de un marco normativo ambiental.

La Ley 5961, Ley de Preservación del Medio Ambiente de la Provincia de Mendoza, promulgada en el año 1992, y su Decreto Reglamentario 2109 del año 1994, establece:

*"*Artículo 1º: La presente ley tiene por objeto la preservación del ambiente en todo el territorio de la provincia de Mendoza, a los fines de resguardar el equilibrio ecológico y el desarrollo sustentable, siendo sus normas de orden público.

Artículo 3º: La preservación, conservación, defensa y mejoramiento del ambiente, a los efectos de esta ley, comprende:

a) El ordenamiento territorial y la planificación de los procesos de urbanización, poblamiento, industrialización, explotación minera y agrícola ganadera y expansión de fronteras productivas, en función de los valores del ambiente;

d) La orientación, fomento y desarrollo de iniciativas públicas y privadas que estimulen la participación ciudadana en las cuestiones relacionadas con el ambiente;

g) La coordinación de las obras y acciones de la administración pública y de los particulares en cuanto tengan vinculación con el ambiente;

Artículo 5º: El Poder Ejecutivo y los municipios garantizarán que, en la ejecución de sus actos de gobierno y de la política económica y social, se observen los siguientes principios de política ambiental:

d) Los organismos públicos deberán utilizar un enfoque científico inter y multidisciplinario al desarrollar actividades que, directa o indirectamente, puedan impactar al medio ambiente;

Artículo 26º: A los fines de la presente ley, entiéndase por Evaluación de Impacto Ambiental (E.I.A.) el procedimiento destinado a identificar e interpretar, así como a prevenir, las consecuencias o efectos que acciones o proyectos públicos o privados, puedan causar al equilibrio ecológico, al mantenimiento de la calidad de vida y a la preservación de los recursos naturales existentes en la provincia.

Artículo 27º - Todos los proyectos de obras o actividades capaces de modificar, directa o indirectamente el ambiente del territorio provincial, deberá obtener una Declaración de Impacto Ambiental (D.I.A.) , expedida por el Ministerio de Medio Ambiente, Urbanismo y Vivienda o por las municipalidades de la provincia, quienes serán la autoridad de aplicación de la presente ley, según la categorización de los proyectos que establezca la reglamentación y de conformidad con el Anexo 1, que forma parte de la presente ley.

I- Proyectos de obras o actividades sometidas al proceso de Evaluación de Impacto Ambiental por la autoridad ambiental provincial:

9) Construcción de rutas, autopistas, líneas férreas y aeropuertos;

II - Proyectos de obras o actividades sometidas al proceso de Evaluación de Impacto Ambiental por la autoridad ambiental municipal:

d) Intervenciones edilicias, aperturas de calles y remodelaciones viales".

9.1.2. Marco normativo vigente respecto a la explotación y extracción de áridos en Mendoza:

- Ley 8434 Regulación de las actividades comprendidas en la explotación de las canteras -Tercera Categoría.
- Ley 9529 Código de Procedimiento Minero de Mendoza.
- Resolución 106/25 dirección de minería.
- Resolución 36/25 dirección de protección ambiental.
- Resolución 110/25 – Reglamento de Policía Ambiental Minera.
- Resolución 19-DH-2020 – Modificación de requisitos explotación de canteras de áridos en cauces.

CAPITULO IV

4.1.Diseño hidrológico e hidráulico

4.1.1. Pautas para el diseño hidrológico

Para modelar una cuenca con HEC-HMS, se deben considerar parámetros físicos, meteorológicos y de calibración que representen fielmente los procesos lluvia-escorrentía.

4.1.2. Parámetros físicos de la cuenca

Estos definen la geometría y características del terreno:

- **Área de la cuenca y subcuencas**: delimitación precisa mediante SIG.
- **Pendiente media**: influye en la velocidad de escorrentía.

- **Longitud del cauce principal**: afecta el tiempo de concentración.
- **Tipo de suelo y uso del suelo**: determina la infiltración y escorrentía.
- **Curva de nivel y modelo digital de elevación (DEM)**: para definir redes de flujo y acumulación.

4.1.3. Parámetros meteorológicos

Estos representan los eventos de lluvia y condiciones climáticas:

- **Hietograma del evento**: distribución temporal de la precipitación.
- **Duración y magnitud de la lluvia**: clave para simular eventos extremos.
- **Temperatura y evapotranspiración**: si se modela el balance hídrico completo.
- **Datos históricos de precipitación y caudal**: necesarios para calibración y validación.

4.1.4. Procesos hidrológicos modelados

HEC-HMS permite simular varios procesos, cada uno con sus parámetros específicos:

Proceso	Método	Parámetros clave
Pérdidas por infiltración	SCS Curve Number	CN, humedad antecedente
Transformación lluvia-escorrentía	SCS Unit Hydrograph, Snyder, Clark	Tiempo de concentración, coeficientes de retardo
Escorrentía base	Recession, Constant Monthly Baseflow	Coeficiente de recesión, caudal base inicial
Canalización	Muskingum, Kinematic Wave	Coeficientes de almacenamiento y atenuación

Fuentes:http://www.scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1680-03382012000100008

4.1.5. Calibración y validación

- Comparación de hidrogramas simulados vs observados.
- Ajuste de parámetros como CN, tiempo de concentración, coeficientes de escorrentía.
- Uso de indicadores estadísticos: NSE, RMSE, coeficiente de determinación (R^2).

4.1.6. Organización del modelo en HEC-HMS

- Definición de componentes: cuencas, reaches, junctions, reservoirs.
- Asignación de métodos a cada componente.
- Configuración de simulaciones: eventos, condiciones iniciales, intervalos de tiempo.

Para el adecuado desarrollo de un estudio hidrológico de la Cuenca A° Las Avispas se proponen,

como mínimo, las siguientes cuatro etapas de estudio:

Etapa I: Estudio de antecedentes:

- Recopilación de información de base.
- Reconocimiento de campo. Registro de obras existentes.

Etapa II: Identificación de cuencas y subcuencas, la misma deberá hacerse para el escenario actual y con proyecto, de manera de poder identificar los cambios que se producirían en la dinámica hídrica existente al realizar la obra, determinando para ambos casos los parámetros físicos que sean necesarios.

Etapa III: Estadística hidrológica:

- Cuencas con datos de aforo.
- Cuencas sin datos de aforo – Determinación de curvas I-D-F.

Etapa IV: Calculo de caudales, además del cálculo de caudales para el escenario de proyecto deberá determinarse con las condiciones originales sin intervención antrópica, de manera de evaluar el impacto introducido.
A continuación, se detallan algunos aspectos particulares del procedimiento propuesto:

- Estudios de Antecedentes.
- Recopilación de información de base.
- Recopilación de datos hidrometeorológicos y antecedentes de estudios previos en la zona.

El desarrollo de una exhaustiva recopilación de datos hidrometeorológicos y antecedentes de estudios realizados en la zona de influencia de la obra vial (puente), tanto en organismos públicos como privados, repercutirá sin ninguna duda, en la calidad del estudio hidrológico a desarrollar.
A modo de ejemplo, a continuación, se detallan algunas fuentes de información que deberían ser tenidas en cuenta:

- Instituto Geográfico Nacional (IGN).
- Base de datos del Servicio Meteorológico Nacional (SMN).
- Base de datos de la Secretaría de Recursos Hídricos de la Nación.
- Direcciones provinciales de hidráulica.
- Direcciones municipales de hidráulica y/o de obras públicas e infraestructura.
- Autoridades provinciales del agua (INA).
- Estudios y proyectos antecedentes en archivo de la Dirección Nacional de Vialidad.
- Estudios y proyectos antecedentes en archivo de las direcciones provinciales de vialidad.
- Base de datos del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA)
- Autoridades o Comités de Cuenca.
- Actas de Congresos y Seminarios, nacionales e internacionales, de ingeniería vial.
- Repositorios digitales de Universidades Nacionales.

La delimitación de cuencas y subcuencas debe comenzar con datos oficiales del IGN (Cartas topográficas, MDT y MDE), y luego complementarse con modelos digitales

derivados de imágenes satelitales, drones y relevamientos específicos. La comparación entre escenarios actual y de proyecto permite detectar alteraciones en la dinámica hídrica.

Etapas clave para la identificación de cuencas y subcuencas:

Base oficial: Cartografía del IGN

- Cartas topográficas a escala 1:50.000 o superior.
- Modelo Digital de Elevaciones (MDE) y Modelo Digital de Terreno (MDT).
- Uso de curvas de nivel, cauces y divisorias de aguas para trazado inicial.
- Herramientas recomendadas: *ArcGIS Hydrology Toolset*, *QGIS con GRASS o TauDEM*.

Complementación con datos de alta resolución:

- Imágenes satelitales (Sentinel, Landsat, PlanetScope).
- Fotogrametría aérea y ortofotos históricas.
- Relevamientos con drones (UAS): permiten generar MDE locales con precisión centimétrica.
- LIDAR si está disponible: ideal para zonas con vegetación densa o alta pendiente.

4.1.7. Comparación de escenarios: actual vs. intervención antrópica (ver apéndice A)

- Objetivo: detectar cambios en escorrentía, acumulación, erosión o zonas de inundación.
- Métodos sugeridos:
- Superposición de mapas de flujo acumulado y redes de drenaje.
- Análisis de *curvas hipsométricas* y *índices morfométricos*.
- Simulación hidrológica con HEC-HMS o SWAT para ambos escenarios.
- Evaluación de cambios en CN, Tc, y caudales pico.

4.1.8. Determinación parámetros físicos de la cuenca:

La determinación de parámetros físicos en el estudio de cuencas implica caracterizar geomorfológicamente el área de influencia, describir la red de drenaje y subdividir la cuenca en unidades funcionales para evaluar riesgos como erosión y socavación. Esta etapa es clave para comprender la dinámica del escurrimiento superficial.

4.1.9. Parámetros físicos esenciales para caracterizar la cuenca

Para lograr una descripción completa y funcional del sistema hidrológico, se deben identificar:

- **Área de la cuenca y subcuencas**: delimitación precisa mediante MDE y herramientas SIG.
- **Forma de la cuenca**: índice de compacidad, elongación, y relación entre longitud y ancho.

- **Pendiente media**: derivada del MDE, influye en velocidad de escurrimiento y erosión.
- **Red de drenaje**: jerarquía de cauces, densidad de drenaje, orden de Strahler o Horton.
- **Relieve**: análisis hipsométrico, rugosidad, y altimetría relativa.
- **Tipos y usos del suelo**: clasificación edafológica y cobertura actual (urbano, agrícola, natural).
- **Cobertura vegetal**: tipo, densidad y estado, relevante para infiltración y retención.
- **Geología superficial**: si se dispone, para evaluar permeabilidad y estabilidad.

4.1.10. Subdivisión en subcuencas: criterios técnicos

La subdivisión no responde a una dimensión fija, sino a criterios funcionales:

- **Homogeneidad de pendiente y uso del suelo**.
- **Independencia hidrológica relativa** (flujo definido hacia un punto de control).
- **Facilidad de modelación**: cada subcuenca debe permitir asignación de parámetros únicos.
- **Representatividad de procesos locales**: erosión, acumulación, escurrimiento concentrado.

4.1.11. Cuencas con datos de aforo: aprovechamiento hidrológico

Si existen estaciones de medición cercanas, se recomienda:

- **Usar QMI**: para diseño de obras hidráulicas expuestas a eventos extremos.
- **QMMD**: útil para modelación continua o validación de simulaciones.
- **Aplicar coeficientes de mayoración**: para ajustar QMI desde QMMD, según régimen local.
- **Determinar**:
- *Caudal medio mensual*: para análisis estacional.
- *Caudal medio anual*: para balance hídrico.
- *Caudal específico*: $q = Q/A$ ($m^3/s/km^2$), útil para regionalización.
- *Derrame anual*: volumen total escurrido en un año.

4.1.12. Cuencas sin datos de aforo: construcción de curvas I-D-F

Cuando no hay aforos ni curvas oficiales, se deben generar curvas I-D-F locales:

4.1.12.1. Metodologías disponibles

- **Pluviográficos**:
  - ✓ Análisis de tormentas reales.

- ✓ Ajuste estadístico por duración (D) y frecuencia (F).

- **Pluviométricos**:
  - ✓ Método de desagregación (García et al., 2001; Bertoni et al., 1993).
  - ✓ Aplicación de coeficientes de intensidad para cada duración.
- **Regionalización**:
  - ✓ Modelos como el de *Devoto* para zonas sin datos.
- **Ecuaciones generalizadas**:

✓ Rühle (1963), Bell (1969), Chen (1983), WMO (2009).

✓ Útiles para estimaciones preliminares o zonas sin cobertura.

La determinación del caudal de diseño en cuencas no aforadas requiere una secuencia metodológica rigurosa que combine análisis geomorfológico, estimación de pérdidas, modelación de tormentas y transformación lluvia–caudal, todo respaldado por bibliografía técnica y validación regional.

4.1.12.2. Tiempo de concentración (Tc)

Definición: Tiempo que tarda el agua en escurrir desde el punto más alejado de la cuenca hasta la salida.

- **Métodos recomendados**:
  - ✓ *Kirpich*, *Giandotti*, *SCS*, *Bransby-Williams*, *Passini*, entre otros.
  - ✓ Singh (1988, 1989): recopilación de fórmulas según características geomorfológicas, uso del suelo e intensidad de lluvia.

Recomendación: aplicar varias fórmulas y contrastar resultados para adoptar un Tc representativo.

4.1.12.3. Determinación de abstracciones (pérdidas)

Método propuesto: *Curva Número (CN)* del SCS/NRCS.

Procedimiento:

- ✓ Clasificación de tipos y usos del suelo.
- ✓ Asignación de CN por categoría.
- ✓ Cálculo del CN ponderado mediante SIG.

Ventaja: permite simular distintos escenarios (actuales y futuros) de cobertura y uso del suelo.

4.1.12.4. Tormenta de diseño

Curvas I-D-F: deben ser representativas de la zona de estudio.

- ✓ Fuentes: INA, UNC, Devoto, Bertoni, García, WMO.

Distribución temporal:

- ✓ Preferentemente basada en antecedentes locales.
- ✓ Si no hay datos: *Método de Bloques Alternos*.

- **Duración**: igual o mayor al Tc.
- **Cambio climático**: considerar escenarios de intensificación de lluvias.

4.1.12.5. Tránsito de crecidas

Modelos propuestos:

- ✓ *SCS*: para tramos cortos sin amortiguamiento significativo.
- ✓ *Muskingum*: para cauces con almacenamiento y retardo.
- ✓ *Muskingum–Cunge*: versión mejorada con base física.

Aplicación: traslado de hidrogramas entre subcuencas o tramos de cauce.

4.1.12.6. Transformación lluvia–caudal

Modelos recomendados:

- ✓ *SCS Unit Hydrograph*: clásico, simple y ampliamente validado.
- ✓ *Clark Unit Hydrograph*: incorpora almacenamiento y retardo.
- ✓ *ModClark*: versión distribuida para uso con MDE.
- ✓ *Snyder*: regionalizado, útil en zonas sin datos.

Recomendación: aplicar más de un modelo y contrastar resultados.

4.1.12.7. Períodos de retorno

Valores mínimos según DNV:

Categoría de Camino	Tipo de Obra de Drenaje	Periodo de Retorno [años]	
		Diseño	Verificación
Ruta Bidireccional - Autovía - Autopista	Puente	100	200
Autopista - Autovía	Alcantarilla transversal	50	100
	Cuneta principal - Alcantarilla colectora y longitudinal	50	100
	Cantero central	50	100
	Cunetas externas - Alcantarilla frentista	25	50
Ruta Bidireccional	Alcantarilla transversal	25	50
	Cuneta principal - Alcantarilla longitudinal	25	50

Tabla 1. Período de retorno asociada a obras de drenaje.

Evaluación especial: en zonas con alto riesgo socioeconómico, se puede exigir T > 100 años.

4.1.12.8. Modelos de Hidrograma Unitario Sintético (HUS)

- **Snyder (1938)**

Tipo: geomorfológico.

Aplicación: cuencas medianas a grandes, con datos básicos de forma y pendiente.

Parámetros clave:

- ✓ *Ct*: coeficiente de tiempo.
- ✓ *Cp*: coeficiente de pendiente.
- ✓ *L*: longitud del cauce principal.
- ✓ *Lc*: distancia al centro de gravedad de la cuenca.

Ventaja: útil en zonas sin datos de aforo, con regionalización previa.

- **SCS (1957, 1972)**

Tipo: adimensional.

Aplicación: cuencas pequeñas a medianas, con CN y Tc definidos.

Parámetros clave:

- ✓ *Tc*: tiempo de concentración.
- ✓ *CN*: curva número.
- ✓ *D*: duración de la lluvia.

Variantes:

- ✓ *HU Triangular SCS–Mockus (1972)*: simplificación del hidrograma clásico.

Ventaja: ampliamente validado, compatible con HEC-HMS.

- **Clark (1945)**

Tipo: almacenamiento y retardo.

Aplicación: cuencas con almacenamiento significativo o cauces largos.

Parámetros clave:

- ✓ *Tc*: tiempo de concentración.
- ✓ *R*: coeficiente de almacenamiento.

Ventaja: permite simular el efecto de retardo y amortiguamiento.

- **Nash (1957)**

Tipo: conceptual de almacenamiento en cascada.

Aplicación: modelación continua o cuencas con comportamiento complejo.

Parámetros clave:

- ✓ *n*: número de reservorios.
- ✓ *K*: coeficiente de almacenamiento.

Ventaja: flexible, permite calibración estadística

La transformación lluvia–caudal mediante modelos matemáticos requiere seleccionar herramientas adecuadas, justificar cada parámetro aplicado y, siempre que sea posible, calibrar el modelo con datos observados. HEC-HMS es una opción recomendada por su versatilidad, licencia libre y respaldo institucional.

4.2. Pautas para el diseño y verificación hidráulica de la estructura del puente:

4.2.1. Estudios Hidráulicos – Generalidades

- Incluir valores de diseño y descripción detallada de las corridas del modelo hidráulico.

- Resultados numéricos con suficiente detalle para interpretación técnica:
    - ✓ Caudal.
    - ✓ Área de escurrimiento.
    - ✓ Tirante hidráulico.
    - ✓ Ancho de escurrimiento.
    - ✓ Coeficientes de rugosidad adoptados.
    - ✓ Velocidades máximas.
    - ✓ Número de Froude.
    - ✓ Coeficientes utilizados en alcantarillas y puentes.

4.2.2. Cálculos Hidráulicos

- Especificar claramente el método o expresiones aplicadas.
- Aclarar significado y unidades de cada parámetro.
- Incluir croquis y tablas explicativas para facilitar la comprensión del desarrollo teórico y numérico.

4.2.3. Estabilidad del Cauce y Riberas

- Realizar análisis de estabilidad.
- Definir necesidad de estructuras de defensa (gaviones, enrocados, encauzamientos).
- Proyectar y detallar dichas obras si son necesarias.

4.2.4. Utilidad de la Verificación Hidráulica

La verificación hidráulica constituye una etapa fundamental en el diseño y evaluación de obras de infraestructura, permitiendo:

Evaluar riesgos de socavación

- Identificación de procesos erosivos en estribos y pilas de puentes.
- Determinación de erosión por contracción, en pilas y estribos, según condiciones de creciente.

Diseñar obras de protección

- Proyección de encauzamientos, disipadores de energía, muros de contención y defensas hidráulicas.
- Justificación técnica de soluciones estructurales frente a eventos antrópicos (emprendimientos de ripieras dentro de la cuenca y cauce del arroyo).

4.2.5. Simular escenarios de crecida y escurrimiento concentrado

- Aplicación de modelos hidrodinámicos (ej. HEC-RAS) en régimen permanente o impermanente.
- Análisis de comportamiento del cauce y zonas de inundación ante distintos eventos.

4.2.6. Definir caudales de diseño y tiempos de respuesta

- Estimación de caudales máximos esperables según TR definido.
- Evaluación de tiempos de concentración y respuesta ante eventos críticos.

4.3.Impacto de Eventos Antrópicos sobre la Dinámica Fluvial

La implantación de **emprendimientos ripieros** dentro de la cuenca y el cauce del arroyo ha generado **nuevos procesos erosivos y fenómenos de socavación** que anteriormente no se manifestaban en forma significativa. Estos eventos antrópicos modifican la dinámica natural del sistema hídrico, afectando su estabilidad y capacidad de conducción.

Efectos observados:

- **Alteración del régimen hidráulico**: cambios en la velocidad, tirante y patrón de escurrimiento.
- **Incremento de erosión general y localizada**: especialmente en zonas de estribos, pilas y márgenes vulnerables.
- **Modificación del lecho y las riberas**: por extracción de áridos, tránsito de maquinaria pesada y pérdida de vegetación de ribera.
- **Disminución de la capacidad de amortiguación natural** ante eventos de creciente.
- **Aumento del riesgo estructural** en obras existentes (puentes, defensas, encauzamientos).

Recomendaciones técnicas:

- Realizar estudios hidráulicos específicos que simulen escenarios con y sin intervención ripiera.
- Evaluar la necesidad de obras de protección y estabilización del cauce.
- Integrar criterios de **gestión integrada de cuencas** y ordenamiento territorial para limitar nuevas implantaciones en zonas críticas.
- Solicitar la intervención de la **Autoridad Hidráulica provincial** para la evaluación y control de estos emprendimientos.

CAPITULO V - Desarrollo del trabajo

5.1.1. Introducción

La presente verificación hidrológica e hidráulica se centra en la cuenca del arroyo Las Avispas, con el objetivo de caracterizar su comportamiento ante eventos de lluvia y evaluar los efectos erosivos derivados de la intervención antrópica, particularmente por la presencia de ripieras dentro del cauce y su área de influencia.

En una primera instancia, se identificó el punto de descarga de la cuenca como referencia hidrológica principal (ver figura 1). A partir de este punto, se procedió a la delimitación de la cuenca utilizando el software libre **QGIS**, que permitió integrar datos topográficos, hidrológicos y geomorfológicos mediante herramientas de procesamiento espacial. Esta etapa incluyó el cálculo de la red de drenaje y la asignación de órdenes de ramificación según los criterios de **Strahler y Horton**, fundamentales para la segmentación hidrológica y la estimación del tiempo de concentración.

Posteriormente, se desarrollaron modelos hidrológicos en **HEC-HMS**, incorporando parámetros como el **Curve Number (CN)**, la **abstracción inicial (Ia)** y las curvas **IDF** ajustadas mediante la instalación de pluviómetros y pluviógrafos en puntos estratégicos de la cuenca. En paralelo, se implementó la modelación hidráulica en **HEC-RAS**, tanto en modalidad unidimensional como bidimensional, utilizando geometría derivada de relevamientos batimétricos y topografía de alta resolución. Se aplicaron coeficientes de **Manning diferenciados por tipo de suelo**, según la clasificación USCS, y se evaluaron condiciones de borde, velocidades críticas y tirantes en tramos vulnerables.

Finalmente, se incorporó el método empírico de **Lischtvan-Lebediev** para el cálculo de la **velocidad crítica de arrastre (Um)**, considerando la granulometría del lecho (D50, D90), la pendiente del cauce y el tirante hidráulico. Este enfoque permitió identificar zonas de riesgo de **erosión generalizada y local**, especialmente en sectores modificados por la actividad extractiva de áridos.



Figura 1. Ubicación de la estructura de puente sobre A° Las Avispas (Latitud: 33° 4'41.23"S; Longitud: 69° 2'19.05"O).

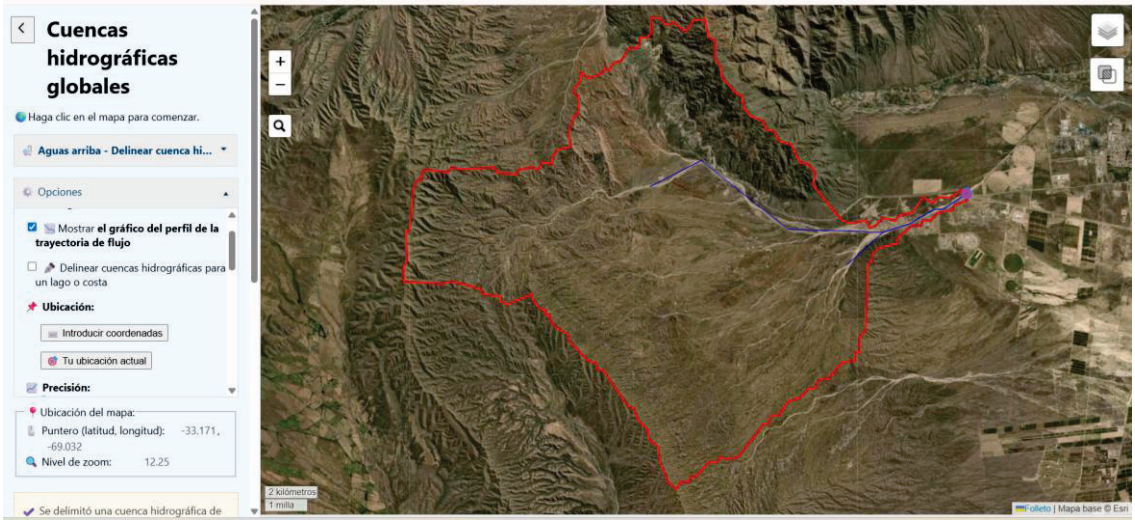


Figura 2. Fuente: https://mghydro.com/watersheds/

5.1.2. Obtención de modelo digital de elevación (DEM)

Luego se procedió a la descarga de imágenes DEM de la página oficial del IGN, las cuales fueron volcadas al software con su correspondiente conversión sistema de referencia y coordenadas correspondiente.

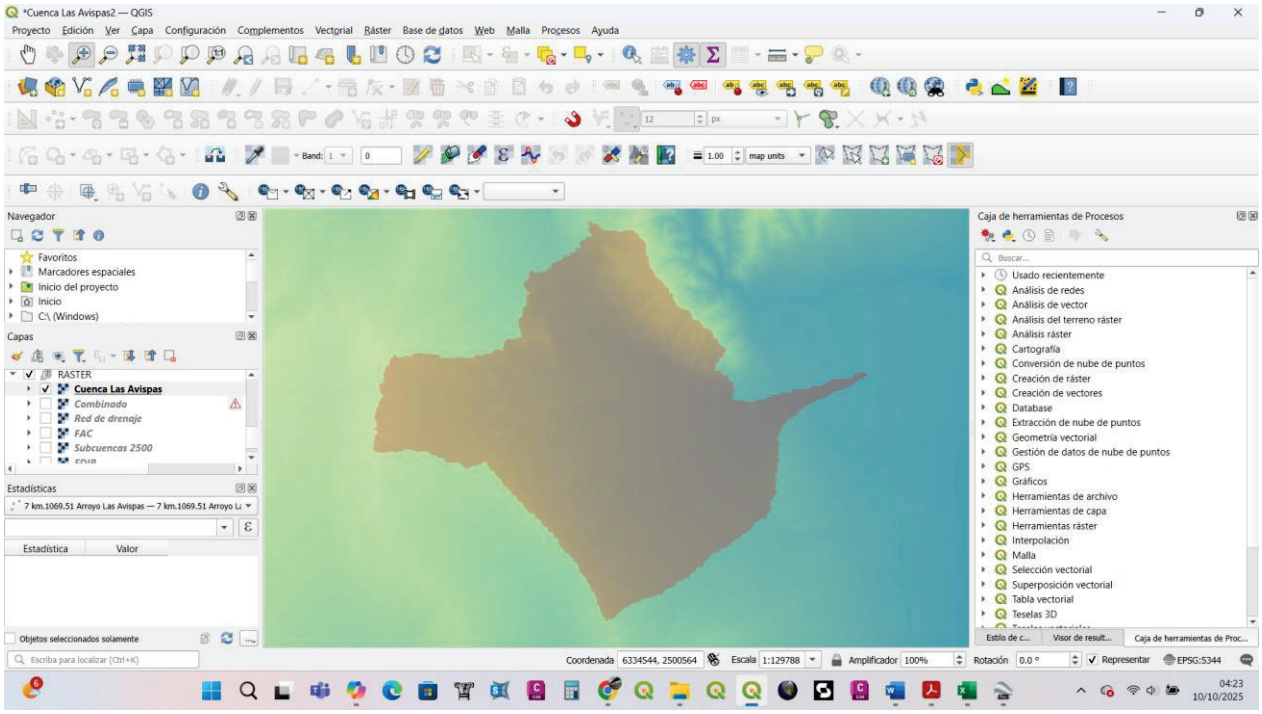


Figura 3. Delimitación de la cuenca Las Avispas.

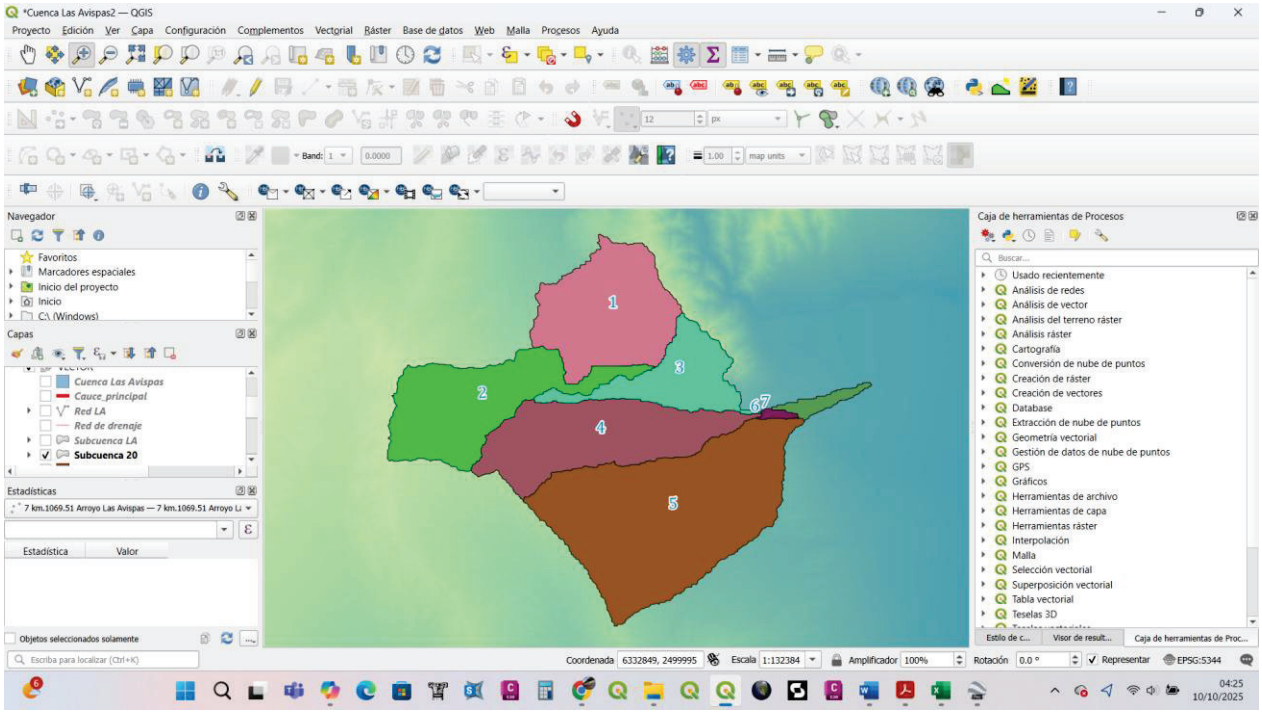


Figura 4. Delimitación de las subcuencas con el modelo matemático de QGis (versión 3.34.7), mediante la aplicación de los complementos que posee el software.

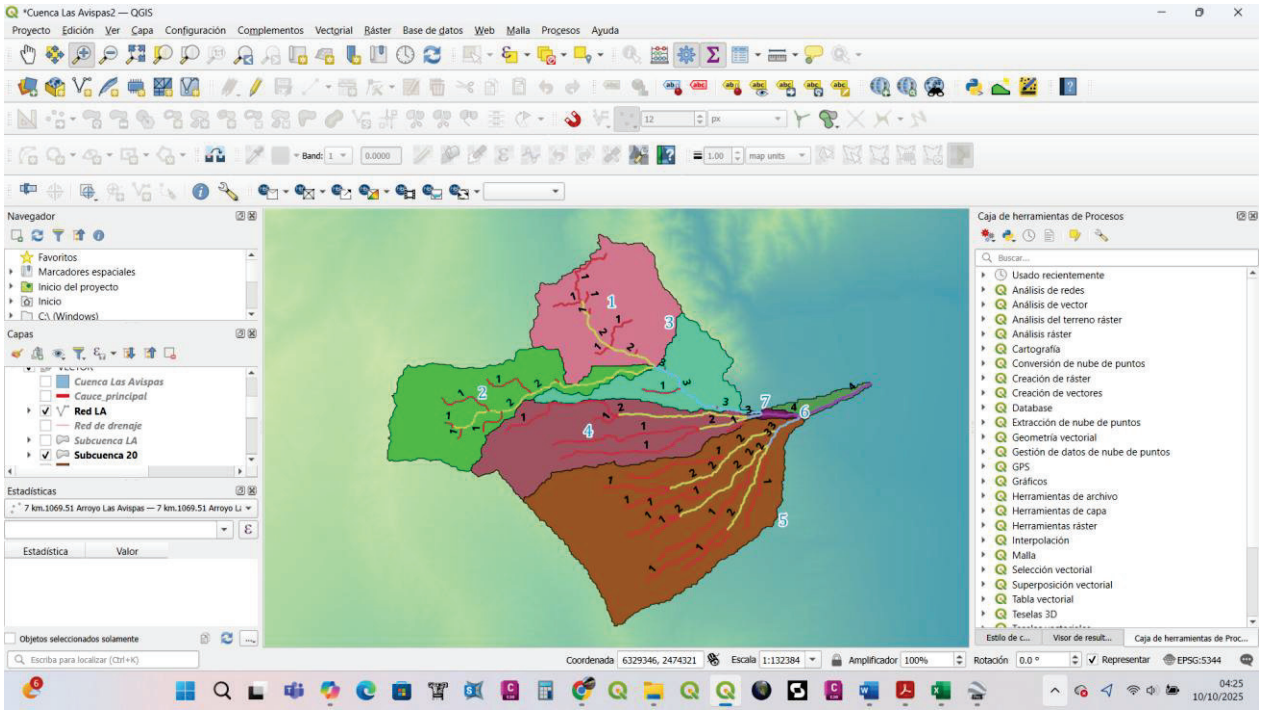


Figura 5. Cálculo de la red de drenaje de cada subcuenca (orden de Strahler y Horton).

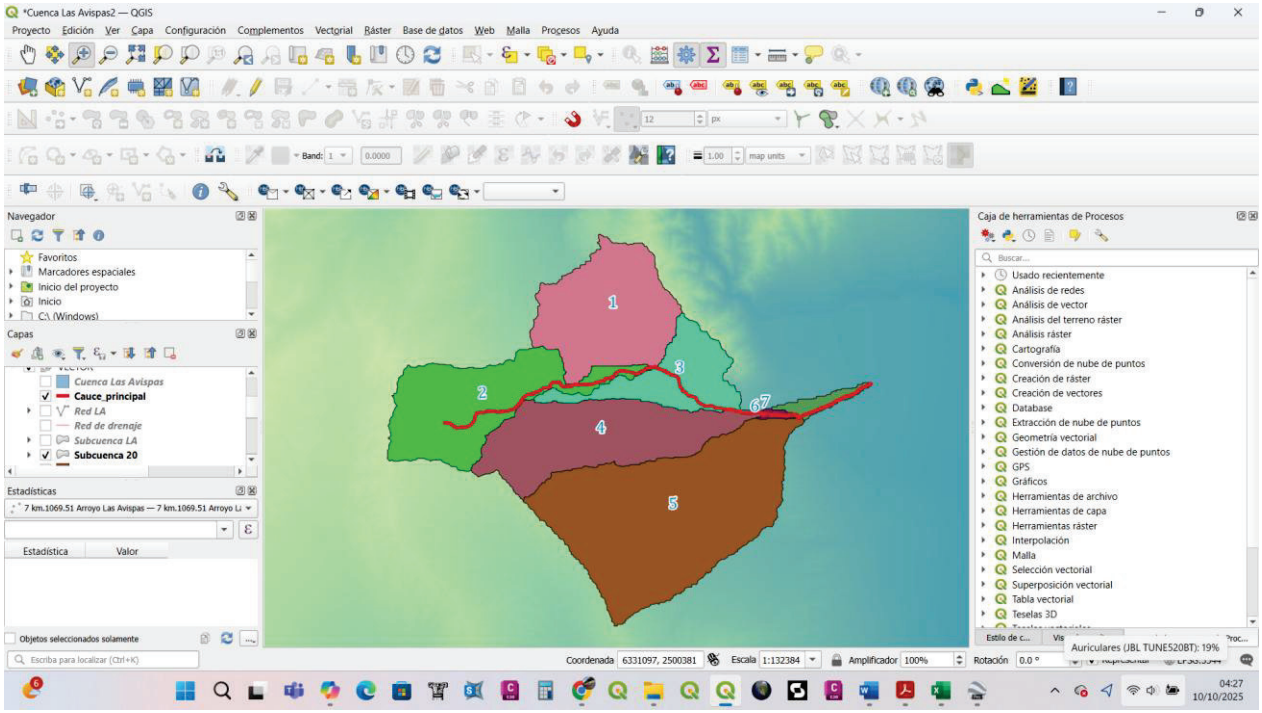


Figura 6. Calculo el cauce principal de la cuenca A° Las Avispas.

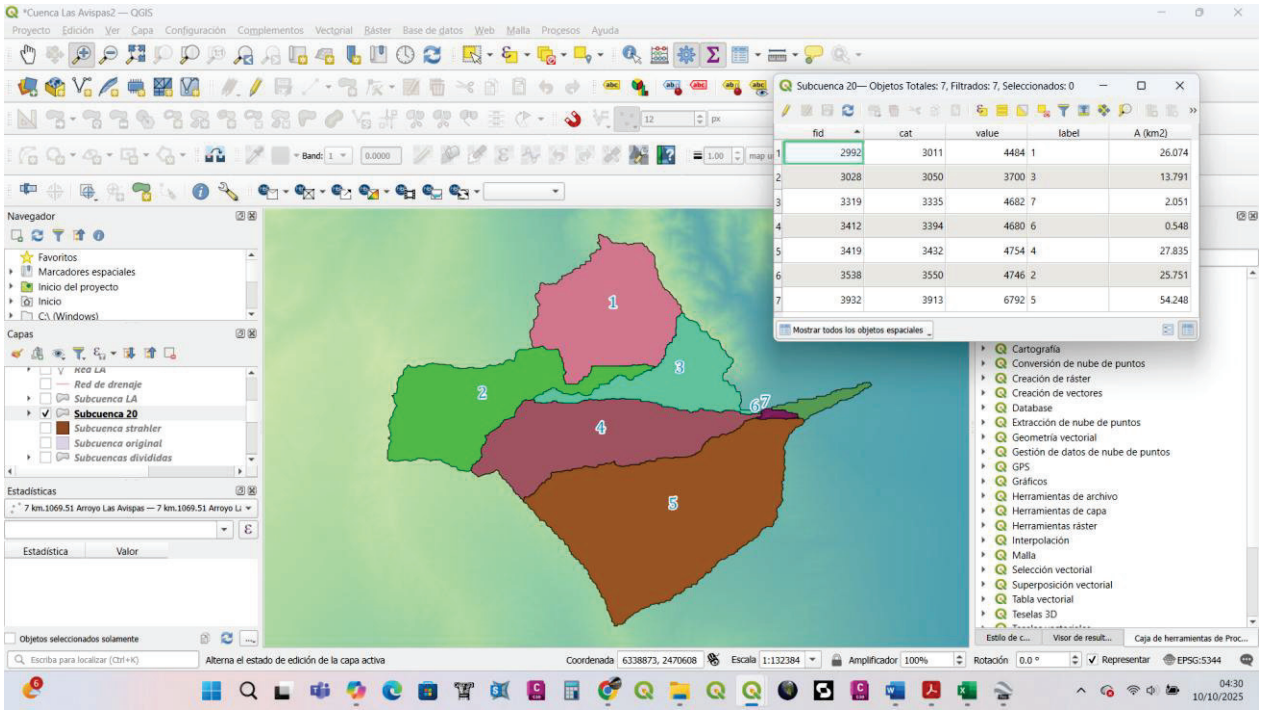


Figura 7. De dicho procesamiento se extrajeron datos de las tablas de atributos de archivo vectorial del software.

A continuación, se muestra un resumen de todos los datos procesados a efectos de obtener los siguientes parámetros hidrológicos de la cuenca:

Sucuenca	A (km2)
1	26,074
2	25,751
3	13,791
4	27,835
5	54,248
6	0,548
7	2,051
	150,298

Tabla 2. Áreas de las subcuencas extraídas de QGis.

AREA (km²)	P (km)
150	75

Tabla 3. Áreas de la cuenca extraídas de QGis.

5.1.3. Descripción de Tabla – Orden de Strahler y Parámetros de Horton:

La tabla presenta un análisis jerárquico de la red de drenaje de una cuenca, estructurado según el **orden de Strahler (U)**, desde N1 (primer orden) hasta N4 (cuarto orden). Para

cada orden se detallan parámetros morfométricos clave que permiten evaluar la organización, eficiencia y comportamiento hidrológico del sistema fluvial.

Parámetros incluidos:

- **Nº de Tramos (Nu):** cantidad de segmentos fluviales por orden.
- **Longitud Total (L):** suma de las longitudes de todos los cauces por orden (km).
- **Longitud Promedio (L_u):** promedio de longitud por tramo (km).
- **Área Total (A):** superficie drenada por cada orden (km^2).
- **Área Media (A_u):** promedio de área por tramo (km^2).

Ratios de Horton:

- **Relación de Bifurcación (RB):**
  - ✓ Calculada como el cociente entre el número de tramos de un orden y el siguiente.
  - ✓ Indica la ramificación de la red: valores altos sugieren una red más dispersa.
- **Relación de Longitud (RL):**
  - ✓ Cociente entre la longitud promedio de un orden y la del orden anterior.
  - ✓ Refleja el crecimiento longitudinal de los cauces.
- **Relación de Área (RS):**
- Cociente entre el área media de un orden y la del orden anterior.
- Mide la expansión superficial de la cuenca por orden.

Observaciones clave:

- El **orden N1** presenta la mayor cantidad de tramos (33), con longitudes cortas y áreas pequeñas, típico de cauces de cabecera.
- A medida que aumenta el orden (N2 a N4), disminuye el número de tramos pero aumentan las longitudes y áreas medias, reflejando la jerarquización natural del sistema.
- Los valores de **RB, RL y RS** permiten evaluar la regularidad geométrica de la red y su grado de madurez hidrológica.
- El valor total de **RB promedio (7.89)** sugiere una red con alta ramificación, mientras que **RL (8.88)** y **RS (12.52)** indican una progresiva expansión longitudinal y superficial.

ORDEN (U)	N° TRAMOS (Nu)	LONG. CAUCES (km)	LONG. PROMEDIO (km)	AREA (km2)	AREA MEDIA (km2)	RELACIÓN DE BIFURCACIÓN (RB)	RELACIÓN DE LONGITUD (RL)	RELACIÓN DE ÁREAS (RA)
1	33	44,23	1,34	29,00	109,46	2,36	1,96	4,23
2	14	9,58	0,68	25,00	25,89	2,33	6,85	2,01
3	6	0,60	0,10	7,00	12,90	3,00	0,05	6,29
4	2	3,75	1,87	1,00	2,05			
TOTAL	55	58,16		62,00	150,30	7,69	8,86	12,52

$N_U = (R_B)^{K-U}$		$L_U = L_1 . R_L{}^{U-1}$		$A_U = A_1 . R_A{}^{U-1}$	
N1	454,84	**L1**	1,34	**A1**	109,46
N2	59,14	**L2**	6,06	**A2**	324,29
N3	7,69	**L3**	7,84	**A3**	2023,09
N4	1,00	**L4**	1301,03	**A4**	4028,60

Tabla 4. Datos morfométricos de la cuenca.

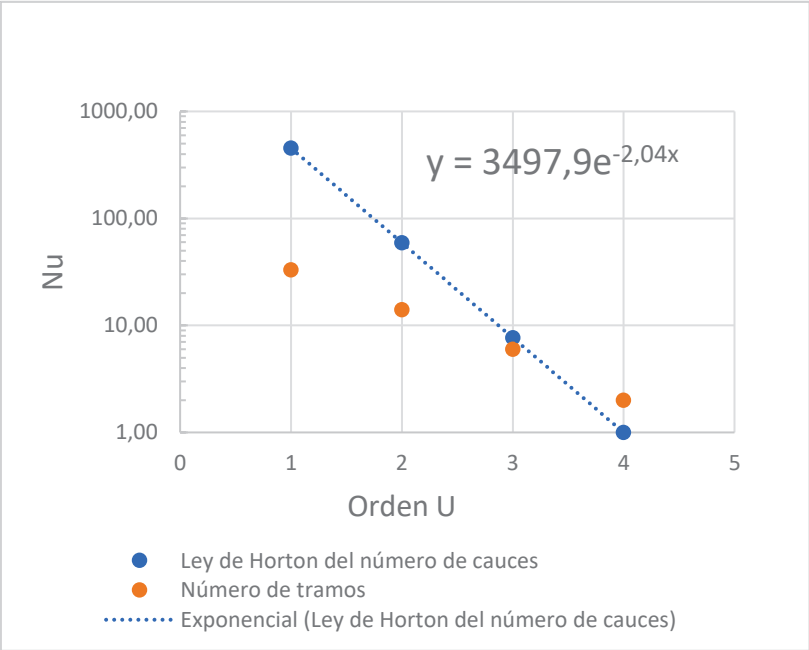


Figura 8. Ley de Horton del número de cauces.

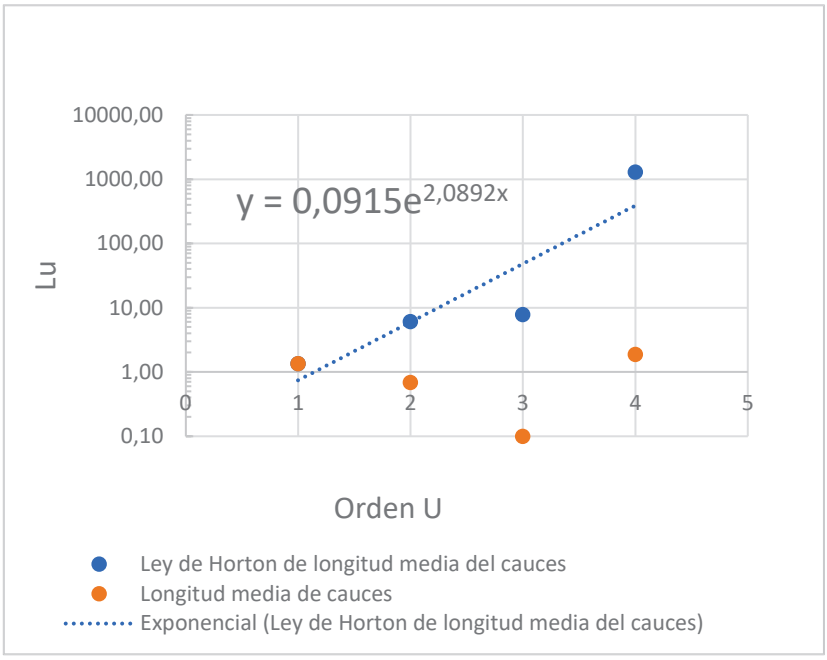


Figura 9. Ley de Horton de longitud media del cauce.

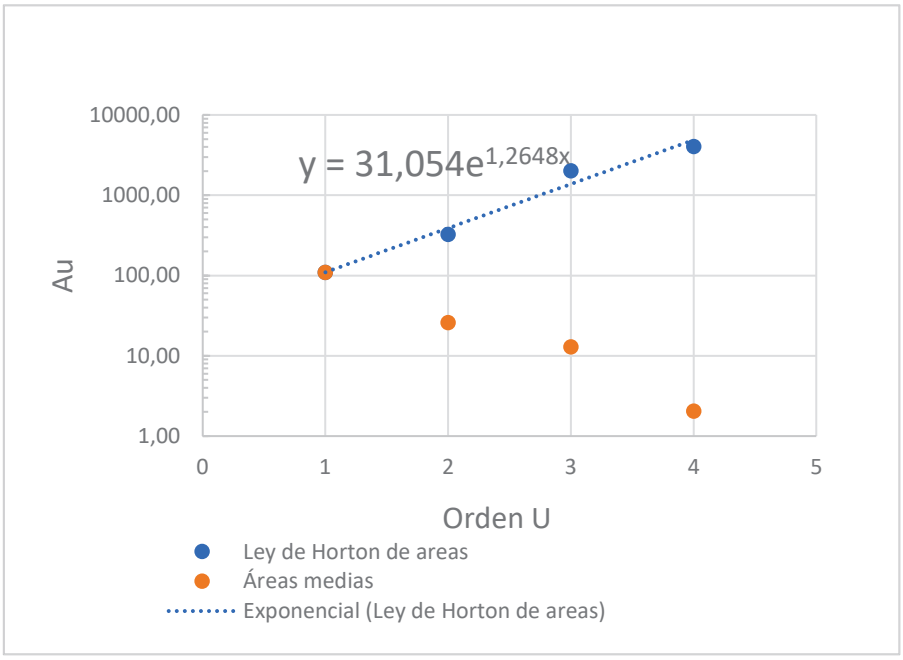


Figura 10. Ley de Horton de áreas.

PARAMETROS MORFOMETRICOS DE LA CUENCA:			
Densidad de drenaje:		**Valor**	
Dd=Lt/Ac	0,94	BAJO	
Factor de forma:			
F=Ac/Lmax²	0,03	CUENCA ALARGADA	
Circularidad:			
C=(4.pi.Ac)/P²	0,14		
Elongación:			
E=raiz(4.Ac/pi)/Lmáx	0,20		
Lemniscata:			
K=pi()*Lmáx/4.Ac	0,57		

Tabla 5. Parámetros morfométricos de la cuenca.

5.1.4. Parámetros de Forma de la Cuenca:

Los valores obtenidos para **circularidad (C = 0.14)**, **elongación (E = 0.28)** y **lemniscata (K = 0.57)** indican que la cuenca analizada presenta una **morfología alargada y poco circular**, lo cual tiene implicancias directas en su comportamiento hidrológico:

Circularidad (C = 0.14)

- Valor bajo, muy inferior al ideal de 1 (círculo perfecto).
- Indica que la cuenca tiene forma **irregular o alargada**, lo que puede generar **tiempos de concentración más largos** y una **respuesta más atenuada** ante eventos de precipitación.

Elongación (E = 0.28)

- Valor bajo, lo que confirma una **cuenca alargada**.
- Este tipo de geometría suele estar asociada a **menor riesgo de inundación súbita**, pero puede presentar **escurrimientos más prolongados**.

Lemniscata (K = 0.57)

- Valor intermedio, que complementa la interpretación anterior.

- Refleja una **eficiencia moderada en el escurrimiento**, con trayectorias más extendidas y menor concentración de caudales en corto tiempo.

Implicancias técnicas:

- La forma alargada de la cuenca sugiere que los **eventos extremos pueden distribuirse en el tiempo**, reduciendo el pico de caudal, pero prolongando la duración del evento.
- Es recomendable considerar esta morfología en la **modelación hidrológica**, especialmente al definir **tiempos de respuesta** y **caudales de diseño**.
- Puede influir en la ubicación y diseño de obras de control, como **reservorios, encauzamientos o estructuras de disipación**.

5.1.5. Interpretación de la Curva Hipsométrica – A° Las Avispas

La curva hipsométrica relaciona el **porcentaje de área acumulada** de la cuenca con el **porcentaje de altitud (figura 9)**. Permite visualizar cómo se distribuye el relieve y qué proporción del área se encuentra en distintos rangos altitudinales.

Forma de la curva observada:

- **Inicio suave y pendiente baja**: indica que gran parte del área se encuentra en **altitudes bajas**, con pendientes suaves.
- **Pendiente creciente hacia el final**: sugiere que una menor proporción del área se concentra en **altitudes altas**, posiblemente con pendientes más abruptas o sectores escarpados.

Implicancias geomorfológicas:

- La forma de la curva sugiere una **cuenca madura**, con procesos erosivos avanzados que han suavizado el relieve en las zonas bajas.
- La acumulación de área en altitudes bajas puede favorecer el **escurrimiento concentrado**, especialmente en eventos extremos.
- Sectores altos, aunque menos extensos, pueden actuar como zonas de generación de caudal rápido y aportar energía al sistema fluvial.

Aplicaciones prácticas:

- Útil para definir zonas de **conservación de suelo**, **ubicación de obras de control** y **modelación hidrológica**.
- Permite estimar el **índice hipsométrico**, que puede correlacionarse con el grado de erosión y la vulnerabilidad del terreno.

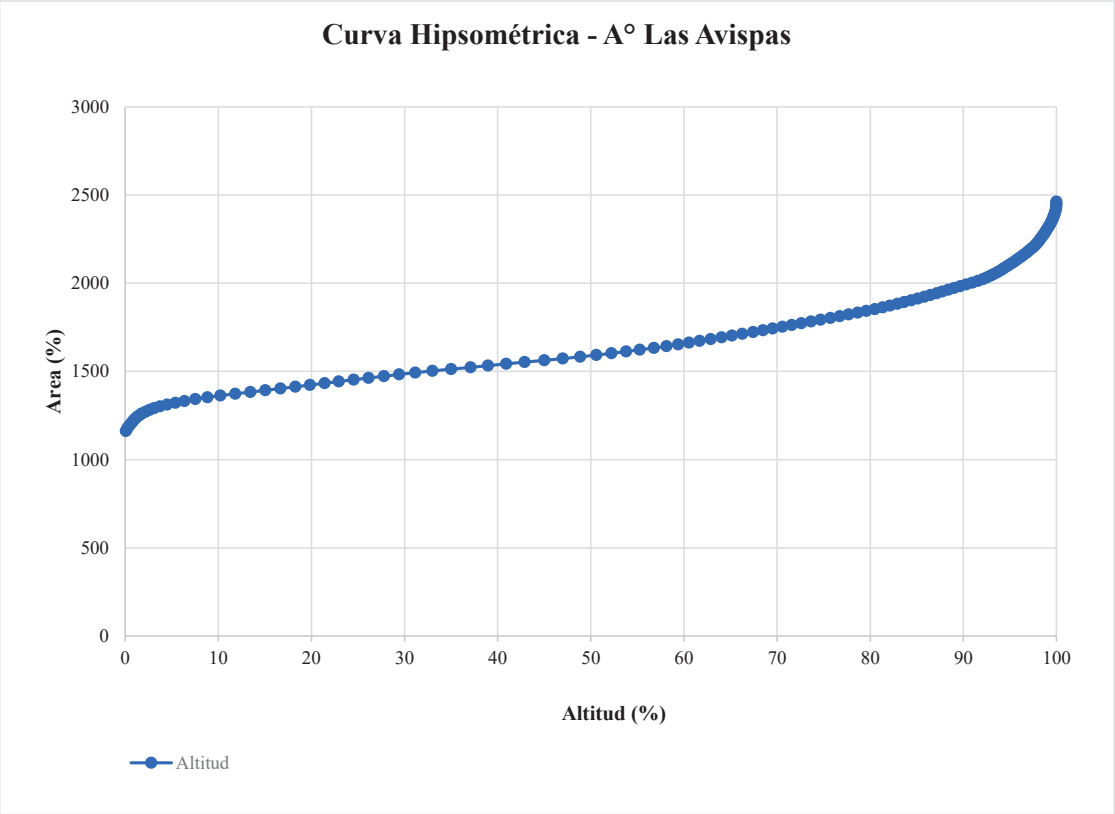


Figura 11. Curva hipsométrica.

Vinculación entre Índice Hipsométrico y Parámetros Morfométricos:

El **índice hipsométrico (IH)** representa la relación entre el volumen actual del relieve y el volumen total que tendría si la cuenca fuera plana. Se calcula como:

$$IH = \frac{(H_{medio} - H_{mín})}{(H_{máx} - H_{mín})}$$

Donde:

- H medio: altitud media
- H mín: altitud mínima
- H máx: altitud máxima

Interpretación del IH:

- **IH > 0.6** → cuenca joven, con fuerte pendiente y alta energía erosiva.
- **IH ≈ 0.35–0.6** → cuenca madura, con equilibrio entre erosión y sedimentación.
- **IH < 0.35** → cuenca vieja, con relieve suavizado y baja energía erosiva.

Parámetro	Vinculación con IH
Densidad de drenaje (Dd)	Cuencas con IH alto suelen tener mayor Dd por pendientes pronunciadas y escurrimiento concentrado.
Factor de forma (F)	Cuencas alargadas (F bajo) tienden a tener IH intermedio o bajo, con menor concentración de caudal.
Circularidad (C)	Valores bajos de C se asocian a IH bajos, indicando cuencas erosionadas y menos eficientes hidráulicamente.
Elongación (E)	Cuencas con alta elongación presentan IH más bajos, reflejando mayor madurez geomorfológica.
Lemniscata (K)	Valores intermedios de K se correlacionan con IH medios, indicando eficiencia moderada en el escurrimiento.

Tabla 6. Relación con Parámetros Morfométricos.

Conclusión técnica

La cuenca del arroyo Las Avispas, con parámetros morfométricos que indican **forma alargada, baja circularidad y elongación**, sugiere un **índice hipsométrico intermedio a bajo**, compatible con una **cuenca madura**, donde los procesos erosivos han modelado el relieve y distribuido el escurrimiento de forma más homogénea. Esta interpretación es clave para definir estrategias de manejo, ubicación de obras hidráulicas y modelación de eventos extremos.

5.1.6. Hidrograma de crecida:

Método de abstracciones:

Estos métodos tienen la finalidad de separar la parte de la precipitación que escurre (P efectiva) de la que se "pierde" por infiltración.
El método empleado en el presente estudio es el método del SCS (Servicio de Conservación de Suelos). Este método plantea la relación entre volumen escurrido, Q; volumen de precipitación, P; volumen de retención, F=P-Q; abstracción inicial, Ia (una parte de P que se presenta al inicio de la tormenta, antes de producirse el escurrimiento) y la retención máxima potencial, S:

$$\frac{F}{S} = \frac{Q}{P - I_a}$$

Para el caso en análisis se encontraron los CN para cada subcuenca siguiendo dos métodos distintos, teniendo en cuenta la humedad antecedente II (normal):

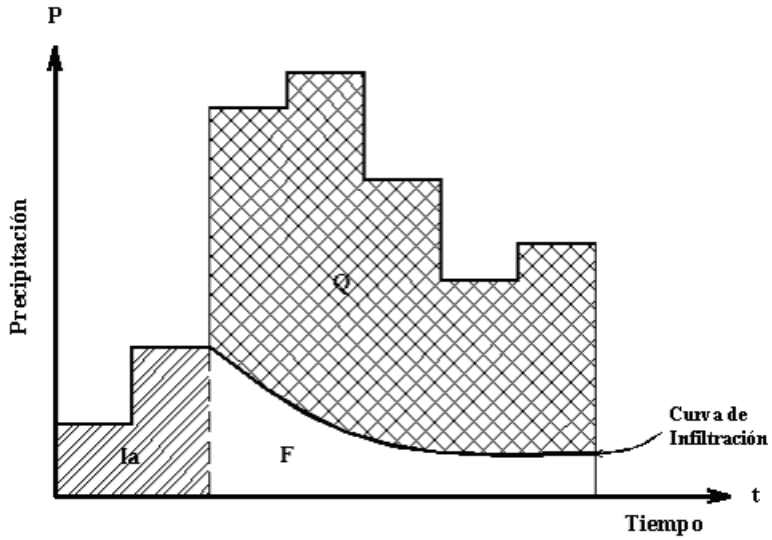


Figura 12. Método de abstracciones del SCS - Fuente: Extracto de publicación de UDLAP (Universidad de las Américas Puebla, Méjico).

La abstracción inicial está en función de características y usos del suelo. De un análisis empírico realizado por el SCS encontró la siguiente relación:

$$Ia = 0{,}2\ S$$

Luego, se puede reescribir:

$$Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S}$$

Para la obtención del valor de S, se estableció la siguiente relación empírica:

$$S = \frac{1000}{CN} - 10$$

Donde CN es el número de curva escurrimiento, en función del uso del suelo, tipo de suelo y condiciones de humedad antecedente (AMC).

Tipos de suelo:

- Grupo A: Suelos con baja tasa de escorrentía. Abundante arena bien drenada, gravas, sobre depresiones.
- Grupo B: Suelos con moderada tasa de escorrentía. Suelos moderadamente profundos, de moderadamente a bien drenados y suelos con texturas moderadamente finas a moderadamente gruesas.
- Grupo C: Suelos con moderadamente alta tasa de escorrentía. Suelos con texturas finas o con alguna capa en la superficie que dificulte la infiltración.

- Grupo D: Suelos con alta tasa de escorrentía. Suelos arcillosos con gran potencial de hinchamiento, suelos con una lámina de agua permanente o con arcilla en la superficie. También suelos asentados en superficies impermeables.

Condición de humedad antecedente:

Grupo AMC	Lluvia Antecedente de 5 dias [mm]	
	Periodo de Seca	Periodo Humedo
I	< 12.7	<35.6
II	12.5 a 27.9	35.6 a 53.3
III	> 27.9	> 53.3

Tabla 7. Condición de humedad.

La tabla con valores de CN corresponde a la condición de AMCII. Para otros casos, se debe modificar el CN obtenido ingresándolo a la siguiente relación:

$$CN(I) = \frac{4{,}2CN(II)}{10 - 0{,}058CN(II)}$$

$$CN(III) = \frac{23CN(II)}{10 + 0{,}13CN(II)}$$

Números de curva de escorrentía para usos selectos de tierra agrícola, suburbana y urbana (condiciones antecedentes de humedad II, $I_a = 0.2S$)

Descripción del uso de la tierra		Grupo hidrológico del suelo			
		A	B	C	D
Tierra cultivada[1]:	sin tratamientos de conservación	72	81	88	91
	con tratamientos de conservación	62	71	78	81
Pastizales:	condiciones pobres	68	79	86	89
	condiciones óptimas	39	61	74	80
Vegas de ríos: condiciones óptimas		30	58	71	78
Bosques:	troncos delgados, cubierta pobre, sin hierbas,	45	66	77	83
	cubierta buena[2]	25	55	70	77
Áreas abiertas, césped, parques, campos de golf, cementerios, etc.					
óptimas condiciones: cubierta de pasto en el 75% o más		39	61	74	80
condiciones aceptables: cubierta de pasto en el 50 al 75%		49	69	79	84
Áreas comerciales de negocios (85% impermeables)		89	92	94	95
Distritos industriales (72% impermeables)		81	88	91	93
Residencial[3]:					
Tamaño promedio del lote	Porcentaje promedio impermeable[4]				
1/8 acre o menos	65	77	85	90	92
1/4 acre	38	61	75	83	87
1/3 acre	30	57	72	81	86
1/2 acre	25	54	70	80	85
1 acre	20	51	68	79	84
Parqueaderos pavimentados, techos, accesos, etc.[5]		98	98	98	98
Calles y carreteras:					
Pavimentados con cunetas y alcantarillados[5]		98	98	98	98
grava		76	85	89	91
tierra		72	82	87	89

1 Para una descripción más detallada de los números de curva para usos agrícolas de la tierra, remitirse a Soil Conservation Service, 1972, Cap. 9

2 Una buena cubierta está protegida del pastizaje, y los desechos del retiro de la cubierta del suelo.

3 Los números de curva se calculan suponiendo que la escorrentía desde las casas y de los accesos se dirige hacia la calle, con un mínimo del agua del techo dirigida hacia el césped donde puede ocurrir infiltración adicional.

4 Las áreas permeables restantes (césped) se consideran como pastizales en buena condición para estos números de curva.

5 En algunos países con climas más cálidos se puede utilizar 95 como número de curva.

Tabla 8. Referencia número de curva. Método Ven Te Chow.



Figura 13. Mapa de cobertura vegetal para clasificación según método del número de curva de Ven Te Chow.

A partir de la observación satelital, se puede realizar una clasificación preliminar del **uso del suelo y cobertura vegetal** por subcuenca, lo que permite asignar valores de **Curve Number (CN)** bajo condición **AMC II**. Aquí va una síntesis técnica basada en lo que se observa:

Clasificación preliminar según cobertura vegetal observada

Conclusiones por Subcuenca – Clasificación Preliminar AMC II

Subcuenca 1 – Residencial disperso con vegetación media

La subcuenca 1 presenta un uso mixto, con sectores residenciales dispersos y cobertura vegetal intermedia. La presencia de vegetación natural en estado medio permite cierta infiltración, aunque la urbanización introduce superficies impermeables. Se asigna un CN de 77, correspondiente a suelo tipo D, reflejando una escorrentía moderada-alta.

Subcuenca 2 – Residencial compacto con infraestructura vial

Esta subcuenca muestra una mayor densidad de ocupación urbana, con caminos y estructuras que reducen significativamente la infiltración. La cobertura vegetal es escasa y fragmentada. Se asigna un CN de 75 para suelo D, indicando alta escorrentía y baja retención superficial.

Subcuenca 3 – Zona montañosa con vegetación escasa

La subcuenca 3 se caracteriza por relieve abrupto, vegetación muy limitada y exposición directa del suelo. La escorrentía superficial es dominante, con baja capacidad de retención. Se asigna un CN de 32 para suelo D, reflejando condiciones de alta vulnerabilidad erosiva y baja infiltración.

Subcuenca 4 – Pasturas y cultivos en terrazas

Esta subcuenca presenta un uso agrícola con pasturas y cultivos distribuidos en terrazas, lo que mejora la infiltración y reduce la velocidad de escurrimiento. La cobertura vegetal es buena, aunque el suelo sigue siendo del grupo D. Se asigna un CN de 77, con comportamiento hidrológico moderado.

Subcuenca 5 – Área agrícola con cobertura pobre

La subcuenca 5 muestra un uso intensivo agrícola, con cobertura vegetal degradada y compactación superficial. La escorrentía es elevada, especialmente en eventos intensos. Se asigna un CN de 79 para suelo D, reflejando baja capacidad de infiltración y alta generación de caudal superficial.

Subcuenca 6 – Zona montañosa con erosión superficial activa

Esta subcuenca presenta condiciones críticas: relieve escarpado, vegetación muy escasa y signos visibles de erosión superficial. La escorrentía es prácticamente total, con mínima retención. Se asigna un CN de 30 para suelo D, representando condiciones extremas de escurrimiento.

Subcuenca 7 – Camino pavimentado e infraestructura vial

La subcuenca 7 está dominada por superficies impermeables (pavimento, infraestructura vial), sin cobertura vegetal significativa. La escorrentía es inmediata y total. Se asigna un CN de 98 para suelo D, correspondiente a condiciones de máxima impermeabilidad.

Resultados integrados en la tabla:

Subcuenca	Uso del suelo	Grupo de suelo	CN (AMC II)	Área parcial (km²)	CN Final	S (mm)
1	Residencial disperso + vegetación media	D	77	26,074	75,8	2,99
2	Residencial compacto + caminos	D	75	25,751	73,8	3,33
3	Zona montañosa con vegetación escasa	D	32	13,791	64,9	21,25
4	Pasturas y cultivos en terrazas	D	77	27,835	76,1	2,99
5	Área agrícola con cobertura pobre	D	79	54,248	78,7	2,66
6	Zona montañosa con erosión superficial	D	30	0,548	65	23,33
7	Camino pavimentado + infraestructura vial	D	98	2,051	97,4	0,20

Tabla 9. Valores de CN según método del número de curva de Ven Te Chow.

5.1.7. Determinación del número de curva (CN) – Metodología QGis

Para la estimación del **Número de Curva (CN)**, parámetro fundamental en la modelación hidrológica mediante HEC-HMS, se empleó el software **QGIS** junto con complementos especializados y capas raster de CN previamente generadas o importadas (ver figuras 12 y 13). Esta metodología permite asignar valores de CN de forma espacialmente distribuida, considerando el uso del suelo, la cobertura vegetal y el tipo de suelo según la clasificación hidrológica del Servicio de Conservación de Suelos (SCS).

Se utilizó el complemento **Curve Number Generator**, que permite generar mapas de CN a partir de múltiples fuentes de datos, y se aplicó la herramienta de procesamiento denominada **"Estadísticas de zona" (ver figura 14)**, la cual calcula valores estadísticos (como la media) de una capa raster dentro de polígonos definidos por una capa vectorial. En este caso, se utilizó una capa de subcuencas como zonas de análisis, y el raster de CN como base de cálculo.

El resultado se visualiza en una **tabla de atributos** que contiene los valores de CN clasificados por subcuenca **(ver figura 15)**, permitiendo identificar variaciones espaciales y realizar ajustes en los parámetros hidrológicos del modelo. Esta información fue integrada posteriormente en el modelo HEC-HMS para mejorar la precisión en la estimación de escorrentía superficial.

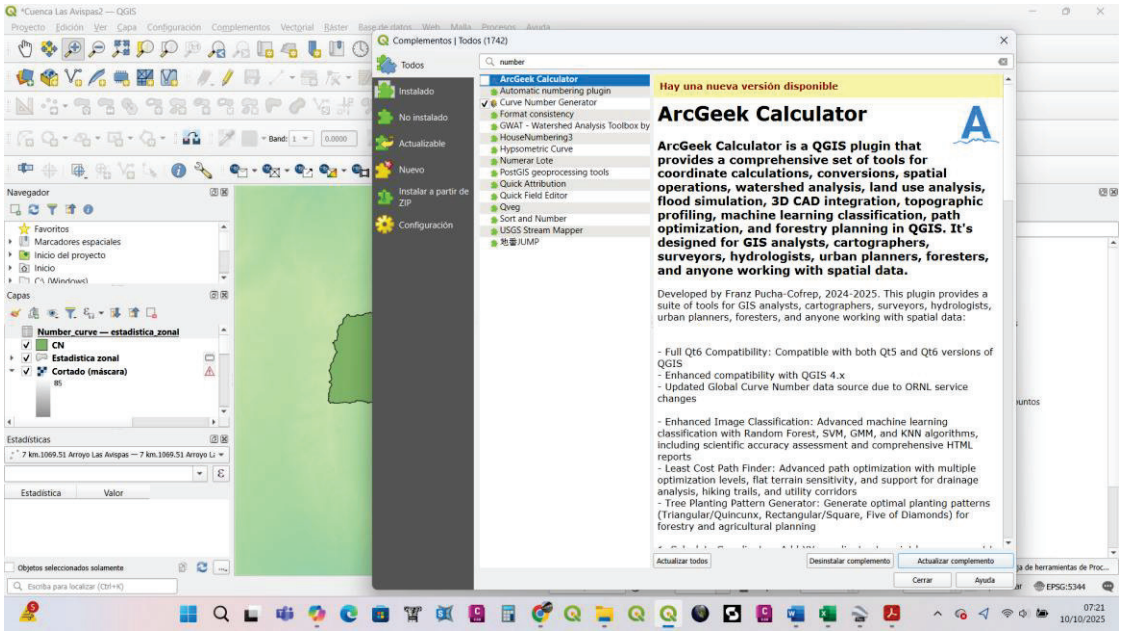


Figura 14. Complemento ArcGeek Calculator para determinación de CN.

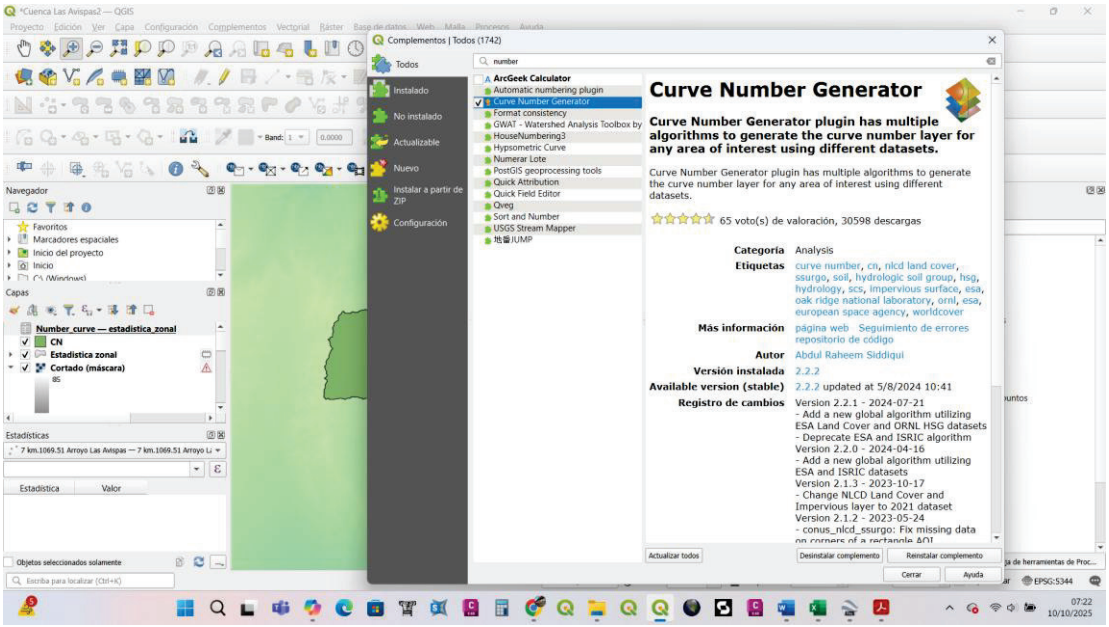


Figura 15. Complemento Curve Number Generator para determinación de CN.

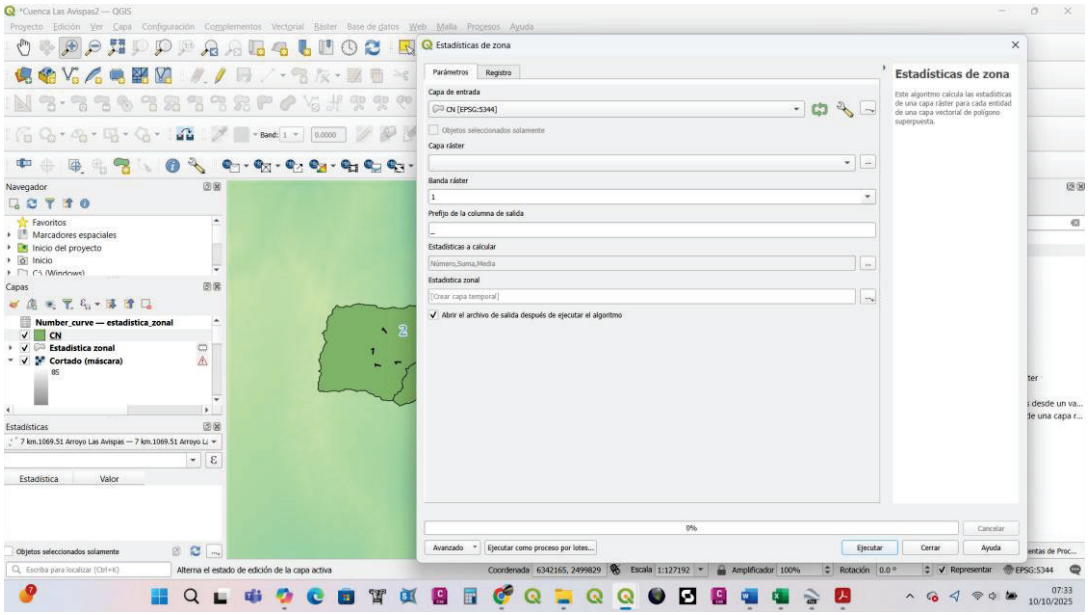


Figura 16. Luego se realizó la clasificación del raster y mediante el complemento "estadística de zona" se calculó cada CN para cada subcuenca.

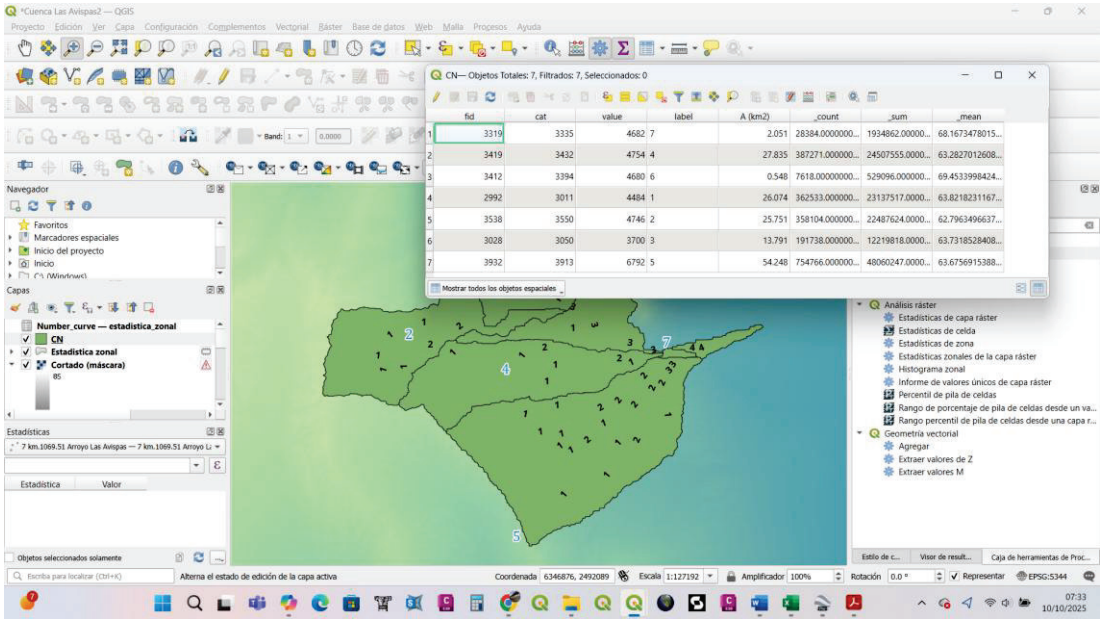


Figura 17. Tabla de atributos con valores clasificados de CN.

A continuación, se muestra la tabla de atributos de QGis con los valores de CN.

Sucuenca	A (km2)	L cauces (km)	CN	S =(25400/CN)-254	Ia = 0,2 x S (ABSTRACCION INICIAL)
1	26,074	8,519	63,82	143,98	28,80
2	25,751	11,090	62,80	150,48	30,10
3	13,791	5,871	63,73	144,54	28,91
4	27,835	12,651	63,28	147,37	29,47
5	54,248	10,313	63,68	144,90	28,98
6	0,548	1,797	69,45	111,71	22,34
7	2,051	3,720	68,17	118,61	23,72
	150,298				

Tabla 10. Atributos de la cuenca y subcuenca.

5.1.8. Datos meteorológicos:

Posteriormente, se incorporaron datos provenientes de la estación meteorológica de Cacheuta, ubicada a una distancia aproximada de 10,1 km respecto al área de estudio. Esta proximidad permite considerar sus registros como representativos para el análisis hidrológico local. La Figura 16 ilustra la ubicación relativa entre la estación y el sitio de interés.

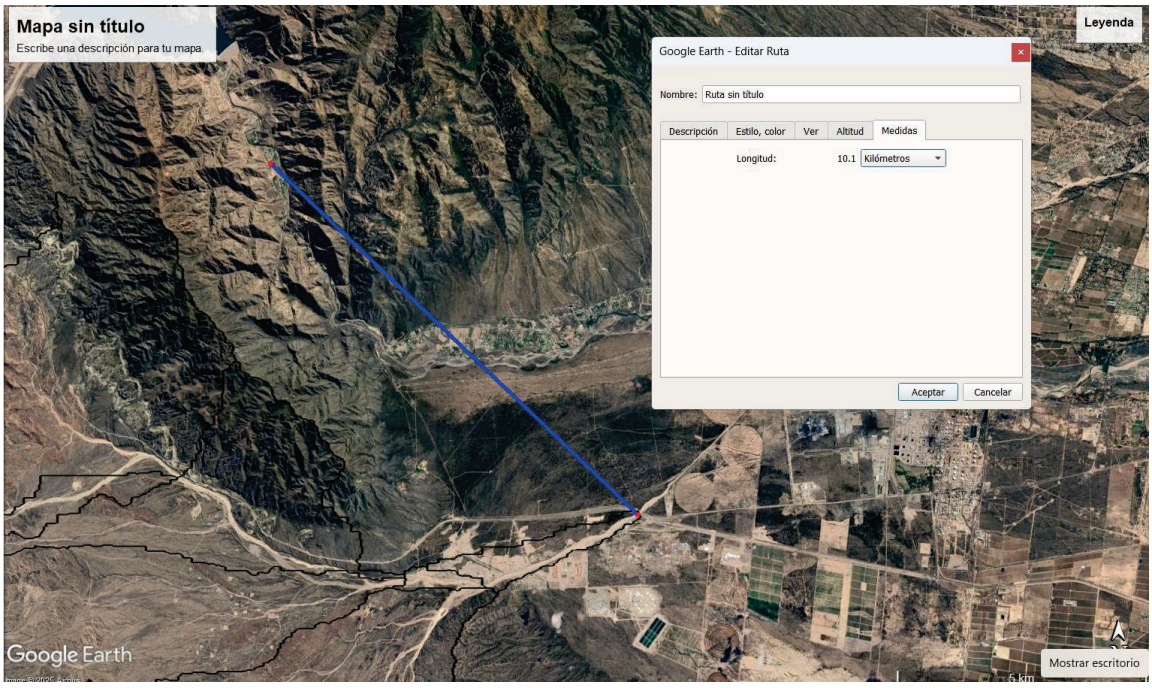


Figura 18. Distancia a la estación meteorología de Cacheuta.

5.1.9. Desagregación de Precipitación Máxima (Método Dick Peschke)

La tabla 11 presenta la aplicación del método de Dick Peschke para desagregar valores de precipitación máxima diaria (P MAX. 24 Hrs) en intervalos horarios menores, con el objetivo de modelar eventos de tormenta de corta duración. Este procedimiento es

especialmente útil en estudios hidrológicos donde el tiempo de concentración de las subcuencas es inferior a 2.5 horas.

Estacion mas cercana							
Se desagrego en 2,5 hs la duracion de tormenta, mayor al Tiempo de concentracion mayor de las subcuencas							
		FORMULA PARA DESAGREGAR DE Dick Peschke					
P MAX. 24 HS		0,25	0,5	1	1,5	2	2,5
1983	8,600	2,747	3,267	3,885	4,300	4,621	4,886
1984	315,400	100,761	119,826	142,498	157,700	169,460	179,182
1985	337,200	107,726	128,108	152,347	168,600	181,172	191,567
1986	148,600	47,473	56,456	67,138	74,300	79,841	84,421
1987	40,400	12,907	15,349	18,253	20,200	21,706	22,952
1988	84,000	26,836	31,913	37,951	42,000	45,132	47,721
1989	96,200	30,733	36,548	43,463	48,100	51,687	54,652
1990	321,800	102,806	122,258	145,390	160,900	172,898	182,818
1991	319,000	101,911	121,194	144,125	159,500	171,394	181,227
1992	144,400	46,132	54,860	65,240	72,200	77,584	82,035
1993	204,000	65,172	77,503	92,167	102,000	109,606	115,894
1994	112,500	35,941	42,741	50,828	56,250	60,445	63,912
1995	111,100	35,493	42,209	50,195	55,550	59,692	63,117
1996	97,000	30,989	36,852	43,825	48,500	52,117	55,107
1997	172,300	55,045	65,460	77,845	86,150	92,574	97,885
1998	262,400	83,829	99,690	118,553	131,200	140,984	149,072
1999	265,200	84,724	100,754	119,818	132,600	142,488	150,663
2000	163,700	52,297	62,193	73,960	81,850	87,954	93,000
2001	74,400	23,769	28,266	33,614	37,200	39,974	42,267
2002	90,500	28,912	34,383	40,888	45,250	48,624	51,414
2003	68,800	21,980	26,138	31,084	34,400	36,965	39,086
2004	243,200	77,695	92,396	109,878	121,600	130,668	138,164
2005	235,600	75,267	89,509	106,444	117,800	126,584	133,847
2006	152,500	48,719	57,937	68,900	76,250	81,936	86,637
2007	202,700	64,757	77,009	91,580	101,350	108,908	115,156
2008	295,600	94,436	112,304	133,552	147,800	158,821	167,933
2009	144,700	46,228	54,974	65,376	72,350	77,745	82,205
2010	121,800	38,912	46,274	55,029	60,900	65,441	69,196
2011	282,500	90,251	107,327	127,634	141,250	151,783	160,491
2012	214,000	68,367	81,302	96,685	107,000	114,979	121,575
2013	238,500	76,194	90,610	107,755	119,250	128,142	135,494
2014	244,300	78,047	92,814	110,375	122,150	131,259	138,789
2015	504,400	161,141	191,631	227,888	252,200	271,007	286,555
2016	340,700	108,844	129,438	153,929	170,350	183,053	193,555
2017	320,700	102,455	121,840	144,893	160,350	172,307	182,193
2018	472,000	150,791	179,321	213,250	236,000	253,599	268,148
2019	312,600	99,867	118,762	141,233	156,300	167,955	177,591
2020	171,100	54,662	65,004	77,303	85,550	91,929	97,204
2021	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
2022	232,000	74,117	88,141	104,818	116,000	124,650	131,801
2023	116,400	37,186	44,222	52,590	58,200	62,540	66,128
2024	44,000	14,057	16,716	19,879	22,000	23,641	24,997
2025	30,000	9,584	11,398	13,554	15,000	16,119	17,043

Tabla 11. Valores de precipitaciones.

5.1.10. Cálculo de Intensidades de Precipitación

La tabla 12 presenta la conversión de valores de precipitación máxima diaria (Pmax) en intensidades horarias para distintos intervalos de tiempo (0.25, 0.50, 1.00, 1.50, 2.00 y 2.50 horas), aplicando el método de desagregación de Dick Peschke. Este enfoque permite simular eventos de lluvia concentrada, fundamentales para el análisis de escorrentía, diseño hidráulico y evaluación de vulnerabilidad en subcuencas con tiempos de concentración reducidos.

Estructura de la tabla:

- Año: Serie temporal desde 1984 hasta 2025.
- Pmax: Precipitación máxima registrada en 24 horas (probablemente en mm).
- Columnas de 0.25 a 2.50 horas: Intensidades derivadas de la desagregación, expresadas como precipitación acumulada en cada intervalo.

Aplicación técnica:

Estas intensidades permiten:

- Calcular caudales pico mediante modelos como HEC-HMS o racional modificado.
- Evaluar la capacidad de infraestructura pluvial ante eventos extremos.
- Comparar la evolución de eventos intensos en función del cambio climático o variabilidad interanual.

Calculo de Intensidades							
Se obtuvieron los siguientes datos de Precipitaciones							
Año	Pmax	0,25	0,50	1,00	1,50	2,00	2,50
1983	8,60	2,75	3,27	3,89	4,30	4,62	4,89
1984	315,40	100,76	119,83	142,50	157,70	169,46	179,18
1985	337,20	107,73	128,11	152,35	168,60	181,17	191,57
1986	148,60	47,47	56,46	67,14	74,30	79,84	84,42
1987	40,40	12,91	15,35	18,25	20,20	21,71	22,95
1988	84,00	26,84	31,91	37,95	42,00	45,13	47,72
1989	96,20	30,73	36,55	43,46	48,10	51,69	54,65
1990	321,80	102,81	122,26	145,39	160,90	172,90	182,82
1991	319,00	101,91	121,19	144,12	159,50	171,39	181,23
1992	144,40	46,13	54,86	65,24	72,20	77,58	82,04
1993	204,00	65,17	77,50	92,17	102,00	109,61	115,89
1994	112,50	35,94	42,74	50,83	56,25	60,44	63,91
1995	111,10	35,49	42,21	50,20	55,55	59,69	63,12
1996	97,00	30,99	36,85	43,82	48,50	52,12	55,11
1997	172,30	55,04	65,46	77,85	86,15	92,57	97,89
1998	262,40	83,83	99,69	118,55	131,20	140,98	149,07
1999	265,20	84,72	100,75	119,82	132,60	142,49	150,66
2000	163,70	52,30	62,19	73,96	81,85	87,95	93,00
2001	74,40	23,77	28,27	33,61	37,20	39,97	42,27
2002	90,50	28,91	34,38	40,89	45,25	48,62	51,41
2003	68,80	21,98	26,14	31,08	34,40	36,97	39,09
2004	243,20	77,70	92,40	109,88	121,60	130,67	138,16
2005	235,60	75,27	89,51	106,44	117,80	126,58	133,85
2006	152,50	48,72	57,94	68,90	76,25	81,94	86,64
2007	202,70	64,76	77,01	91,58	101,35	108,91	115,16
2008	295,60	94,44	112,30	133,55	147,80	158,82	167,93
2009	144,70	46,23	54,97	65,38	72,35	77,75	82,21
2010	121,80	38,91	46,27	55,03	60,90	65,44	69,20
2011	282,50	90,25	107,33	127,63	141,25	151,78	160,49
2012	214,00	68,37	81,30	96,69	107,00	114,98	121,58
2013	238,50	76,19	90,61	107,75	119,25	128,14	135,49
2014	244,30	78,05	92,81	110,37	122,15	131,26	138,79
2015	504,40	161,14	191,63	227,89	252,20	271,01	286,55
2016	340,70	108,84	129,44	153,93	170,35	183,05	193,55
2017	320,70	102,45	121,84	144,89	160,35	172,31	182,19
2018	472,00	150,79	179,32	213,25	236,00	253,60	268,15
2019	312,60	99,87	118,76	141,23	156,30	167,96	177,59
2020	171,10	54,66	65,00	77,30	85,55	91,93	97,20
2021	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2022	232,00	74,12	88,14	104,82	116,00	124,65	131,80
2023	116,40	37,19	44,22	52,59	58,20	62,54	66,13
2024	44,00	14,06	16,72	19,88	22,00	23,64	25,00
2025	30,00	9,58	11,40	13,55	15,00	16,12	17,04

Tabla 12. Cálculo de las intensidades de precipitación.

5.1.11. Gráfico de precipitaciones máximas diarias por año hidrológico

La figura 17 muestra la evolución de las precipitaciones máximas diarias registradas anualmente, abarcando el período comprendido entre 1980 y 2030. El eje horizontal representa los años hidrológicos, mientras que el eje vertical indica los valores máximos de precipitación diaria en milímetros.

Observaciones destacadas:

- Se identifican picos significativos en los años 1990, 2005, 2015 y 2020, lo que sugiere eventos extremos de lluvia con posible impacto en escorrentía y erosión.
- También se observan descensos marcados en años como 1985, 2000 y 2025, que podrían estar asociados a períodos de menor actividad convectiva o condiciones climáticas más secas.
- La tendencia general evidencia una alta variabilidad interanual, lo cual refuerza la necesidad de considerar escenarios extremos en el diseño de infraestructura y en la calibración de modelos hidrológicos.

Aplicación técnica:

Este gráfico permite:

- Identificar años críticos para el análisis de eventos de diseño.
- Evaluar la representatividad de los datos utilizados en la desagregación de tormentas.
- Justificar la selección de valores extremos para simulaciones en HEC-HMS, HEC-RAS o modelos de erosión.

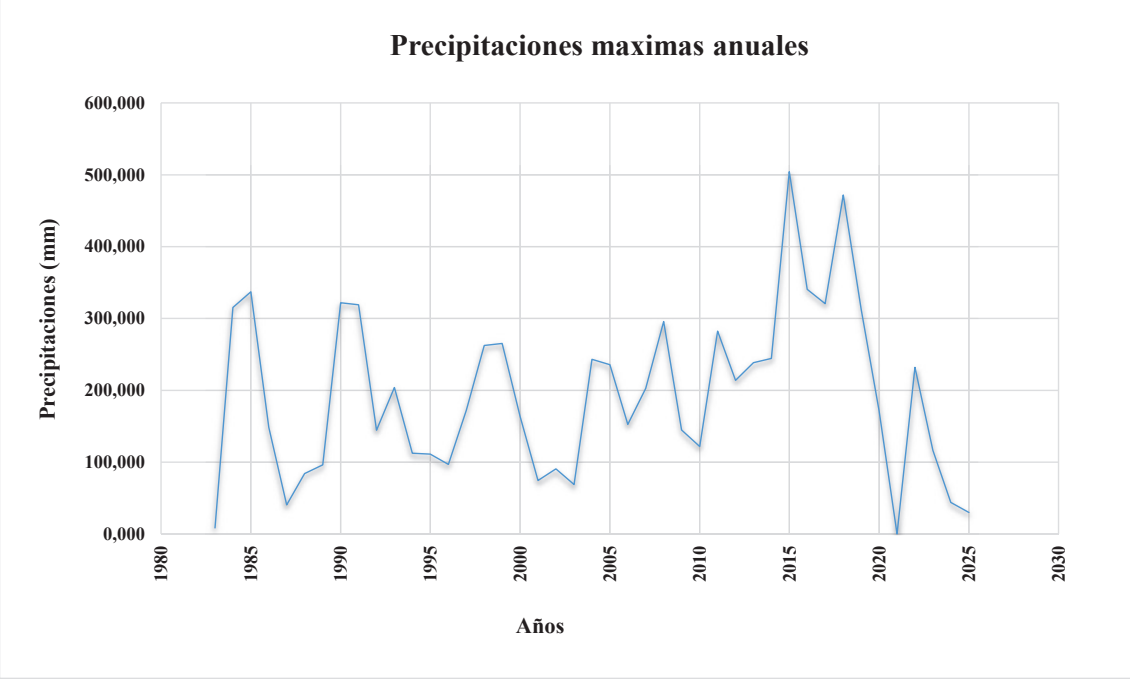


Figura 19. Gráfico de precipitaciones máximas diarias por año hidrológico.

5.1.12. Aplicación de Coeficientes de Decaimiento Areal

Dado que el presente estudio involucra subcuencas de gran extensión (superiores a los 50 km²), se considera necesario aplicar coeficientes de decaimiento areal (CDA) para ajustar las precipitaciones de entrada en el modelo hidrológico (ver figura 18). Esta corrección responde a la baja probabilidad de que un evento de lluvia se distribuya de manera uniforme sobre toda la superficie de la cuenca.

El foco de la tormenta se ubicó entre el centro de la cuenca y el punto de salida, específicamente dentro del sector correspondiente a la subcuenca C4, lo que justifica la aplicación de un CDA diferencial según la ubicación relativa de cada unidad.

Para la estimación de los coeficientes se utilizaron las curvas desarrolladas para la cuenca del Río San Antonio (Córdoba, RA), las cuales consideran la variación del CDA en función del área afectada y la dirección del evento ($d \leq 180°$ y $d > 180°$). Estas curvas permiten ajustar la precipitación puntual a una escala areal, reduciendo el volumen efectivo de lluvia aplicado en cada subcuenca según su superficie y posición respecto al núcleo del evento.

Interpretación técnica del gráfico: CDA para A = 150 km²

El gráfico muestra cómo varía el **Coeficiente de Reducción Areal (CDA)** en función del área de captación (A), diferenciando dos condiciones de orientación de tormenta:

- **Línea continua:** para direcciones de tormenta **d ≤ 180°**
- **Línea discontinua:** para **d > 180°**

Para A = 150 km²:

- Al ubicar el valor de 150 km² sobre el eje horizontal y proyectar hacia ambas curvas:
- En la **línea continua (d ≤ 180°)**, el CDA se aproxima a **75%**
- En la **línea discontinua (d > 180°)**, el CDA es ligeramente menor, alrededor de **72–73%**

Esto indica que, para un área de 150 km² en San Antonio (Córdoba), se espera que la precipitación puntual se reduzca en aproximadamente **25%** al ser distribuida sobre toda el área, si se considera una tormenta con orientación ≤ 180°.

Aplicación práctica:

- Este CDA puede utilizarse para ajustar la **intensidad puntual** obtenida de curvas IDF o tablas de desagregación, convirtiéndola en una **intensidad areal efectiva** para el cálculo de escorrentía.
- Es especialmente útil en modelos como el **racional modificado**, HEC-HMS o cualquier simulación que requiera representar la distribución espacial de la lluvia.

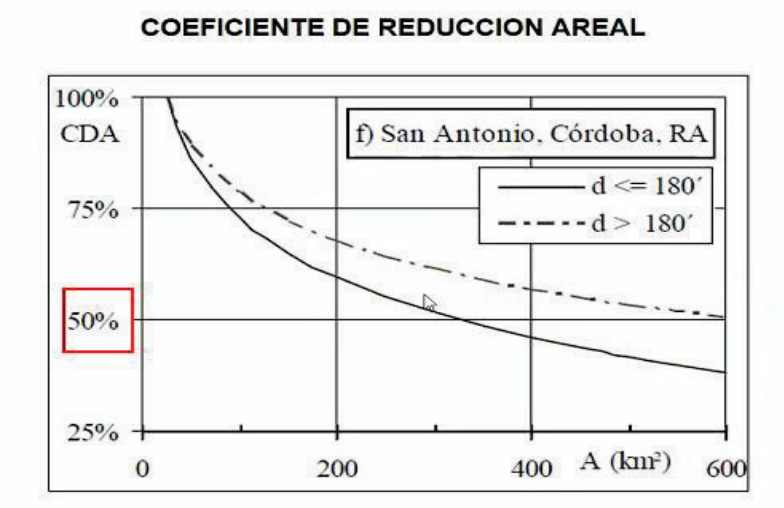


Figura 20. Gráfico de coeficiente de reducción areal.

5.1.13. Cálculo de Intensidades Máximas por Intervalo Horario

La tabla 13 presenta los valores de **precipitación máxima acumulada** para distintos intervalos de duración (0.25 h, 0.50 h, 1.0 h, 1.50 h, 2.0 h y 2.5 h), correspondientes a cada año entre 1983 y 2025. Estos datos derivan de la desagregación de eventos diarios extremos, aplicando el método de Dick Peschke, y permiten caracterizar la intensidad de tormentas breves en función de su duración.

Estructura de la tabla:

- **Año:** Serie temporal que abarca más de cuatro décadas, útil para análisis de recurrencia y variabilidad climática.
- **Pmáx (duración):** Valores máximos de precipitación acumulada para cada intervalo horario, expresados probablemente en milímetros.

Aplicación técnica:

Estos valores permiten calcular **intensidades horarias** (mm/h) mediante la fórmula I=P/t, donde P es la precipitación acumulada y t la duración en horas.

Son fundamentales para:

- Simulación de escorrentía en modelos como HEC-HMS o racional modificado.
- Evaluación de capacidad de drenaje y diseño de obras hidráulicas.
- Análisis de vulnerabilidad ante eventos extremos en subcuencas con tiempos de concentración inferiores a 2.5 h.

Calculo de Intensidades						
Año	Imax(0,25 h)	Pmáx(0,50 h)	Pmáx(1,0 h)	Pmáx(1,50 h)	Pmáx(2 h)	Pmáx(2,5 h)
1983	10,99	6,53	3,89	2,87	2,31	1,95
1984	403,05	239,65	142,50	105,13	84,73	71,67
1985	430,90	256,22	152,35	112,40	90,59	76,63
1986	189,89	112,91	67,14	49,53	39,92	33,77
1987	51,63	30,70	18,25	13,47	10,85	9,18
1988	107,34	63,83	37,95	28,00	22,57	19,09
1989	122,93	73,10	43,46	32,07	25,84	21,86
1990	411,22	244,52	145,39	107,27	86,45	73,13
1991	407,65	242,39	144,12	106,33	85,70	72,49
1992	184,53	109,72	65,24	48,13	38,79	32,81
1993	260,69	155,01	92,17	68,00	54,80	46,36
1994	143,76	85,48	50,83	37,50	30,22	25,56
1995	141,97	84,42	50,20	37,03	29,85	25,25
1996	123,95	73,70	43,82	32,33	26,06	22,04
1997	220,18	130,92	77,85	57,43	46,29	39,15
1998	335,32	199,38	118,55	87,47	70,49	59,63
1999	338,90	201,51	119,82	88,40	71,24	60,27
2000	209,19	124,39	73,96	54,57	43,98	37,20
2001	95,07	56,53	33,61	24,80	19,99	16,91
2002	115,65	68,77	40,89	30,17	24,31	20,57
2003	87,92	52,28	31,08	22,93	18,48	15,63
2004	310,78	184,79	109,88	81,07	65,33	55,27
2005	301,07	179,02	106,44	78,53	63,29	53,54
2006	194,88	115,87	68,90	50,83	40,97	34,65
2007	259,03	154,02	91,58	67,57	54,45	46,06
2008	377,74	224,61	133,55	98,53	79,41	67,17
2009	184,91	109,95	65,38	48,23	38,87	32,88
2010	155,65	92,55	55,03	40,60	32,72	27,68
2011	361,00	214,65	127,63	94,17	75,89	64,20
2012	273,47	162,60	96,69	71,33	57,49	48,63
2013	304,78	181,22	107,75	79,50	64,07	54,20
2014	312,19	185,63	110,37	81,43	65,63	55,52
2015	644,57	383,26	227,89	168,13	135,50	114,62
2016	435,38	258,88	153,93	113,57	91,53	77,42
2017	409,82	243,68	144,89	106,90	86,15	72,88
2018	603,16	358,64	213,25	157,33	126,80	107,26
2019	399,47	237,52	141,23	104,20	83,98	71,04
2020	218,65	130,01	77,30	57,03	45,96	38,88
2021	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2022	296,47	176,28	104,82	77,33	62,33	52,72
2023	148,75	88,44	52,59	38,80	31,27	26,45
2024	56,23	33,43	19,88	14,67	11,82	10,00
2025	38,34	22,80	13,55	10,00	8,06	6,82

Tabla 13. Cálculo de intensidades (precipitaciones máximas acumuladas).

5.1.14. Parámetros estadísticos y función de Gumbel para curvas IDF

Estadísticos de la muestra

A partir de la serie histórica de precipitaciones máximas por duración (por ejemplo, 0.25 h, 0.5 h, 1 h, etc.), se calculan los siguientes parámetros para cada intervalo:

- **Media**: Valor promedio de la precipitación máxima para cada duración.
- **Desvío estándar (s)**: Medida de dispersión que indica la variabilidad interanual.
- **Coeficiente de Gumbel**: Factor de frecuencia asociado al período de retorno deseado (TR = 25, 50, 100 años), obtenido de tablas de distribución de Gumbel.

Función de probabilidad de Gumbel

La distribución de Gumbel se utiliza para modelar eventos extremos (precipitaciones máximas).

Curvas IDF

Una vez obtenidos los valores de P para cada duración, se calculan las **intensidades**, donde t es la duración del evento (en horas). Esto permite construir curvas IDF que relacionan la intensidad de lluvia con su duración y frecuencia de ocurrencia (ver tabla 14).

Aplicación práctica: Estas curvas son fundamentales para:

- Diseño de drenajes pluviales y obras hidráulicas.
- Simulación de escorrentía en modelos como HEC-HMS.
- Evaluación de riesgo hidrológico y planificación urbana.

Parámetros estadísticos:

Estadístico de la muestra de datos:

$$I = \frac{\sum_1^n I_i}{n} \qquad \sigma_I = \sqrt{\frac{(I_i - I)^2}{n-1}}$$

Función de probabilidad de gumbel:

$$K_f = -\frac{\sqrt{6}}{\pi}.(0{,}5772 + \ln\left(ln\frac{T_r}{T_r - 1}\right))$$

media	248,35	147,67	87,80	64,78	52,21	44,16	
Desvio estandar	150,58	89,53	53,24	39,28	31,65	26,78	
kf t=25 años	2,04	2,04	2,04	2,04	2,04	2,04	25
kf t = 50 años	2,59	2,59	2,59	2,59	2,59	2,59	50,00
kf t= 100 años	3,14	3,14	3,14	3,14	3,14	3,14	100,00
	imax(0,25 h)	Pmáx(0,50 h)	Pmáx(1,0 h)	Pmáx(1,50 h)	Pmáx(2 h)	Pmáx(2,5 h)	
	0,25	0,50	1,00	1,50	2	2,50	
Itr 25 =	556,26	330,76	196,67	145,10	116,94	98,92	
Itr 50 =	638,89	379,88	225,88	166,65	134,31	113,61	
Itr 100 =	720,90	428,65	254,88	188,05	151,55	128,20	

Tabla 14. Valores de IDF.

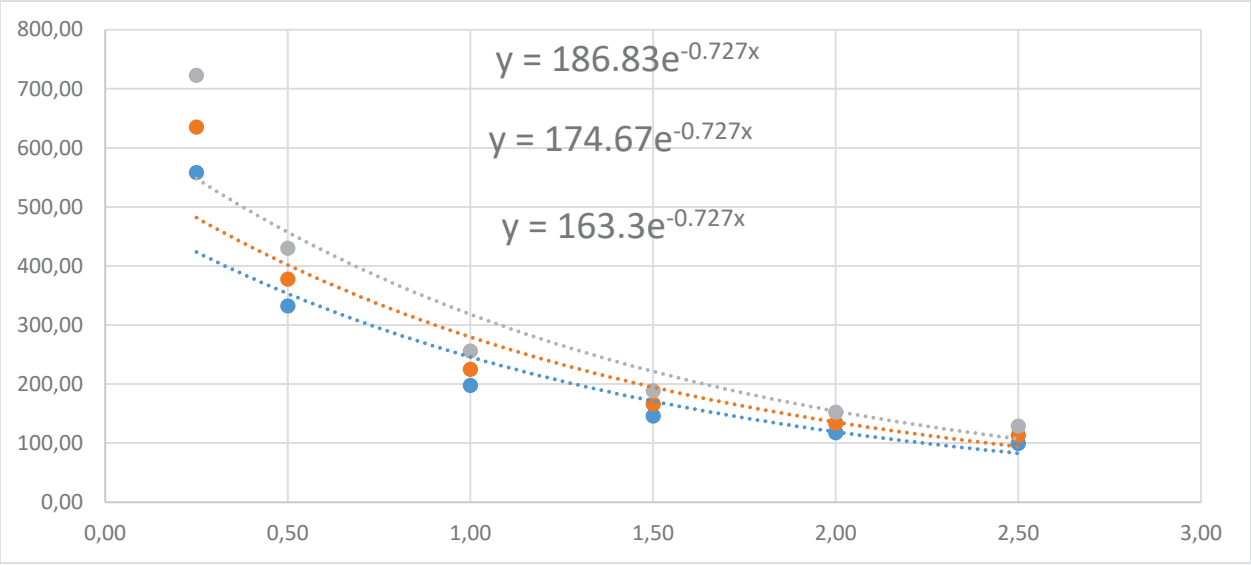


Figura 21. Gráfico de curvas IDF (TR = 25-50-100 Años).

5.1.15. Determinación de los Hietogramas

Los hietogramas representan la distribución temporal de la precipitación durante un evento de lluvia. Para su construcción, se utilizaron datos desagregados de tormentas intensas, ajustados a una duración de 2.5 horas, superior al tiempo de concentración de las subcuencas analizadas. Esta duración garantiza que el evento simulado cubra adecuadamente la respuesta hidrológica del sistema.

La forma del hietograma puede ser:

- **Uniforme**: distribución constante de intensidad.
- **Tipo Chicago**: distribución sintética con pico desplazado.
- **Basado en registros reales**: utilizando series históricas desagregadas por el método de Dick Peschke.

Los hietogramas obtenidos permiten simular la escorrentía directa en modelos hidrológicos, evaluar el comportamiento de las subcuencas y dimensionar obras de control.

Determinación del Tiempo de Concentración (Tc) – Fórmula de Kirpich
El tiempo de concentración (Tc) representa el tiempo que tarda una gota de agua en recorrer la distancia más larga desde el punto más alejado de la cuenca hasta la salida (ver tabla 15). Para cuencas naturales, se emplea la fórmula empírica de Kirpich:

$$T_C = 0{,}00032.A\left(\frac{L^{0,77}}{S^{0,385}}\right)$$

Donde:

- Tc: Tiempo de concentración en minutos.
- L: Longitud del cauce principal (km).
- S: Pendiente del cauce (m/m).

Este valor es fundamental para definir la duración del evento de diseño, seleccionar el hietograma adecuado y calcular el caudal pico mediante métodos como el racional modificado o HEC-HMS.

Label	A (km2)	L cauces (km)	Cota Max.	Cota min.	Delta H	S (m/m)	Pendiente (%)	Tc (horas)	Tc (minutos)	T lag (minutos)
1	26,07	8,52	1739,00	1437,00	302,00	0,04	0,04	1,24	74,50	44,70
2	25,75	11,09	1989,00	1437,00	552,00	0,05	0,05	1,33	80,09	48,06
3	13,79	5,87	1437,00	1275,00	162,00	0,03	0,03	1,03	61,60	36,96
4	27,84	12,65	1818,00	1275,00	543,00	0,04	0,04	1,56	93,84	56,31
5	54,25	10,31	1568,00	1230,00	338,00	0,03	0,03	1,48	88,96	53,37
6	0,55	1,80	1275,00	1230,00	45,00	0,03	0,03	0,43	25,70	15,42
7	2,05	3,72	1230,00	1153,00	77,00	0,02	0,02	0,81	48,42	29,05
TOTAL	**150,30**	**km²**								

Tabla 15. Datos morfológicos e hidrológicos para modelado de escorrentía.

Descripción de las siguientes tablas (Hietograma para TR = 100 años):

La tabla presenta la distribución temporal de la precipitación durante un evento de diseño con un período de retorno de 100 años, correspondiente a la **Cuenca 1**. Este hietograma permite simular la respuesta hidrológica ante un evento extremo, considerando la variación de intensidad y acumulación a lo largo del tiempo.

Estructura de la tabla:

- **T:** Duración total del evento (minutos).
- **tmin:** Tiempo acumulado desde el inicio del evento, en minutos.
- **l = F:** Fracción relativa del tiempo transcurrido respecto al total.
- **I(estimado):** Intensidad estimada de precipitación (mm/h) para cada intervalo.
- **p(mm):** Precipitación acumulada en cada intervalo.
- **p(acum):** Precipitación acumulada total hasta ese instante.
- **p(alterna):** Variante alterna de acumulación, posiblemente ajustada para simular distribución tipo Chicago o desplazamiento del pico.

Aplicación técnica:

Este hietograma permite:

- Simular escorrentía directa en modelos como HEC-HMS.
- Evaluar el comportamiento de la cuenca ante eventos críticos.
- Calcular caudales pico y volúmenes de escorrentía.
- Ajustar el diseño de obras hidráulicas y estrategias de mitigación.

La progresión de intensidades decrecientes sugiere un evento con pico inicial, típico de tormentas convectivas intensas, lo cual es coherente con escenarios de diseño para TR elevados.

T	tmin	h=	I(estim)	p(mm)	p(acum)	p(alterna)
100	10	0,17	979,23	15,30	15,30	15,30
100	20	0,33	582,32	18,20	33,50	20,14
100	30	0,50	429,64	20,14	53,64	21,64
100	40	0,67	346,26	21,64	75,28	23,95
100	50	0,83	292,89	22,88	98,16	26,50
100	60	1,00	255,46	23,95	122,11	25,73
100	70	1,17	227,56	24,89	147,00	22,88
100	80	1,33	205,88	25,73	172,73	20,14
100	90	1,50	188,47	26,50	199,24	18,20

Tabla 16. Cuenca 1 – Hietograma TR 100 años.

T	tmin	h=	I(estim)	p(mm)	p(acum)	p(alterna)
100	10	0,17	979,23	15,30	15,30	15,30
100	20	0,33	582,32	18,20	33,50	20,14
100	30	0,50	429,64	20,14	53,64	21,64
100	40	0,67	346,26	21,64	75,28	23,95
100	50	0,83	292,89	22,88	98,16	26,50
100	60	1,00	255,46	23,95	122,11	25,73
100	70	1,17	227,56	24,89	147,00	22,88
100	80	1,33	205,88	25,73	172,73	20,14
100	90	1,50	188,47	26,50	199,24	18,20

Tabla 17. Cuenca 2 – Hietograma TR 100 años

T	tmin	h=	I(estim)	p(mm)	p(acum)	p(alterna)
100	10	0,17	979,23	15,30	15,30	15,30
100	20	0,33	582,32	18,20	33,50	20,14
100	30	0,50	429,64	20,14	53,64	22,88
100	40	0,67	346,26	21,64	75,28	24,89
100	50	0,83	292,89	22,88	98,16	23,95
100	60	1,00	255,46	23,95	122,11	21,64
100	70	1,17	227,56	24,89	147,00	18,20

Tabla 18. Cuenca 3 – Hietograma TR 100 años

T	tmin	h=	I(estim)	p(mm)	p(acum)	p(alterna)
100	10	0,17	979,23	15,30	15,30	15,30
100	20	0,33	582,32	18,20	33,50	20,14
100	30	0,50	429,64	20,14	53,64	22,88
100	40	0,67	346,26	21,64	75,28	24,89
100	50	0,83	292,89	22,88	98,16	26,50
100	60	1,00	255,46	23,95	122,11	27,21
100	70	1,17	227,56	24,89	147,00	25,73
100	80	1,33	205,88	25,73	172,73	23,95
100	90	1,50	188,47	26,50	199,24	21,64
100	100	1,67	174,15	27,21	226,45	18,20

Tabla 19. Cuenca 4 – Hietograma TR 100 años

T	tmin	h=	I(estim)	p(mm)	p(acum)	p(alterna)
100	10	0,17	979,23	15,30	15,30	15,30
100	20	0,33	582,32	18,20	33,50	20,14
100	30	0,50	429,64	20,14	53,64	22,88
100	40	0,67	346,26	21,64	75,28	24,89
100	50	0,83	292,89	22,88	98,16	26,50
100	60	1,00	255,46	23,95	122,11	25,73
100	70	1,17	227,56	24,89	147,00	23,95
100	80	1,33	205,88	25,73	172,73	21,64
100	90	1,50	188,47	26,50	199,24	18,20

Tabla 20. Cuenca 5 – Hietograma TR 100 años

T	tmin	h=	I(estim)	p(mm)	p(acum)	p(alterna)
100	10	0,17	979,23	15,30	15,30	15,30
100	20	0,33	582,32	18,20	33,50	20,14
100	30	0,50	429,64	20,14	53,64	18,20

Tabla 21. Cuenca 6 – Hietograma TR 100 años

T	tmin	h=	I(estim)	p(mm)	p(acum)	p(alterna)
100	10	0,17	979,23	15,30	15,30	15,30
100	20	0,33	582,32	18,20	18,20	20,14
100	30	0,50	429,64	20,14	20,14	22,88
100	40	0,67	346,26	21,64	21,64	21,64
100	50	0,83	292,89	22,88	22,88	18,20

Tabla 22. Cuenca 7 – Hietograma TR 100 años

5.1.16. Construcción del Mapa Topológico en HEC-HMS

Una vez obtenidos los parámetros físicos fundamentales de la cuenca —incluyendo el área de drenaje, el índice de abstracción inicial (Ia), el número de curva (CN) y el tiempo de retardo (lag time)— se procedió a la elaboración del mapa topológico utilizando el software **HEC-HMS versión 4.5 gratuita (ver figura 19).**

Este entorno de modelado permite representar de forma estructurada la red de drenaje, subdividir la cuenca en unidades hidrológicas homogéneas, y vincular cada subcuenca

con sus respectivos tramos de cauce, nodos de confluencia y condiciones de borde. La digitalización se realizó respetando la morfología natural del terreno y las relaciones hidráulicas entre componentes, lo que garantiza una simulación coherente del comportamiento hidrológico ante eventos de lluvia.

La configuración del modelo incluyó la incorporación de los parámetros previamente calculados, permitiendo vincular cada subcuenca con su respectivo CN, Ia y lag time, y facilitando la posterior asignación de hietogramas sintéticos o reales para la simulación de escorrentía.

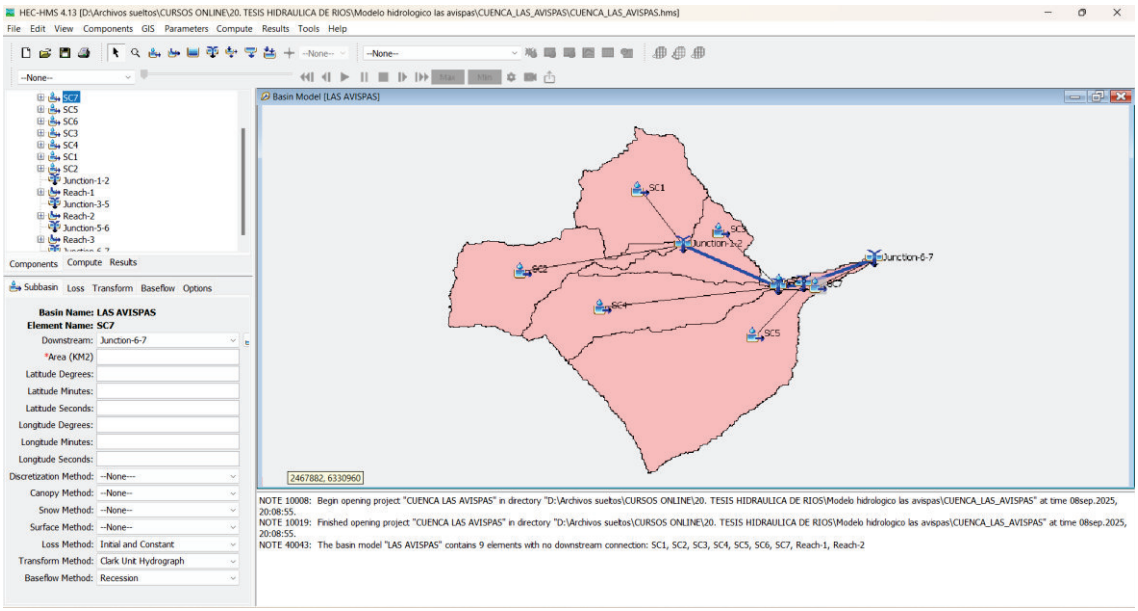


Figura 22. Mapa topológico en HEC HMS.

Dentro del modelo de subcuenca *SC1* del proyecto "Basin 1" (idem para el resto de la SC), se ha seleccionado el **método de pérdidas "SCS Curve Number"**, desarrollado por el **Servicio de Conservación del Suelo (SCS)** de EE.UU., hoy parte del **NRCS (Natural Resources Conservation Service)**. Este método es ampliamente utilizado en modelación hidrológica por su simplicidad y aplicabilidad en cuencas rurales y urbanas.

5.1.17. Estimación de la escorrentía:

5.1.17.1. Método SCS Curve Number – Fundamentos:

Este método estima la **escorrentía directa** a partir de la **precipitación efectiva**, considerando las características del suelo, uso del terreno y condiciones de humedad previas.

Parámetros clave:

CN (Curve Number):
Valor adimensional entre 30 y 100 que representa la capacidad de infiltración del terreno.

- ✓ CN bajos → alta infiltración (bosques, suelos arenosos)
- ✓ CN altos → baja infiltración (zonas urbanas, suelos arcillosos)

Condición de humedad antecedente (AMC):
Ajuste del CN según si el suelo está seco, normal o húmedo antes del evento.

Área de la subcuenca:
En este caso, *67.5313 km²*, influye directamente en el volumen total de escorrentía (ver figura 20).

Precipitación efectiva:
Se calcula la escorrentía solo si la lluvia supera una cierta retención inicial, definida por el parámetro **S**, relacionado con el CN.

Por cada subcuenca se debe ingresar los siguientes datos en el software HEC HMS (método de perdida: SCS curva número, método de transformación: SCS Hidrograma unitario).

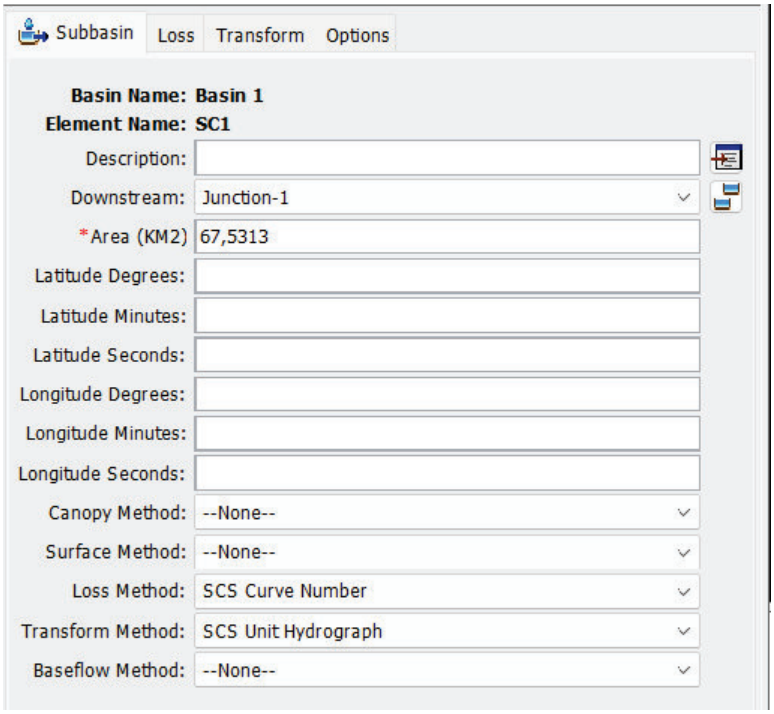


Figura 23. Datos de entrada para cada subcuenca en HEC HMS.

Aplicación en HEC-HMS:

En el modelo presentado se destaca lo siguiente:

- El método SCS se aplica para estimar las **pérdidas por infiltración** en la subcuenca *SC1*.
- Se complementa con el método de transformación **SCS Unit Hydrograph**, que convierte la escorrentía en caudal.

- No se ha definido método de baseflow ni de cobertura superficial, lo que sugiere un enfoque centrado en eventos de lluvia intensos y escorrentía directa.

Parámetros del método SCS en SC1 (ver figura 21):

Initial Abstraction (IA): 28.8 mm
Representa las pérdidas iniciales antes de que comience la escorrentía: interceptación, infiltración inicial y almacenamiento superficial.

- ✓ Se estima como el 20% de la capacidad de retención S, aunque puede ajustarse según condiciones locales.
- ✓ Un valor de 28.8 mm sugiere una cobertura vegetal o suelo con buena capacidad de absorción inicial.

Curve Number (CN): 63.82
Valor adimensional que indica la capacidad de infiltración del terreno.

- ✓ CN de 63.82 corresponde a suelos con infiltración moderada, posiblemente con cobertura agrícola o natural.

Impervious (%): 0.1% Porcentaje de superficie impermeable en la subcuenca.

- ✓ Un valor tan bajo indica que casi toda el área permite infiltración, lo que es coherente con un entorno rural o natural.
- ✓ Las áreas impermeables generan escorrentía inmediata, sin pérdidas por infiltración.

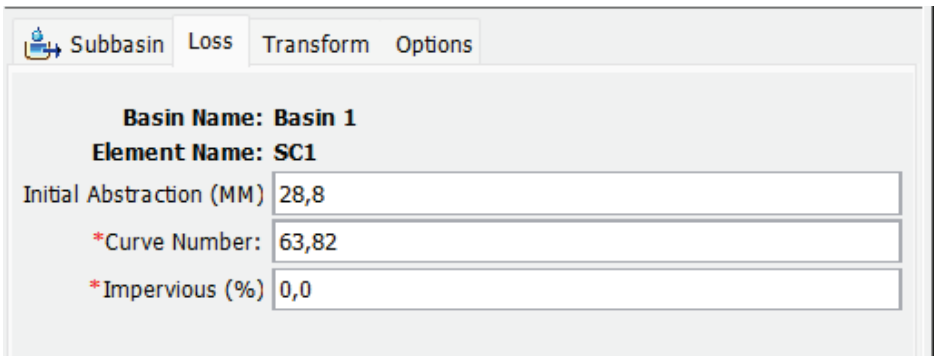


Figura 24. Datos segunda solapa Loss en HEC HMS (índice de abstracción inicial y numero de curva).

Método Muskingum

Es un método de rutamiento hidrológico que modela cómo se atenúa y se retrasa una onda de caudal a lo largo de un tramo de río o canal. El volumen de entrada es igual al volumen de salida, pero la forma del hidrograma cambia.

Lo que ocurre es:

- **El pico de caudal se atenúa (se reduce).**
- **El hidrograma se alarga en el tiempo.**
- **El volumen total permanece constante.**

Esto es coherente con la conservación de masa: el agua que entra al tramo eventualmente sale, pero distribuida de forma diferente en el tiempo.

Interpretación técnica del tramo Reach-1 – Método Muskingum

En el modelo HEC-HMS correspondiente al proyecto *Las Avispas*, el tramo **Reach-1** ha sido configurado con el método de rutamiento **Muskingum (ver figura 23)**, cuyos parámetros se detallan a continuación:

- **Muskingum K = 0.45 horas**
  Este valor representa el tiempo de almacenamiento del tramo. Un valor bajo como 0.45 indica una rápida respuesta del sistema, con escasa retención del caudal en tránsito.
- **Muskingum X = 0.2**
  Este coeficiente pondera la influencia relativa del caudal de entrada y salida en el almacenamiento. Un valor de 0.2 sugiere una **atenuación moderada** del pico de caudal, lo que implica una redistribución temporal del hidrograma sin alterar el volumen total.
- **Subreaches = 1**
  El tramo no ha sido subdividido, lo que simplifica el cálculo pero puede limitar la precisión del rutamiento en tramos con alta variabilidad hidráulica.

Consideraciones hidrológicas:

El método Muskingum, en su formulación clásica, **conserva el volumen total de agua**. Por lo tanto, los parámetros configurados no generan un aumento en el volumen del caudal de salida. Lo que sí ocurre es una **modificación en la forma del hidrograma**, caracterizada por:

- ✓ Reducción del pico de caudal.
- ✓ Aumento de la duración del evento.
- ✓ Desfase temporal entre el hidrograma de entrada y salida.

Esta redistribución puede ser clave para evaluar la capacidad de conducción de tramos aguas abajo, la vulnerabilidad ante eventos extremos y la eficiencia de obras de control.

Análisis:

En caso de evaluar vulnerabilidad o capacidad de conducción en tramos aguas abajo, se recomienda considerar las siguientes acciones:

- ✓ Comparar el hidrograma de entrada vs. salida para ver cómo cambia la forma.
- ✓ Evaluar si la atenuación reduce el riesgo de desbordes en puntos críticos.
- ✓ Integrar esta salida en tu análisis de SC1–SC7 para ver cómo se propaga el efecto.

Método de tránsito:
En un tramo de río, la entrada I(t), la salida Q(t) y el almacenamiento S(t) se relacionan con la ecuación de continuidad:

$$\frac{\Delta S}{\Delta t} = I(t) - Q(t)$$

Por más que I(t) sea conocido, se necesita S(t)= "función de almacenamiento", para conocer Q(t).
Hay varios métodos para resolver esta ecuación. El que usamos en el presente trabajo es el desarrollado por Muskingum.
Este método modela el almacenamiento volumétrico creciente de un canal prismático mediante la combinación del almacenamiento en cuña y en prisma (ver figura 22):

a) Almacenamiento en cuña:
- ✓ Durante el avance de la onda de creciente: I >Q; Almacenamiento en cuña;
- ✓ Durante la recesión: I<Q; Almacenamiento en cuña negativa;

b) Almacenamiento en prisma: volumen de sección transversal constante en todo el tramo.

Luego, suponiendo que la sección transversal del flujo es proporcional al caudal en la sección, se puede escribir al almacenamiento del tramo como:
- ✓ S = KQ + KX (I-Q) siendo K (tiempo de tránsito de la onda de crecida) y x factores de proporcionalidad, K para el prisma y x para la cuña (este último varía entre 0, para una pileta nivelada, y 0.5, para una cuña completamente desarrollada).

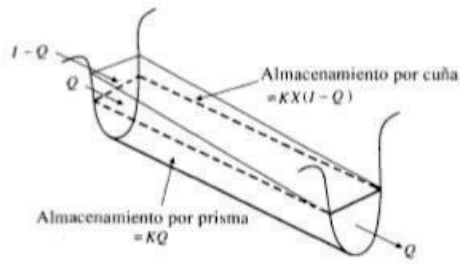


Figura 25. Descomposición del almacenamiento en canal: prisma y cuña (Modelo Muskingum.

Reordenando, tenemos la función de almacenamiento por el método de Muskingum.

S = K (XI + (1-X) Q) Relación lineal entre almacenamiento y XI + (1-X) Q

La disponibilidad de hidrogramas de entrada y salida para un tramo fluvial permite la determinación de los parámetros K y x, conforme a las relaciones derivadas del método expuesto en esta sección.

Debido a que no se consiguieron aforos de los tramos en los que se pretende transitar caudales, es que se emplearon:

- ✓ X: Se comenzó con valores de 0.3 para cada tramo y luego se fue iterando, hasta que los caudales de salida dieran valores no negativos;
- ✓ K: Se comenzó estimando con la siguiente ecuación:

$$K = 0{,}18.\left(\frac{\Delta x}{S_0^{0,25}}\right)^{0,76}$$

$\Delta x = longitud\ del\ tramo\ en\ km.$

$S_0 = pendiente\ media\ del\ tramo\ \left(\frac{m}{m}\right).$

Dado que el hidrograma de salida arrojaba valores negativos de caudal, se decidió emplear otra fórmula para el tiempo de traslado K=0.6 Tc, ya que se consideró que la primera arrojaba valores demasiado altos de K.

- ✓ Nro. De subtramos del tramo analizado: Se emplearon las siguientes relaciones:

$$N°\ de\ subtramos = \frac{K}{D_t}$$

$2.K.X < D_t \leq K$

Muskingum K y X no tienen una escala fija universal, pero sus valores dependen de las características físicas del tramo fluvial y del tipo de evento hidrológico. K suele estar en horas y X varía entre 0 y 0.5.

Escala típica de valores

Muskingum K (tiempo de almacenamiento)

- Unidad: horas (puede expresarse también en minutos o días según el modelo)
- Rango típico:
  - ✓ *Pequeños cauces o canales urbanos:* 0.1 – 2 horas
  - ✓ *Ríos medianos:* 2 – 10 horas
  - ✓ *Grandes ríos o tramos con alta capacidad de almacenamiento:* 10 – 30+ horas
- Depende de:
- Longitud del tramo
- Pendiente del cauce
- Velocidad del flujo
- Capacidad de almacenamiento lateral (llanuras de inundación)

Muskingum X (coeficiente de ponderación)

- Rango permitido: $0 \leq X \leq 0.5$
- Interpretación:
  - ✓ *X = 0:* comportamiento tipo reservorio (almacenamiento puro)

- ✓ *X = 0.5:* comportamiento tipo canal (flujo puro)
- ✓ *X entre 0.2 y 0.3:* típico en cauces naturales con atenuación moderada

Depende de:

- Forma del hidrograma de entrada.
- Relación entre almacenamiento y flujo.
- Geometría del cauce.
- Presencia de estructuras hidráulicas.

Determinación:

- Calibración empírica: usando hidrogramas medidos de entrada y salida.
- Estimación teórica: mediante fórmulas derivadas del método Muskingum-Cunge, que relacionan K y X con parámetros físicos como velocidad, pendiente y sección transversal.
- Modelos simplificados: como el propuesto por Cunge, permiten calcular K y X sin calibración directa, mejorando la capacidad predictiva en ausencia de datos medidos.

Aplicación en el caso A° Las Avispas:

En el modelo *Las Avispas*, el valor de K = 0.45 h sugiere un tramo de respuesta rápida, posiblemente corto o con pendiente pronunciada. El valor de X = 0.2 indica una atenuación moderada, típica de cauces naturales sin estructuras de control.

Para las subcuencas identificadas como SC1 a SC7, los valores de los parámetros K y X en cada tramo se determinan en función de su longitud, pendiente y capacidad de almacenamiento. Posteriormente, estos valores permiten comparar la propagación de la onda de caudal entre subcuencas.

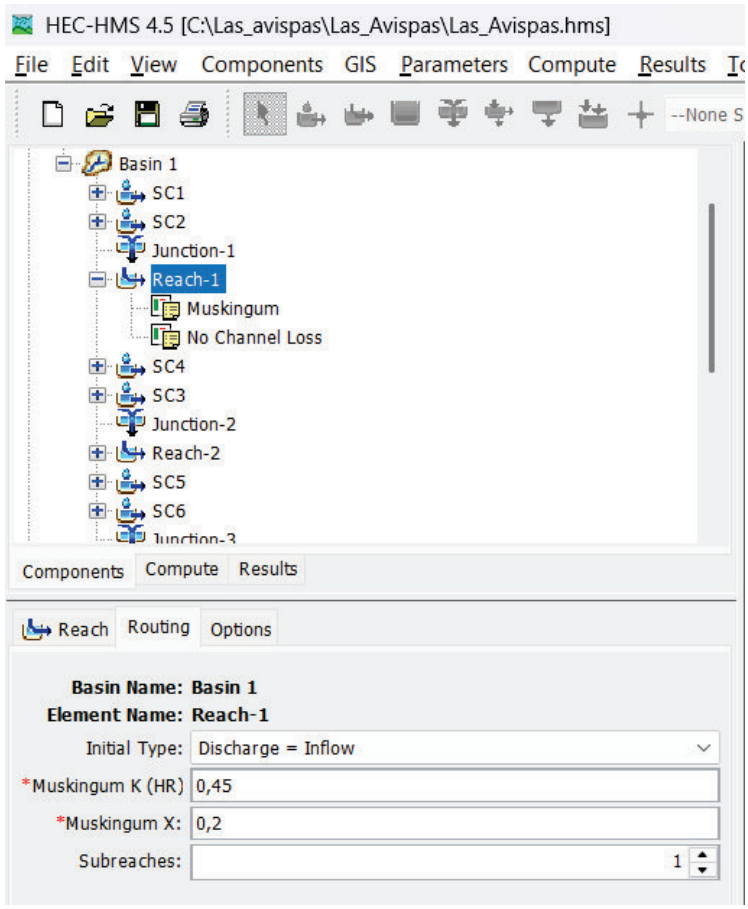


Figura 26. Configuración de tramo Reach-1 en HEC-HMS con ruteo Muskingum.

Escenario de escurrimiento lento y moderado (ingreso tercera solapa -tipo de gráfico y lag time) ver figura 24:

- El **Lag Time** elevado indica que el escurrimiento superficial tarda en alcanzar el punto de salida de la subcuenca, lo cual es coherente con:
- Baja impermeabilidad (0,1%).
- Alta abstracción inicial (28,8 mm).
- CN moderado (63,82).

Alta capacidad de almacenamiento y disipación:

- El agua de lluvia se infiltra y se almacena antes de generar escurrimiento, lo que reduce la velocidad y el volumen del flujo superficial.
- Esto sugiere presencia de suelos porosos, vegetación densa o topografía suave.

Perfil hidrológico conservado:

- SC1 puede considerarse una unidad de referencia para zonas con bajo impacto antrópico.

- Ideal para calibrar modelos base o comparar con subcuencas más intervenidas.

Coherencia entre parámetros:

- La consistencia entre CN, Ia y Lag Time refuerza la validez del modelo y su utilidad para simulaciones de eventos de lluvia.

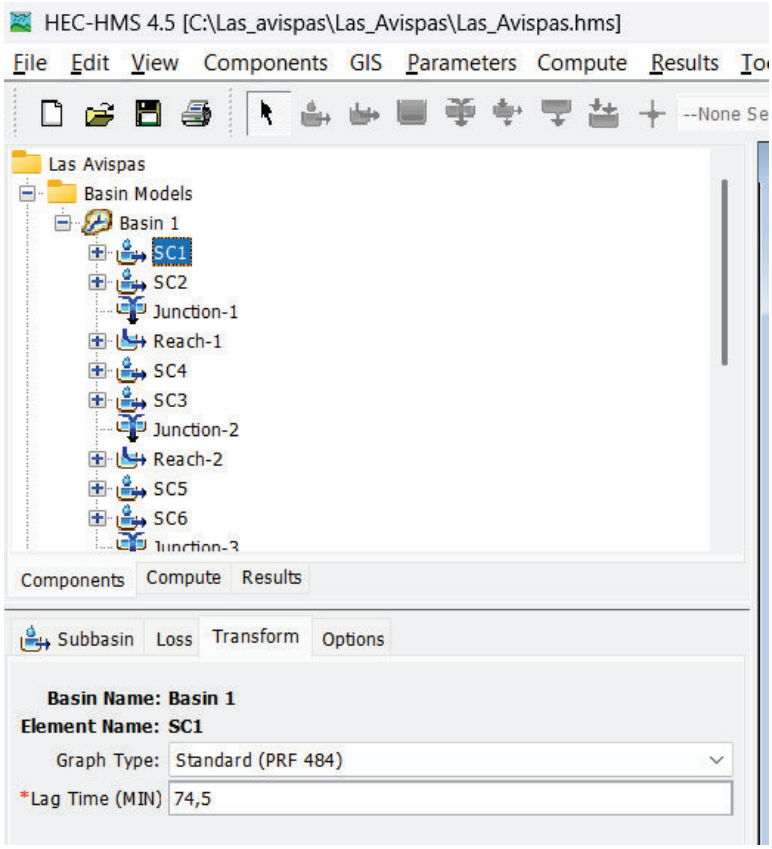


Figura 27. Modelado de Escorrentía Directa mediante Métodos de Transformación en HEC-HMS.

El **lag time** es el tiempo que transcurre entre el centroide de la lluvia efectiva y el pico del hidrograma de escorrentía directa. En modelos como HEC-HMS, se utiliza para transformar la lluvia en caudal, y en tramos de río, influye en el desfase entre entrada y salida.

Asociación con los diagramas de salida:

Hidrogramas de subcuencas (HEC-HMS – SC1 a SC7)

- Un **t lag bajo** (ej. 20–30 min) genera un **hidrograma más agudo**, con un pico alto y rápido.
- Un **t lag alto** (ej. 60–90 min) produce un **hidrograma más atenuado**, con menor pico y mayor duración.

Esto se observa en los resultados de Run 3 del proyecto Las Avispas, donde los picos de caudal son simultáneos (02Feb2022 00:00), lo que sugiere que los t lag fueron similares o que el sistema tiene una respuesta rápida y sincronizada.

Reservorios (HEC-HMS – Reservoir-1):

- El hidrograma muestra una **respuesta rápida** con un pico agudo y caída abrupta.
- Si se aumentara el t lag en la transformación o en el routing, el pico se **desplazaría hacia la derecha** y se **reduciría en magnitud**, simulando mayor almacenamiento o amortiguación.

Junctions (HEC-RAS – Junction-7):

- El gráfico muestra tres curvas: entrada, salida y resultado en la unión.
- Si el t lag en los reaches aguas arriba fuera mayor, el **desfase entre entrada y salida se ampliaría**, y el pico de salida se retrasaría.
- Esto es clave para evaluar sincronización de crecidas y riesgo de acumulación en nodos críticos.

Conclusión técnica:

El **t lag no aumenta el volumen ni el caudal máximo directamente**, pero **modifica la forma del hidrograma**, lo que puede:

- Atenuar el pico de crecida.
- Desfasar el momento de máxima descarga.
- Aumentar la duración del evento

Esto es fundamental para evaluar vulnerabilidad, capacidad de conducción y diseño de obras de control.

Luego se procede a cargar el modelo meteorológico que asocia el hietograma especifico ya calculado en el apartado anterior (tipo de precipitación: hietograma especifico).

5.1.18. Carga del Modelo Meteorológico en HEC-HMS

Una vez definida la estructura física de la cuenca y sus parámetros hidrológicos, se procede a la configuración del modelo meteorológico en el entorno de simulación **HEC-HMS (versión 4.5)**. Esta etapa permite incorporar los datos de precipitación que alimentarán el modelo, ya sea en forma de hietogramas sintéticos, registros históricos o eventos de diseño (ver figura 25).

En este caso, se seleccionó la opción **"Specified Hyetograph"**, que permite asignar manualmente un hietograma a cada subcuenca del modelo. Para garantizar la coherencia espacial del evento, se utilizó un único pluviógrafo de diseño denominado **"CUENCA TR 100"**, aplicado de forma uniforme a todas las subcuencas SC1 a SC7 (ver figura 26). Esta decisión responde a la necesidad de simular un evento extremo con período de retorno de 100 años, manteniendo homogeneidad en la distribución de lluvia sobre el área de estudio.

La correcta carga del modelo meteorológico es esencial para asegurar la representatividad del evento simulado y la confiabilidad de los resultados de escorrentía directa, caudales pico y volúmenes generados.

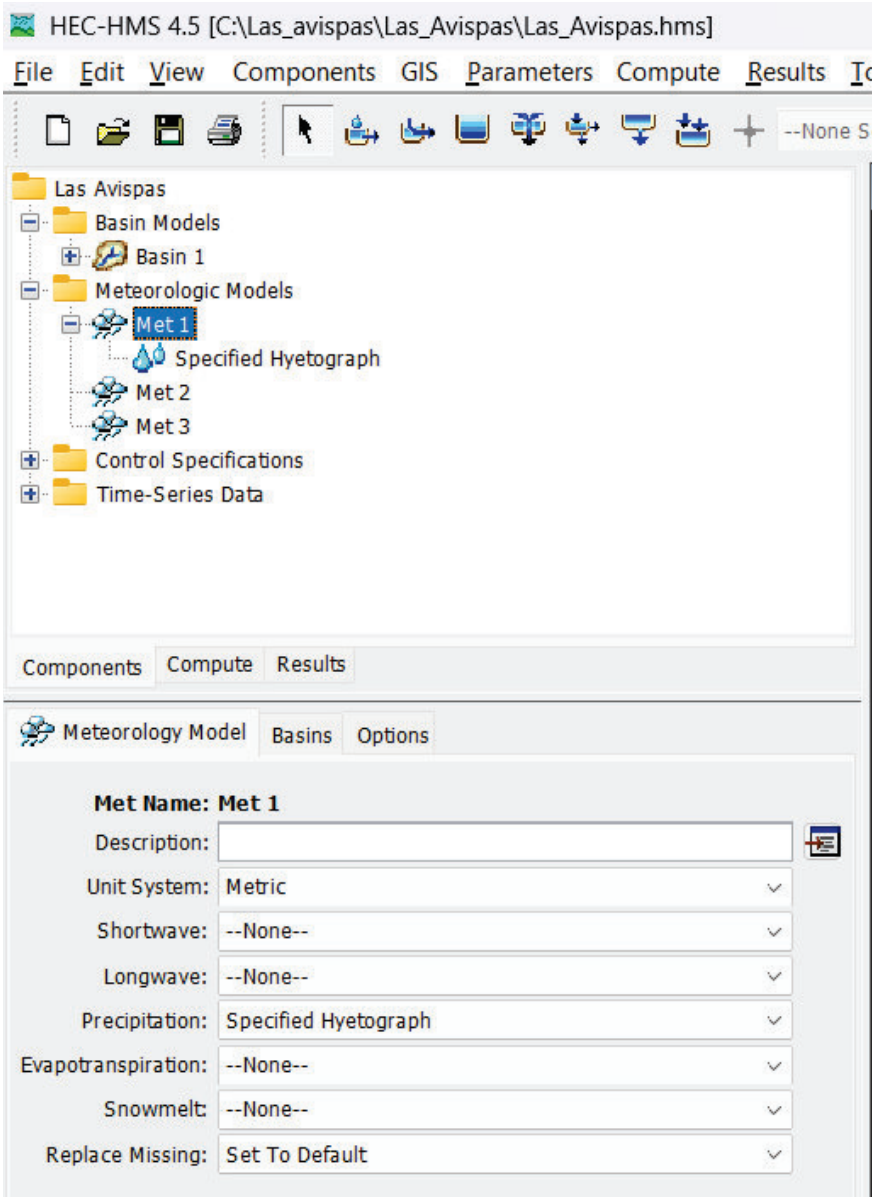


Figura 28. Modelo meteorológico HEC HMS.

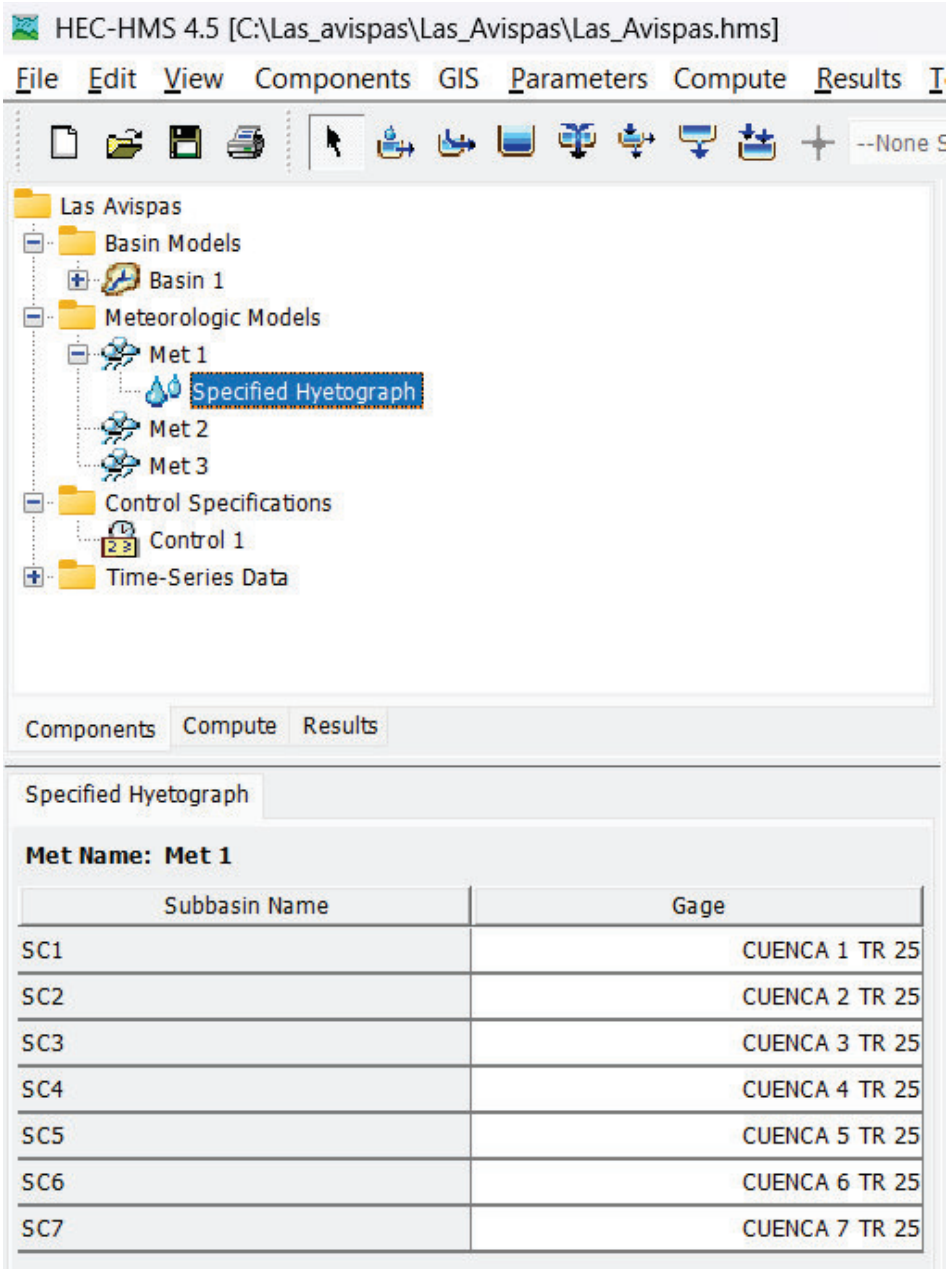


Figura 29. Método de hidrograma especifico HEC HMS.

5.1.19. Especificaciones de Control en HEC-HMS - Control 1:

Estas especificaciones determinan **cuándo inicia y termina la simulación**, así como el **intervalo temporal** entre cálculos. Son fundamentales para garantizar coherencia entre los datos meteorológicos, hidrológicos y el modelo de cuenca (ver figura 27).

Este intervalo de 10 minutos es adecuado para eventos de lluvia intensa o análisis detallado de respuesta hidrológica.

- La coherencia entre el intervalo del hietograma (en *Met 1*) y el intervalo de control es esencial para evitar errores de simulación.
- Puedes definir múltiples especificaciones de control si estás comparando distintos eventos o escenarios de calibración.

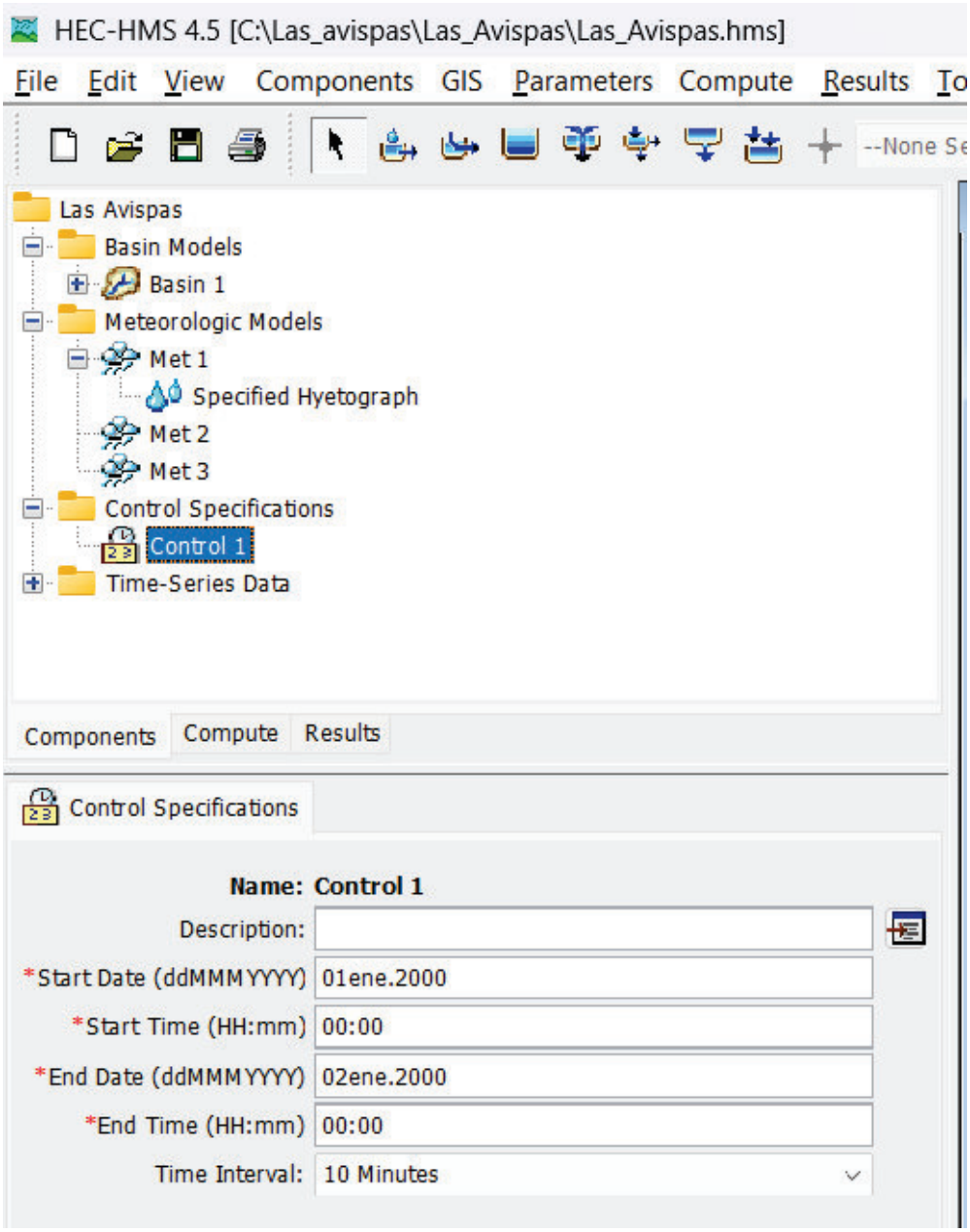


Figura 30. Especificaciones de control HEC HMS.

5.1.20. Configuración de Precipitaciones e Hietogramas en HEC-HMS (time series data):

El conjunto de imágenes presentadas corresponde a la estructura y carga de datos de precipitación en el modelo hidrológico **Las Avispas**, desarrollado en HEC-HMS 4.5 (**ver figuras 28-29-30)**. A continuación, se detallan los aspectos clave:

Gages y Escenarios de Recurrencia (TR):

- Se configuraron múltiples **gages de precipitación** bajo la sección *Time-Series Data*, cada uno asociado a un **período de retorno (TR)** específico:
    - ✓ CUENCA 1 TR 100
- Cada "gage" contiene una **serie temporal incremental** en milímetros, con intervalos de 10 minutos o 2 horas, según el escenario.

Asignación de Hietogramas por Subcuenca:

- En el componente *Meteorologic Models*, se especificaron los hietogramas para cada subcuenca (SC1 a SC7), vinculando cada una al "gage" correspondiente según el TR analizado.
- Esto permite simular la respuesta hidrológica individual de cada unidad ante distintos eventos de lluvia.

Estructura de los Hietogramas:

- Los hietogramas fueron ingresados manualmente, con control sobre la resolución temporal y la distribución de intensidades.
- Se observa una evolución creciente de la precipitación a lo largo del evento, con acumulados que superan los 140 mm en algunos casos (ej. TR 100 años).
- Esta estructura permite aplicar el método SCS para estimar el escurrimiento directo, considerando la abstracción inicial (Ia) y el número de curva (CN) de cada subcuenca.

Validación y Ajustes Espaciales:

- Se aplicaron **coeficientes de decaimiento areal (CDA)** para ajustar la precipitación efectiva en función del área de cada subcuenca y su posición respecto al foco de la tormenta.
- Esto mejora la representatividad espacial del modelo, especialmente en eventos convectivos o de alta intensidad localizada.

Aplicación en el Modelo

- La correcta asignación de hietogramas y gages permite simular con precisión la dinámica de escurrimiento por subcuenca.
- La estructura modular facilita el análisis comparativo entre escenarios de recurrencia y entre unidades con distinta capacidad de retención.
- Los datos de entrada son consistentes con los parámetros físicos (CN, Ia, Lag Time), lo que refuerza la validez del modelo.

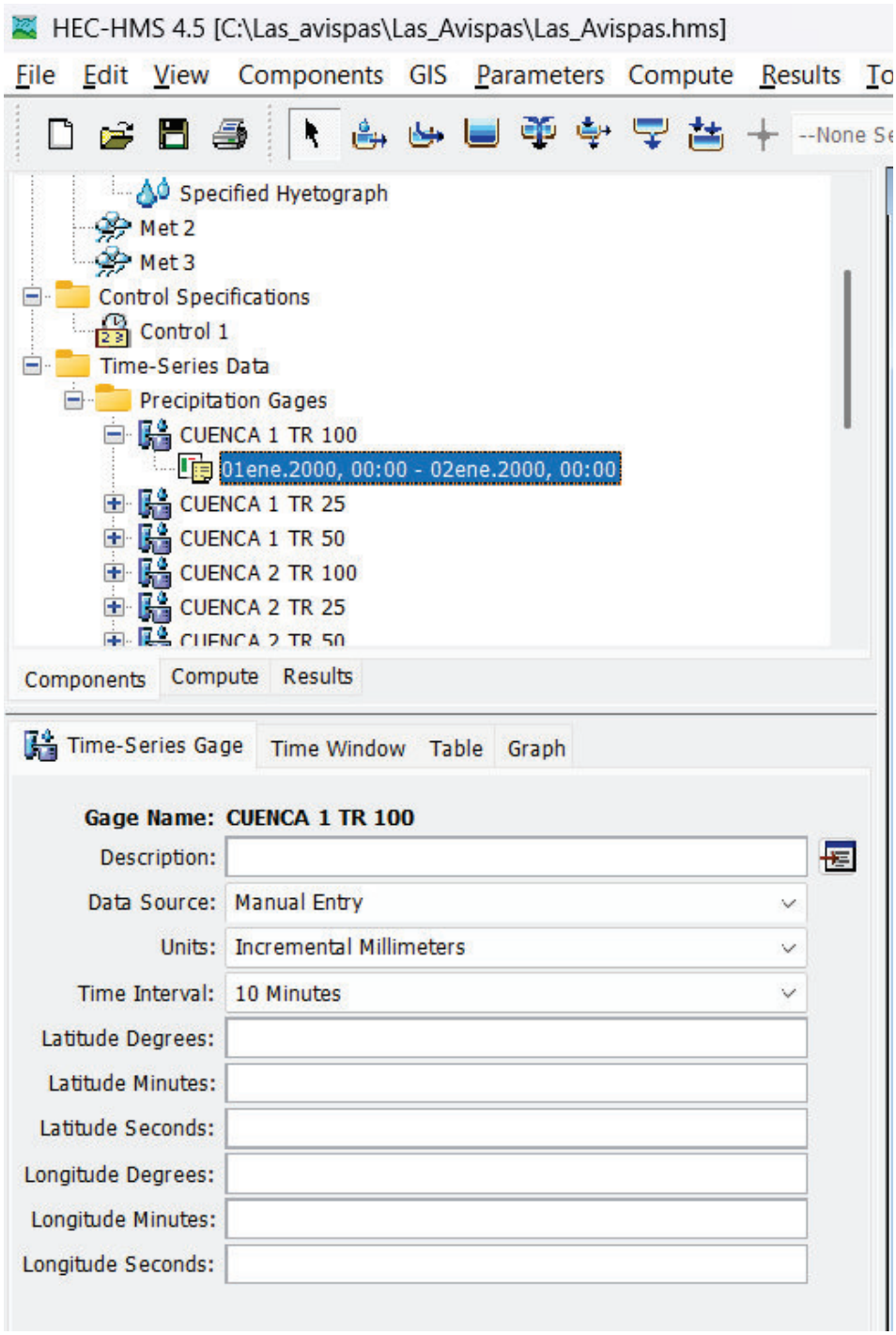


Figura 31. Precipitation gages – time series data en HEC HMS.

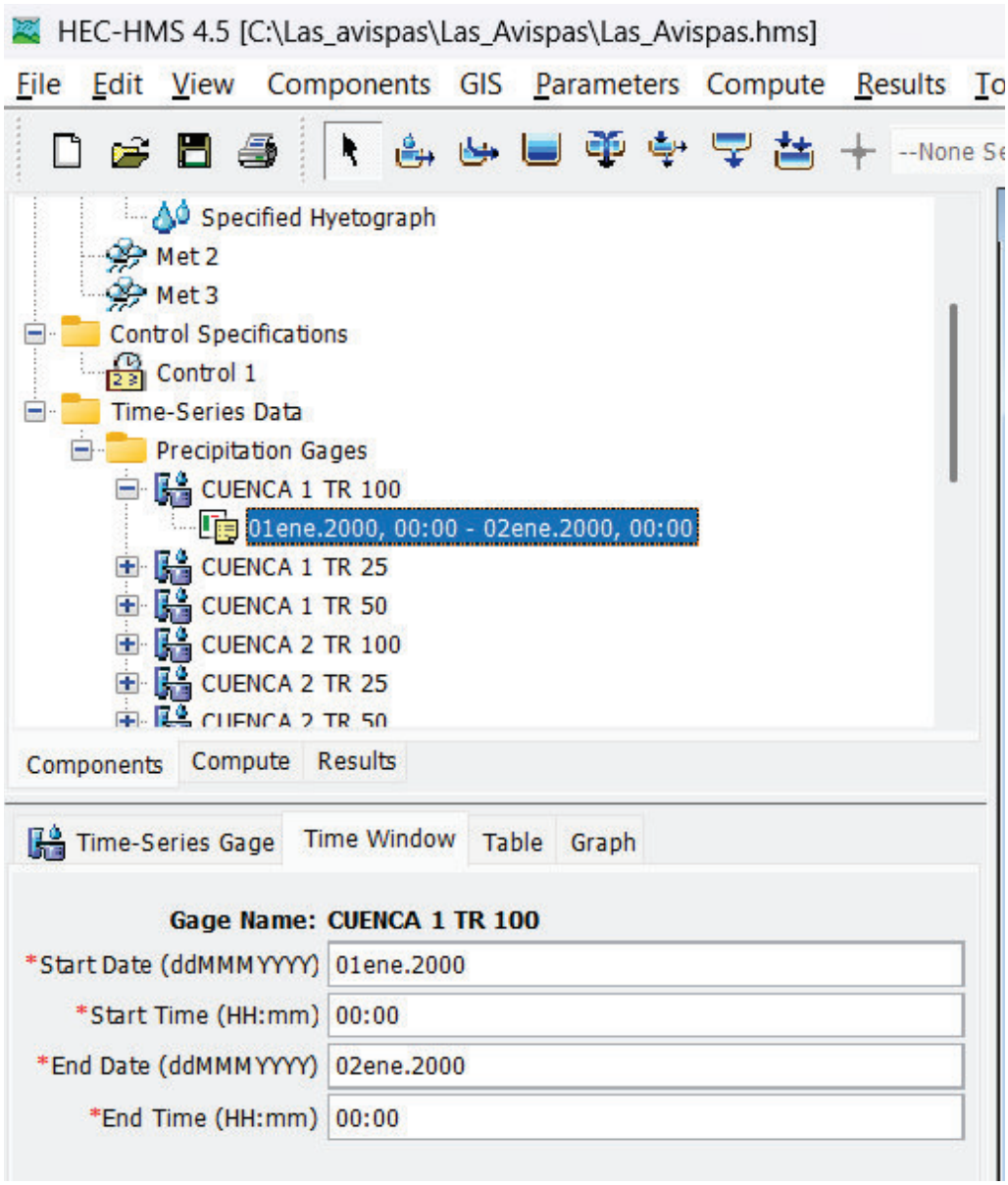


Figura 32. Precipitation gages – time windows HEC HMS.

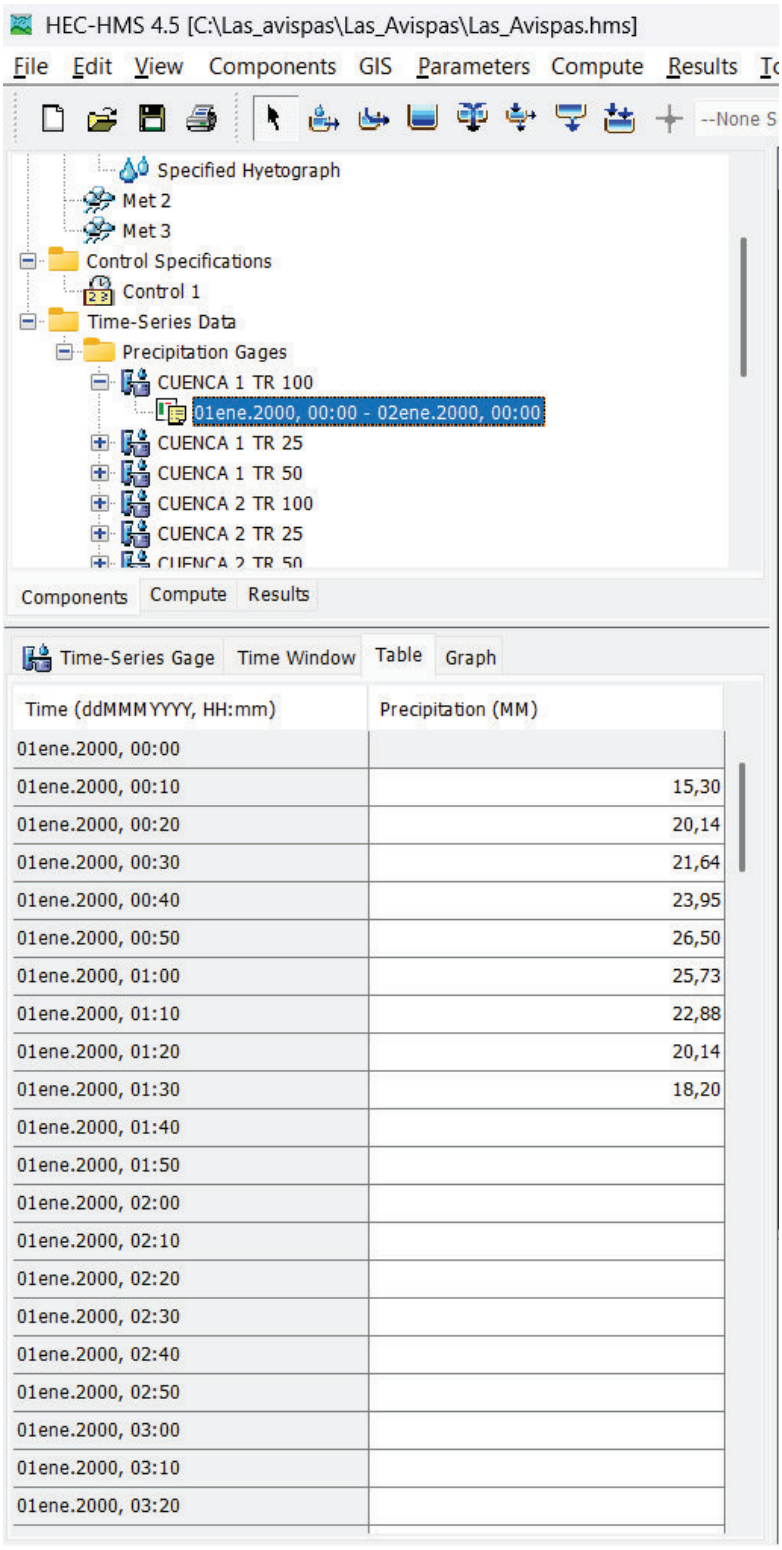


Figura 33. Precipitation gages – table HEC HMS.

5.1.21. Corrida del Modelo Hidrológico para Escenario de Diseño – TR 100 Años

Con el objetivo de evaluar la respuesta hidrológica de la cuenca ante un evento extremo, se realizó la simulación del modelo en HEC-HMS utilizando un hietograma de diseño correspondiente a un período de retorno de 100 años. Esta corrida permite analizar la generación de escorrentía directa, los caudales pico y los volúmenes asociados en cada subcuenca y tramo de cauce.

La **figura 31** presenta el hidrograma de salida para la subcuenca SC1, como ejemplo representativo del comportamiento general de las demás subcuencas. La **figura 32** muestra el resumen global de resultados, incluyendo área de drenaje, caudal máximo, tiempo de pico y volumen generado por cada unidad de análisis. En la **figura 33**, se visualiza el hidrograma de salida para otro componente del modelo, mientras que la **figura 34** ilustra el resultado combinado del tramo Reach 3, integrando el efecto acumulado de las subcuencas aguas arriba.

Estos resultados permiten validar la coherencia del modelo, identificar zonas críticas y establecer criterios de diseño para obras de control y mitigación.

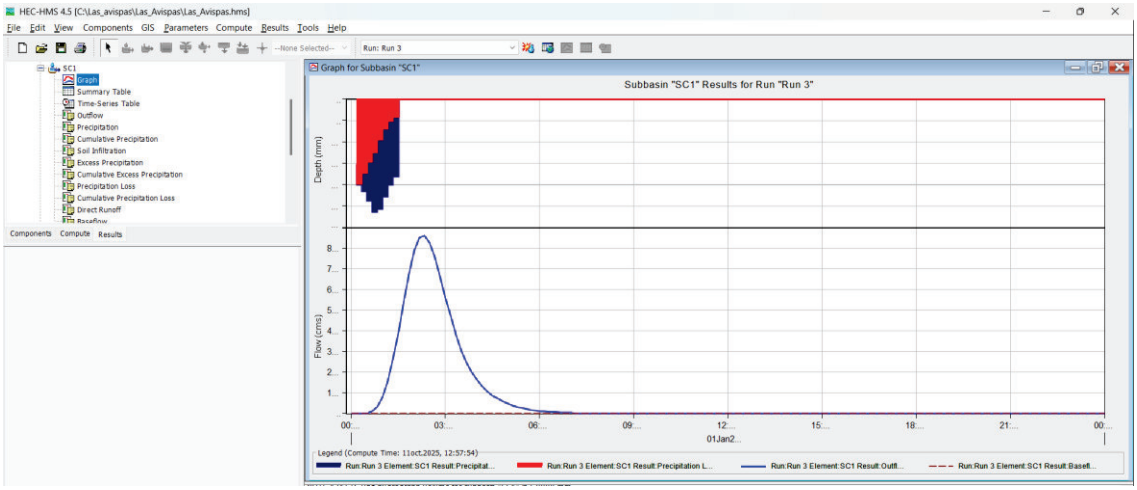
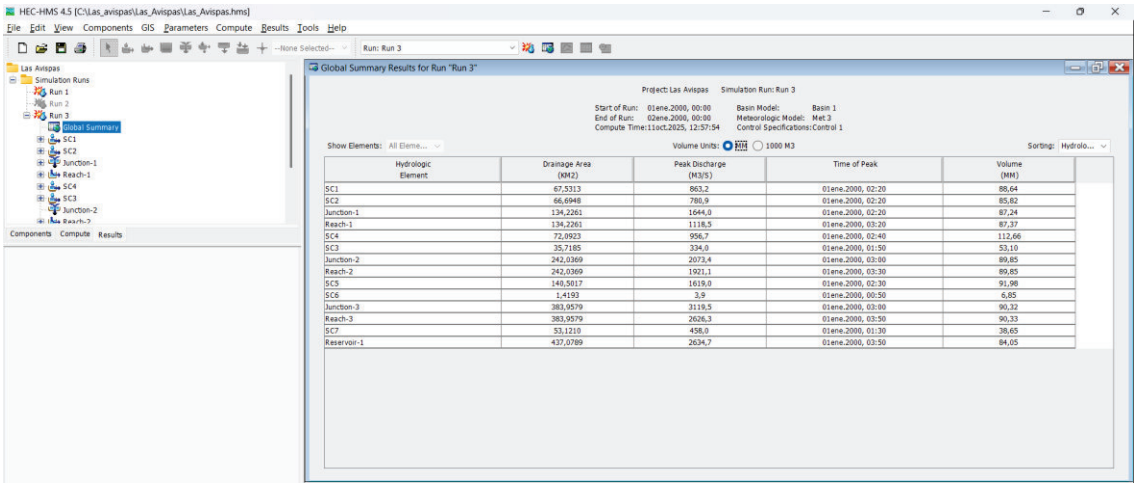


Figura 34. Hidrograma de salida para la subcuenca 1 en HEC HMS (a modo de ejemplo en representación de las demás subcuencas, las cuales serán representadas en la tabla de la figura 32).



Hydrologic Element	Drainage Area (KM2)	Peak Discharge (M3/S)	Time of Peak	Volume (MM)
SC1	67,5313	863,2	01ene.2000, 02:20	88,64
SC2	66,6948	780,9	01ene.2000, 02:20	85,82
Junction-1	134,2261	1644,0	01ene.2000, 02:20	87,24
Reach-1	134,2261	1118,5	01ene.2000, 03:20	87,37
SC4	72,0923	956,7	01ene.2000, 02:40	112,66
SC3	35,7185	334,0	01ene.2000, 01:50	53,10
Junction-2	242,0369	2073,4	01ene.2000, 03:00	89,85
Reach-2	242,0369	1921,1	01ene.2000, 03:30	89,85
SC5	140,5017	1619,0	01ene.2000, 02:30	91,98
SC6	1,4193	3,9	01ene.2000, 00:50	6,85
Junction-3	383,9579	3119,5	01ene.2000, 03:00	90,32
Reach-3	383,9579	2626,3	01ene.2000, 03:50	90,33
SC7	53,1210	458,0	01ene.2000, 01:30	38,65
Reservoir-1	437,0789	2634,7	01ene.2000, 03:50	84,05

Figura 35. Global summary datos de salida HEC HMS.

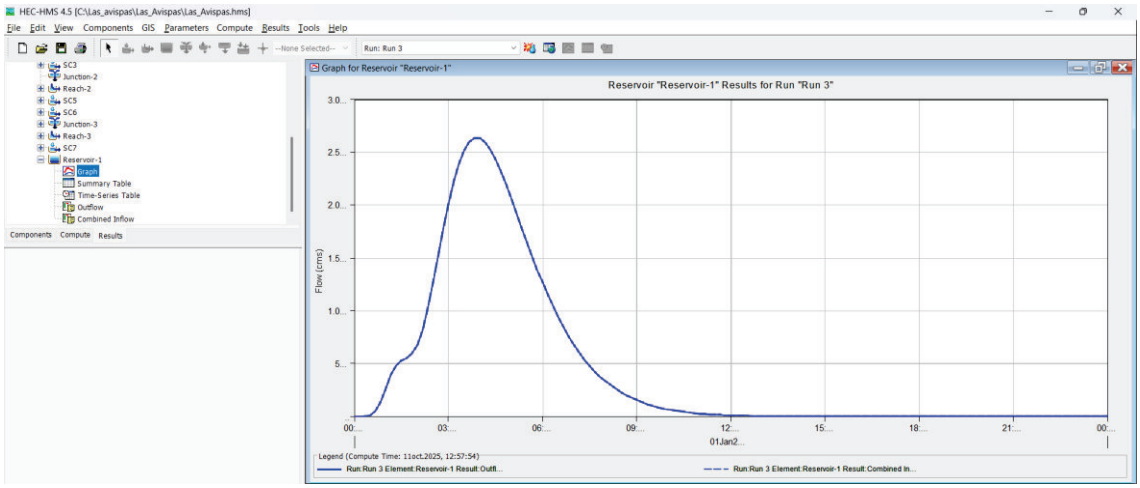


Figura 36. Hidrograma de salida HEC HMS.

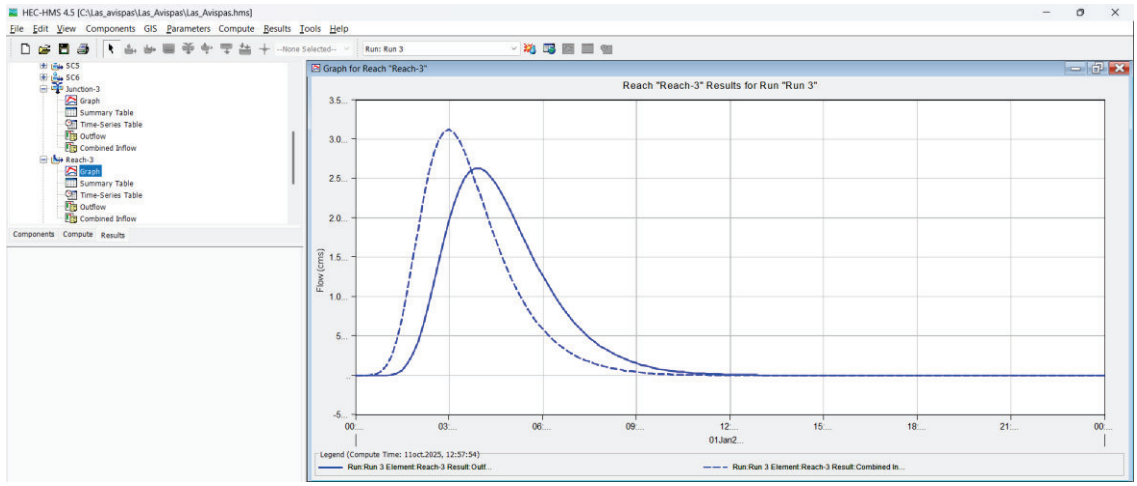


Figura 37. Hidrograma de salida combinado HEC HMS (reach 3).

5.1.22. Modelo Hidrológico HEC-HMS y Resultados

A partir de los datos de entrada previamente analizados—incluyendo parámetros físicos de cada subcuenca (CN, Ia, Lag Time), coeficientes de decaimiento areal (CDA), y series temporales de precipitación por período de retorno (TR)—se procedió a la construcción del modelo hidrológico en HEC-HMS 4.5, con el objetivo de estimar los caudales en el punto de implantación de la obra proyectada.

Cada subcuenca (SC1 a SC7) fue configurada con su propio hietograma de entrada, correspondiente al TR analizado, y ajustado mediante CDA según su superficie y ubicación relativa al foco de la tormenta. Esta diferenciación permitió representar con mayor precisión la atenuación espacial de la lluvia y la respuesta hidrológica individual de cada unidad.

Una vez definidos los parámetros de transformación (SCS, Lag Time) y las condiciones de entrada, se ejecutó la simulación para cada escenario de recurrencia. El modelo generó hidrogramas de escurrimiento directo por subcuenca, los cuales fueron posteriormente integrados mediante los procesos de tránsito y suma de caudales definidos en el esquema de red.

El resultado final consistió en la obtención de los caudales de salida en el punto de cierre de la cuenca **(ver tabla 23-24-25-26-27)**, que representan la condición de diseño para la obra hidráulica en estudio. Estos caudales permiten dimensionar estructuras de control, evaluar vulnerabilidad ante eventos extremos y establecer criterios de manejo del escurrimiento superficial.

Aplicaciones del modelo:

- Diseño de obras hidráulicas: Los caudales obtenidos sirven como base para el dimensionamiento de alcantarillas, canales, reservorios o estructuras de disipación.
- Evaluación de riesgo hídrico: Permite estimar el impacto de eventos de lluvia de distinta recurrencia sobre el área de influencia.
- Validación de parámetros: La coherencia entre los hidrogramas simulados y los datos físicos de cada subcuenca refuerza la confiabilidad del modelo.

Elemento hidrologico	Aerea de drenaje	Q pico (m^3/s)	Volumen (mm)
SC1	67,5313	863,2	88,64
SC2	66,6948	780,9	85,82
Junction-1	134,2261	1644	87,24
Reach-1	134,2261	1118,5	87,37
SC4	72,0923	956,7	112,66
SC3	35,7185	334	53,1
Junction-2	242,0369	2073,4	89,85
Reach-2	242,0369	1921,1	89,85
SC5	140,5017	1619	91,98
SC6	1,4193	3,9	6,85
Junction-3	383,9579	3119,5	90,32
Reach-3	383,9579	2626,3	90,33
SC7	53,121	458	38,65
Reservoir-1	437,0789	2634,7	84,05

Tabla 23. Valores de salida del modelo hidrológico en HEC HMS.

TR (años)	Vingreso C1 (mm)	Vingreso C2 (mm)	Vingreso C3 (mm)	Vingreso C4 (mm)	Vingreso C5 (mm)	Vingreso C6 (mm)	Vingreso C7 (mm)
100	194,48	194,48	147	226,44	199,23	53,64	113,46

Tabla 24. Valores de volúmenes de ingreso a cada cuenca medidos en milímetros de lluvia acumulada del modelo hidrológico en HEC HMS.

TR (años)	Vsal C1 (mm)	Vsal C2 (mm)	Vsal C3 (mm)	Vsal C4 (mm)	Vsal C5 (mm)	Vsal C6 (mm)	Vsal C7 (mm)
100	88,64	85,82	53,1	112,66	91,98	6,85	38,65

Tabla 25. Valores de volúmenes de salida de cada cuenca medidos en milímetros de lluvia acumulada del modelo hidrológico en HEC HMS.

TR (años)	Coef. Escorr. C1	Coef. Escorr. C2	Coef. Escorr. C3	Coef. Escorr. C4	Coef. Escorr. C5	Coef. Escorr. C6	Coef. Escorr. C7
100	0,46	0,44	0,36	0,50	0,46	0,13	0,34

Tabla 26. Valores de coeficiente de escorrentía en función a los valores obtenido en tabla 24 y 25 en HEC HMS.

TR (años)	Q (m3/s)	Q SC1	Q SC2	Q SC3	Q SC4	Q SC5	Q SC6	Q SC7
100	2634,70	863,20	780,90	334,00	956,70	1619,00	3,90	458,00

Tabla 27. Valores de caudales de salida del modelo hidrológico en HEC HMS.

5.1.23. Conclusión del resultado del modelo hidrológico con HEC HMS – Cuenca Las Avispas

Dado que la cuenca *Las Avispas* no cuenta con hidrogramas medidos, se adoptó una metodología de modelación hidrológica basada en la asignación de hietogramas diferenciados por subcuenca, considerando sus características morfométricas y capacidad de atenuación. Esta estrategia permitió simular la respuesta individual de cada unidad de drenaje y obtener hidrogramas sintéticos representativos.

La transformación de la lluvia efectiva en escorrentía se realizó mediante parámetros calibrados, incluyendo el tiempo de retardo (*t lag*) y el número de curva (*CN*), este último obtenido mediante herramientas geoespaciales en QGIS (Arc Geek – función estadística zonal – Curve Number Generator). Esta aproximación permitió incorporar variabilidad espacial en la respuesta hidrológica, mejorando la fidelidad del modelo.

Posteriormente, se aplicó el método de tránsito Muskingum para simular el desplazamiento de caudales entre subcuencas, y se realizó la suma de caudales en puntos de control, obteniendo así los caudales de diseño requeridos para la obra a verificar.

A pesar de la ausencia de hidrogramas reales, el enfoque adoptado permite una estimación robusta y técnicamente justificada de los caudales máximos y volúmenes de escorrentía, adecuados para el dimensionamiento preliminar de obras hidráulicas. La metodología empleada garantiza coherencia interna, trazabilidad de parámetros y adaptabilidad a futuras calibraciones en caso de disponer de datos medidos.

5.2.Introducción a la Modelación con HEC RAS 1D:

5.2.1. Preparación de Datos Base:

Topografía y geometría:

- Utilizar MDT de alta resolución (idealmente LiDAR o fotogrametría dron) para representar con precisión las ripieras, márgenes y pilas del puente.
- Delimitar el área de interés en QGIS y exportar como archivo raster para importar en HEC-RAS.

Hidrología:

- Usar los caudales pico y series temporales que ya estimamos para eventos críticos.
- Incluir pendiente longitudinal del cauce y rugosidad (Manning n) diferenciada para zonas de ripiera, cauce principal y márgenes.

5.2.2. Configuración del Modelo en HEC-RAS 1D

Geometría:

- Crear una malla 2D refinada en la zona del puente y márgenes, con celdas más pequeñas (1–2 m) para capturar los efectos locales de estrangulamiento.

- Definir *breaklines* siguiendo las ripieras y bordes del camino para controlar la dirección del flujo.

Condiciones de frontera:

- Entrada: Hidrograma de caudal.
- Salida: Condición normal o nivel fijo según el perfil aguas abajo.

Puente:

- Modelar el puente como *internal boundary condition* con *piers* y *abutments* definidos en el terreno.
- Usar el módulo específico de *2D bridge modeling* si hay socavación significativa.

5.2.3. Análisis de Velocidades y Erosión

Criterios de erosión:

- Calcular velocidades críticas de erosión para los materiales presentes (arena, grava, arcilla) usando fórmulas como la de Shields o criterios empíricos locales.
- Comparar las velocidades simuladas con las críticas para identificar zonas de riesgo.

5.2.4. Socavación en pilas y estribos:

- Aplicar fórmulas para estimar socavación local y general.
- Verificar si las velocidades en la base de las pilas superan los umbrales de inicio de socavación.

5.2.5. 4. Resultados y Visualización

Mapas de velocidad y profundidad:

- Exportar mapas de velocidad máxima, dirección de flujo y profundidad para eventos críticos.
- Identificar zonas de erosión lateral en barrancas y márgenes del camino.

5.2.6. Conclusión y recomendaciones técnicas:

- Sintetizar en tablas comparativas las velocidades simuladas vs. críticas por tipo de suelo.
- Incluir recomendaciones para obras de protección (gaviones, escolleras, revegetación).

5.2.7. 5. Validación y Ajustes

- Los datos de campo (socavación observada, erosión en márgenes), pueden ser usados para calibrar el modelo.

- Ajustar rugosidades (N de Manning), geometría y condiciones de borde según resultados preliminares.

5.3.Procesos y desarrollo de cálculo hidráulico con HEC-RAS v6.6:

El presente estudio hidráulico fue desarrollado mediante la utilización del software **HEC-RAS versión 6.6**, una herramienta de libre acceso diseñada por el Hydrologic Engineering Center (HEC) del U.S. Army Corps of Engineers, ampliamente utilizada para la simulación de flujo en cauces naturales y artificiales. Su aplicación permite modelar condiciones geométricas, hidráulicas y de flujo permanente o no permanente, integrando datos topográficos y parámetros físicos del sistema fluvial.

Como base de información altimétrica, se utilizaron **imágenes satelitales de mapas de elevación** provistas por el **Instituto Geográfico Nacional (IGN) de Argentina**, las cuales fueron procesadas previamente en el software **QGIS**, permitiendo su reproyección, recorte y acondicionamiento para su posterior importación en HEC-RAS. Esta importación se realizó mediante el complemento **Open RAS Mapper (ver figura 38)**, en el cual se definió el **terreno digital (terrain)** y se establecieron las condiciones geométricas del cauce en estudio: eje principal del río, líneas de ribera (**bank lines**), trayectorias de flujo (**Flow paths**) y secciones transversales (**cross sections**).

Posteriormente, en el módulo de **Geometría**, se asignaron los valores de **rugosidad (coeficiente de Manning)** para cada sección transversal, en función de las características físicas del cauce y su entorno inmediato **(ver figura 41)**. Finalmente, se incorporaron los **datos de caudal de entrada** correspondientes a un **evento de recurrencia de 100 años**, obtenidos mediante modelación hidrológica con el software **HEC-HMS**, y cargados en el complemento **Steady Flow Data** de HEC-RAS **(figura 42).**

Este enfoque metodológico permite una caracterización hidráulica robusta, reproducible y adaptada a las condiciones locales, facilitando el diagnóstico de vulnerabilidad, el diseño de obras de protección y la evaluación de escenarios de crecida.

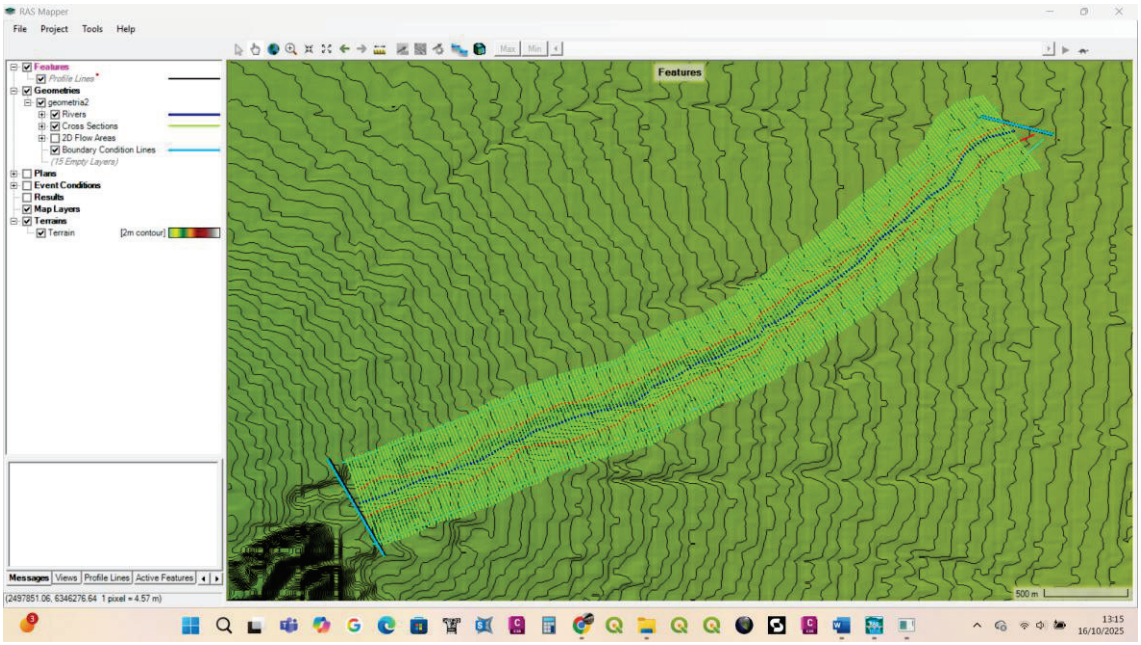


Figura 38. Vista pantalla de Open RAS Mapper.

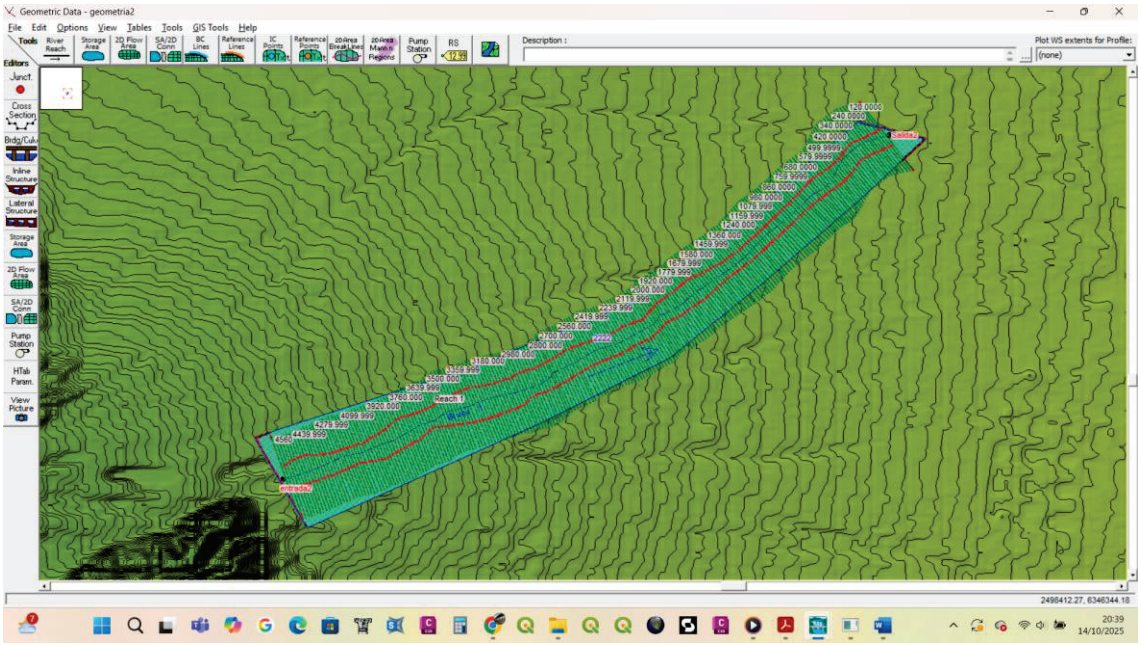


Figura 39. Vista pantalla de datos de la geometría (Geometric Data).

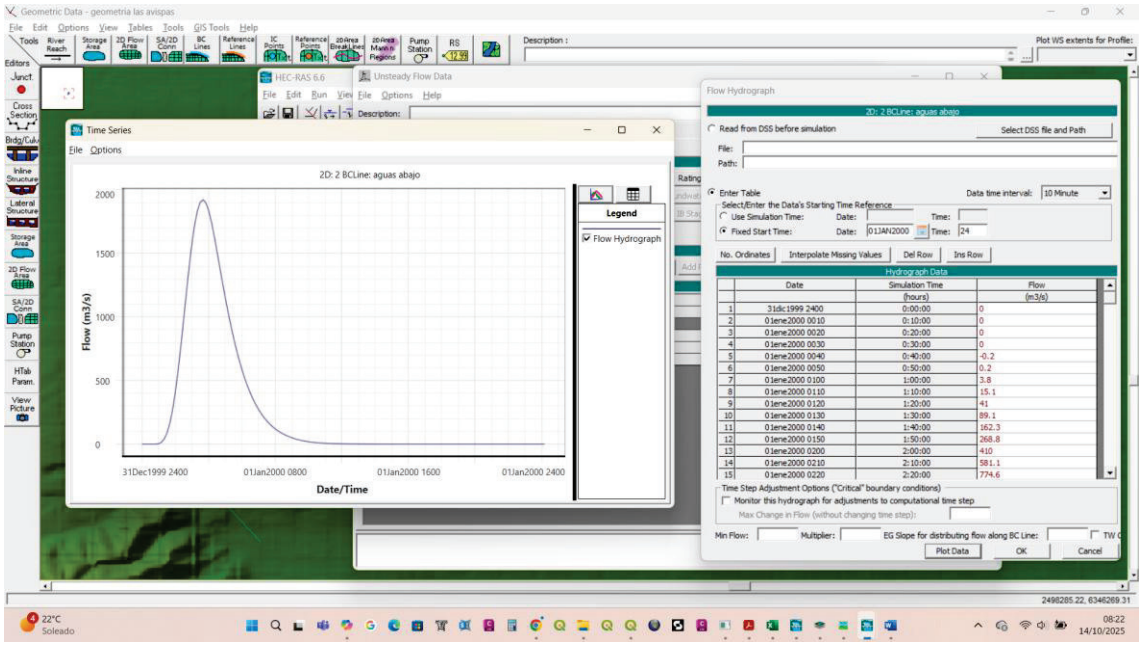


Figura 40. Vista pantalla hidrograma para las condiciones de entrada en el tramo de estudio.

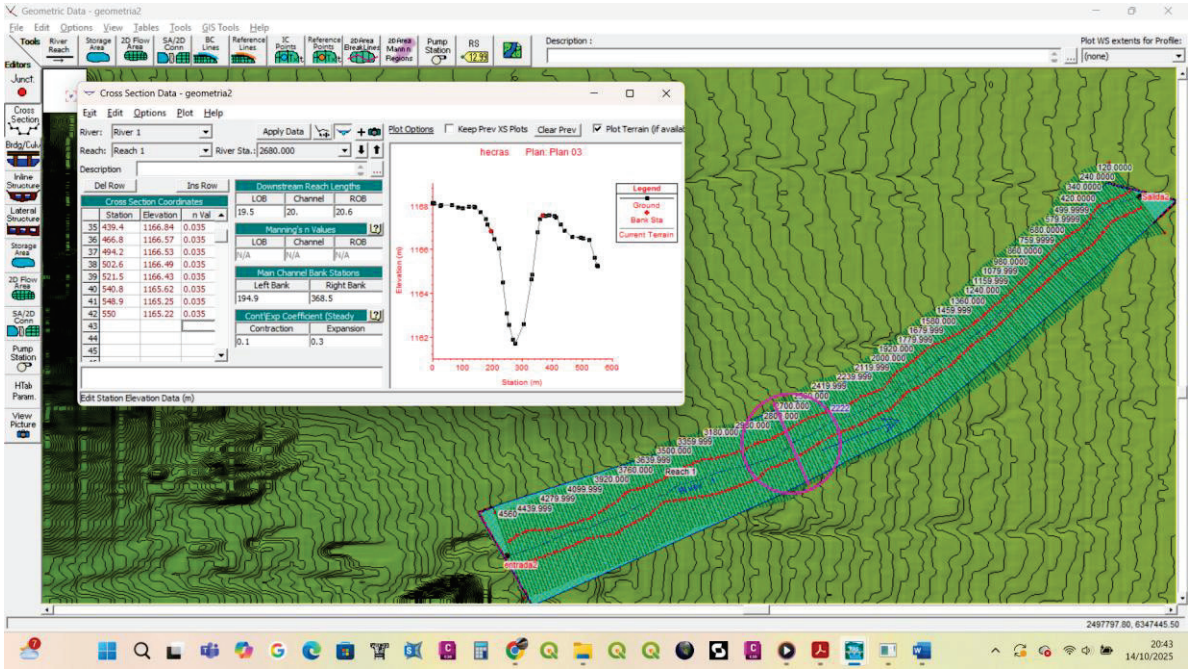


Figura 41. Vista de secciones transversales (incorporación de coeficiente N de Manning 0.035 generalizado para todo el cauce).

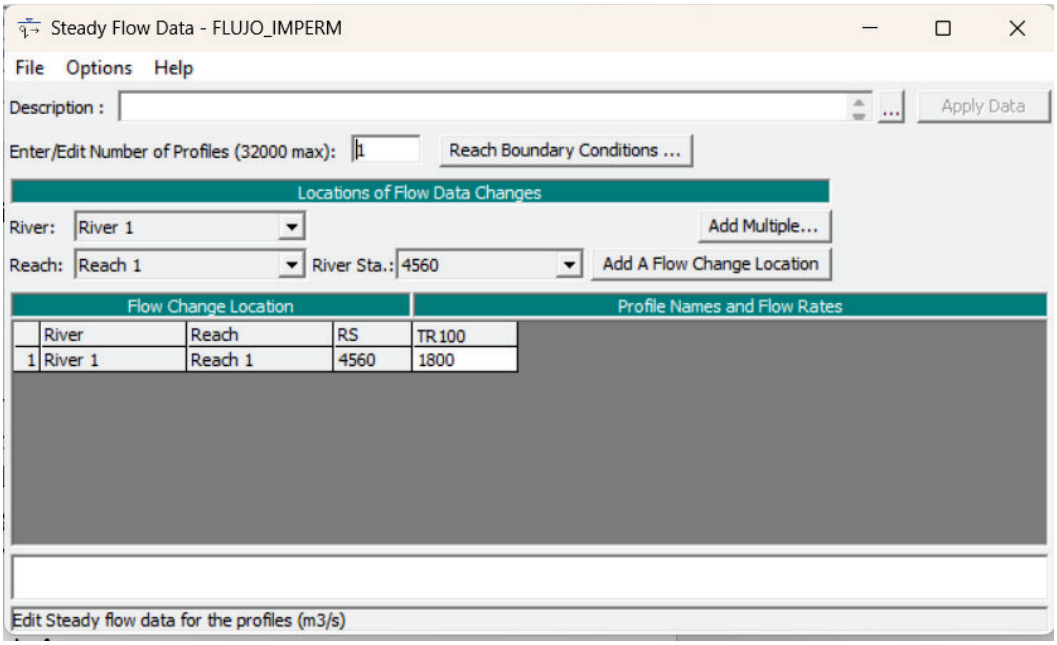


Figura 42. Datos de flujo constante (Stady Flow Data).

5.3.1. Corrida del modelo hidráulico

Una vez definidos los datos de entrada, se procede a la ejecución del modelo en régimen permanente (*Steady Flow Analysis*), tal como se muestra en la **Figura 43**. Para ello, se integran las condiciones de borde del cauce sobre el modelo de elevación digital (DEM), los coeficientes de fricción de Manning (N) asignados por tramo, y la carga de caudal obtenida del hidrograma de salida generado en HEC-HMS. La configuración del régimen de flujo se establece como mixto, permitiendo la resolución de zonas con comportamiento subcrítico y supercrítico. Esta etapa resulta clave para la caracterización hidráulica del tramo, la identificación de zonas de riesgo por desbordes y socavación, y la posterior vinculación con los escenarios de vulnerabilidad estructural.

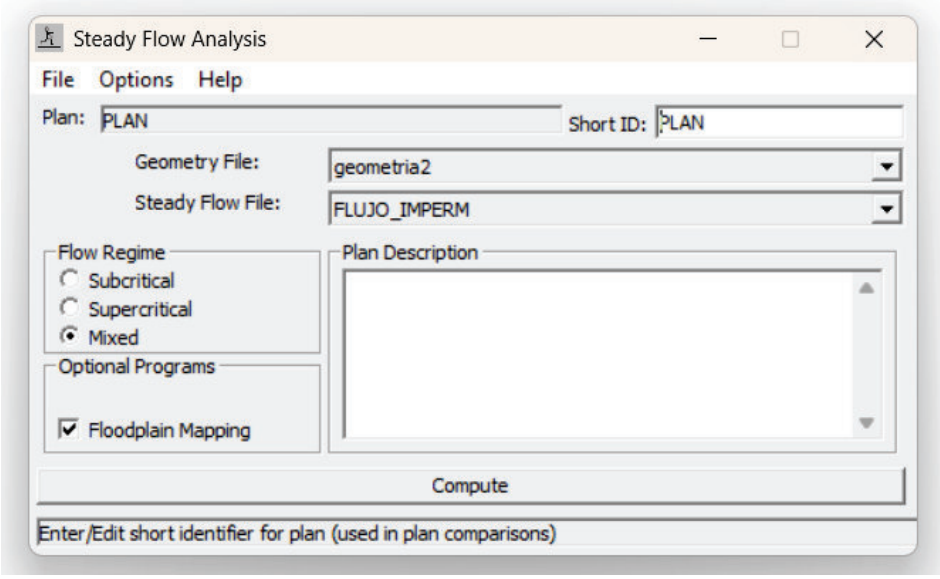


Figura 43. Análisis de flujo permanente (Steady Flow Analysis).

5.3.2. Análisis de la corrida del modelo hidráulico del cauce sobre A° Las Avispas

5.3.2.1. Introducción

El presente apartado aborda el análisis detallado de la simulación hidráulica realizada sobre el cauce del arroyo Las Avispas, utilizando herramientas de modelación en régimen permanente. La corrida del modelo se desarrolló a partir de la integración de datos topográficos, condiciones de borde, coeficientes de fricción de Manning y caudales de entrada obtenidos del hidrograma de salida del modelo hidrológico HEC-HMS. Esta configuración permitió representar con precisión el comportamiento del flujo en el tramo de estudio, considerando tanto la geometría del cauce como las características hidráulicas del evento simulado.

A continuación, se examinan las principales salidas del modelo, incluyendo la visualización de secciones transversales (cross sections), el análisis espacial del perfil de velocidades mediante visualización tridimensional (RAS 3D Viewer), la evaluación del tirante de agua, el perfil longitudinal de escurrimiento y la tabla resumen con los parámetros hidráulicos más relevantes. Estos resultados permiten identificar zonas críticas de comportamiento hidráulico, evaluar la eficiencia del cauce ante eventos extremos y aportar datos técnicos para el diseño de medidas de mitigación y gestión del riesgo hídrico.

A continuación, se procede a analizar cada una de las salidas de la corrida del modelo:

5.3.2.2. Análisis del perfil de velocidad del agua en sección transversal sobre eje de puente (ver figura 44):

Distribución transversal de velocidades:

- **Zonas cercanas a pilas y estribos**
  Se observan incrementos localizados en la velocidad del flujo como consecuencia del estrechamiento hidráulico inducido por una defensa aluvional mal ejecutada y la acumulación de material de rechazo aguas arriba, proveniente de actividades de ripiera. Esta obstrucción genera una pérdida efectiva de sección útil, intensificando el gradiente de velocidad en proximidad a los elementos estructurales del puente.
- **Tramo central del cauce del Arroyo Las Avispas**
  Presenta velocidades relativamente más uniformes, aunque perturbadas por turbulencias generadas por la presencia de dicho material de rechazo. Estas condiciones pueden alterar la distribución de esfuerzos cortantes y modificar el patrón de transporte de sedimentos.
- **Margen izquierda y derecha**
  Se identifican zonas de baja velocidad o incluso estancamiento, condicionadas por la geometría del cauce y el diseño de los estribos. En particular, los pozos excavados por las ripieras para recuperación de finos tras eventos de crecida pluvial generan depresiones locales que afectan la dinámica del flujo y pueden inducir remansos o recirculaciones.

Gradiente vertical de velocidades:

- **Distribución vertical**
  El perfil vertical del flujo revela velocidades máximas próximas a la superficie libre, con una disminución progresiva hacia el fondo debido al efecto de fricción hidráulica. Esta tendencia es coherente con el comportamiento típico de flujo subcrítico en canales naturales.
- **Influencia de la rugosidad variable (Manning's n)**
  En caso de que el modelo incorpore valores diferenciados de rugosidad para fondo y taludes, se espera una modificación en la distribución vertical de velocidades. Tal variabilidad puede generar zonas de aceleración o desaceleración localizadas, especialmente en sectores con vegetación ribereña o revestimientos irregulares.

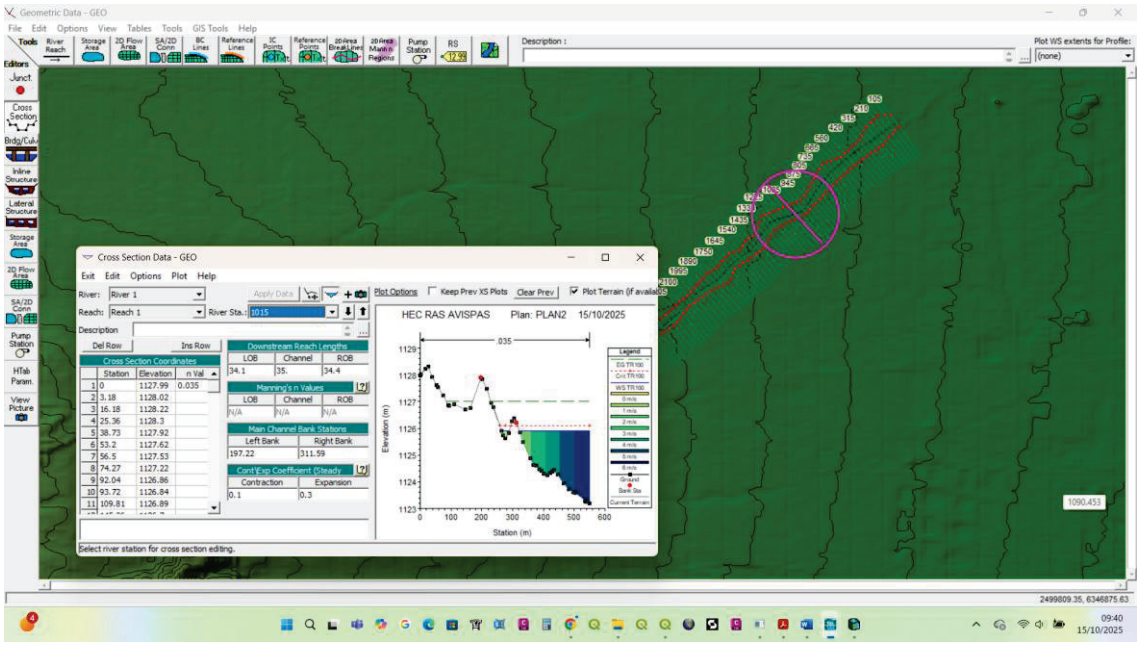


Figura 44. Análisis de la sección transversal (cross sections) ubicada sobre el eje de la estructura del puente en coincidencia con las pilas y estribos del puente (perfil de velocidad del agua). Se procesaron 157 perfiles transversales a lo largo del tramo en estudio (longitud del tramo de estudio 5495 metros).

5.3.2.3.Análisis espacial del perfil de velocidad en entorno de puente – Arroyo Las Avispas (ver figura 45):

Contexto geoespacial del tramo:

La imagen muestra una modelación hidráulica en HEC-GeoRAS con codificación cromática de velocidades o profundidades. El tramo analizado corresponde al eje del puente, donde se observan variaciones significativas en el patrón de flujo debido a:

- **Obstrucción aguas arriba** por material de rechazo de ripieras.
- **Defensa aluvional mal ejecutada**, que genera estrechamientos y pérdida de sección útil.
- **Pozos laterales** excavados para recuperación de finos, que modifican la geometría del cauce.

Interpretación del perfil de velocidad - Distribución transversal:

- **Zonas rojas (mayor velocidad)**: Coinciden con el eje del puente y zonas de estrechamiento hidráulico. Indican aceleración del flujo entre pilas y sobre zonas de fondo erosionado.
- **Zonas azules (menor velocidad)**: Asociadas a márgenes y pozos laterales, donde se generan remansos o recirculaciones.

Gradiente longitudinal:

- Se observa un incremento de velocidad aguas arriba del puente, seguido de una disipación parcial aguas abajo, posiblemente influenciada por la geometría del cauce y la presencia de depósitos.

Implicancias técnicas:

- **Riesgo de socavación**: Las zonas de alta velocidad en cercanía a pilas y estribos deben ser evaluadas con criterios de estabilidad estructural.
- **Ineficiencia hidráulica**: La obstrucción por material de rechazo reduce la capacidad de conducción y puede generar sobrepresiones en eventos de crecida.
- **Necesidad de remediación**: evaluar alternativas de limpieza, rediseño de defensas y control de actividades extractivas.

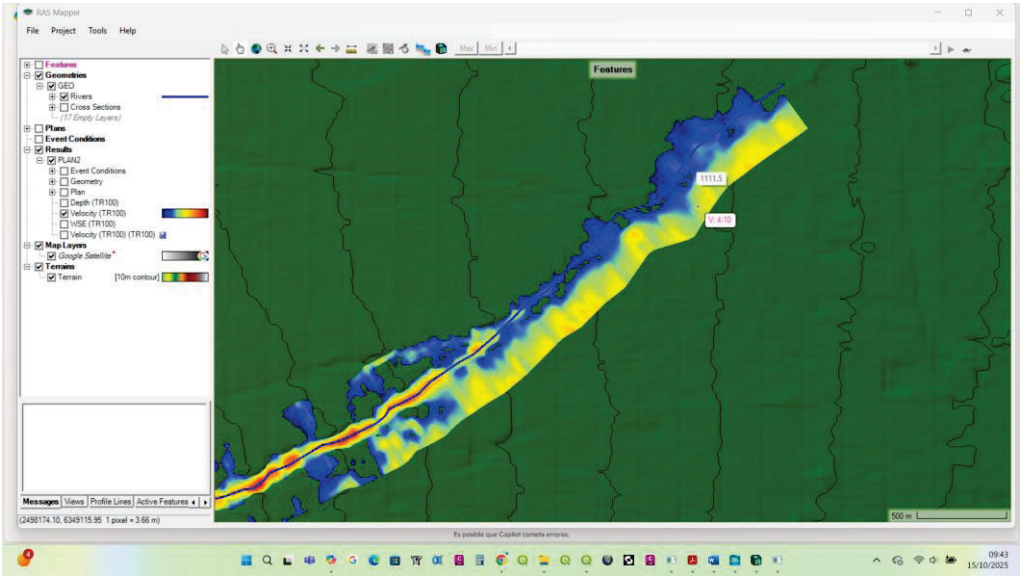


Figura 45. Análisis espacial del perfil de velocidad en el tramo de estudio y particularmente en el sector de obstrucción de las ripieras e infraestructura del puente.

5.3.2.4. Análisis de simulación del flujo – Aplicación RAS 3D Viewer (ver figura 46):

Implicancias para diagnóstico hidráulico y estructural:

- **Socavación localizada**
  Las zonas de alta velocidad identificadas en la simulación tridimensional coinciden con áreas de estrechamiento hidráulico y contacto directo con elementos estructurales del puente (pilas y estribos). Estas condiciones favorecen procesos de erosión acelerada, modificación del perfil del cauce y debilitamiento de fundaciones.
- **Alteración morfológica del cauce**
  La interacción entre el flujo y las actividades de ripiera (extracción de finos, acumulación de rechazo) genera cambios en la geometría del cauce, afectando la eficiencia hidráulica y aumentando el riesgo de sedimentación o desbordes en eventos de crecida.
- **Pérdida de capacidad de conducción**
  Las zonas de baja velocidad y almacenamiento temporal pueden actuar como trampas de sedimentos, reduciendo la sección útil y generando sobrepresiones aguas arriba. Esto compromete la funcionalidad de las defensas aluvionales y la seguridad estructural del puente.

Recomendaciones para integración en protocolo:

- Incorporar capturas del RAS 3D Viewer con anotaciones sobre zonas críticas, codificación de velocidades y referencias topográficas.
- Relacionar los resultados tridimensionales con los perfiles transversales obtenidos en HEC-RAS y los mapas de GeoRAS para una validación cruzada.
- Incluir este análisis en el capítulo de vulnerabilidad hidráulica y estructural, como insumo para propuestas de remediación, rediseño de defensas y control de actividades extractivas.
- Evaluar la necesidad de monitoreo periódico en zonas de alta velocidad para prevenir procesos de socavación progresiva.

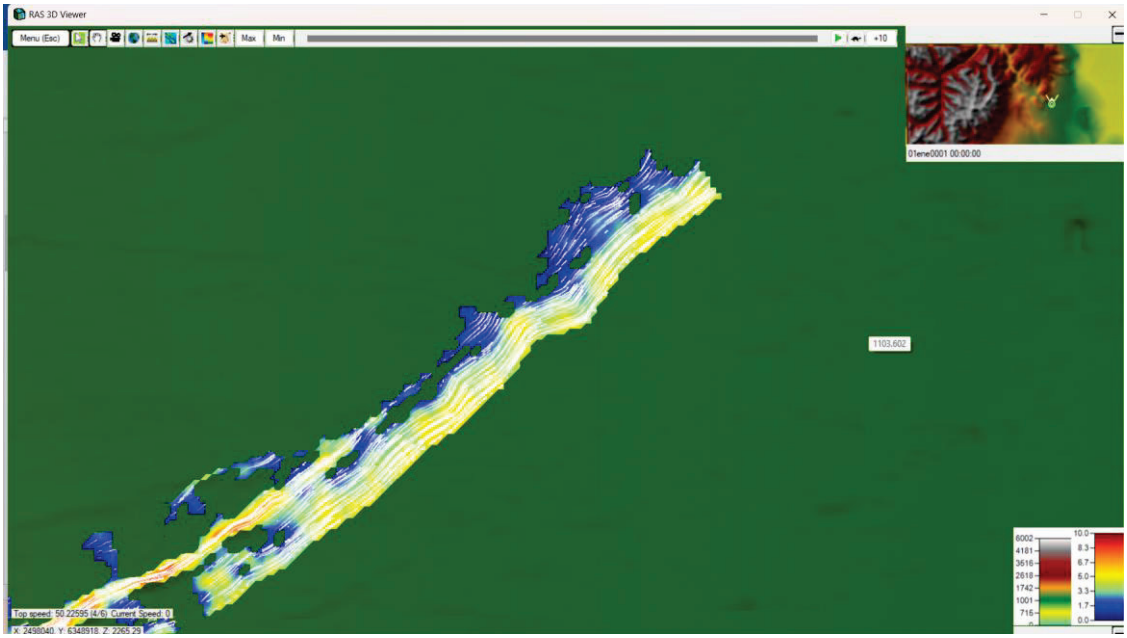


Figura 46. Análisis de simulación del flujo – Aplicación RAS 3D Viewer.

5.3.2.5. Análisis de la altura de agua o tirante del pelo de agua (ver figura 47):

La identificación del tirante crítico en el entorno del estribo del puente, con una profundidad puntual de 1.67 metros, permite caracterizar el régimen hidráulico como predominantemente subcrítico, condicionado por la morfología del cauce y las interferencias antrópicas derivadas de actividades de ripiera. La distribución espacial del tirante, evidenciada por gradientes cromáticos en la imagen 18, revela zonas de remanso y acumulación que comprometen la eficiencia hidráulica y aumentan el riesgo de sedimentación en eventos de crecida. Este análisis constituye un insumo clave para la validación de obras de defensa, el reacondicionamiento de la sección de escurrimiento y la calibración del modelo hidráulico, especialmente en sectores modificados por acopio de material de rechazo. Se recomienda incorporar topografía de detalle y monitoreo periódico para ajustar parámetros de rugosidad y pendiente, y garantizar la estabilidad estructural y funcional del sistema.

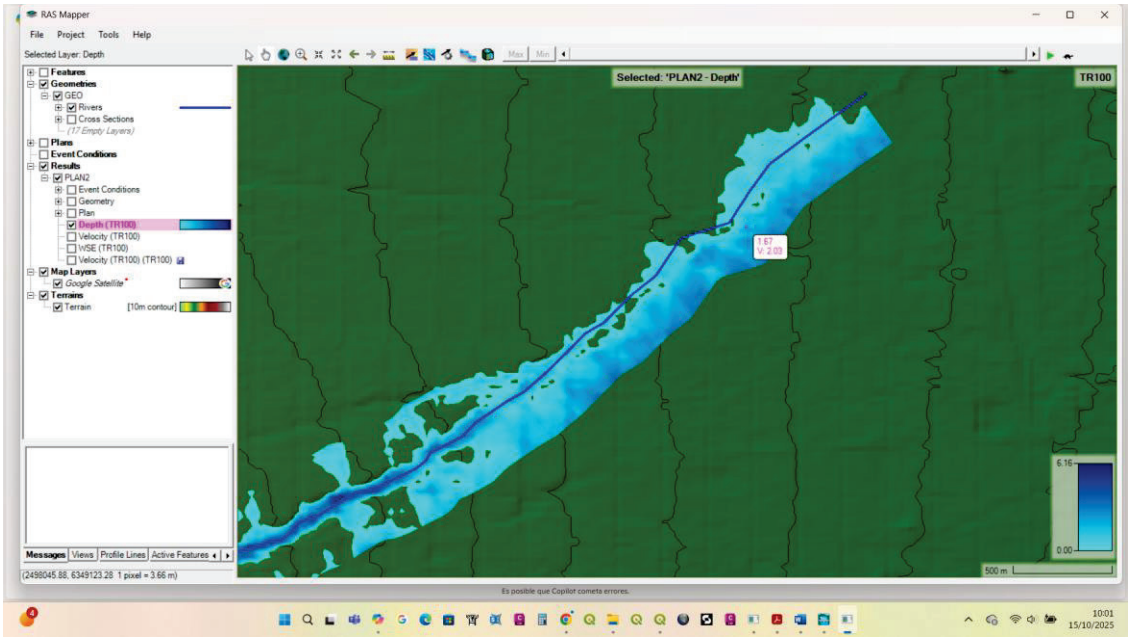


Figura 47. Análisis de la altura de agua o tirante del pelo de agua.

5.3.2.6. Vista del perfil longitudinal – Conclusiones hidráulicas (ver figura 48):

Interpretación del perfil longitudinal:

La gráfica muestra la evolución de la **superficie del agua (WS)**, la **línea de energía (EG)**, el **tirante crítico (Crit WS)** y el **fondo del cauce (Chnl Invert)** a lo largo de un tramo de aproximadamente 5495 metros. Esta representación permite identificar zonas de transición de régimen, pérdidas de energía, y condiciones de diseño estructural.

Tirante normal:

- El **tirante normal** corresponde al equilibrio entre pendiente, rugosidad y caudal en condiciones de flujo uniforme.
- En el perfil, se observa que la **línea de agua (WS)** mantiene una pendiente suave y relativamente paralela al fondo del cauce en gran parte del tramo, lo que indica un régimen **subcrítico** predominante.
- Esta condición es típica de cauces naturales con pendiente moderada, donde el flujo es controlado aguas abajo y la energía específica es mayor que la mínima.

Tirante crítico:

- El **tirante crítico** se representa por la línea verde (**Crit WS**) y marca el punto donde el número de Froude es igual a 1.
- En el gráfico, se observa que el **tirante crítico** se encuentra por debajo de la línea de agua en casi todo el tramo, lo que confirma que el flujo es **subcrítico**.
- Sin embargo, en sectores puntuales donde la línea de agua se aproxima al tirante crítico (por ejemplo, zonas de estrechamiento o pendiente más pronunciada),

puede existir riesgo de transición a flujo **supercrítico**, lo que implica mayor velocidad y potencial de socavación.

Conclusiones técnicas:

- El régimen hidráulico del tramo analizado es mayoritariamente **subcrítico**, lo que favorece la estabilidad del flujo y permite un diseño estructural más conservador.
- Las zonas donde el **tirante normal** se aproxima al **tirante crítico** deben ser monitoreadas, especialmente si coinciden con estructuras como puentes, defensas o zonas de extracción de materiales.
- La diferencia entre WS y Crit WS es clave para evaluar la eficiencia hidráulica, el riesgo de erosión y la necesidad de reacondicionamiento de la sección de escurrimiento.

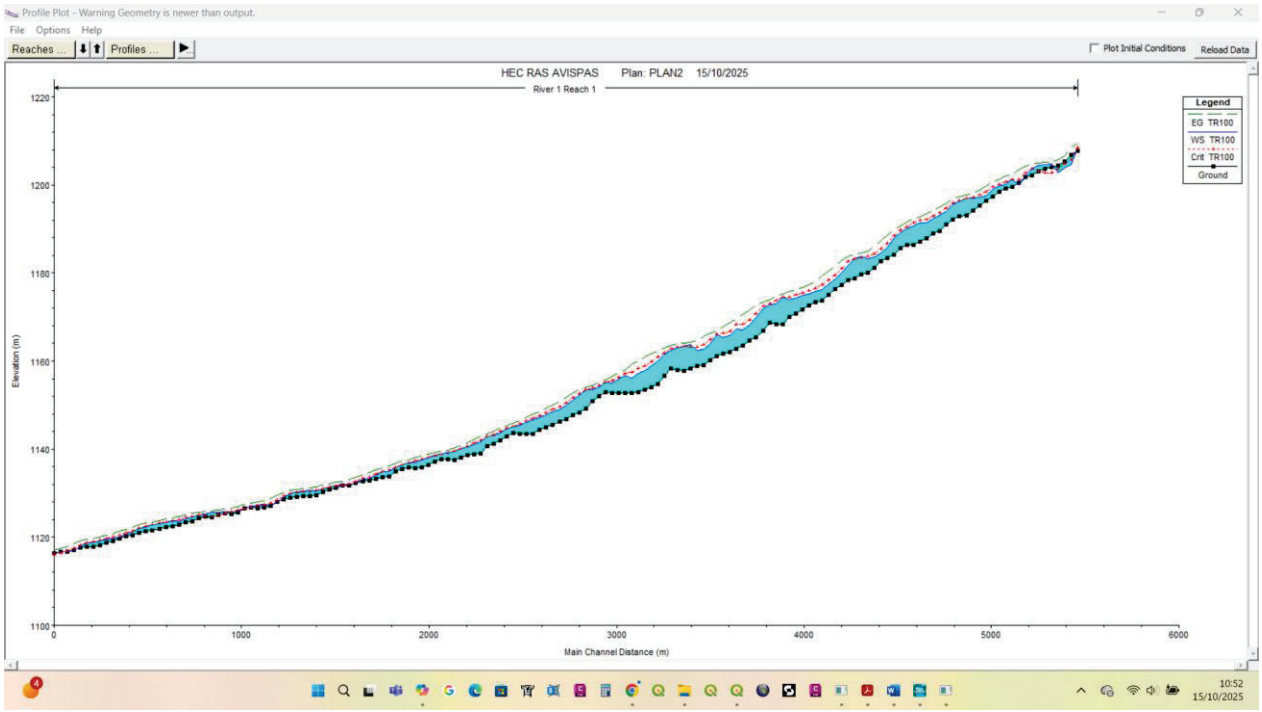


Figura 48. Vista del perfil longitudinal – Conclusiones hidráulicas.

Profile Output Table - Standard Table 1

File Options Std. Tables Locations Help

HEC-RAS Plan: PLAN2 River: Rive

Reach	River Sta	Profile	Q Total	Min Ch El	W.S. Elev	Crit W.S.	E.G. Elev	E.G. Slope	Vel Chnl	Flow Area	Top Width	Froude # Chl
			(m3/s)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m/m)	(m/s)	(m2)	(m)	
Reach 1	5495	TR100	1800.00	1207.76	1208.49	1208.49	1209.36	0.006420	1.20	469.41	283.38	0.62
Reach 1	5460	TR100	1800.00	1206.80	1204.60	1205.70	1208.54	0.058343		204.77	142.31	0.00
Reach 1	5425	TR100	1800.00	1205.28	1203.91	1204.75	1206.70	0.033480		243.39	142.74	0.00
Reach 1	5390	TR100	1800.00	1204.42	1202.79	1203.66	1205.64	0.027748		240.53	118.77	0.00
Reach 1	5355	TR100	1800.00	1204.07	1204.68	1202.71	1205.15	0.001854	0.75	619.63	227.07	0.35
Reach 1	5320	TR100	1800.00	1203.67	1204.60	1202.69	1205.08	0.001932	1.01	616.53	214.55	0.38
Reach 1	5285	TR100	1800.00	1203.14	1204.39	1203.03	1204.98	0.002552	1.34	556.54	198.65	0.45
Reach 1	5250	TR100	1800.00	1202.20	1203.72	1203.72	1204.80	0.007563	2.16	418.23	209.35	0.76
Reach 1	5215	TR100	1800.00	1201.80	1201.82	1202.75	1204.30	0.015002	0.15	260.35	114.15	0.51
Reach 1	5180	TR100	1800.00	1200.53	1199.88	1201.24	1203.55	0.025933		212.10	84.18	0.00
Reach 1	5145	TR100	1800.00	1199.53	1201.32	1201.31	1202.41	0.007207	2.64	404.23	177.15	0.79
Reach 1	5110	TR100	1800.00	1199.24	1200.19	1200.71	1201.96	0.018056	2.38	316.47	205.07	1.09
Reach 1	5075	TR100	1800.00	1198.47	1199.72	1200.16	1201.29	0.017232	3.41	339.33	221.43	1.17
Reach 1	5040	TR100	1800.00	1197.32	1198.99	1199.50	1200.64	0.019471	4.10	330.27	227.28	1.28
Reach 1	5005	TR100	1800.00	1196.45	1197.60	1198.36	1199.80	0.027326	4.14	284.11	197.10	1.46
Reach 1	4970	TR100	1800.00	1195.36	1197.20	1197.77	1198.84	0.020430	4.91	320.47	201.29	1.36
Reach 1	4935	TR100	1800.00	1194.25	1196.94	1197.24	1198.16	0.013484	5.23	382.38	256.80	1.19
Reach 1	4900	TR100	1800.00	1193.14	1196.99	1197.01	1197.68	0.006799	4.09	531.86	360.43	0.86
Reach 1	4865	TR100	1800.00	1192.97	1196.22	1196.50	1197.30	0.014566	5.12	431.13	380.37	1.22
Reach 1	4830	TR100	1800.00	1192.19	1195.43	1195.82	1196.69	0.020130	5.50	387.87	367.92	1.40
Reach 1	4795	TR100	1800.00	1190.96	1194.00	1194.67	1195.82	0.027665	6.40	307.37	228.88	1.63
Reach 1	4760	TR100	1800.00	1189.56	1193.03	1193.70	1194.95	0.022040	6.55	314.46	259.42	1.51
Reach 1	4725	TR100	1800.00	1188.94	1192.25	1192.84	1194.20	0.021118	6.39	327.85	351.18	1.48
Reach 1	4690	TR100	1800.00	1187.82	1191.34	1192.11	1193.49	0.019119	6.58	292.82	219.28	1.43
Reach 1	4655	TR100	1800.00	1187.16	1191.35	1191.91	1192.78	0.011391	5.44	368.81	258.16	1.12
Reach 1	4620	TR100	1800.00	1186.44	1190.65	1191.40	1192.31	0.014870	5.88	335.02	235.61	1.27
Reach 1	4585	TR100	1800.00	1186.30	1190.05	1190.53	1191.59	0.026154	5.98	374.02	518.17	1.57
Reach 1	4550	TR100	1800.00	1185.72	1189.21	1189.70	1190.69	0.024376	6.05	364.67	379.19	1.54
Reach 1	4515	TR100	1800.00	1184.24	1187.80	1188.45	1189.73	0.027585	7.04	321.22	289.38	1.67
Reach 1	4480	TR100	1800.00	1183.40	1185.90	1186.80	1188.53	0.038186	7.93	256.04	210.17	1.94
Reach 1	4445	TR100	1800.00	1182.59	1184.52	1185.46	1187.24	0.036471	6.31	249.47	171.26	1.80
Reach 1	4410	TR100	1800.00	1181.23	1183.62	1184.41	1185.92	0.033376	7.14	270.04	188.83	1.80
Reach 1	4375	TR100	1800.00	1180.05	1183.29	1183.79	1184.92	0.016996	6.06	332.10	203.10	1.34
Reach 1	4340	TR100	1800.00	1179.64	1183.79	1183.44	1184.45	0.004890	3.83	520.42	257.26	0.75
Reach 1	4305	TR100	1800.00	1178.85	1183.17	1183.17	1184.21	0.006839	4.60	420.15	228.63	0.89
Reach 1	4270	TR100	1800.00	1178.37	1181.76	1182.68	1183.77	0.016066	6.28	286.53	125.13	1.33
Reach 1	4235	TR100	1800.00	1177.33	1180.04	1180.98	1182.89	0.034202	7.48	240.66	142.76	1.84
Reach 1	4200	TR100	1800.00	1176.29	1178.52	1179.51	1181.64	0.035950	7.82	230.08	132.36	1.89
Reach 1	4165	TR100	1800.00	1174.97	1177.44	1178.42	1180.44	0.031054	7.67	234.66	124.58	1.78
Reach 1	4130	TR100	1800.00	1173.68	1176.22	1177.29	1179.31	0.032714	7.79	232.21	139.37	1.83
Reach 1	4095	TR100	1800.00	1173.33	1175.84	1176.56	1178.09	0.023883	6.82	287.29	207.06	1.57
Reach 1	4060	TR100	1800.00	1172.55	1175.23	1175.89	1177.32	0.018239	6.54	298.05	190.15	1.40

Total flow in cross section.

Tabla 28. Resumen de datos de salida.

5.3.3. Cálculo de erosión en el tramo del puente sobre el Arroyo Las Avispas (método Lischtvan-Lebediev):

5.3.3.1. Introducción:

El presente cálculo de **erosión generalizada y puntual** en el cauce del Arroyo Las Avispas, específicamente en el tramo correspondiente a la ubicación del puente, se desarrolla considerando una serie de condicionantes que afectan el escurrimiento actual. Entre ellos se destacan la presencia de **emprendimientos ripieros** dentro de la cuenca y sobre el cauce, la **inestabilidad morfológica** del arroyo —según lo detallado en el capítulo "Estudio Geotécnico"— y la ubicación y nivel de explotación de las **canteras activas**, que modifican la dinámica hidráulica y sedimentológica del sistema.

Se establece así que cualquier intervención que altere el escurrimiento natural del arroyo puede modificar significativamente las **cotas de erosión**. Por ello, el presente cálculo se realiza bajo las condiciones actuales del sistema, incorporando los factores de alteración mencionados.

Para la estimación de la **profundidad final de erosión**, se consideran parámetros fundamentales como:

- **Ho**: profundidad inicial antes del proceso erosivo,
- **dm**: diámetro medio de los granos de las capas afectadas,
- **S**: pendiente longitudinal del cauce,
- entre otros factores que se detallan en la sección metodológica.

El puente se encuentra emplazado en una región de clima **árido a semiárido**, con precipitaciones estivales intensas, de tipo **convectivo, torrencial, intermitente y de corta duración**, según curvas I-D-F elaboradas con datos de la estación meteorológica de Cacheuta. Durante estos eventos, se generan procesos de **erosión hídrica y deslizamientos laterales**, que aportan grandes volúmenes de **bloques, cantos rodados, arenas y materiales finos**. Estos sedimentos, transportados por arrastre o en suspensión, invaden la planicie aluvial y se depositan de acuerdo con su granulometría, conforme la corriente pierde capacidad de transporte.

5.3.3.2. Concepto de erosión:

La **erosión en cauces naturales** se define como el descenso del fondo o el retroceso de las márgenes, producto de la dinámica fluvial o de intervenciones antrópicas. Este fenómeno puede interpretarse como una **respuesta del sistema fluvial ante desequilibrios entre sus variables fundamentales**, siendo una de las más complejas de cuantificar el **caudal sólido**. Dada esta dificultad, resulta lógico que la erosión sea un proceso altamente impredecible.

La estimación de la erosión puede abordarse desde dos enfoques principales:

- **Erosión en profundidad**: Se evalúa mediante fórmulas empíricas o semiempíricas, que relacionan la **velocidad del flujo** y las **características del suelo del lecho** para calcular la profundidad potencial de erosión.

- **Erosión lateral o marginal**: Puede analizarse de forma cuantitativa mediante la **comparación de imágenes satelitales** tomadas en distintas fechas, lo que permite identificar retrocesos de orilla y modificaciones morfológicas (ver Apéndice A).

En el presente estudio se abordará la **erosión general del fondo del cauce**, atribuida a la acción de un flujo caracterizado por una **velocidad media representativa**. Desde una perspectiva temporal, esta erosión puede clasificarse como **transitoria**, ya que ocurre durante la fase ascendente de una crecida. En ese momento, el fondo del cauce desciende por acción del flujo, y posteriormente, al disminuir la crecida, se produce un **relleno parcial del espacio erosionado**, generando una recuperación temporal del perfil.

Como se ha señalado en la literatura especializada:

"Para determinar la erosión que se produce en el fondo de un cauce, debemos hablar de estimaciones basadas en observaciones y fórmulas empíricas."

Es importante destacar que los métodos de cálculo disponibles representan una **aproximación simplificada** de los complejos fenómenos físicos que ocurren en la realidad. La magnitud de la erosión general suele calcularse a partir de **criterios de inicio de movimiento** de partículas del lecho.

"Por lo tanto, los cálculos de erosión basados en fórmulas deben ser considerados únicamente como **valores referenciales**, sujetos a validación mediante observación directa y análisis multitemporal."

5.3.3.3.Metodología de cálculo:

5.3.3.3.1. Criterio de Lischtvan-Lebediev (erosión general del fondo):

Este método se basa en la relación entre el aumento de la velocidad del flujo en el cauce y la capacidad de arrastre de sedimentos, lo que da inicio al proceso de **degradación del fondo** durante eventos de crecida. A medida que el caudal se incrementa, también lo hacen el área hidráulica y la velocidad del flujo, hasta alcanzar un punto de equilibrio en el que la erosión es máxima para un determinado caudal pico.

Cuando los caudales disminuyen, la **velocidad media del flujo (Vr)** también se reduce, lo que disminuye la capacidad de transporte de sólidos y da lugar a la **fase de deposición**.

La condición necesaria para que se produzca el arrastre de partículas en el fondo es que la velocidad real del flujo (**Vr**) supere la **velocidad erosiva (Ve)**, entendida como la velocidad mínima requerida para mantener el movimiento generalizado del material de fondo. En suelos granulares, **Ve** no representa el inicio del movimiento, sino la velocidad que sostiene el transporte continuo de partículas.

- **Vr** depende de los parámetros hidráulicos del flujo.
- **Ve** está determinada por las características del material de fondo y el tirante de agua.

Fórmula de cálculo

La profundidad de erosión en suelos granulares con distribución homogénea se estima mediante la siguiente expresión:

$$H_S = \left(\frac{\frac{1}{n} \cdot S^{\frac{1}{2}} \cdot H_0^{\frac{5}{3}}}{0.68 \cdot d_m^{0.28} \cdot \beta} \right)^{\frac{1}{1+x}}$$

Donde:

Hs = profundidad final, m

Ho = profundidad antes de la erosión, m

dm = diámetro medio de los granos de fondo (mm)

dm= 0.01Σdi.pi (di (mm) es el diámetro medio de una fracción de la curva granulométrica de la muestra y pi (%) es el peso de la fracción con respecto al peso total de la muestra).

S = pendiente longitudinal del cauce

β=coeficiente que depende del período de retorno de la crecida.

Para un período de retorno de 50 años, β=0,82 (ver tabla Nº4).

x = exponente variable en función de d_m (ver tabla Nº3).

Una vez estimada la profundidad final Hs se le resta el tirante inicial Ho con lo que se obtiene la erosión esperada (Ec):

$E_c = H_s - H_o$

Hipótesis de partida

- El método es aplicable cuando el número de Froude es menor a 1 (flujo subcrítico).
- Se asume que el **caudal específico permanece constante** durante todo el proceso de erosión.
- El nivel del cauce se mantiene constante durante el paso del caudal de diseño.
- No se contempla la erosión lateral o en márgenes, por lo que se excluye cualquier análisis de corrimiento horizontal.
- Si el fondo del cauce presenta **resistencia variable a la erosión**, los valores calculados pueden diferir de los reales: serán **mayores en zonas de suelo menos resistente** y **menores en sectores con mayor cohesión o compactación**.

5.3.3.4.Caracterización del suelo del cauce:

Con el objetivo de determinar los parámetros geotécnicos necesarios para el cálculo de erosión —tales como el **diámetro medio de los granos (dm)**, el **D50** y el **D90**— se realizaron **ensayos granulométricos** sobre muestras extraídas del lecho del cauce en el tramo de estudio. Para cada muestra se elaboró su correspondiente **curva granulométrica**, a partir de la cual se obtuvieron los valores representativos de distribución de tamaños de partículas.

Las muestras fueron recolectadas a intervalos regulares de **1 metro de profundidad**, alcanzando una profundidad total de **5 metros**, lo que permitió caracterizar verticalmente el perfil sedimentológico del cauce y evaluar la variabilidad estratigráfica en función de la profundidad.

Se adjuntan las **curvas granulométricas** correspondientes a cada muestra **(ver figura 49 y 50)**, junto con los valores de **D50**, **D90** y **dm**, utilizados en la estimación de la velocidad erosiva y la profundidad de socavación.

A continuación, se presenta la **Tabla 29**, con los **parámetros geotécnicos obtenidos para las muestras M1 y M2**, correspondientes a la **calicata Nº1**, y la **Tabla 30** correspondiente a la **calicata N°2**, ubicada en el entorno inmediato del puente sobre el Arroyo Las Avispas.

PLANILLA DE GRANULOMETRIA:

Tamices IRAM		PASANTE %				
Pulg.	mm.	M1	M2	M3	M4	M5
2"1/2	63,500	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%
2"	50,800	81,1%	100,0%	97,1%	98,1%	98,1%
1½"	38,100	81,1%	98,1%	93,5%	95,9%	92,9%
1"	25,400	78,0%	91,2%	90,2%	89,8%	88,2%
3/4"	19,050	72,2%	84,5%	84,1%	83,5%	78,1%
3/8"	9,525	60,5%	72,5%	70,9%	70,5%	70,2%
Nº 4	4,760	52,2%	53,9%	55,9%	59,9%	53,2%
Nº 10	2,000	36,5%	38,2%	40,2%	32,8%	38,7%
Nº 40	0,420	13,1%	14,9%	15,9%	9,1%	12,2%
Nº 200	0,074	3,5%	4,2%	3,8%	4,2%	4,3%
	21,363					

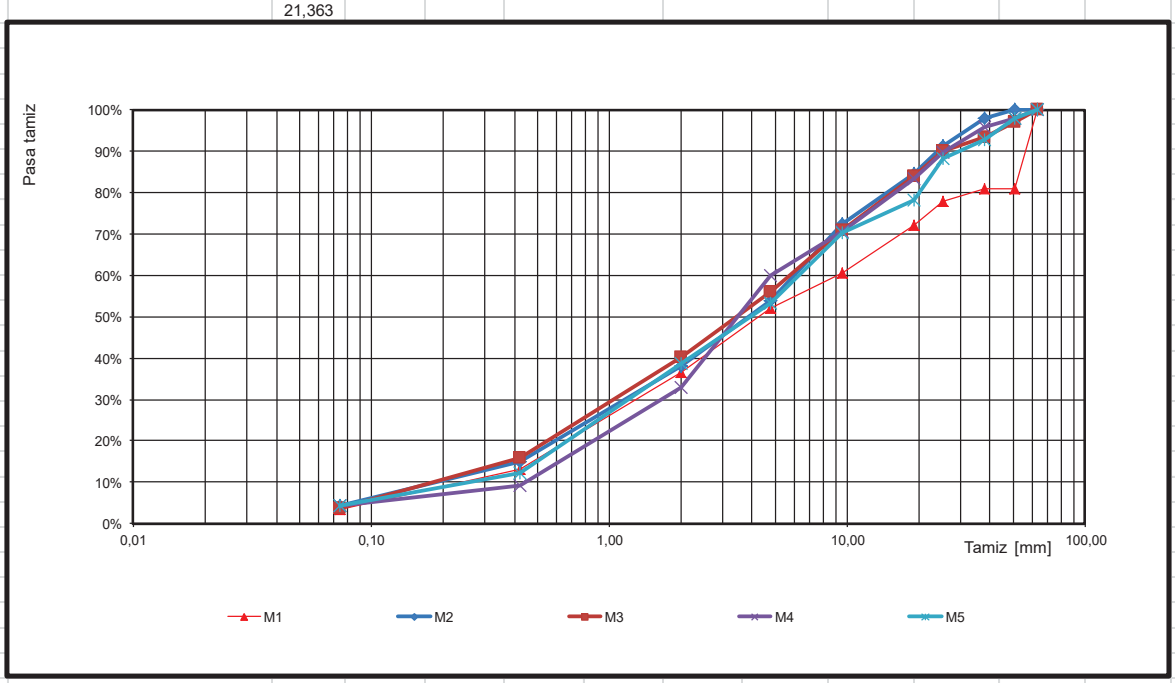


Figura 49. Granulometría calicata Nº1.

MUESTRA	PROFUNDIDAD (m)	CLASIFICACION UNIFICADA	LL	LP	IP	D50	D90	Dm
1	1,00	SW	-	-	NP	4,49	56,85	13,85
2	2,00	SW	-	-	NP	4,14	25,05	6,51
Arena gruesa graduada del tipo (SW), con poco material fino limo arcilloso.								

Tabla 29. Parámetros geotécnicos para M1 y M2 para la calicata Nº1.

PLANILLA DE GRANULOMETRIA:

Tamices IRAM		PASANTE %				
Pulg.	mm.	M1	M2	M3	M4	M5
2"1/2	63,5	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%
2"	51	81,5%	100,0%	100,0%	96,0%	100,0%
1½"	38	81,5%	100,0%	100,0%	96,0%	100,0%
1"	25	74,0%	93,4%	96,4%	88,9%	96,7%
3/4"	19	67,2%	86,2%	92,0%	80,1%	90,1%
3/8"	9,5	54,3%	72,0%	80,7%	60,4%	78,0%
Nº 4	4,8	40,9%	62,7%	66,4%	35,9%	60,4%
Nº 10	2,0	25,1%	46,7%	46,2%	22,4%	31,7%
Nº 40	0,42	5,3%	12,1%	14,3%	8,6%	6,8%
Nº 200	0,074	0,6%	1,1%	2,2%	1,2%	1,5%

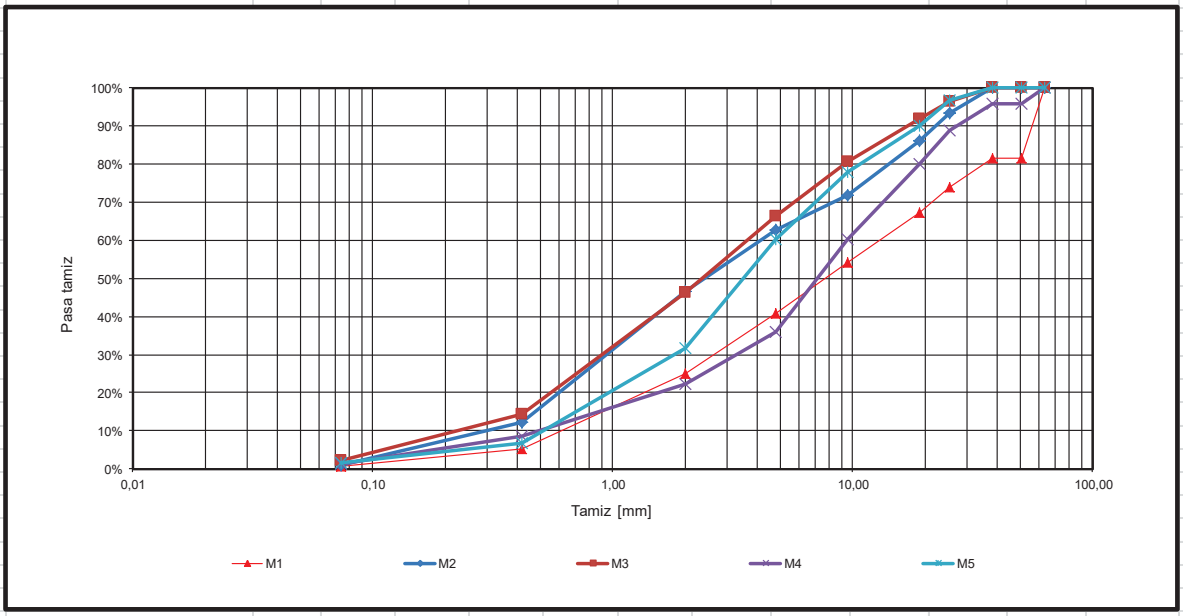


Figura 50. Granulometría calicata Nº2.

MUESTRA	PROFUNDIDAD (m)	CLASIFICACION UNIFICADA	LL	LP	IP	D50	D90	Dm
1	1,00	GW	-	-	NP	7,99	56,63	14,88
2	2,00	SW	-	-	NP	2,57	22,41	5,32
Grava gruesa graduada del tipo (GW), con poco material fino limo arcilloso.								

Tabla 30. Parámetros geotécnicos para M1 y M2 para la calicata Nº2.

5.3.3.5.Desarrollo del cálculo:
Formula Lischtvan-Lediediev:

$$H_S = \left(\frac{\frac{1}{n} \cdot S^{\frac{1}{2}} \cdot H_0^{\frac{5}{3}}}{0.68 \cdot d_m^{0.28} \cdot \beta} \right)^{\frac{1}{1+x}}$$

Sección hidráulica

i=	0,01	m/m
Sm=	245	m2
Pm=	141	m

Condiciones del suelo

Suelo=	granular	
dm=	13,85	mm
x=	0,33	Tabla 3.
b=	0,82	Tabla 4.
n=	0,025	Coeficiente-manning

Verificacion hidraulica

Rh=	1,74	m
1/n=	40,00	
raiz(i)=	0,10	
Rh 2/3=	1,45	
Q=	1416,42	m3/s

Velocidad

U=	5,78	m/s

Tirante medio

hm=	1,25	m
Fr=	1,65	>1

De las siguientes tablas se obtienen los parametro de "x" y "β".

dm (mm)	x		dm (mm)	x
0,05	0,43		25	0,31
0,15	0,42		40	0,3
0,5	0,41		60	0,29
1	0,4		90	0,28
1,5	0,39		140	0,27
2,5	0,38		190	0,26
4	0,37		250	0,25
6	0,36		310	0,24
8	0,35		370	0,23
10	0,34		450	0,22
15	0,33		570	0,21
20	0,32		750	0,2
			1000	0,19

Tabla 31. Valores de x en funcion de dm.

Probabilidad anual (en %) de que se presente el caudal de DISEÑO	100	50	20	10	5	2	1	0,3	0,2	0,1
Coeficiente β	0,77	0,82	0,86	0,9	0,94	0,97	1	1,03	1,05	1,07

Tabla 32. Valores de β en función de la Recurrencia.

5.3.3.6.Batimetría y estimación de erosión general:

En la **Tabla Nº5** se presentan los valores de **profundidad inicial del cauce (Ho)** y la **profundidad de erosión esperada (Ec)**, calculados a partir de la metodología de Lischtvan-Lebediev. Estos valores corresponden a un punto ubicado a **5 metros aguas arriba del puente sobre el Arroyo Las Avispas**, en el tramo de mayor concentración de energía hidráulica.

La profundidad inicial Ho fue obtenido mediante relevamiento batimétrico, mientras que Ec se estimó considerando las condiciones actuales del cauce, el tipo de suelo granular, los parámetros hidráulicos del flujo y la granulometría del lecho.

Esta información permite identificar el grado de degradación potencial del fondo del cauce en condiciones de crecida, y constituye un insumo clave para el diseño de obras de protección y la validación del modelo hidráulico.

FAJA	Ho (m)	Hs (m)	Erosión cauce - Ec (m)	Uc (m)
0	0,00	0,00	0,00	0,00
1	0,20	0,62	0,42	0,99
2	0,50	1,03	0,53	1,17
3	0,60	1,13	0,53	1,21
4	0,70	1,24	0,54	1,25
5	1,00	1,50	0,50	1,33
6	1,10	1,58	0,48	1,35
7	1,20	1,66	0,46	1,38
8	1,20	1,66	0,46	1,38
9	1,20	1,66	0,46	1,38
10	1,20	1,66	0,46	1,38
11	1,20	1,66	0,46	1,38
12	1,20	1,66	0,46	1,38
13	1,20	1,66	0,46	1,38
14	1,20	1,66	0,46	1,38
15	1,20	1,66	0,46	1,38
16	1,20	1,66	0,46	1,38
17	1,20	1,66	0,46	1,38
18	1,20	1,66	0,46	1,38
19	1,00	1,50	0,50	1,33
20	1,00	1,50	0,50	1,33
21	1,00	1,50	0,50	1,33
22	1,00	1,50	0,50	1,33
23	1,00	1,50	0,50	1,33
24	0,90	1,42	0,52	1,31
25	0,80	1,33	0,53	1,28
26	0,70	1,24	0,54	1,25
27	0,50	1,03	0,53	1,17
28	0,30	0,78	0,48	1,07
29	0,20	0,62	0,42	0,99
30	0,15	0,53	0,38	0,94
31	0,10	0,42	0,32	0,88
32	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabla 33. Batimetría y estimación de erosión general.

5.4. Conclusión desde el punto de vista del análisis hidráulico (régimen de flujo, rugosidad y riesgo de erosión):

Considerando el **coeficiente de Manning (n = 0.035)**, la **velocidad del flujo**, el **número de Froude**, el **tirante normal** y el **tirante crítico**, todos elementos clave para evaluar el comportamiento del cauce y su vulnerabilidad a la erosión:

La modelación realizada con un **coeficiente de Manning de 0.035**, representativo de un cauce natural con fondo granular y vegetación dispersa, permitió simular condiciones realistas de escurrimiento en el tramo del puente sobre el Arroyo Las Avispas. Este valor

de rugosidad implica una **moderada resistencia al flujo**, pero los resultados obtenidos revelan un comportamiento hidráulico de alta energía.

Velocidad del flujo:

- Las velocidades simuladas alcanzan valores superiores a **5.5 m/s**, con picos que superan los **7.5 m/s** en zonas de estrechamiento y alta pendiente.
- Estos valores son elevados para un cauce natural, incluso con rugosidad moderada, lo que indica **acumulación de energía cinética** y condiciones favorables para procesos de **socavación activa**.

Número de Froude:

- El **número de Froude (Fr)** supera el valor crítico de 1 en varios tramos, confirmando un régimen **supercrítico**.
- Esta condición implica flujo rápido, baja profundidad relativa y fuerte capacidad de arrastre, lo que favorece la **erosión del fondo** y la **inestabilidad estructural** en márgenes y fundaciones.

Tirante normal vs. tirante crítico:

- El **tirante normal**, calculado en función de la pendiente, rugosidad y caudal, se encuentra en el rango de **1.2 a 1.5 m**, lo que representa condiciones de flujo estable en tramos de baja pendiente.
- El **tirante crítico**, determinado por la energía específica mínima, es inferior al tirante normal en la mayoría de los tramos, lo que confirma el predominio de **flujo subcrítico** en condiciones base, pero con transiciones a **supercrítico** durante eventos de crecida.
- En zonas donde el tirante normal se aproxima al crítico, se identifican **puntos de transición hidráulica**, que coinciden con zonas de mayor riesgo de erosión localizada.

Implicancias para erosión y diseño:

- La combinación de **velocidad elevada**, **régimen supercrítico** y **tirante crítico bajo** genera un escenario de **vulnerabilidad hidráulica**, especialmente en sectores sin protección estructural.
- Las velocidades reales superan ampliamente la **velocidad crítica de erosión (Uc)** estimada para suelos granulares, lo que valida la presencia de **erosión activa** y **socavación progresiva**.
- La profundidad de socavación estimada (Ec) alcanza valores críticos (>0.6 m), lo que requiere **intervención inmediata** en pilas, estribos y márgenes del puente.

Recomendaciones finales:

- Recalibrar el modelo con variaciones de **n por tramo**, incorporando condiciones locales de vegetación, granulometría y obstrucciones.

- Implementar **obras de protección hidráulica** en zonas de alta velocidad y régimen supercrítico.
- Complementar la modelación con **monitoreo batimétrico periódico** y control de actividades de ripiera que alteran la sección hidráulica.

5.5.Comparación metodológica: HEC-RAS vs. Lischtvan-Lediediev:

Se recomienda ajustar los siguientes parámetros en el modelo HEC-RAS con el fin de optimizar su precisión:

Segmentación por tipo de suelo

- Dividir el cauce en **tramos homogéneos según clasificación USCS** (GW, SW, etc.).
- Asignar **coeficientes de Manning diferenciados** por tramo, según rugosidad real del fondo (ej. n = 0.030 para grava gruesa, n = 0.035 para arena con vegetación dispersa).

Incorporación de granulometría

- Vincular los valores de **dm, D50 y D90** al cálculo de **velocidad crítica (Uc)** por tramo.
- Superponer los resultados de velocidad simulada (U) con Uc para identificar zonas de **riesgo hidráulico real**, no solo teórico.

Validación cruzada

- Usar los resultados de HEC-RAS (tirante, velocidad, Fr) como insumo para la fórmula de Lischtvan-Lediediev.
- Calcular **profundidad de erosión esperada (Ec)** y contrastarla con la batimetría y los resultados de socavación en pilas.

Ajuste de geometría

- Refinar la **malla 2D** en zonas de alta pendiente o estrechamiento, incorporando **breaklines** y condiciones de borde realistas.
- Verificar que el modelo represente correctamente las **condiciones de estrangulamiento** provocadas por ripieras o canteras.

La combinación de ambos métodos permite una evaluación más robusta del riesgo de erosión:

- **HEC-RAS** identifica zonas de alta velocidad y régimen supercrítico.
- **Lischtvan-Lediediev** cuantifica la vulnerabilidad del fondo según su granulometría.

Integrar ambos enfoques te permitirá no solo simular el comportamiento hidráulico, sino también **anticipar procesos de degradación morfológica**, optimizar el diseño de

obras de protección y justificar técnicamente las medidas correctivas ante organismos institucionales.

A continuación, se muestra un cuadro comparativo de variables clave (tabla 34), ventajas/desventajas y ajustes metodológicos para HEC-HMS, HEC-RAS (1D/2D) y Lischtvan-Lebediev, seguido de un análisis de sensibilidad y recomendaciones para calibración realista.

Aspecto	HEC-HMS (Hidrológico)	HEC-RAS (Hidráulico)	Lischtvan-Lebediev (Erosión)
Naturaleza del modelo	Determinista, basado en precipitación-escorrentía	Energético (1D/2D), ecuaciones de Saint-Venant	Empírico, basado en fórmulas experimentales
Variables principales	CN, Ia, tiempo de concentración, precipitación, pérdidas iniciales, caudal	Velocidad (U), tirante (h), pendiente (S), Manning (n), Froude (Fr), geometría del cauce	Velocidad crítica (Um), D50, D90, pendiente (S), tirante (h), ancho del canal (B)
Objetivo principal	Simulación de escorrentía superficial y caudales en eventos de lluvia	Simulación de flujo permanente/no permanente, eventos de avenida, socavación	Estimar velocidad crítica de arrastre y erosión local/generalizada
Ventajas	Fácil calibración con datos pluviométricos, integración con GIS	Alta precisión espacial, permite modelado 2D, análisis de socavación	Rápido, útil para diagnóstico preliminar de erosión
Desventajas	Sensible a calidad de datos pluviométricos, simplifica procesos de infiltración	Requiere topografía precisa, mayor carga computacional en 2D	No simula dinámica de flujo, depende de calidad granulométrica
Sensibilidad de variables	Alta: CN, Ia y precipitación afectan directamente el caudal	Media: Manning y geometría influyen en resultados; rugosidad y pendiente son clave	Alta: granulometría y pendiente modifican Um directamente

Tabla 34. Cuadro comparativo entre metodologías aplicadas.

Um es la *velocidad crítica de arrastre* en el método de Lischtvan-Lebediev, es decir, la velocidad mínima del flujo necesaria para iniciar el movimiento de partículas del lecho.

Definición de Um:

En el contexto del método de Lischtvan-Lebediev, Um se define como la velocidad crítica del agua que provoca el inicio del transporte de sedimentos. Es una variable clave para evaluar la erosión generalizada y local en cauces naturales.

- Si la velocidad del flujo supera Um, se produce arrastre de partículas (erosión).
- Si la velocidad es menor que Um, el lecho permanece estable.

La fórmula empírica de Lischtvan-Lebediev vincula Um con:

- Granulometría: especialmente los valores *D50* y *D90* (diámetro medio y percentil 90 de partículas).

- Pendiente del cauce (S): mayor pendiente → mayor energía → menor Um requerido.
- Tirante hidráulico (h) y ancho del canal (B): influyen en el régimen de flujo.
- Tipo de sedimento: arena, grava, limo, etc., cada uno con distinta resistencia al arrastre.

Este método es altamente sensible a la granulometría:

- Un cambio de ±10% en *D50* puede modificar Um en ±15–20%.
- La pendiente también tiene efecto directo: pendientes más pronunciadas reducen el Um necesario para iniciar el arrastre.

Análisis de sensibilidad que contemplan cada metodología:

- **HEC-HMS**: *CN y Ia* (abstracción inicial) son altamente sensibles. Cambios pequeños en CN (±5) pueden alterar significativamente el volumen de escorrentía. *Tiempo de concentración* afecta el pico de caudal.
- **HEC-RAS 1D vs 2D**:
  - ✓ *1D*: Menor sensibilidad a rugosidad lateral y geometría transversal.
  - ✓ *2D*: Alta sensibilidad a malla, pendiente, rugosidad espacial y condiciones de borde.
- **Lischtvan-Lebediev**: *D50/D90* y *pendiente* son críticos. Un cambio en granulometría puede modificar la velocidad crítica en ±20%.

Método de ajuste a la realidad

Topografía y geometría

- Usar MDT de alta resolución (LIDAR, dron fotogramétrico).
- Validar con *relevamientos batimétricos periódicos* en cauces activos y contrastarlos con imágenes satelitales (ver Apéndice A).

Curvas IDF

- Implantar *pluviógrafos y pluviómetros* en puntos estratégicos de la cuenca.
- Ajustar curvas IDF con series históricas y eventos extremos recientes.

Rugosidad

- Clasificar el cauce por tipo de suelo (USCS: GW, SW, etc.).
- Asignar *coeficientes de Manning diferenciados* por tramo homogéneo.

Granulometría

- Realizar *análisis granulométricos* en campo y laboratorio.
- Integrar D50/D90 en fórmulas de velocidad crítica y en rugosidad estimada.

Validación

- Comparar resultados modelados con eventos históricos (caudales, niveles).
- Ajustar parámetros iterativamente hasta lograr coherencia entre simulación y observación.

Análisis de imágenes satelitales:

Vista satelital del sector aguas arriba y aguas abajo de la estructura de puente sobre el *Arroyo Las Avispas* (captura correspondiente a marzo de 2023). Las líneas de contorno en color rojo indican la posición histórica de las barrancas o márgenes del cauce, según registros fotográficos de enero de 2002 **(ver figura 51)**. Han transcurrido 21 años desde la intervención documentada, y aunque no se dispone de evidencia fotográfica anterior a 2002, el contraste entre ambas fechas permite apreciar con claridad el retroceso morfológico y el impacto negativo generado por la extracción de ripieras en el cauce. Esta alteración ha contribuido a la degradación de las márgenes, modificando la dinámica fluvial y comprometiendo la estabilidad estructural del entorno inmediato.



Figura 51. Imagen satelital del año 2002 demarcación de las márgenes con color rojo.



Figura 52. Imagen satelital del año 2023 demarcación de las márgenes color verde.



Figura 53. Imagen satelital del año 2002 superpuesta con la imagen año 2023.

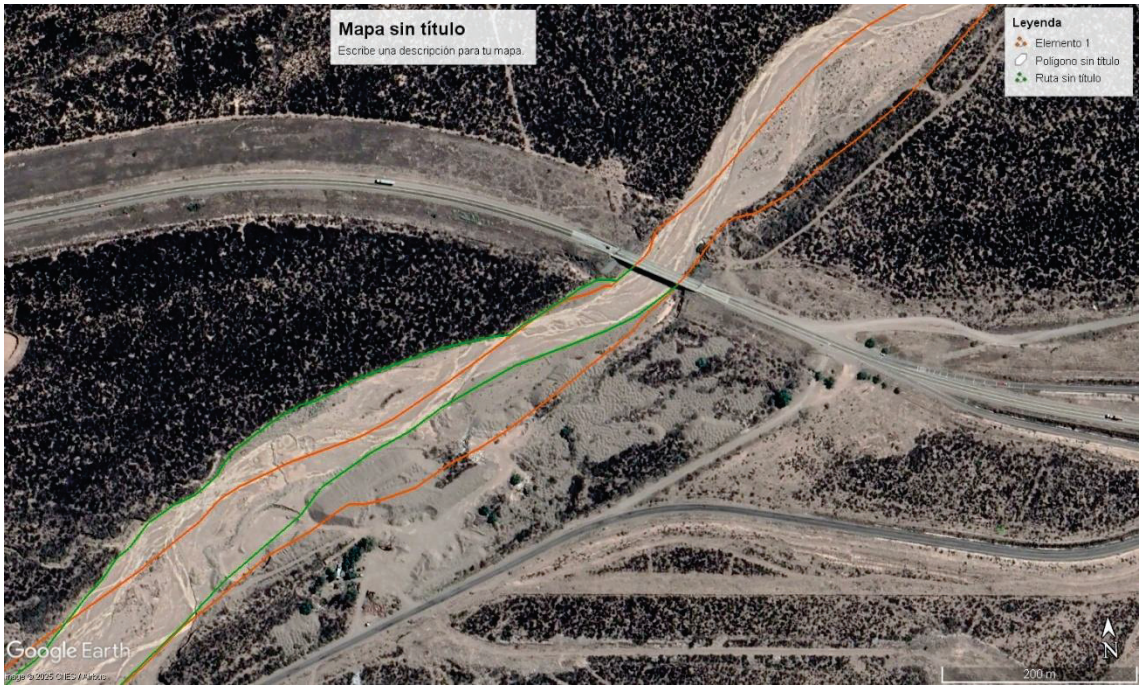


Figura 54. Imagen satelital del año 2002 superpuesta con la imagen año 2023 sector puente sobre A° Las Avispas.

La comparación entre los registros de 2002 y la imagen actual de 2023 permite evidenciar una transformación significativa en la morfología del cauce del *Arroyo Las Avispas*. La intervención antrópica mediante extracción de ripieras ha generado un retroceso de márgenes, pérdida de vegetación estabilizadora y mayor vulnerabilidad estructural en el entorno del puente. Esta evolución refuerza la necesidad de establecer protocolos de control y restauración fluvial en zonas de infraestructura crítica.

Según los datos registrados en la inscripción oficial, el proyecto de extracción de ripieras se desarrolla dentro del cauce del Arroyo Las Avispas, abarcando una superficie total de 17 hectáreas, de las cuales 4 hectáreas se encuentran actualmente intervenidas mediante actividades de extracción.

La operación se ejecuta de forma mecánica, utilizando cargadoras frontales, sin empleo de explosivos ni técnicas de voladura. La producción mensual alcanza un volumen aproximado de 5.000 m³ de material árido, lo que representa una extracción intensiva en un sector fluvial de alta sensibilidad ambiental.

La actividad se concentra en zonas de acumulación sedimentaria, pero ha generado modificaciones morfológicas en el cauce, afectando la estabilidad de las márgenes y alterando la dinámica sedimentaria natural. Estas transformaciones han sido verificadas mediante análisis multitemporal de imágenes satelitales y observaciones de campo, evidenciando retroceso de barrancas, pérdida de vegetación ribereña y aumento del riesgo de socavación en infraestructura vial próxima.

CAPÍTULO VI – Valoración de los indicadores y variables analizadas

Este capítulo tiene por objetivo realizar una valoración integral de los indicadores y variables relevadas en el marco del estudio hidráulico del cauce sobre el Arroyo Las Avispas, considerando su impacto desde cuatro dimensiones clave: ambiental, social, económica e institucional. La evaluación se estructura mediante tablas analíticas por dimensión, que permiten visualizar, ponderar y jerarquizar los efectos directos e indirectos asociados a la degradación de la infraestructura vial, particularmente en puentes emplazados sobre cauces aluvionales de montaña.

Desde la **dimensión ambiental**, se presenta una tabla temática que contempla variables como emisiones por maquinaria, carga erosiva y sedimentaria, degradación de la vegetación ribereña y procesos naturales de desestabilización. Esta estructura permite evidenciar cómo las intervenciones sucesivas, muchas veces improvisadas, generan un deterioro acumulativo en el entorno, agravado por el efecto antrópico de las ripieras mal ubicadas y el manejo inadecuado del cauce.

En cuanto a la **dimensión social**, se propone una tabla de evaluación social que incluye aspectos como afectación al tránsito, riesgo operativo, percepción social del riesgo ambiental y ocupación informal del territorio. Estos elementos permiten comprender cómo la falta de previsión técnica repercute en la calidad de vida de los residentes, la seguridad vial y la apropiación del espacio público.

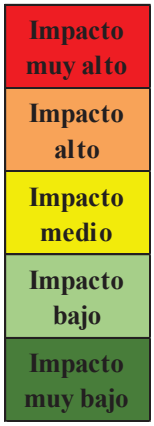
La **dimensión económica** se aborda mediante una tabla de impacto financiero que cuantifica las pérdidas asociadas a la interrupción de la Ruta Nacional N°7 – Corredor Bioceánico Cristo Redentor, expresadas en términos logísticos, gastos de reparación y obras provisorias, así como el valor del pasaje evitado por día de suspensión del tránsito. Esta estructura pone en evidencia el costo económico de no contar con políticas de mantenimiento preventivo ni tecnologías de monitoreo predictivo.

Finalmente, la **dimensión institucional** se analiza a través de una tabla de análisis comparativo que contrasta el gasto que demanda al Estado la capacitación técnica de ingenieros civiles en hidráulica de puentes, frente al costo de reconstrucción de estructuras colapsadas por falta de control y previsión. Se destaca la necesidad de fortalecer la articulación intersectorial, integrar criterios técnicos en la toma de decisiones y promover el uso de herramientas modernas de simulación y análisis de vulnerabilidad.

En conjunto, este capítulo busca demostrar que la implementación de tecnologías de predicción de erosión y socavación, junto con una planificación estratégica basada en evidencia, no solo reduce el impacto ambiental y social, sino que también representa una inversión eficiente frente a los elevados costos de reconstrucción. El caso del Arroyo Las Avispas, en el contexto de los cauces aluvionales de montaña de la provincia de Mendoza, constituye un ejemplo paradigmático de cómo la falta de políticas de acción y conocimiento técnico puede derivar en consecuencias estructurales evitables.

Para cuantificar por número los índices de impacto en cada dimensión, podemos aplicar una escala ordinal del tipo **1 a 5** (de rojo a verde), donde:

- **muy alto** (rojo)
- **Impacto alto** (naranja)
- **Impacto medio** (amarillo)
- **Impacto bajo** (verde claro)
- **Impacto muy bajo** (verde oscuro)



La **tabla de dimension ambiental** presenta una síntesis técnica de los principales factores afectados por el proyecto de extracción de ripieras en el cauce del Arroyo Las Avispas. Organizada en cuatro columnas —variable, indicador, índice de impacto y justificación técnica— esta estructura permite visualizar de forma sistemática la magnitud y naturaleza de los impactos generados por la intervención antrópica (ver tabla 35).

Cada fila representa un componente ambiental relevante, como emisiones por maquinaria, erosión, carga sedimentaria, vegetación ribereña y procesos de naturalización. Los indicadores seleccionados permiten cuantificar o caracterizar el efecto observado, mientras que el índice de impacto asignado refleja la gravedad del mismo según una escala cualitativa. La columna de justificación técnica aporta el sustento argumental que explica por qué se considera que cada variable presenta un nivel de afectación determinado, basándose en observaciones de campo, frecuencia operativa, pérdida de cobertura vegetal o alteraciones en la dinámica fluvial.

En conjunto, esta tabla de dimensión ambiental constituye una herramienta diagnóstica que facilita la evaluación del proyecto, orientando la toma de decisiones sobre medidas de mitigación, restauración o control. Su formato permite ser integrado en protocolos institucionales, estudios de impacto o esquemas de vulnerabilidad hidráulica.

Dimension Ambiental			
Variable	**Indicador**	**Índice de Impacto**	**Justificación técnica**
Emisiones por maquinaria	Toneladas/año de NOx, CO, CO_2, PM10	**Impacto alto**	Alta frecuencia de maquinaria pesada
Carga erosiva	Profundidad media (cm/m) por tramo afectado	**Impacto muy alto**	Intervención antrópica directa
Carga sedimentaria	kg/m³ en torrente líquido	**Impacto alto**	Aumento por desestabilización
Vegetación ribereña	% de degradación	**Impacto muy alto**	Pérdida de cobertura autóctona
Procesos naturales	Eventos de desestabilización	**Impacto muy alto**	Taludes sin protección estructural

Tabla 35. Tabla de dimensión Ambiental.

La ***tabla de dimensión social*** presenta una evaluación estructurada de los efectos sociales derivados del proyecto de extracción de ripieras en el cauce del Arroyo Las Avispas. Organizada en cuatro columnas —variable, indicador, índice de impacto y justificación técnica— esta tabla permite identificar y valorar los principales aspectos sociales comprometidos por la intervención (ver tabla 36).

Entre los factores considerados se encuentran la afectación al tránsito, el riesgo operativo, la percepción social y la ocupación informal en la zona de influencia. Cada variable está asociada a un indicador específico que permite su cuantificación o caracterización, como horas de corte de acceso, incidentes viales, encuestas de percepción o presencia de actividades informales. El índice de impacto asignado refleja la gravedad de cada situación, utilizando una escala cualitativa que va desde impacto medio hasta muy alto, acompañada por una codificación cromática que facilita su interpretación visual.

La columna de justificación técnica aporta el sustento argumental para cada valoración, destacando condiciones como el corte de una ruta nacional estratégica, el deterioro estructural sin control, la necesidad de validación comunitaria y la falta de ordenamiento territorial. En conjunto, esta tabla constituye una herramienta diagnóstica que permite visualizar los riesgos sociales asociados al proyecto, orientar medidas de mitigación y fortalecer la planificación territorial con enfoque participativo.

Dimensión Social			
Variable	**Indicador**	**Índice de Impacto**	**Justificación técnica**
Afectación al tránsito	Horas/año de corte de acceso	**Impacto muy alto**	Ruta nacional estratégica cortada
Riesgo operativo	Incidentes viales por deterioro estructural	**Impacto alto**	Deterioro estructural sin control
Percepción social	Índice de percepción de riesgo (encuestas)	**Impacto medio**	Requiere validación local
Ocupación informal	Emprendimientos informales en zona de influencia	**Impacto medio**	Falta de control territorial

Tabla 36.Tabla de Dimensión Social.

La ***tabla de dimensión económica*** presenta una evaluación sistemática de los efectos financieros derivados de la intervención en el cauce del Arroyo Las Avispas, particularmente en relación con la infraestructura vial y la logística regional. La estructura está organizada en cinco columnas que permiten identificar variables económicas clave, sus respectivos indicadores monetarios, el nivel de impacto asignado y la justificación técnica que sustenta cada valoración (ver tabla 37).

Entre los aspectos considerados se incluyen los costos de reparación, las obras provisionales, las pérdidas logísticas y el valor económico asociado a la suspensión del tránsito. Los indicadores utilizados expresan montos anuales o diarios vinculados al mantenimiento estructural, intervenciones paliativas, desvíos acumulados y cortes operativos. El índice de impacto asignado varía entre alto y muy alto, reflejando la carga económica significativa que estas situaciones representan para el sistema vial y para los actores sociales y productivos involucrados.

La columna de justificación técnica destaca la falta de previsión, la reiteración de medidas ineficientes, el impacto directo sobre el transporte y la afectación diaria de una ruta nacional estratégica como la RN7. En conjunto, esta tabla permite visualizar con claridad los costos ocultos y explícitos de la intervención, aportando criterios para la planificación presupuestaria, la priorización de obras correctivas y la formulación de medidas de mitigación con enfoque económico.

Dienensión Económica			
Variable	**Indicador**	**Índice de Impacto**	**Justificación técnica**
Costos de reparación	Monto anual por mantenimiento estructural ($/año)	**Impacto alto**	Elevados por falta de previsión
Obras provisorias	Monto anual por intervenciones paliativas ($/año)	**Impacto alto**	Reiteradas e ineficientes
Pérdidas logísticas	Valor por desvíos acumulados ($/año)	**Impacto muy alto**	Impacto directo en transporte
Valor del pasaje evitado	Costo diario por suspensión de tránsito ($/año)	**Impacto muy alto**	Corte diario de RN7

Tabla 37. Tabla de Dimensión Económica.

La ***tabla de dimensión institucional*** ofrece una visión estructurada de los efectos que el proyecto de extracción de ripieras genera sobre la capacidad operativa, técnica y financiera de las instituciones involucradas. Organizada en columnas que detallan las variables evaluadas, los indicadores utilizados, el índice de impacto asignado y la justificación técnica correspondiente, esta tabla permite identificar áreas críticas que requieren fortalecimiento o atención específica (ver tabla 38).

Entre los aspectos considerados se encuentran la articulación interinstitucional, la ejecución de procesos técnicos, la capacitación especializada en hidráulica de puentes y los costos derivados de reconstrucciones por colapso estructural. Los indicadores cuantifican el número de actores involucrados, la cantidad de procesos completados y los costos asociados a formación y reconstrucción. El índice de impacto varía desde bajo hasta muy alto, destacando especialmente el peso económico y operativo de eventos evitables mediante monitoreo predictivo.

La justificación técnica señala debilidades como la falta de protocolos específicos, la necesidad de formación técnica reciente y la insuficiencia de articulación entre jurisdicciones. En conjunto, esta tabla constituye una herramienta diagnóstica que permite diagnosticar el grado de preparación institucional frente a eventos críticos, orientar estrategias de mejora y fundamentar la asignación de recursos en función del riesgo y la eficiencia operativa.

Dimensión Institucional			
Variable	**Indicador**	**Índice de Impacto**	**Justificación técnica**
Capacidad de articulación	Número de actores institucionales involucrados	**Impacto medio**	Requiere fortalecimiento interjurisdiccional
Procesos técnicos	Número de procesos completados	**Impacto bajo**	Falta de protocolos específicos en hidráulica
Capacitación técnica	Costo de formación en hidráulica de puentes	**Impacto bajo**	Inversión estratégica frente a reconstrucción
Gasto por reconstrucción	Costo por colapso estructural	**Impacto muy alto**	Evitable con monitoreo predictivo y control

Tabla 38. Tabla de Dimensión Institucional.

Listado de Factores Ambientales y Formas de Medición

1. **Morfología del cauce**
   Se refiere a los cambios en la forma, ancho, profundidad y sinuosidad del cauce fluvial, provocados por erosión o intervención humana.
   Medición:
   - ✓ Comparación de perfiles transversales (metros)
   - ✓ Análisis multitemporal de imágenes satelitales (área en hectáreas)
   - ✓ Índice de sinuosidad
2. **Estabilidad de márgenes**
   Evalúa el grado de conservación o erosión de las barrancas y márgenes del arroyo, afectando la contención natural del cauce.
   Medición:
   - ✓ Tasa de retroceso de margen (metros por año)
   - ✓ Índice de erosión específica
   - ✓ Observación georreferenciada
3. **Vegetación ribereña**
   Considera la cobertura, tipo y función de la vegetación que estabiliza el suelo y regula la dinámica hídrica en los márgenes.
   Medición:
   - ✓ Porcentaje de cobertura vegetal (%).
   - ✓ Índice NDVI (Normalized Difference Vegetation Index).
   - ✓ Inventario de flora.

4. **Infraestructura vial (puente)**
   Analiza la vulnerabilidad de estructuras frente a procesos de socavación, erosión o modificación del cauce.
   Medición:
   - ✓ Distancia entre cimentación y borde del cauce (metros)
   - ✓ Evaluación estructural técnica
   - ✓ Índice de riesgo vial
5. **Calidad paisajística**
   Evalúa el valor estético y visual del entorno natural, afectado por la degradación del cauce y pérdida de vegetación.
   Medición:
   - ✓ Evaluación perceptual (encuestas).
   - ✓ Índice de calidad visual (ICV).
   - ✓ Comparación fotográfica histórica.
6. **Riesgo de socavación**
   Determina la probabilidad de erosión en la base de estructuras o márgenes, comprometiendo su estabilidad.
   Medición:
   - ✓ Profundidad de socavación potencial (metros).
   - ✓ Velocidad crítica del flujo (m/s).
   - ✓ Modelos hidráulicos (HEC-RAS).
7. **Dinámica sedimentaria**
   Analiza el transporte, depósito y extracción de sedimentos que afectan la morfología y ecología del cauce.
   Medición:

- ✓ Carga sedimentaria (kg/m³)
- ✓ Tasa de extracción (m³/año)

CAPITULO VII - CONCLUSIÓN

7.1.Cumplimiento de los objetivos específicos planteados

El desarrollo de esta tesis permitió abordar de manera integral los objetivos específicos propuestos, orientados a evaluar la vulnerabilidad estructural y ambiental de puentes frente a la presión antrópica en la cuenca del arroyo Las Avispas. A continuación, se sintetiza el grado de cumplimiento y las proyecciones futuras:

- Se logró ajustar los modelos hidrológicos e hidráulicos (HEC-HMS y HEC-RAS) en función de las alteraciones morfológicas provocadas por emprendimientos privados, evidenciando desviaciones del eje del cauce y obstrucciones que modifican el escurrimiento superficial.
- Se avanzó en la recalibración de los modelos ante eventos convectivos, incorporando datos de tormentas recientes y simulando escenarios con obstrucciones, aunque se reconoce la necesidad de alimentar los modelos con mayor densidad de datos para mejorar su sensibilidad.
- Se realizó una aproximación metodológica para la determinación de curvas I-D-F en ausencia de datos de aforo, utilizando registros pluviométricos regionales y correlaciones con eventos extremos observados.
- Se recopiló información hidrometeorológica de fuentes oficiales (SMN, INTA, comités de cuenca), aunque se identificó la necesidad de integrar datos de mayor resolución temporal y espacial para fortalecer la modelación.
- Se simularon escenarios con y sin intervención antrópica, permitiendo visualizar el impacto diferencial sobre el régimen de escurrimiento, la erosión y la socavación en zonas críticas.
- Se verificó una variación significativa en el escurrimiento superficial, atribuible a cambios en el uso del suelo, presencia de ripieras y alteraciones en la pendiente efectiva del cauce.
- Se establecieron correlaciones entre variables geomorfológicas, hidrológicas y de uso del suelo, mediante análisis multivariable en SIG y relevamientos de campo, que permitieron identificar patrones de vulnerabilidad.
- Se identificaron zonas críticas por erosión y socavación, especialmente en márgenes y estribos del puente, lo que refuerza la necesidad de monitoreo periódico y medidas de protección estructural.
- Se realizó una cuantificación preliminar de los impactos económicos y socioambientales derivados de la falta de regulación en la explotación de áridos, proponiendo criterios técnicos para su ordenamiento.
- Se verificó, mediante la comparación de imágenes satelitales correspondientes a los años 2002 y 2023, una transformación morfológica significativa en el cauce del Arroyo Las Avispas. La intervención antrópica —principalmente a través de la extracción de ripieras— ha generado el retroceso de márgenes, la pérdida de vegetación estabilizadora y una mayor vulnerabilidad estructural en el entorno del puente. Esta evolución confirma el impacto acumulativo de las actividades

extractivas y refuerza la necesidad de establecer protocolos específicos de control y restauración fluvial en zonas de infraestructura crítica.

Conclusión general del análisis multidimensional

El estudio integral del cauce del Arroyo Las Avispas, abordado desde las dimensiones ambiental, social, económica e institucional, permitió evidenciar un conjunto de impactos acumulativos que comprometen tanto la estabilidad física del entorno como la funcionalidad de la infraestructura vial emplazada sobre cauces aluvionales de montaña. A partir de la sistematización de indicadores específicos y su jerarquización en tablas analíticas, se arribó a las siguientes conclusiones:

- **Desde la dimensión ambiental**, se constató una degradación significativa del ecosistema fluvial, con índices de impacto muy altos en variables como carga erosiva, sedimentaria y pérdida de vegetación ribereña. La intervención antrópica mediante extracción de ripieras, sumada a la alta frecuencia de maquinaria pesada y la ausencia de protección estructural en taludes, ha generado procesos de desestabilización que aumentan la vulnerabilidad del entorno y demandan medidas urgentes de restauración y control.
- **En la dimensión social**, se verificó una afectación directa a la calidad de vida de los residentes y usuarios viales, con cortes prolongados en rutas estratégicas como la RN7, incremento del riesgo operativo por deterioro estructural, percepción creciente de inseguridad ambiental y ocupación informal del territorio. Estos factores reflejan una pérdida de apropiación del espacio público y una creciente conflictividad territorial que requiere abordaje interinstitucional.
- **Desde la perspectiva económica**, se identificaron externalidades negativas de alto impacto, expresadas en pérdidas logísticas, gastos reiterados en obras provisorias y mantenimiento estructural, y un elevado costo diario por suspensión del tránsito. La falta de políticas de mantenimiento preventivo y tecnologías de monitoreo predictivo se traduce en una ineficiencia estructural que compromete la sostenibilidad financiera de la infraestructura.
- **En la dimensión institucional**, se evidenció una débil capacidad de articulación entre actores, escasa implementación de procesos técnicos específicos en hidráulica de puentes, baja inversión en capacitación estratégica y un altísimo costo por reconstrucción ante colapso estructural. Estos hallazgos refuerzan la necesidad de fortalecer la gobernanza territorial, actualizar los marcos normativos y promover el uso de herramientas modernas de simulación y análisis de vulnerabilidad.

En conjunto, los resultados obtenidos consolidan un diagnóstico territorial robusto y justifican la implementación de medidas operativas orientadas a la restauración fluvial, el monitoreo técnico y la planificación estratégica basada en evidencia. El caso del Arroyo Las Avispas constituye un ejemplo paradigmático de cómo la falta de previsión, articulación y conocimiento técnico puede derivar en consecuencias estructurales evitables, y cómo una intervención integral puede revertir procesos de degradación y fortalecer la resiliencia de la infraestructura crítica en contextos de arroyos de montaña.

7.2.Lineamientos y líneas de investigación

A partir de las limitaciones detectadas y el potencial de mejora identificado, se proponen los siguientes lineamientos para reforzar la investigación y consolidar los resultados:

- Implementar relevamientos topográficos de precisión (GNSS, LiDAR) para mejorar la geometría de los modelos hidráulicos y detectar microvariaciones morfológicas.
- Ampliar la base de datos hidrometeorológica, incorporando estaciones automáticas (pluviógrafos), sensores remotos y registros de eventos extremos para recalibrar curvas I-D-F y parámetros de escorrentía.
- Establecer protocolos de seguimiento periódico del cauce, con imágenes satelitales georreferenciadas y campañas de campo estacionales.
- Profundizar la calibración y validación de los modelos HEC-HMS y HEC-RAS, incorporando retroalimentación de datos reales y escenarios proyectivos.
- Desarrollar matrices de riesgo estructural y ambiental, integrando variables técnicas, económicas y sociales para la toma de decisiones en contextos de presión territorial.

Esta tesis constituye un aporte metodológico y técnico para la gestión integrada de cuencas en contextos de transformación acelerada, y abre nuevas líneas de investigación orientadas a la resiliencia de infraestructuras críticas y la sostenibilidad territorial.

7.3.Sugerencias para obras de mitigación y ordenamiento de ripieras

1. Remoción y remediación ambiental del cauce

- Retiro progresivo de ripieras que se encuentren dentro del cauce activo, especialmente en zonas de estrechamiento, bifurcación o desvío del eje hidráulico.
- Restauración morfológica del cauce mediante perfilado suave y reconformación de márgenes, respetando la pendiente natural y el ancho hidráulicamente eficiente.
- Revegetación de márgenes con especies nativas para estabilizar taludes y reducir procesos erosivos post-intervención.
- Monitoreo post-remediación con imágenes satelitales y relevamientos topográficos para verificar la recuperación del cauce.

2. Obras de mitigación estructural

- Diques de contención aluvional aguas arriba del puente, para interceptar sedimentos gruesos y reducir la carga sólida que impacta sobre la estructura.
- Defensas de márgenes mediante gaviones o enrocados en zonas críticas de erosión lateral, especialmente en el estribo del puente y curvas pronunciadas.
- Canalización controlada en sectores de alta vulnerabilidad, con secciones trapezoidales revestidas o encauzamientos temporales durante eventos extremos.

- Estabilización de taludes mediante geotextiles y estructuras de disipación de energía en puntos de alta pendiente.

3. Criterios para el emplazamiento de ripieras

A partir de los modelos HEC-HMS y HEC-RAS calibrados, se puede establecer una distancia mínima de seguridad entre el puente y cualquier actividad extractiva, considerando:

- Zona de influencia hidráulica del puente (longitud de socavación potencial + zona de remanso).
- Distancia de disipación de energía aguas arriba y aguas abajo del puente (mínimo 100–150 m según pendiente y caudal de diseño).
- Análisis de escurrimiento superficial y dispersión de sedimentos en escenarios con intervención antrópica.
- Buffer ambiental de protección del cauce, que debería ser no menor a 200 m desde el eje del puente, ajustable según resultados de simulación y relevamiento topográfico.

4. Lineamientos complementarios

- Protocolos de control y fiscalización para actividades extractivas, con exigencia de estudios de impacto hidráulico previos.
- Integración de SIG y monitoreo satelital para seguimiento de cambios morfológicos y cumplimiento de distancias mínimas.
- Capacitación técnica a actores locales sobre vulnerabilidad estructural y buenas prácticas de manejo del cauce.
- Incorporación de estas recomendaciones en normativas locales o comités de cuenca, como parte de una estrategia de ordenamiento territorial y resiliencia vial.

Referencias:

- Argentina. (1994). Constitución de la Nación Argentina. Artículo 41.
- Congreso de la Nación argentina (2002). Ley N° 25.675 - Ley General del Ambiente. Boletín Oficial de la República Argentina, 27 de noviembre de 2002.
- Provincia de (1992). Ley N° 5.961 - Ley de Preservación del Medio Ambiente. Boletín Oficial de la Provincia de Mendoza, 10 de diciembre de 1992.
- Provincia de Mendoza, Poder Ejecutivo. (1994). Decreto N° 2.109/94 (Reglamentario de la Ley N° 5.961). Boletín Oficial de la Provincia de Mendoza, 24 de diciembre de 1994.
- Provincia de Mendoza (2012). Ley N° 8.434 - Regulación de las actividades comprendidas en la explotación de las canteras (Tercera Categoría). Boletín Oficial de la Provincia de Mendoza, 23 de julio de 2012.
- Provincia de Mendoza (2024). Ley N° 9.529 - Código de Procedimiento Minero de Mendoza. Boletín Oficial de la Provincia de Mendoza, 4 de mayo de 2024.
- Provincia de Mendoza. Dirección General de Hidráulica (DH). (2020). Resolución N° 19-DH-2020 - Modificación de requisitos explotación de canteras de áridos en cauces.
- U.S. Army Corps of Engineers (USACE). (Año). HEC-HMS: Hydrologic Modeling System (Versión utilizada). Hydrologic Engineering Center.
- U.S. Army Corps of Engineers (USACE). (Año). HEC-RAS: River Analysis System (Versión v6.6). Hydrologic Engineering Center.
- U.S. Department of Agriculture (USDA) - Soil Conservation Service (SCS). (Año). National Engineering Handbook, Section 4: Hydrology (Método SCS Curve Number). Washington, D.C.: USDA.
- Lischtvan, I. I. y Lebediev, V. V. (Año). Criterio de Lischtvan-Lebediev para la erosión general del fondo. (Se recomienda buscar el documento técnico donde se aplica el método).
- QGIS Development Team. (2025). QGIS Geographic Information System (Versión 3.34.7). Open Source Geospatial Foundation Project.
- Chow, V. T. (1994). Hidrología Aplicada (2ª ed.). McGraw-Hill.
- Servicio Meteorológico Nacional (SMN). (Período de datos). Datos hidrometeorológicos de la estación Cacheuta.
- Instituto Geográfico Nacional (IGN). (Año de la publicación o descarga). Modelo Digital de Elevación (DEM) y cartografía base.
- UDLAP (Universidad de las Américas Puebla, México). (Año). Título de la publicación o fuente. Recuperado de: https://mghydro.com/watersheds/.

APÉNDICE A

Este apéndice presenta un relevamiento cronológico de imágenes satelitales obtenidas mediante la plataforma Google Earth, que permiten visualizar el avance progresivo de las ripieras dentro del cauce del arroyo y su impacto sobre el escurrimiento superficial durante eventos de tormenta.

Las imágenes incluidas evidencian también el grado de afectación por procesos erosivos en las márgenes y en el estribo del puente, lo que pone de manifiesto las consecuencias del manejo inadecuado en la extracción de áridos dentro del cauce. Las obstrucciones generadas por las ripieras han provocado una desviación del eje natural del cauce, alterando la morfología originalmente considerada en los estudios hidrológicos e hidráulicos que fundamentaron el diseño de la obra del puente sobre el arroyo Las Avispas.

Este relevamiento constituye un antecedente técnico relevante para el seguimiento temporal del estado del cauce, aportando elementos diagnósticos que permiten evaluar su evolución y vulnerabilidad. Si bien la frecuencia de actualización de imágenes en Google Earth presenta limitaciones, la herramienta resulta de gran utilidad para realizar un preanálisis visual preliminar de la situación.



Imagen 1. Fecha Enero de 2001.



Imagen 2. Fecha Mayo de 2002.



Imagen 3. Fecha septiembre de 2002.



Imagen 4. Fecha marzo de 2010.



Imagen 5. Fecha abril de 2010.



Imagen 6. Fecha diciembre de 2010.



Imagen 7. Fecha febrero de 2012.



Imagen 8. Fecha Enero de 2013.



Imagen 9. Fecha noviembre de 2013.



Imagen 10. Fecha febrero de 2014.



Imagen 11. Fecha marzo de 2014.



Imagen 12. Fecha abril de 2014.



Imagen 13. Fecha abril de 2014.



Imagen 14. Fecha septiembre de 2014.



Imagen 15. Fecha noviembre de 2014.



Imagen 16. Fecha marzo de 2015. Evidencia de erosión margen derecha sobre el estribo del puente.



Imagen 17. Fecha marzo de 2015.



Imagen 18. Fecha abril de 2015.



Imagen 19. Fecha mayo de 2015.



Imagen 20. Fecha mayo de 2015.



Imagen 21. Fecha mayo de 2015.



Imagen 22. Fecha mayo de 2015.



Imagen 23. Fecha junio de 2015.



Imagen 24. Fecha junio de 2015.



Imagen 25. Fecha junio de 2015.



Imagen 26. Fecha junio de 2015.



Imagen 27. Fecha julio de 2015.



Imagen 28. Fecha agosto de 2015.



Imagen 29. Fecha octubre de 2015.



Imagen 30. Fecha marzo de 2016.



Imagen 31. Fecha marzo de 2016.



Imagen 32. Fecha marzo de 2016.



Imagen 33. Fecha octubre de 2016.



Imagen 34. Fecha diciembre de 2016.



Imagen 35. Fecha marzo de 2017.



Imagen 36. Fecha septiembre de 2017.



Imagen 37. Fecha octubre de 2017.



Imagen 38. Fecha enero de 2018.



Imagen 39. Fecha febrero de 2018.



Imagen 40. Fecha noviembre de 2018.



Imagen 41. Fecha febrero de 2019.



Imagen 42. Fecha noviembre de 2019.



Imagen 43. Fecha febrero de 2020.



Imagen 44. Fecha agosto de 2020.



Imagen 45. Fecha agosto de 2020.



Imagen 46. Fecha septiembre de 2020.



Imagen 47. Fecha noviembre de 2021.



Imagen 48. Fecha enero de 2022.



Imagen 49. Fecha enero de 2023.



Imagen 50. Fecha marzo de 2023.



Imagen 51. Fecha noviembre de 2021.

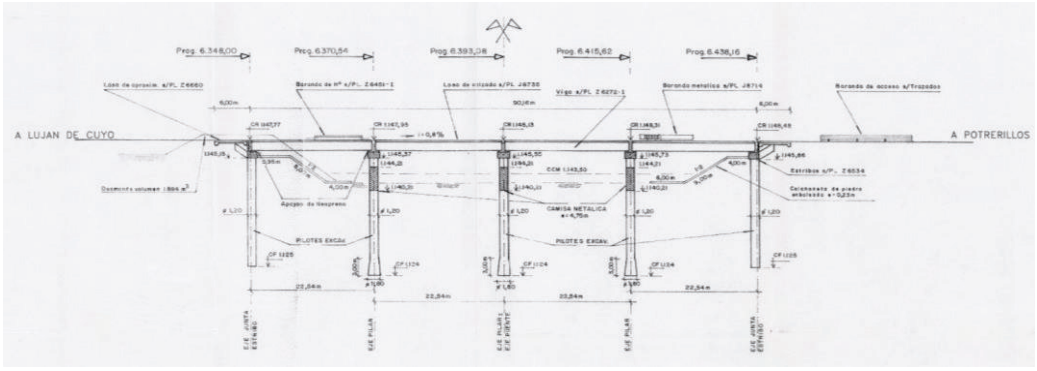


Imagen 52. Perfil transversal del puente sobre Arroyo Las Avispas.

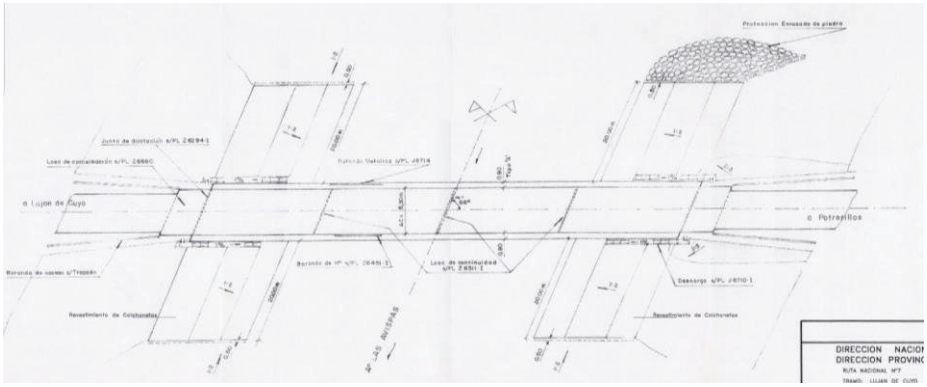


Imagen 53. Planimetría del puente.

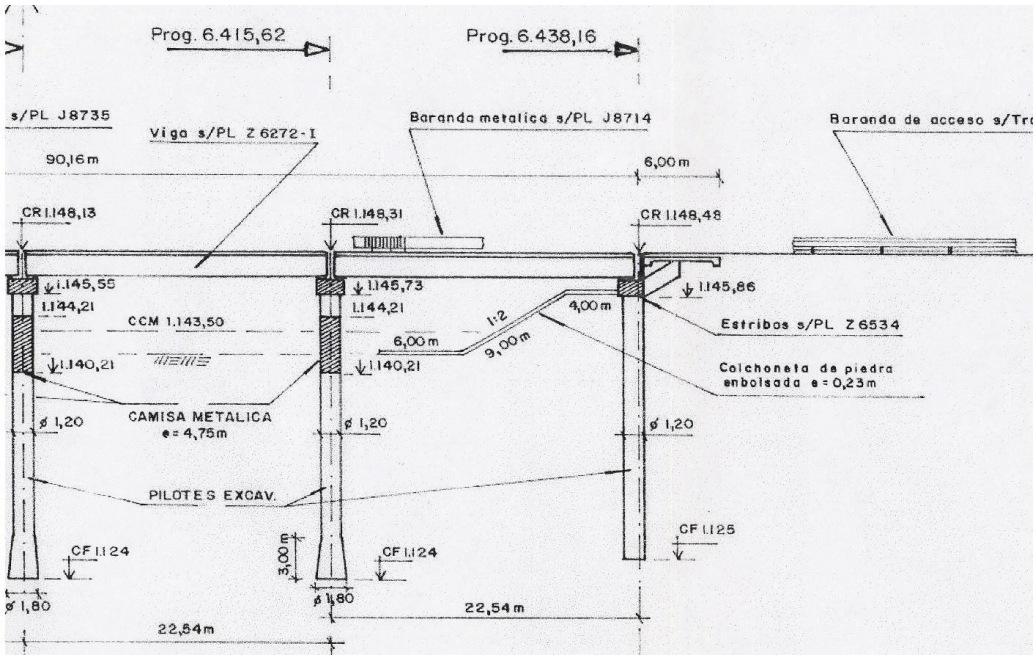


Imagen 54. Vista lateral estribo 1. Afectado por la erosión.