

**MODELO HIDRODINÁMICO BIDIMENSIONAL PARA EL ANÁLISIS
DE ZONAS DE INUNDACIÓN EN EL CORREGIMIENTO DEL DIAMANTE,
NORTE DE SANTANDER.**

JUAN DAVID CEBALLOS TIQUE

UNIVERSIDAD DE PAMPLONA

FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AMBIENTAL, CIVIL Y QUÍMICA

PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL

PAMPLONA, JUNIO 2025

**MODELO HIDRODINÁMICO BIDIMENSIONAL PARA EL ANÁLISIS
DE ZONAS DE INUNDACIÓN EN EL CORREGIMIENTO DEL DIAMANTE,
NORTE DE SANTANDER.**

JUAN DAVID CEBALLOS TIQUE

Tesis para optar al título de Ingeniero Civil

M. Sc DIEGO IVÁN SÁNCHEZ TAPIERO

DIRECTOR

UNIVERSIDAD DE PAMPLONA

FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AMBIENTAL, CIVIL Y QUÍMICA

PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL

PAMPLONA, JUNIO 2025

Dedicatoria

A Dios: Porque permitiste que este día llegara, me diste salud, razón, conocimiento, en mí nunca existió la soledad. Donde terminan mis fuerzas comienzan las tuyas Dios.

A mis padres: Mamá, tuviste la fortaleza para guiarme en un camino lleno de desafíos, tu apoyo y amor siempre se vieron reflejados en días turbulentos, aquellos sentimientos tan nobles y puros son el fruto de la persona que soy hoy en día, una persona de bien, gracias a ti. Papá, tu presencia es innegable, me diste aliento, me animaste, y sobrepusiste todo por verme triunfar, no dudaste de mí, y eso te lo agradezco. A los dos, a mis queridos padres, les dedico el presente, como mi regalo por su cariño, esfuerzo, atención y comprensión, los amo.

A mis hermanas: Anhgi, estuviste conmigo en los momentos más difíciles, jamás tuve una incomodidad gracias a ti, luchaste a mi lado para llegar a este preciso momento en el universo, es gratificante ofrecerte esta dedicatoria para que estés orgullosa de mí. Yarleidy, tuviste el coraje para decirme las cosas que necesitaba, nunca titubeaste y ofreciste tu apoyo incondicional a mí, soy feliz de poder llamarlas hermanas, las amo.

Agradecimientos

Un agradecimiento especial al Ingeniero Diego Iván Sánchez Tapiero, por su total apoyo a esta tesis, aportándome conocimientos basados en sus experiencias, además, por tener esa disposición de atenderme, ayudarme, guiarme y por demostrarme que con fortaleza se puede ir en contra de la corriente.

Agradezco al Ingeniero Edier Alexander Atilua por su ayuda y contribución por los equipos con el Instituto Superior De Educación Rural.

Agradezco a la Docente Maria Esther Rivera por mostrarme el amplio y hermoso mundo de la Hidrología.

Agradezco a la Universidad de Pamplona, y a toda la facultad de Ingeniería Civil por brindarme los conocimientos y ayuda en mi formación como profesional.

Agradezco a mis mejores amigos, quienes estuvieron pendientes durante este proceso y lograron animarme para continuar y hacer las cosas mejores, aprecio totalmente su cariño, estoy feliz de saber que están en mi vida.

Agradezco a mis amigos, aquellos que siguen en mi vida, aquellos que se fueron, quienes directa o indirectamente me brindaron su apoyo, tiempo, y cariño, a todos ustedes, los aprecio.

A mi bella mascota, Kira, que estas viendo como llego a la cima desde el colegio, eres mi apoyo especial e incondicional, gracias por estar conmigo.

RESUMEN

El corregimiento El Diamante, ubicado entre los municipios de Pamplonita y Chinácota, Norte de Santander, enfrenta un riesgo significativo de inundaciones fluviales debido a las crecientes intensidades de precipitación y a las modificaciones en el cauce del río Pamplonita. Con el objetivo de identificar las zonas vulnerables ante eventos hidrológicos extremos y generar información útil para la gestión del riesgo, se desarrolló un modelo hidrodinámico bidimensional utilizando las herramientas HEC-RAS y HEC-HMS.

Inicialmente se realizó un levantamiento topográfico mediante el uso de dron y un equipo GPS RTK, con lo cual se obtuvieron datos precisos de la superficie y batimetría del cauce. A partir de estos se construyó un Modelo Digital del Terreno (DEM) en el software Agisoft, que fue complementado con información procesada en ArcGIS para generar curvas de nivel y cobertura vegetal.

En el componente hidrológico se utilizaron datos de precipitación máxima diaria de estaciones cercanas, generando curvas IDF y modelando hietogramas de diseño en HEC-HMS para diferentes periodos de retorno. La calibración del modelo se realizó mediante el ajuste del número de curva, utilizando datos históricos de caudal de la estación Don Juana y aplicando el método estadístico de Gumbel con el fin de conocer caudales a futuro. Con los caudales obtenidos para diferentes periodos de retorno, se simuló la propagación de flujos en HEC-RAS, generando mapas de zonas de inundación; este estudio proporciona una herramienta técnica de gran valor para la planificación territorial y la mitigación de riesgos por inundación en comunidades rurales vulnerables como El Diamante.

ABSTRACT

The El Diamante district, located between the municipalities of Pamplonita and Chinácota, Norte de Santander, faces a significant risk of river flooding due to increasing rainfall intensities and changes in the Pamplonita River channel. To identify areas vulnerable to extreme hydrological events and generate useful information for risk management, a two-dimensional hydrodynamic model was developed using HEC-RAS and HEC-HMS tools.

A topographic survey was initially conducted using a drone and RTK GPS equipment, yielding precise data on the surface and bathymetry of the riverbed. From these data, a Digital Terrain Model (DEM) was constructed in Agisoft software, which was complemented with information processed in ArcGIS to generate contour lines, land-use maps, and vegetation cover.

In the hydrological component, maximum daily precipitation data from nearby stations were used to generate IDF curves and model design hyetographs in HEC-HMS for different return periods. The model was calibrated by adjusting the curve number, using historical flow data from the Don Juana station, and applying the Gumbel statistical method to determine future flows. Finally, using the flows obtained for different return periods, flow propagation was simulated in HEC-RAS, generating flood zone maps.

This study provides a valuable technical tool for territorial planning and flood risk mitigation in vulnerable rural communities such as El Diamante.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	20
1.1 Problema.....	21
1.2 Justificación	23
2. OBJETIVOS.....	25
2.1 Objetivo General.....	25
2.2 Objetivos Específicos.....	25
3. MARCO REFERENCIAL.....	26
3.1 Marco de antecedentes o estado del arte.....	26
4. MARCO TEORICO	38
4.1 Modelación hidrodinámica	38
4.1.1 Acoplamiento de modelos.....	38
4.1.2 Condiciones de frontera	38
4.1.3 Simulación en flujo no permanente (transitorio)	38
4.1.4 Sensibilidad del modelo	39
4.2 Modelamiento hidrológico.....	39
4.2.1 Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF)	39
4.2.2 Hietograma.....	40
4.2.3 Número de Curva (Curve Number – CN).....	40
4.3 Modelamiento hidráulico.....	40
4.3.1 Modelos bidimensionales (2D)	40
4.3.2 Coeficiente de Manning (n)	41
4.3.3 HEC-RAS y RAS Mapper	41
4.3.4 Clasificación régimen del flujo	42
4.4 Herramientas de apoyo geoespacial.....	43
4.4.1 Sistemas de Información Geográfica (SIG).....	43
4.4.2 Clasificación de uso del suelo y cobertura vegetal	43
4.5 Factores de riesgo y análisis del peligro por inundaciones	43
4.5.1 Peligro, vulnerabilidad y riesgo por inundación	44
4.5.2 Impactos de las inundaciones.....	44
5. MARCO LEGAL.....	45
6. MARCO CONTEXTUAL.....	48
7. METODOLOGÍA.....	51
7.1 Descripción del área de estudio	52
7.2 Fase de levantamiento de información.....	55
7.2.1 Levantamiento Fotogramétrico con Dron.....	56
7.2.2 Levantamiento Batimétrico del Cauce.....	58

7.2.3 Fuentes Secundarias.....	59
7.3 <i>Procesamiento de datos geoespaciales</i>	62
7.3.1 Generación del Modelo Fotogramétrico en Agisoft Metashape	62
7.3.2 Procesamiento de Datos Batimétricos en Civil 3D	65
7.3.3 Integración de Modelos Digitales de Elevación (DEM) en ArcGIS.....	67
7.4 <i>Clasificación de cobertura vegetal y asignación de coeficientes de rugosidad de Manning</i>	71
7.5 <i>Modelado Hidrológico</i>	73
7.5.1 Curvas IDF	73
7.5.2 Construcción de Hietogramas a partir de Curvas IDF	76
7.5.3 Estimación de Caudales Máximos con Gumbel y Calibración en HEC-HMS	78
7.6 <i>Modelado Hidráulico en HEC-RAS</i>	84
7.6.1 Importación de Datos Geoespaciales	84
7.6.2 Calibración del Modelo Hidráulico	88
7.6.3 Simulación de Eventos de Diseño.....	93
8. RESULTADOS	94
8.1 <i>Análisis de precipitación</i>	94
8.1.1 Curvas IDF	97
8.1.2 Hietogramas para periodos de retorno Pamplona:	101
8.1.3 Hietogramas para periodos de retorno Palmita	108
8.1.4 Hietogramas para periodos de retorno Chinácota	115
8.2 <i>Calibración y Validación del Modelo</i>	119
8.3 <i>Caudales para Distintos Periodos de Retorno</i>	122
8.4 <i>Mapas de Inundación y Zonas Vulnerables</i>	125
9. CONCLUSIONES	145
10. RECOMENDACIONES	146
11. BIBLIOGRAFÍA	148

Lista de Figuras

Figura 1. Interfaz general Hec-Ras (Elaboración propia).....	42
Figura 2. Herramientas de Hec-Ras (Elaboración propia).....	42
Figura 3. Ortofoto de Corregimiento el Diamante, obtenida de Agisoft, abierta en Rasmapper (Elaboración propia).....	48
Figura 4. Ubicación geográfica de la zona de estudio, En los recuadros laterales se muestra un acercamiento a la red hidrográfica de la cuenca y la localización específica del tramo de estudio en el municipio de Pamplona. (Elaboración propia).	49
Figura 5. Vista aérea del tramo del río Pamplonita a su paso por el sector urbano de Pamplona, donde se evidencian zonas residenciales próximas al cauce. (Elaboración propia).	53
Figura 6. Vista cenital del cruce del río Pamplonita con la vía nacional, donde se observa el puente vehicular y el entorno urbano inmediato. (Elaboración propia).....	54
Figura 7. Perspectiva aguas arriba del puente principal sobre el río Pamplonita, utilizada como referencia para modelado hidráulico. (Elaboración propia).	54
Figura 8. Imagen aérea del puente vehicular sobre el río Pamplonita, donde se evidencian intervenciones en los márgenes y acumulaciones de material en el cauce. Elaboración propia.....	55
Figura 9. Registro del inicio del vuelo fotogramétrico con dron para la captura de imágenes aéreas del cauce y su entorno. (Elaboración propia).	56
Figura 11. Puntos de control terrestre 4 y 5 ubicados sobre el eje vial que cruza el cauce del río, usados para la georreferenciación precisa del modelo. (Elaboración propia).	57
Figura 12. Punto de control terrestre 7 localizado en el margen vial junto a viviendas, correspondiente a un sector crítico cercano al cauce. (Elaboración propia).	58

Figura 13. Apoyo técnico del ISER durante la toma de datos topográficos en campo, empleando estación GNSS para la caracterización del cauce. (Elaboración propia).	58
Figura 14. Trabajo de campo en el cauce: toma de datos batimétricos mediante GPS RTK para el levantamiento detallado del perfil del río. (Elaboración propia).	58
Figura 15. Registro batimétrico desde el margen del río, empleando GPS RTK para obtener la geometría precisa del fondo del cauce. (Elaboración propia).	59
Figura 16. Interfaz de la plataforma IDEAM utilizada para la descarga de datos hidrometeorológicos de la estación Donjuana, fundamentales para el análisis de caudales y generación de curvas IDF. (Elaboración propia).	60
Figura 17. Visualización del catálogo de mapas del portal del SIAC, utilizado para la obtención de coberturas temáticas como uso del suelo, geología y límites administrativos. (Elaboración propia).	60
Figura 18. Interfaz del software de fotogrametría mostrando la nube de puntos y los productos generados tras el procesamiento del vuelo: ortomosaico, MDE y puntos de control. (Elaboración propia).	63
Figura 19. Distribución de puntos de control terrestre (GCP) y representación gráfica de los errores en XY y Z. Los niveles de incertidumbre muestran precisiones subcentimétricas y del orden de pocos centímetros, validando la calidad del modelo generado. (Elaboración propia).	64
Figura 20. Modelo Digital de Elevación (MDE) generado a partir de la nube de puntos obtenida mediante fotogrametría con dron. Se visualizan las diferencias altimétricas del terreno en el tramo de estudio. (Elaboración propia).	65
Figura 21. Puntos obtenidos en el levantamiento y superficie generada en Civil 3D. (Elaboración propia).	66

Figura 22. Visualización de curvas de nivel y líneas de rotura en AutoCAD Civil 3D, utilizadas para la definición precisa de la superficie topográfica y modelación del cauce. (Elaboración propia).....	67
Figura 23. Resultado del recorte del DEM batimétrico mediante la herramienta “Extract by Mask”, mostrando la sección central del cauce ajustada espacialmente. (Elaboración propia).	69
Figura 24. Modelo Digital de Elevación continuo generado a partir de la integración del DEM batimétrico y el levantado con dron, representando tanto el terreno expuesto como el cauce sumergido del río. (Elaboración propia).	70
Figura 25. Comparación entre el Modelo Digital de Elevación original generado con dron (derecha) y el modelo final fusionado con batimetría (izquierda). Se evidencia una transición continua y coherente en la topografía. (Elaboración propia).	71
Figura 26. Clasificación del uso del suelo y asignación espacial de coeficientes de rugosidad de Manning (n) en el área de estudio. (Elaboración propia).	72
Figura 27. Curvas Intensidad–Duración–Frecuencia (IDF) generadas para la cuenca a partir de los registros de precipitación de estaciones IDEAM. Estas curvas permiten estimar la intensidad de lluvias para distintos tiempos de duración y periodos de retorno. (Elaboración propia).....	76
Figura 28. Modelo hidrológico configurado en HEC-HMS, delimitando la cuenca de aporte hacia el sector de El Diamante y utilizando como estación de control Don Juana. (Elaboración propia).....	80
Figura 29. Modelo hidrológico configurado en HEC-HMS, (Elaboración propia).....	82
Figura 30. Hec-Hms Configuración de Time-Series Data, (Elaboración propia).....	83

Figura 31. Visualización del modelo 2D en RAS Mapper con ortofoto georreferenciada y capa raster de clasificación de uso del suelo (landcover), codificada con coeficientes de Manning. (Elaboración propia).	85
Figura 33. Visualización detallada de la malla de cálculo y las regiones de refinamiento en el cauce principal mediante HEC-RAS 2D. (Elaboración propia).....	86
Figura 34. Representación de puentes modelados en HEC-RAS 2D, uno con flujo presurizado y sobrevertimiento, y otro con múltiples alcantarillas y estructura de embalse. (Elaboración propia).....	87
Figura 35. Sección transversal del primer puente modelado como estructura de tipo Bridge 2D (Pressure/Weir/Orifice), mostrando el perfil del cauce y la ubicación del tablero del puente. (Elaboración propia).	87
Figura 36. Representación del segundo cruce complejo modelado en HEC-RAS 2D, incorporando múltiples alcantarillas (culverts) y un vertedero (weir), visualizado en la ventana del editor de conexiones. (Elaboración propia).	88
Figura 37. Realización de aforo en el río Pamplonita mediante el método de flotador, en el sector conocido como “El Diamante”. Se observa la medición de profundidades para definir la sección transversal del canal. (Elaboración propia).	89
Figura 38. Representación de la sección transversal del río en AutoCAD, utilizada para calcular el área hidráulica a partir de los datos de campo levantados durante el aforo. (Elaboración propia).....	89
Figura 40. Visualización del flujo no permanente simulado con condición de caudal constante, empleado para la calibración del modelo hidráulico en el sector El Diamante. (Elaboración propia).....	91

Figura 41. Resultados del modelo hidráulico calibrado mostrando la profundidad simulada de 0.45 m en la orilla derecha del cauce. (Elaboración propia).	92
Figura 43. Asignación del coeficiente de rugosidad de Manning ($n = 0.09$) para el cauce principal en el modelo hidráulico, utilizado durante el proceso de calibración. (Elaboración propia).....	92
Figura 44. Curva IDF PAMPLONA (Elaboración propia).	98
Figura 45. Curva IDF LA PALMITA (Elaboración propia).	99
Figura 46. Curva IDF CHINACOTA (Elaboración propia).	100
Figura 47. Hietograma PR 2 años (Elaboración propia).	102
Figura 48. Hietograma PR 5 años (Elaboración propia).	103
Figura 49. Hietograma PR 10 años (Elaboración propia).	104
Figura 50. Hietograma PR 25 años (Elaboración propia).	105
Figura 51. Hietograma PR 50 años (Elaboración propia).	106
Figura 52. Hietograma PR 100 años (Elaboración propia).	107
Figura 53. Hietograma PR 500 años (Elaboración propia).	108
Figura 54. Hietograma PR 2 años (Elaboración propia).	109
Figura 55. Hietograma PR 5 años (Elaboración propia).	110
Figura 56. Hietograma PR 10 años (Elaboración propia).	111
Figura 57. Hietograma PR 25 años (Elaboración propia).	112
Figura 58. Hietograma PR 50 años (Elaboración propia).	113
Figura 59. Hietograma PR 100 años (Elaboración propia).	114
Figura 60. Hietograma PR 500 años (Elaboración propia).	115
Figura 61. Hietograma PR 10 años (Elaboración propia).	116
Figura 62. Hietograma PR 25 años (Elaboración propia).	117

Figura 63. Hietograma PR 50 años (Elaboración propia).....	118
Figura 64. Hietograma PR 100 años (Elaboración propia).....	119
Figura 65. Resultado caudal modelado Hec-Hms, PR=2 (Elaboración propia).	123
Figura 66. Resultado caudal modelado Hec-Hms, PR=5 (Elaboración propia).	123
Figura 67. Resultado caudal modelado Hec-Hms, PR=10 (Elaboración propia).	123
Figura 68. Resultado caudal modelado Hec-Hms, PR=25 (Elaboración propia).	124
Figura 69. Resultado caudal modelado Hec-Hms, PR=50 (Elaboración propia).	124
Figura 70. Resultado caudal modelado Hec-Hms, PR=100 (Elaboración propia).	124
Figura 71. Resultado caudal modelado Hec-Hms, PR=100 (Elaboración propia).	125
Figura 72. Resultado modelado RASMAPPER, Depth, PR=2 (Elaboración propia).	126
Figura 73. Resultado modelado RASMAPPER, Depth, PR=5 (Elaboración propia).	126
Figura 74. Resultado modelado HEC-RAS, PR=5 (Elaboración propia).....	128
Figura 75. Resultado modelado HEC-RAS, PR=10 (Elaboración propia).....	129
Figura 76. Resultado modelado RASMAPPER, Depth, PR=10 (Elaboración propia).	130
Figura 77. Resultado modelado Hec-Ras, PR=25 (Elaboración propia).	131
Figura 78. Resultado modelado Hec-Ras, PR=50 (Elaboración propia).	132
Figura 79. Resultado modelado RASMAPPER, Depth, PR=50 (Elaboración propia).	132
Figura 80. Resultado modelado RASMAPPER, Velocity, PR=50 (Elaboración propia).	133
Figura 81. Resultado modelado Hec-Ras, PR=100 (Elaboración propia).	134
Figura 82. Resultado modelado RASMAPPER, Depth, PR=100 (Elaboración propia).	135
Figura 83. Resultado modelado RASMAPPER, Velocity, PR=100 (Elaboración propia). ..	135
Figura 84. Resultado modelado Hec-Ras, PR=500 (Elaboración propia).	136
Figura 85. Resultado modelado RASMAPPER, Depth, PR=500 (Elaboración propia).	137
Figura 86. Resultado modelado RASMAPPER, Velocity, PR=500 (Elaboración propia). ..	137

Figura 87. Comparativa Depth 2, 5, 10, 25 años (Elaboración propia).	140
Figura 88. Comparativa Depth 50, 500 años (Elaboración propia).	141
Figura 89. Mapa de inundación periodo de retorno 2 años (Elaboración propia).	142
Figura 90. Mapa de inundación periodo de retorno 5 años (Elaboración propia).	142
Figura 91. Mapa de inundación periodo de retorno 10 años (Elaboración propia).	143
Figura 92. Mapa de inundación periodo de retorno 25 años (Elaboración propia).	143
Figura 93. Mapa de inundación periodo de retorno 50 años (Elaboración propia).	144
Figura 94. Mapa de inundación periodo de retorno 100 años (Elaboración propia).	144

Lista de Tablas

Tabla 1. Estadísticas de calidad de la serie de datos hidrometeorológicos. Se muestra la cantidad de datos faltantes, el porcentaje respecto al total, la media y la desviación estándar, como parte del proceso de validación y trazabilidad de la información utilizada. (Elaboración propia).....	61
Tabla 2. Comparación entre los valores asignados de rugosidad de Manning para diferentes coberturas del terreno y los rangos recomendados en la literatura técnica. Se incluyen las fuentes de referencia utilizadas para la asignación de los coeficientes. (Elaboración propia).	73
Tabla 3. PPT MAX 24 horas Pamplona. (Elaboración propia).	94
Tabla 4. PPT MAX 24 horas La Palmita. (Elaboración propia).	95
Tabla 5. PPT MAX 24 horas Blonay. (Elaboración propia).	96
Tabla 6. Intensidades de lluvia Pamplona. (Elaboración propia).	97
Tabla 7. Intensidades de lluvia La Palmita. (Elaboración propia).	98
Tabla 8. Intensidades de lluvia Blonay. (Elaboración propia).	99
Tabla 9. Periodo de retorno de 2 años, Pamplona (Elaboración propia).	101
Tabla 10. Periodo de retorno de 5 años, Pamplona (Elaboración propia).	102
Tabla 11. Periodo de retorno de 10 años, Pamplona (Elaboración propia).	103
Tabla 12. Periodo de retorno de 25 años, Pamplona (Elaboración propia).	104
Tabla 13. Periodo de retorno de 50 años, Pamplona (Elaboración propia).	105
Tabla 14. Periodo de retorno de 100 años, Pamplona (Elaboración propia).	106
Tabla 15. Periodo de retorno de 500 años, Pamplona (Elaboración propia).	107
Tabla 16. Periodo de retorno de 2 años, Palmita (Elaboración propia).	108
Tabla 17. Periodo de retorno de 5 años, Palmita (Elaboración propia).	109

Tabla 18. Periodo de retorno de 10 años, Palmita (Elaboración propia).	110
Tabla 19. Periodo de retorno de 25 años, Palmita (Elaboración propia).	111
Tabla 20. Periodo de retorno de 50 años, Palmita (Elaboración propia).	112
Tabla 21. Periodo de retorno de 100 años, Palmita (Elaboración propia).	113
Tabla 22. Periodo de retorno de 500 años, Palmita (Elaboración propia).	114
Tabla 23. Periodo de retorno de 10 años, Palmita (Elaboración propia).	115
Tabla 24. Periodo de retorno de 25 años, Palmita (Elaboración propia).	116
Tabla 25. Periodo de retorno de 50 años, Palmita (Elaboración propia).	117
Tabla 26. Periodo de retorno de 100 años, Palmita (Elaboración propia).	118
Tabla 27. Calibración de modelo Hec-Hms, Pamplona (Elaboración propia).	120
Tabla 28. Calibración de modelo Hec-Hms, Palmita (Elaboración propia).	121
Tabla 29. Calibración de modelo Hec-Hms, Blonay (Elaboración propia).	121
Tabla 30. Calibración datos de Caudal simulado (Elaboración propia).	122

Lista de Ecuaciones

Ecuación 1. Estimación de la precipitación máxima probable mediante la distribución de Gumbel.....	74
Ecuación 2. Cálculo de la precipitación máxima para duraciones menores a 24 horas utilizando coeficientes de reducción temporal.	74
Ecuación 3. Transformación de precipitación acumulada en intensidad media de lluvia.	75
Ecuación 4. Modelo de regresión tipo potencial para curvas IDF (Intensidad–Duración–Frecuencia).....	75
Ecuación 5. Expresión ajustada para curvas IDF de la cuenca, basada en regresión de tipo potencial.	75
Ecuación 6. Fórmula general ajustada para estimar la intensidad de precipitación en función del periodo de retorno y la duración de la tormenta, con parámetros obtenidos por regresión.....	77
Ecuación 7. Cálculo del tiempo de concentración usando la fórmula de California, considerando la longitud del cauce principal y la pendiente media de la cuenca.	77
Ecuación 8. Parámetro de escala α de la distribución de Gumbel, calculado a partir de la desviación estándar de los caudales máximos anuales.....	78
Ecuación 9. Valor reducido y_T para un período de retorno T , empleado en la estimación de caudales extremos mediante Gumbel.	78
Ecuación 10. Cálculo de la probabilidad de no excedencia $F(x)$ para un determinado período de retorno.....	78
Ecuación 11. Estimación del caudal extremo x_T para un período de retorno T , utilizando la distribución de Gumbel a partir de la media μ , el parámetro de escala α y el valor reducido y_T	79

Ecuación 12. Cálculo del caudal estimado Q mediante el método del flotador, usando el área hidráulica A , la velocidad media V y un coeficiente de corrección F_c 90

1. INTRODUCCIÓN

Las inundaciones representan uno de los fenómenos naturales con mayor impacto sobre las comunidades humanas, especialmente en zonas rurales con infraestructura limitada y baja capacidad de respuesta. En Colombia y particularmente en la región de Norte de Santander, estos eventos se han intensificado debido a las variaciones climáticas, el cambio en los patrones de uso del suelo y las modificaciones morfológicas de los cauces, el corregimiento El Diamante, perteneciente al municipio de Pamplonita y Chinácota, constituye un ejemplo representativo de esta problemática, enfrentando recurrentes eventos de inundación ocasionados por el desbordamiento del río Pamplonita.

Ante esta situación se hace necesaria la implementación de herramientas de modelamiento que permitan comprender la dinámica del flujo del agua y anticipar las zonas de mayor riesgo. En este contexto, los modelos hidrológicos e hidráulicos ofrecen una alternativa eficaz para el análisis y la simulación de eventos extremos. El presente trabajo se enfoca en el desarrollo de un modelo hidrodinámico bidimensional que combine los softwares HEC-HMS y HEC-RAS, con el fin de identificar áreas vulnerables ante inundaciones en el corregimiento El Diamante. Posteriormente, se realiza la simulación hidráulica del flujo en condiciones no permanentes para diferentes tiempos de retorno, con el fin de delimitar las zonas potencialmente inundables.

Este estudio busca aportar al conocimiento técnico y práctico sobre la gestión del riesgo por inundaciones, sirviendo como base para la toma de decisiones en planificación territorial, obras de mitigación y fortalecimiento de la resiliencia comunitaria en zonas rurales.

1.1 Problema

El corregimiento El Diamante en Norte de Santander enfrenta recurrentes eventos de inundación debido a las crecientes precipitaciones y al comportamiento irregular del río Pamplonita, estas inundaciones han generado afectaciones considerables a la infraestructura local, la actividad agrícola y la seguridad de sus habitantes. A pesar de la frecuencia de estos eventos, la zona carece de un estudio técnico que permita identificar con precisión las áreas más vulnerables, lo que limita la capacidad de respuesta y la planificación adecuada por parte de las autoridades y la comunidad.

Según el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), se han emitido alertas por riesgo de inundaciones en varias regiones de Colombia, incluyendo Norte de Santander, debido a lluvias intensas y tormentas. La Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD) ha reportado afectaciones en múltiples municipios del departamento durante temporadas de lluvias.

La inexistencia de un modelo hidrodinámico que represente con fidelidad las condiciones del terreno y del flujo fluvial impide anticipar escenarios de riesgo y dificulta la toma de decisiones en cuanto a la implementación de medidas estructurales o no estructurales para mitigar el impacto de las inundaciones. Esta situación se agrava por la escasa disponibilidad de información geográfica detallada y por la falta de integración entre herramientas de análisis hidrológico e hidráulico.

Las consecuencias de las inundaciones en El Diamante son múltiples y afectan diversos aspectos de la vida comunitaria. En el ámbito económico, las pérdidas en cultivos generan

inseguridad alimentaria y disminuyen los ingresos de las familias campesinas. Socialmente, las inundaciones pueden provocar desplazamientos temporales o permanentes, afectando la cohesión comunitaria y aumentando la vulnerabilidad de grupos en situación de riesgo, como niños y adultos mayores, en términos de salud pública, la acumulación de aguas estancadas favorece la proliferación de vectores de enfermedades, como el dengue y la malaria, y puede contaminar fuentes de agua potable, incrementando el riesgo de enfermedades gastrointestinales.

En este contexto se plantea la necesidad de desarrollar un modelo bidimensional que utilice herramientas como HEC-RAS y HEC-HMS, complementadas con Sistemas de Información Geográfica (SIG), que permita simular escenarios de inundación para distintos periodos de retorno, dicho modelo debe estar basado en información topográfica precisa, con el fin de garantizar un análisis detallado del comportamiento del río y sus zonas de influencia.

Formulación del problema: ¿Cómo puede un modelo hidrodinámico bidimensional, basado en información topográfica detallada y herramientas de simulación como HECRAS y HECHMS, contribuir a la identificación de zonas vulnerables a inundaciones en el corregimiento El Diamante, Norte de Santander?

1.2 Justificación

Las inundaciones representan uno de los fenómenos naturales con mayor capacidad destructiva, especialmente en territorios rurales como El Diamante, donde la infraestructura de mitigación del riesgo es limitada o inexistente, la presencia recurrente de eventos de este tipo no solo genera pérdidas económicas significativas en la producción agrícola, viviendas e infraestructura vial, sino que también representa una amenaza directa para la integridad física y emocional de sus habitantes, esta situación demanda la implementación de soluciones técnicas eficientes que contribuyan a una adecuada gestión del riesgo y a la toma de decisiones fundamentadas. El desarrollo de un modelo hidrodinámico bidimensional para el análisis de zonas de inundación cobra especial relevancia. Mediante el uso de herramientas como HEC-RAS y HEC-HMS, junto con tecnologías geoespaciales como drones, GPS RTK y Sistemas de Información Geográfica (SIG), es posible simular el comportamiento hidráulico del río ante diferentes escenarios de caudal, generando resultados visuales y cuantitativos como mapas de inundación, estos insumos se convierten en herramientas clave para la planeación del territorio, la implementación de medidas de prevención y el diseño de obras de mitigación.

Desde el punto de vista institucional, esta investigación proporciona un insumo técnico valioso para entidades gubernamentales y locales encargadas de la gestión del riesgo, como los Consejos Municipales de Gestión del Riesgo (CMGRD), la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD) y las alcaldías, la información generada puede servir de base para planes de ordenamiento territorial, protocolos de respuesta ante emergencias y formulación de proyectos de inversión pública en infraestructura resiliente.

En el ámbito educativo, este trabajo promueve la integración de conocimientos teóricos con la práctica profesional, fomentando el aprendizaje aplicado en contextos reales, representa una oportunidad formativa para el desarrollo de competencias en modelación, análisis espacial, estadística hidrológica y uso de software especializado, fortaleciendo el perfil del ingeniero civil en formación.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo General

Desarrollar un modelo Hidrodinámico bidimensional para el análisis de zonas de inundación en el corregimiento el Diamante, Norte de Santander.

2.2 Objetivos Específicos

- Realizar un levantamiento topográfico detallado como análisis técnico y descriptivo del terreno con el propósito de conocer los parámetros geomorfológicos de la cuenca.
- Construir el modelo hidrodinámico de la cuenca en estudio mediante la información existente, verificando las soluciones numéricas de las ecuaciones que rigen el flujo.
- Hacer los hietogramas de diseño mediante el uso del software Hec-HMS para analizar la respuesta del sistema hidrológico ante eventos de precipitación intensa.
- Modelar computacionalmente la zona de estudio para conocer el comportamiento espacio temporal del flujo ante un evento extremo del clima.
- Generar los mapas de inundación mediante las variables hidráulicas obtenidas en el modelo hidrodinámico con el fin de conocer las afectaciones causadas.

3. MARCO REFERENCIAL

3.1 Marco de antecedentes o estado del arte

En su estudio (Alejabo, 2023), resalta el uso del software de modelamiento hidráulico Hec Ras para analizar la conversión de precipitación a escorrentía en la cuenca de la Quebrada San Carlos. Centrándose en las nuevas funcionalidades de Hec-Ras desde la versión 5.0, el enfoque principal es convertir este software en una herramienta investigativa. En contraposición al método tradicional que emplea un software hidrológico para preparar los datos de precipitación antes de importarlos a Hec-Ras, esta estrategia permite ingresar directamente la información de precipitación al software, programar el modelo y simular la lluvia en toda la cuenca. Esta metodología facilita la observación directa de la formación de corrientes superficiales, la dirección del flujo y el proceso completo de transformación de la lluvia a escorrentía, ofreciendo una visión detallada y precisa. Este enfoque proporciona datos confiables y valiosos para la gestión de recursos hídricos, la delimitación de áreas inundables y la identificación de zonas de riesgo, destacando la importancia de las herramientas computacionales en la comprensión eficiente de los procesos hidrológicos e hidráulicos.

La investigación previa, realizada por (HUAMAN, MENDOZA, & ROMELIO, 2022), sobre la determinación de la superficie de inundación del río Chumbao en el distrito de San Jerónimo, emerge como un antecedente fundamental para este proyecto. Enfocándose en abordar la amenaza de inundaciones derivadas de la cuenca del río Chumbao en dicho distrito, el estudio empleó métodos que incluyeron la recolección de datos en terreno y la aplicación de modelos numéricos como HEC-HMS y HEC-RAS. Estas técnicas permitieron identificar la extensión de las áreas inundables y calcular el caudal máximo para distintos periodos de retorno. Los hallazgos de esta investigación ofrecen información esencial que puede ser

utilizada por las autoridades locales en la implementación de estrategias preventivas ante potenciales desbordamientos e inundaciones en la zona.

(Rodriguez Garzon & Muñoz López, 2022) llevaron a cabo un análisis de inundaciones en la subcuenca del Río Teusacá utilizando modelación hidráulica en HEC-RAS. El estudio, realizado en los municipios de La Calera, Guasca y Sopó (noreste de Bogotá D.C.), incluyó cuatro muestreos en campo y la recopilación de datos de fuentes secundarias. Esta información se ingresó en el software HEC-RAS para producir las manchas de inundación correspondientes a diversos periodos de retorno (2.5, 5, 10, 25, 50 y 100 años), basados en los caudales máximos de la estación limnométrica Pte. Adobes. El modelo, validado con datos de campo, mostró que las inundaciones afectaban principalmente la vereda El Salitre y el casco urbano de La Calera, impactando urbanizaciones, zonas de desarrollo agropecuario, vías principales y parcelaciones campestres, con una altura máxima del agua de 27.24 cm y un área total de 1.7 km². El estudio también destaca la estacionalidad climática de Colombia, identificando hasta 2020, 190.935 km² de zonas vulnerables a inundaciones, el desastre natural más frecuente en el país, con un gran impacto en la población (Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres [UNGRD], 2020). Las pérdidas anuales esperadas por inundaciones en Bogotá son de 26.840 millones de pesos, mientras que, en La Calera, Sopó y Guasca oscilan entre 201 y 800 millones de pesos (UNGRD, 2021).

(C. & J. E., 2022), en el artículo Hacia la elaboración de un modelo hidrogeológico de la Cuenca del Río Guachiría (Colombia), se desarrolló un análisis que se acerca a un modelo hidrogeológico conceptual agrupando aspectos determinantes tales como: condiciones morfológicas e hidrológicas de la cuenca, constantes hidráulicas, calidad del agua y

localización de zonas de recarga de acuíferos, que sirvan de guía para la planificación y adecuada gestión del recurso hídrico con el fin de brindar a la comunidad un mayor conocimiento acerca del comportamiento del agua superficial en la sabana inundable de Paz de Ariporo, Casanare; así mismo, Sanabria Díaz (2021) en el artículo Análisis Comparativo de los Modelos HEC RAS e IBER en la Determinación de las Zonas de Amenaza por Inundación en el Corregimiento de Santa Fe de Morichal, Municipio de Yopal, Departamento de Casanare, la investigación a desarrollar busca comparar los resultados de modelos HEC RAS e IBER y establecer cuál es el modelo que representa mejor las condiciones reales del evento de estudio. Finalmente se obtuvo que para eventos de amenaza por inundación que requiera el uso de la modelación bidimensional se recomienda el uso de Hec Ras, debido al bajo coste computacional, la visualización de los Resultados, la organización de los elementos, la información de errores disponible y la actualización constante.

(GRANADINO, 2021), se examinó minuciosamente el fenómeno de inundación desencadenado por el desbordamiento del río Amojú en la localidad de Jaén. Se emplearon los modelos matemáticos HEC-RAS y HEC-HMS con el propósito principal de analizar y cartografiar las áreas afectadas por la inundación, con miras a facilitar la toma de decisiones ante este desafío. El proyecto abarcó diversas etapas, desde la delimitación de la cuenca hasta la recolección de datos de precipitación y la realización de simulaciones hidrológicas para estimar los caudales máximos en diferentes períodos de retorno. Además, se llevó a cabo un análisis hidráulico detallado mediante la generación de curvas de nivel, secciones transversales y simulaciones basadas en los caudales estimados. Este estudio resalta la importancia de comprender y manejar los riesgos inherentes a la proximidad de cuerpos de agua,

especialmente en un contexto de cambio climático, donde fenómenos extremos como las inundaciones pueden tener repercusiones devastadoras en comunidades vulnerables.

(MONTERO, MORENO, & ALVARO, 2021). Modelamiento hidráulico para el control y prevención de inundaciones mediante el uso de Hec-Ras 2d en la zona urbana del río Piura. En este estudio, se llevó a cabo una simulación numérica de inundaciones en la zona urbana del río Piura, en respuesta a eventos extremos como el Fenómeno "El Niño" (FEN). Los autores emplearon datos hidrológicos y un modelo digital de elevación del terreno para caracterizar morfológicamente la zona. Utilizando el software HEC-RAS 5.0.7, se modelaron diferentes eventos con periodos de retorno de hasta 500 años, con el objetivo de mitigar el impacto de las inundaciones y diseñar obras de protección ribereña. Los resultados mostraron una disminución significativa en el área inundada, lo que demostró la eficacia de las medidas implementadas.

(MAMANI, 2020). Modelación hidrológica e hidráulica bidimensional del río Cabanillas tramo puente – bocatoma Cabanilla, utilizando el modelo HEC-RAS 2D. En este estudio, se realizó la modelación hidrológica e hidráulica bidimensional del río Cabanillas en la región montañosa del Perú, con el propósito fundamental de sugerir medidas para prevenir desbordamientos e inundaciones, teniendo en cuenta las intensas precipitaciones y la acumulación de sedimentos que pueden desencadenar eventos catastróficos. Se examinaron datos meteorológicos y parámetros morfológicos e hidrológicos de la cuenca del río Cabanillas. Mediante el uso del modelo matemático bidimensional HEC-RAS 2D y herramientas de sistemas de información geográfica (SIG), se delimitaron áreas susceptibles a inundaciones para distintos períodos de retorno. Los resultados revelaron áreas de inundación notables para

períodos de retorno de hasta 500 años, con velocidades y niveles máximos de agua variables. Se llegó a la conclusión de que, si bien los modelos bidimensionales son adecuados para circunstancias específicas de investigación, pueden experimentar variaciones debido a la sensibilidad de determinados parámetros y condiciones de modelado.

(Tamayo García & Rivera Tacoamán, 2020). Modelación hidráulica del Río Pastaza, aplicando el modelo HEC-RAS para la identificación de zonas susceptibles a inundaciones en el sector de Madre Tierra en el cantón Mera de la provincia de Pastaza. En su estudio, Tamayo García y Rivera Tacoamán se dedicaron a la elaboración de planes de emergencia en la parroquia Madre Tierra, ubicada en el cantón Mera de la provincia de Pastaza. Su objetivo principal fue identificar áreas con alto riesgo de inundación debido al desbordamiento del Río Pastaza. Para lograr este propósito, utilizaron el software HEC-RAS del Cuerpo de Ingenieros de la Armada de los Estados Unidos, así como ArcMap, para crear el modelo topográfico y analizar los factores hidráulicos pertinentes. La visualización de los resultados a través de la tecnología SIG les permitió comprender de manera integral la situación y destacar las zonas críticas que requieren medidas preventivas y de respuesta frente a eventos naturales adversos.

De acuerdo con la investigación de (Arteaga, 2020), en su estudio titulado "Determinación de zonas de inundación del río Jipijapa abscisas 0+000 hasta 7+031, mediante modelación hidráulica con el software HEC-RAS", se realizó un análisis con el objetivo de identificar las áreas susceptibles a inundaciones a lo largo de las orillas del río Jipijapa. Mediante la aplicación de técnicas de modelación hidrológica, se logró delimitar las zonas de potencial riesgo en la parte alta de la cuenca del río, desde el punto de inicio en la abscisa 0+000 hasta la zona adyacente a la Universidad Estatal del Sur de Manabí. La evaluación se

basó en datos históricos recopilados por la estación pluviométrica de Andil, los cuales se emplearon para calcular los caudales correspondientes a diferentes períodos de retorno. Estos datos fueron posteriormente sometidos a una modelación hidráulica utilizando los programas Hec-HMS y Hec-RAS. Los resultados obtenidos indicaron la presencia de inundaciones de pequeña escala a partir de la abscisa 0+438, afectando áreas próximas a las márgenes del río. Estos eventos, clasificados como desastres naturales, ocasionan pérdidas tanto materiales como humanas, especialmente en zonas urbanas situadas en las proximidades de las laderas, siendo este fenómeno atribuido a desbordamientos provocados por la insuficiente pendiente del cauce para el transporte de sedimentos originados por las intensas precipitaciones.

(Tandalla & Salazar 2020) en la investigación Plan de gestión de recurso hídrico para una microcuenca interandina usando el modelo hidrológico hydro-bid, mediante la introducción de dicho modelo dieron a conocer la disponibilidad del agua aprovechable bajo un análisis temporal de una microcuenca para desarrollar un plan de gestión de recurso hídricos de una microcuenca, que permite adoptar estrategias para proveer el recurso hídrico en cantidad y calidad dentro del área donde se desarrollan las comunidades. De igual manera, Duque Sarango, Patiño, & López (2019) Realizaron la investigación de Evaluación del Sistema de Modelamiento Hidrológico HEC-HMS para la Simulación Hidrológica de una Microcuenca Andina Tropical conocida como microcuenca del río Chaquilcay, en la provincia de Azuay, en Ecuador en la cual describen hidrogramas para la determinación de caudales y para generar información hidrológica base para la gestión de cuencas, sobre todo en una zona donde no existen estudios de este tipo. De este estudio se logró obtener un caudal alto en el desagüe para distintos periodos de retorno, útiles para cuencas hidrográficas en el área de la región, que

tienen una función importante en el ecosistema y que no cuentan con información hidrometeorológica.

(MOYA & RICARDO, 2019) exploraron el comportamiento de las inundaciones pluviales del río Sevilla en el municipio Guamá de la provincia Santiago de Cuba. En su estudio, resaltaron la importancia de concienciar a la población sobre el riesgo y de proporcionar a los tomadores de decisiones información crucial sobre la vulnerabilidad ante inundaciones naturales. Utilizando el software HEC-RAS, realizaron una simulación minuciosa de las inundaciones, identificando puntos débiles en la infraestructura y ofreciendo una visión general de la susceptibilidad potencial ante estos eventos. Sus descubrimientos recalcaron la urgencia de implementar medidas preventivas y de mitigación de riesgos basadas en el conocimiento adquirido y las experiencias previas en la zona.

El estudio de (ARMIJOS, FIGUEROA MONTTOYA, & MAURICIO, 2019) explora el uso del Hec-RAS para realizar modelaciones hidráulicas y determinar las áreas propensas a inundaciones en las riberas del río Jipijapa. La metodología desarrollada se fundamenta en el análisis de datos estadísticos, las características del terreno y el uso del suelo para calcular las precipitaciones máximas con distintos periodos de retorno, utilizando Hec-HMS. Luego, se emplea Hec-RAS y ArcGIS con la extensión Hec-GeoRAS para identificar los niveles máximos de agua y las zonas inundables en la zona urbana de Jipijapa. Los hallazgos revelan que el tramo del río Jipijapa (UNESUM-BYPASS) enfrenta riesgos significativos de inundación debido a la proximidad de viviendas a sus riberas y a las características geométricas del cauce, lo que ocasiona estrangulamientos en el flujo y desbordamientos con consecuentes daños y pérdidas materiales.

Según (Quispe Orosco & Valeriano Salcedo, 2018), se puede observar una utilización eficaz de herramientas como HEC-HMS y HEC-RAS en la modelación hidrológica e hidráulica con el fin de abordar problemas derivados del cambio climático. En su estudio, se centraron en la modelación hidrológica de eventos extremos en la cuenca del río Tambo mediante el empleo de HEC-HMS, lo que les permitió examinar diversas distribuciones de precipitación y generar hidrogramas de caudal para múltiples escenarios. Asimismo, resaltaron la necesidad imperante de disponer de estructuras de encauzamiento adecuadas para prevenir inundaciones, como se evidenció en la localidad de "El Toro", donde la ausencia de dichas estructuras resultaba en inundaciones en zonas de cultivo. A través del análisis de distintos escenarios de precipitación, se ideó un muro de encauzamiento con enrocado con el propósito de resguardar y rehabilitar áreas afectadas por la erosión del río, lo que contribuyó al fomento del desarrollo sostenible del área de estudio.

(Chagua C. 2018), el trabajo de grado comprende el análisis hidrológico e hidráulico de la cuenca cerca del río Mala, logrando obtener un mapa de inundación en el distrito de Calango, departamento de Lima. El proceso de cartografía de inundaciones comienza con la delimitación de la cuenca en estudio y sus subcuencas, seguido por la creación de una red hídrica y la determinación de parámetros geomorfológicos utilizando el Sistema de Información Geográfica ARCGIS. El análisis hidrológico incluye la recopilación de datos de precipitación máxima en 24 horas, seguido por ajustes recomendados por la Organización Meteorológica Mundial (OMM), así como análisis probabilísticos utilizando distribuciones normales, Gumbel y Pearson tipo III. Además, se desarrolla un hietograma de diseño mediante el método de bloques alternos y se ejecuta una simulación hidrológica utilizando el modelo

matemático HEC-HMS para calcular los caudales de diseño con periodos de retorno de 100 y 500 años. Como resultado con el análisis hidráulico se obtuvo a través del ARCGIS, las zonas de inundación. Para el periodo de retorno de 100 años el área de inundada por el río Mala es de 177,140 m² equivalente a 17.714 Ha., y para un periodo de retorno de 500 años el área de inundada es de 254,170 m².

Un estudio significativo es el llevado a cabo por (Pérez M. & Barbosa C. 2018), titulado "Aplicación de modelo de simulación hidrológica e hidráulica HEC-HMS y HEC-RAS para la estimación de manchas de inundación a una escala de 1:25.000 en la cuenca del río Chicú". Este trabajo trata la problemática de las inundaciones periódicas en el departamento de Cundinamarca, agravadas por el fenómeno de La Niña durante los años 2010-2011, que resultaron en considerables pérdidas humanas y materiales. Utilizando la modelación hidrológica e hidráulica, los autores identificaron áreas de inundación y propusieron estrategias de mitigación para disminuir los riesgos asociados en la cuenca del río Chicú. Este estudio evidencia la efectividad de los modelos HEC HMS y HEC-RAS en la identificación y análisis de zonas propensas a inundaciones, proporcionando un marco metodológico sólido que puede ser adaptado a otras regiones con características similares.

(BUSTOS, MEJIA, & PARDO, 2017) exploraron la degradación de la cuenca del río Tunjuelo y los episodios de lluvias extremas que han resultado en inundaciones, especialmente resaltando las ocurridas en 1959, 1993 y 2002, esta última siendo la más devastadora. En colaboración con instituciones locales, han llevado a cabo múltiples investigaciones para proponer soluciones a estos problemas de inundación. Su estudio se centró en analizar las inundaciones en la parte baja de la cuenca del río Tunjuelo, desde la Estación Av. Boyacá hasta

su confluencia con el río Bogotá. Utilizando datos geoespaciales precisos y software especializado como HEC RAS 5.03 y HidroEsta, identificaron las comunidades ubicadas en las laderas del río que podrían sufrir los efectos de eventos extremos. Mediante el uso de HidroEsta y el análisis de los datos de caudales máximos, determinaron el caudal para un periodo de retorno de 100 años, crucial para prever la extensión de la inundación. El procesamiento de información geoespacial les permitió examinar la topografía del área seleccionada y crear mapas de inundación. Basándose en las estimaciones de población de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, calcularon que aproximadamente 574,862 habitantes podrían resultar afectados por una inundación con un periodo de retorno de 100 años.

Un ejemplo notable en la modelación hidrológica e hidráulica de inundaciones es el estudio realizado por (Camargo O. 2016), titulado "Modelación Hidrológico-Hidráulica de Eventos de Inundación en el Río Bogotá (Sector Tocancipá-Chía) Usando HEC-RAS". Este trabajo se centró en modelar los aspectos hidrológicos e hidráulicos de las inundaciones en el tramo del río Bogotá entre Tocancipá y Chía. La información utilizada fue proporcionada por la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR) y el IDEAM, y se aplicó el modelo HEC-RAS junto con el modelo de dinámica lineal de niveles del agua. Los resultados del estudio mostraron que los errores del modelo HEC-RAS, en términos de la magnitud física de las manchas de inundación, eran significativamente mayores que los de modelos que no incluían la variable de caudal. Este trabajo destaca la relevancia de los modelos numéricos en hidrología como herramientas fundamentales para el estudio del ciclo hidrológico y sus aplicaciones científicas y prácticas. Además, reafirma la eficacia de las herramientas

computacionales, como el modelo HEC-RAS, en la consultoría e investigación para simular eventos de inundación.

El estudio realizado por (Mora M. & Ochoa G. 2016), titulado "Modelamiento de Zonas de Inundación por Medio de las Herramientas HEC-RAS, GEO-RAS y ArcGIS, para el Sector Compreendido entre los Municipios de Corrales-Paz de Rio a lo Largo del Rio Chicamocha, en el Departamento de Boyacá", es una referencia destacada. Este trabajo subraya cómo los fenómenos climáticos impactan la superficie terrestre y provocan riesgos naturales, particularmente inundaciones, que ocasionan pérdidas humanas y materiales significativas. El estudio aborda la necesidad de prever y manejar el riesgo de inundaciones en los municipios de Corrales y Paz del Rio, donde las inundaciones son frecuentes debido a las altas precipitaciones. Empleando herramientas como HEC-RAS, GEO-RAS y ArcGIS, los autores aportan información esencial para la planificación y gestión territorial, resaltando la relevancia de la modelación hidrológica en la toma de decisiones para la gestión del riesgo.

Por otro lado, en los distintos proyectos regionales realizados se tiene que, (Alberto & Santos 2015) Modelamiento Hidrológico de las Microcuencas Olarte y Tobal Pertenecientes a la Cuenca del Lago de Tota, realizaron un estudio de la oferta hídrica del lago de Tota. Este trabajo de investigación tuvo como finalidad la caracterización morfométrica, la elaboración del balance hídrico, los caudales promedio y los posibles puntos de inundación, tomando como caso de estudio las microcuencas Olarte y Tobal, siendo estas las de mayor contribución a la cuenca del lago de Tota. En esta misma línea Loaiza & Casamitjana (2008) en la investigación Caracterización del caudal en dos subcuencas de montaña mediterránea, estudio de aplicabilidad de un modelo hidrológico, abordó la dinámica de los caudales en las subcuencas

de Canalda y Cogulers, pertenecientes al sistema de cuencas de la Ribera Salada. El análisis del comportamiento de los caudales se realizó mediante la utilización del modelo hidrológico llamado TOPLATS. Los resultados obtenidos demuestran que la aplicación del modelo sin calibrar es poco viable y se precisa una calibración previa del mismo y así obtener mayor precisión para los valores de caudal simulados.

En una investigación realizada por (Santos G. & Ricardo 2015), bajo el título "Comparación entre distintas metodologías de modelación hidrológica como HEC HMS, HEC RAS en 1D e IBER en 2D, enfocadas en las planicies de inundación y áreas urbanas de Villapinzon, Cundinamarca", se analizaron diversas estrategias de modelación hidráulica con el propósito de estimar los parámetros hidrodinámicos de los cuerpos de agua. Este estudio resaltó la importancia de contrastar modelos de una y dos dimensiones, como HEC-RAS e IBER, respectivamente, para obtener resultados precisos en distintas condiciones hidrológicas. Además, se centró en la evaluación de riesgos en áreas urbanas, particularmente en el contexto de Villapinzon, Cundinamarca, donde los desafíos asociados al río Bogotá y las crecientes históricas representan preocupaciones significativas, subrayando así la importancia de las investigaciones de modelación para entender y mitigar los riesgos de inundación en zonas vulnerables.

4. MARCO TEORICO

4.1 Modelación hidrodinámica

Se refiere al proceso de integrar un modelo hidrológico, que calcula la esorrentía superficial a partir de eventos de precipitación, con un modelo hidráulico que simula el comportamiento del flujo generado. Esta integración permite representar en el tiempo y el espacio la dinámica del agua, identificando con alta precisión las zonas inundables, la evolución del nivel del agua, las velocidades y el tiempo de llegada del flujo. En este estudio, se logra mediante la conexión de HEC-HMS (modelo de esorrentía) con HEC-RAS (modelo hidráulico 2D).

4.1.1 Acoplamiento de modelos

El acoplamiento es el proceso por el cual se transfieren los resultados de un modelo a otro. En este caso, el hidrograma de salida de HEC-HMS se usa como condición de entrada (frontera) en HEC-RAS. Este paso requiere atención a las unidades, formatos y tiempos de simulación para evitar errores de desincronización o inestabilidad.

4.1.2 Condiciones de frontera

Son parámetros necesarios para iniciar o mantener una simulación hidráulica. Incluyen datos de caudal, nivel de agua, velocidad o presión en los bordes del dominio de cálculo. En modelación hidrodinámica, definir correctamente estas condiciones es vital para garantizar estabilidad y realismo en los resultados.

4.1.3 Simulación en flujo no permanente (transitorio)

Se refiere a la capacidad del modelo para calcular cómo cambia el flujo en el tiempo. A diferencia del flujo permanente, que asume condiciones constantes, el flujo no permanente permite simular eventos como lluvias intensas y crecidas repentinas. Este tipo de modelado es el adecuado para estudios de inundaciones.

4.1.4 Sensibilidad del modelo

Es la medida en la que los resultados de un modelo cambian al modificar sus parámetros de entrada. En modelación hidrodinámica, los parámetros más sensibles suelen ser el coeficiente de Manning, el número de curva, y la resolución de la malla 2D. Evaluar esta sensibilidad permite entender la robustez del modelo.

4.2 Modelamiento hidrológico

La modelación hidrológica se enfoca en el estudio de los procesos relacionados con el ciclo del agua en una cuenca hidrográfica, como la precipitación, la escorrentía, la infiltración y la recarga de acuíferos. Esta disciplina utiliza datos climáticos, topográficos y geológicos para desarrollar modelos que representen cómo interactúan estos procesos y cómo afectan el flujo y la disponibilidad del agua en una determinada área. La modelación hidrológica es fundamental para comprender y predecir la respuesta de una cuenca ante eventos climáticos extremos, así como para gestionar de manera sostenible los recursos hídricos y mitigar los riesgos de inundaciones y sequías.

4.2.1 Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF)

Las curvas IDF representan la relación estadística entre la intensidad de una lluvia, su duración y la frecuencia con la que puede ocurrir (periodo de retorno). Estas curvas son

esenciales para definir eventos de diseño en estudios hidrológicos, y a partir de ellas se generan hietogramas que describen la distribución temporal de la lluvia.

4.2.2 Hietograma

Es un gráfico que representa cómo se distribuye la precipitación en el tiempo durante un evento. Es un insumo clave para modelar escorrentías, pues define el ritmo con el que el agua cae sobre la superficie y afecta la respuesta de la cuenca.

4.2.3 Número de Curva (Curve Number – CN)

Es un parámetro empírico propuesto por el Servicio de Conservación de Suelos (SCS) que indica el potencial de escorrentía de una superficie. Se calcula en función del tipo de suelo, cobertura del terreno, y condiciones de humedad. Su ajuste y calibración en el modelo permite reproducir con mayor exactitud los caudales observados.

4.3 Modelamiento hidráulico

La modelación hidráulica se centra en el estudio del flujo del agua en sistemas de conducción, como ríos, canales, tuberías y estructuras hidráulicas. Esta disciplina utiliza principios físicos y matemáticos para describir cómo se comporta el agua en movimiento, incluyendo su velocidad, presión, profundidad y distribución de energía. La modelación hidráulica es esencial para el diseño y la evaluación de infraestructuras hidráulicas, como puentes, presas, sistemas de alcantarillado y canales de riego, así como para analizar y prevenir los riesgos asociados con inundaciones y erosión fluvial.

4.3.1 Modelos bidimensionales (2D)

A diferencia de los modelos 1D que asumen el flujo lineal a lo largo del cauce, los modelos 2D consideran la variación en dos direcciones (x e y), lo que permite simular flujos en zonas con desbordamientos y geometrías complejas. Son ideales para estudios en zonas planas o pobladas, donde el agua se dispersa fuera del cauce.

4.3.2 Coeficiente de Manning (n)

Este coeficiente representa la fricción o rugosidad del terreno que resiste el paso del agua. Depende de la textura del lecho (arena, grava, vegetación), obstáculos y pendientes. En la modelación hidráulica, se ajusta para que las profundidades del modelo coincidan con mediciones reales, garantizando mayor precisión.

4.3.3 HEC-RAS y RAS Mapper

(Hydrologic Engineering Center's River Analysis System) es un software desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos para la modelación hidráulica de sistemas fluviales. Esta herramienta permite a los ingenieros y científicos simular la propagación de inundaciones, evaluar la capacidad hidráulica de los ríos y analizar el impacto de proyectos de ingeniería en el flujo del agua. HEC RAS utiliza un enfoque basado en secciones transversales para representar la geometría del río y calcular parámetros hidráulicos como la velocidad, profundidad y área de inundación, la extensión RAS Mapper permite integrar los modelos hidráulicos con datos geoespaciales (DEM, uso del suelo) y visualizar resultados en forma de mapas de profundidad, velocidad y extensión de inundaciones.

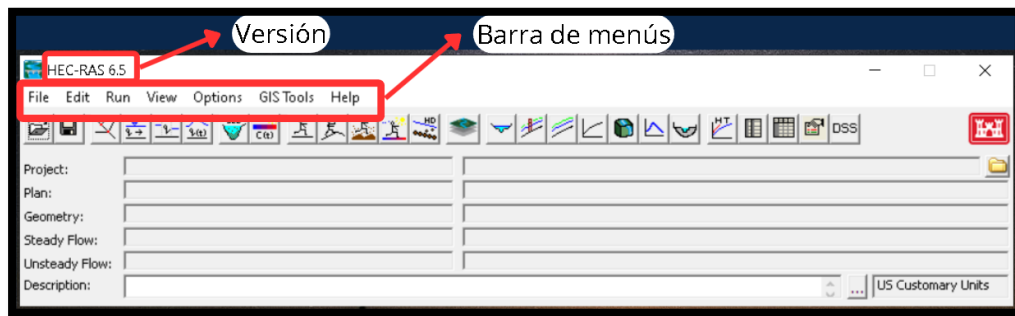


Figura 1. Interfaz general Hec-Ras (Elaboración propia).

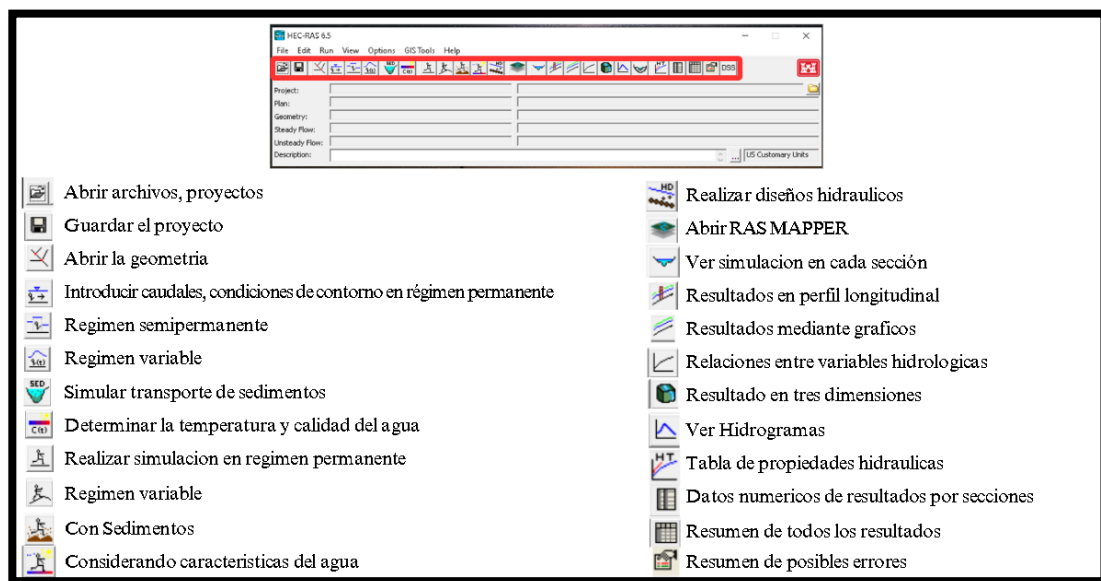


Figura 2. Herramientas de Hec-Ras (Elaboración propia).

4.3.4 Clasificación régimen del flujo

El criterio de Froude se caracteriza por el número de Froude, definido como la relación entre la velocidad media u y la celeridad relativa de la onda dinámica:

- Subcrítico: velocidad baja, el flujo es controlado por condiciones aguas abajo.
- Supercrítico: velocidad alta, el flujo responde a condiciones aguas arriba.
- Crítico: flujo en equilibrio energético, sensible a pequeños cambios en el sistema.

Esta clasificación es fundamental en modelación hidráulica, ya que determina qué ecuaciones se deben utilizar, cómo se comportan las ondas de propagación y qué condiciones de frontera son adecuadas en la simulación. En flujos bidimensionales, la coexistencia de diferentes tipos de flujo en un mismo dominio es común y debe tratarse con técnicas numéricas adecuadas para evitar inestabilidades.

4.4 Herramientas de apoyo geoespacial

4.4.1 Sistemas de Información Geográfica (SIG)

Son plataformas que permiten la gestión, análisis y visualización de datos georreferenciados. En este proyecto, los SIG fueron fundamentales para procesar el DEM, clasificar el uso del suelo, generar mallas de cálculo y representar cartográficamente los resultados. Software como ArcGIS permitió integrar capas temáticas, análisis espacial y elaboración de mapas de uso práctico.

4.4.2 Clasificación de uso del suelo y cobertura vegetal

Consiste en identificar el tipo de superficie dominante (zona urbana, cultivos, bosque, cuerpos de agua, etc.), lo cual incide directamente en la escorrentía, la rugosidad hidráulica y el número de curva hidrológico. Esta clasificación se realiza a partir de imágenes satelitales o análisis de campo, y se incorpora tanto en HEC-HMS como en HEC-RAS.

4.5 Factores de riesgo y análisis del peligro por inundaciones

Diversos elementos aumentan la probabilidad y severidad de una inundación. Entre los más comunes se encuentran: la deforestación de zonas ribereñas, el crecimiento urbano desorganizado, la obstrucción de cauces por residuos sólidos, la pérdida de capacidad hidráulica de los ríos por sedimentación, y la inexistencia de obras de control. Estos factores

alteran el equilibrio natural del escurrimiento, disminuyen la infiltración y aceleran la generación de caudales pico.

4.5.1 Peligro, vulnerabilidad y riesgo por inundación

- Peligro: probabilidad de ocurrencia de un evento natural dañino (inundación, en este caso).
- Vulnerabilidad: grado de susceptibilidad de la comunidad ante el evento, determinada por factores sociales, económicos y físicos.
- Riesgo: producto del peligro por la vulnerabilidad. En otras palabras, zonas de alto riesgo no solo enfrentan inundaciones frecuentes, sino que también tienen alta exposición y baja capacidad de respuesta.

4.5.2 Impactos de las inundaciones

Las inundaciones generan impactos multidimensionales. Entre ellos se destacan:

- Ambientales: erosión, contaminación de cuerpos de agua, pérdida de biodiversidad.
- Sociales: desplazamiento de población, afectaciones a la salud, pérdida de bienes.
- Económicos: daños en infraestructura, paralización de actividades agrícolas y comerciales.

5. MARCO LEGAL

El presente estudio se sustenta en el marco normativo colombiano que regula la gestión del riesgo de desastres, la planificación del recurso hídrico y el ordenamiento territorial, estas disposiciones establecen los lineamientos técnicos y legales para realizar estudios como la modelación hidrodinámica del río Pamplonita, garantizando su pertinencia, aplicabilidad y contribución a la prevención de inundaciones, por lo tanto, este marco legal incluye leyes, decretos y guías emitidas por entidades como el Ministerio de Ambiente, el IDEAM y la UNGRD, las cuales orientan la gestión integral del riesgo en el país.

- Ley 1523 de 2012 – Política Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres establece el marco normativo para la gestión del riesgo de desastres en Colombia, definiéndola como un proceso social orientado a la formulación, ejecución, seguimiento y evaluación de políticas y acciones permanentes para el conocimiento y la reducción del riesgo, así como para el manejo de desastres. La ley crea el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres (SNGRD) y asigna responsabilidades específicas a las autoridades nacionales, departamentales y municipales en la implementación de procesos de conocimiento del riesgo, reducción del riesgo y manejo de desastres.
- Decreto 1807 de 2014 – Incorporación de la Gestión del Riesgo en los Planes de Ordenamiento Territorial reglamenta la incorporación de la gestión del riesgo en los Planes de Ordenamiento Territorial (POT), estableciendo que los municipios deben integrar la gestión del riesgo en sus instrumentos de planificación territorial. Esto implica la identificación de amenazas, vulnerabilidades y riesgos, así como la formulación de estrategias para su reducción y manejo.

- Decreto 1076 de 2015 – Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible compila y racionaliza las normas relacionadas con el sector ambiente y desarrollo sostenible. En el contexto de la gestión del riesgo por inundaciones, establece disposiciones sobre la planificación y manejo del recurso hídrico, incluyendo la necesidad de realizar estudios técnicos para la identificación de zonas de riesgo y la implementación de medidas de mitigación.
- Guía Nacional de Modelación del Recurso Hídrico para Aguas Superficiales Continentales - El Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible ha desarrollado esta guía con el objetivo de establecer lineamientos para la aplicación de modelos matemáticos en la simulación de la calidad de las aguas superficiales. Aunque se enfoca en la calidad del agua, sus lineamientos son aplicables en la modelación hidrodinámica, ya que proporciona directrices sobre la recopilación de datos, calibración y validación de modelos, y análisis de resultados.
- Protocolo de Modelación Hidrológica e Hidráulica – IDEAM, El Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) ha establecido un protocolo para la modelación hidrológica e hidráulica, que proporciona directrices para la implementación de modelos en la evaluación de riesgos por inundaciones. Este protocolo es fundamental para garantizar la consistencia y calidad de los estudios técnicos en el país.
- Ley 99 de 1993 – Creación del Ministerio del Medio Ambiente y del Sistema Nacional Ambiental (SINA), esta ley crea el Ministerio del Medio Ambiente y el Sistema

Nacional Ambiental (SINA), estableciendo las bases para la gestión ambiental en Colombia. Asigna responsabilidades a las autoridades ambientales en la planificación y manejo del recurso hídrico, incluyendo la prevención y control de riesgos por inundaciones.

- Ley 388 de 1997 – Normas sobre Ordenamiento Territorial, la Ley 388 establece normas sobre ordenamiento territorial, incluyendo la necesidad de incorporar la gestión del riesgo en los planes de ordenamiento territorial. Esto implica la identificación de zonas de riesgo y la implementación de medidas para su mitigación, lo cual es relevante para la planificación y ejecución de proyectos de modelación hidrodinámica.
- Decreto 2157 de 2017 – Directrices para la Elaboración del Plan de Gestión del Riesgo de Desastres, este decreto establece directrices para la elaboración del Plan de Gestión del Riesgo de Desastres por parte de las entidades públicas y privadas. Incluye la necesidad de realizar estudios técnicos para la identificación de riesgos y la planificación de acciones para su reducción y manejo.

6. MARCO CONTEXTUAL

El corregimiento se encuentra atravesado por el río Pamplonita, cuya dinámica fluvial ha generado afectaciones recurrentes a la comunidad, este río fluye en dirección sur-norte, con una longitud total de 160 km y un caudal promedio de 15 m³/s, la zona abarca un área aproximada de 137.5 hectáreas.

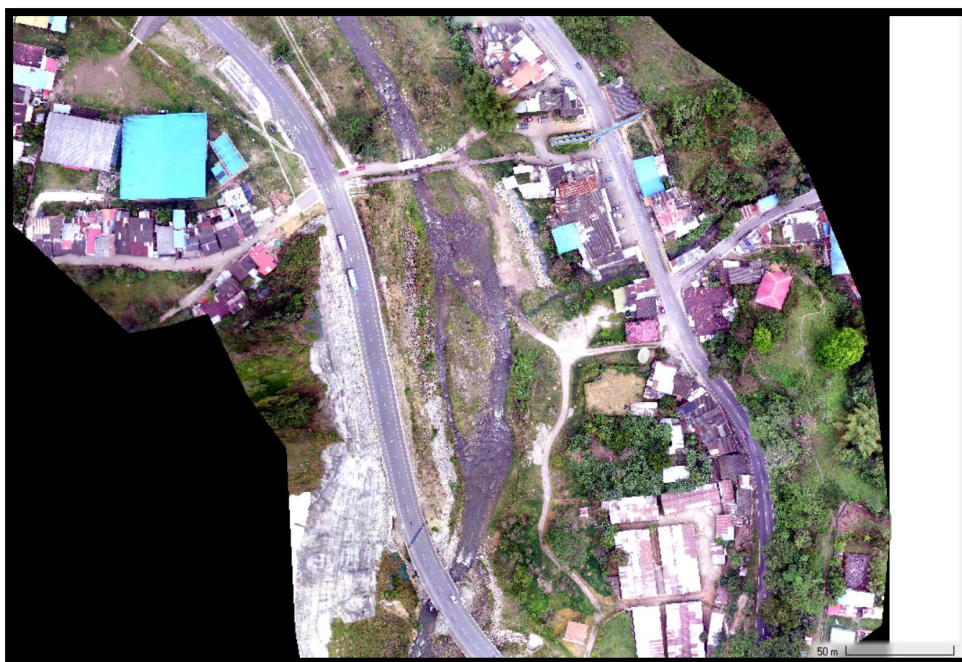


Figura 3. Ortofoto de Corregimiento el Diamante, obtenida de Agisoft, abierta en Rasmapper (Elaboración propia).

Extensión y Límites

El corregimiento tiene un área que incluye tanto zonas urbanas como rurales, con terrenos predominantemente de uso agropecuario. En el Norte limita con municipios del área metropolitana de Cúcuta. Sur, con zonas rurales del municipio de Pamplona. Este, con el río Pamplonita y áreas de influencia. Oeste, con montañas y terrenos de uso mixto.

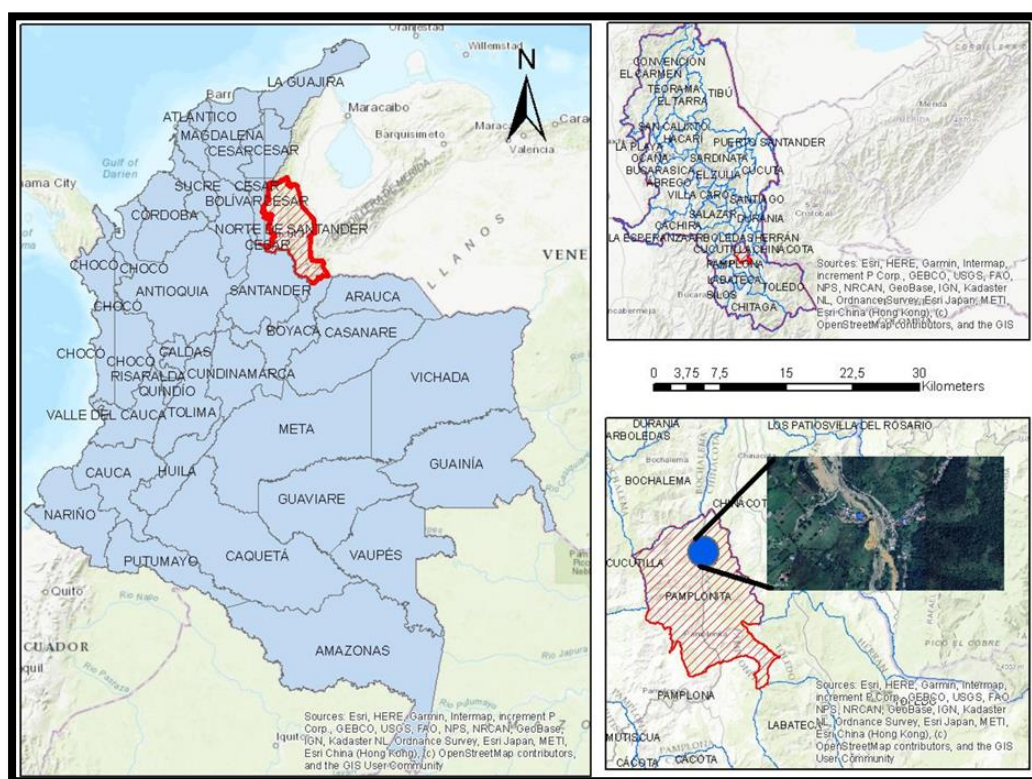


Figura 4. Ubicación geográfica de la zona de estudio, En los recuadros laterales se muestra un acercamiento a la red hidrográfica de la cuenca y la localización específica del tramo de estudio en el municipio de Pamplona. (Elaboración propia).

Demografía

La población del corregimiento El Diamante se estima en aproximadamente 3.000 habitantes, distribuidos en diversos sectores tanto rurales como del centro poblado. Esta cifra refleja una comunidad significativa dentro de la región, con una estructura social que incluye familias dedicadas principalmente a actividades agropecuarias y comerciales.

Economía

La economía de El Diamante se basa principalmente en la agricultura y la ganadería. Los cultivos predominantes incluyen café, caña de azúcar, plátano y diversas hortalizas, mientras que la ganadería se enfoca en la producción de leche y carne. Además, la ubicación

estratégica del corregimiento y su acceso a vías principales facilitan el comercio de productos agrícolas y ganaderos con municipios cercanos.

Cultura

El corregimiento El Diamante posee una rica vida cultural, influenciada por las tradiciones de Pamplonita y Chinácota. Las festividades religiosas y patronales son eventos destacados que fortalecen la identidad y cohesión de la comunidad. Además, la existencia de una parroquia propia y de instituciones educativas locales refleja el compromiso de los habitantes con la preservación de sus valores culturales y el desarrollo social del corregimiento.

7. METODOLOGÍA

El presente trabajo de investigación se enmarca dentro del enfoque cuantitativo, descriptivo y aplicado, orientado al análisis y simulación del comportamiento hidrodinámico del río Pamplonita en el corregimiento El Diamante, mediante la integración de datos topográficos de alta resolución, información hidrometeorológica histórica y técnicas avanzadas de modelación hidrológica e hidráulica.

Desde el punto de vista metodológico se trata de una investigación no experimental en la medida en que no se manipulan las variables de forma directa, sino que se observan, miden y analizan a través de herramientas computacionales que permiten simular su comportamiento, la investigación es descriptiva porque busca caracterizar la dinámica del flujo del río en escenarios de crecida, y aplicada porque sus resultados están dirigidos a la solución de un problema real y específico: la amenaza de inundación en una zona con creciente ocupación territorial y vulnerabilidad estructural.

Este enfoque metodológico permite combinar el uso de herramientas de campo con modelación matemática, estableciendo una cadena de trabajo que parte de la adquisición y procesamiento de datos geoespaciales de alta precisión, pasa por la estimación de caudales de diseño mediante métodos estadísticos y simulación hidrológica (HEC-HMS), y culmina en la simulación hidráulica bidimensional (HEC-RAS 2D), que permite identificar con alta precisión las áreas susceptibles a inundación.

El modelo adoptado contempla dos ejes de análisis: hidrológico e hidráulico, en el eje hidrológico se desarrolló un modelo de generación de esorrentía con base en información

pluviométrica y fisiográfica de la cuenca, mientras que en el eje hidráulico se implementó un modelo en régimen no permanente, que reproduce las condiciones reales de propagación del flujo sobre la superficie topográfica detallada, permitiendo generar mapas de profundidad, velocidad y extensión de la inundación.

La metodología se justifica no solo por su validez técnica, sino por su alineación con las directrices establecidas en la Ley 1523 de 2012 y el Decreto 1807 de 2014, que exigen el conocimiento técnico del riesgo como base para su gestión, esta aproximación permite que los resultados sean utilizados por las autoridades locales como insumos para la toma de decisiones, la planificación territorial, y la formulación de medidas estructurales y no estructurales de mitigación.

7.1 Descripción del área de estudio

El presente estudio se desarrolló en el corregimiento El Diamante, ubicado en el departamento de Norte de Santander, específicamente en el sector que atraviesa el río Pamplonita, esta zona presenta una característica administrativa singular, ya que está dividida entre los municipios de Pamplonita y Chinácota, lo que conlleva una doble jurisdicción en aspectos administrativos, ambientales y de gestión del riesgo.

El área de estudio comprende una franja urbana y semiurbana dispuesta sobre ambas márgenes del río Pamplonita, se caracteriza por una topografía quebrada, con laderas pronunciadas, zonas bajas adyacentes al cauce y estructuras construidas en áreas potencialmente inundables, esta configuración territorial condiciona el comportamiento hidráulico del río, especialmente durante eventos de lluvia intensa, y hace que la comunidad se enfrente a una amenaza permanente por desbordamientos.

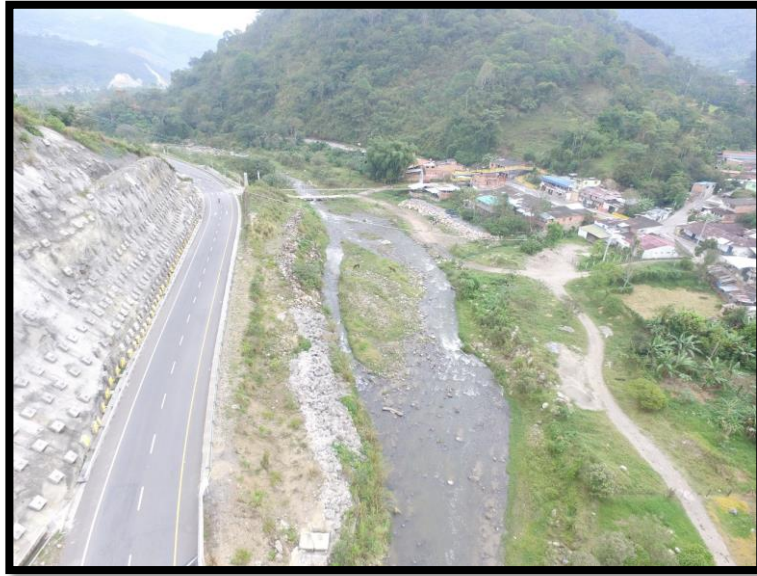


Figura 5. Vista aérea del tramo del río Pamplonita a su paso por el sector urbano de Pamplona, donde se evidencian zonas residenciales próximas al cauce. (Elaboración propia).

Durante la visita técnica realizada, se delimitó el área de análisis hidráulico utilizando herramientas de Google Earth Pro, estableciendo un polígono de vuelo con un perímetro aproximado de 1.816 metros y un área total de 251.990 m². Dentro de este perímetro se realizó el levantamiento fotogramétrico mediante dron y el levantamiento batimétrico del cauce; se identificaron elementos relevantes para la modelación hidráulica, tales como:

- Dos puentes vehiculares de concreto que cruzan el río y que inciden directamente en la propagación del flujo.
- Una pasarela peatonal, que representa una posible obstrucción hidráulica en caso de crecientes.
- Defensas ribereñas parcialmente deterioradas y zonas de protección con rocas y gaviones.
- Infraestructura urbana (viviendas, vías, redes de servicios públicos) ubicada muy cerca del cauce.

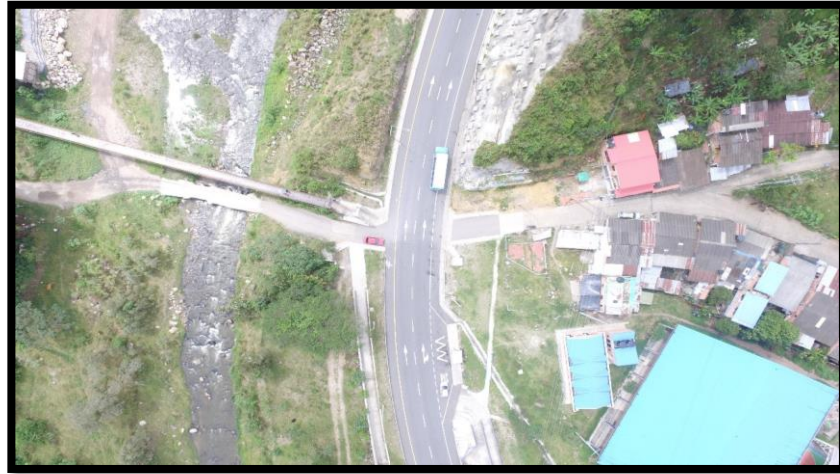


Figura 6. Vista cenital del cruce del río Pamplonita con la vía nacional, donde se observa el puente vehicular y el entorno urbano inmediato. (Elaboración propia).



Figura 7. Perspectiva aguas arriba del puente principal sobre el río Pamplonita, utilizada como referencia para modelado hidráulico. (Elaboración propia).

Además, se realizaron registros fotográficos y vuelos con dron para captar imágenes de detalle del estado actual del cauce, las estructuras hidráulicas y los tramos críticos. Las imágenes aéreas permitieron observar:

- Áreas donde el cauce ha sido intervenido por obras viales (taludes estabilizados con concreto).

- Sectores con acumulación de material aluvial, que reducen la sección hidráulica útil.
- Secciones estrechas del cauce, en donde el riesgo de represamiento o sobrepaso es mayor.



Figura 8. Imagen aérea del puente vehicular sobre el río Pamplonita, donde se evidencian intervenciones en los márgenes y acumulaciones de material en el cauce. Elaboración propia.

Complementariamente, se ejecutaron actividades de levantamiento topográfico con GPS RTK, tanto en superficie como dentro del cauce, con el fin de obtener datos batimétricos precisos que alimentaran el modelo digital del terreno (DEM), estas condiciones justifican plenamente la necesidad de desarrollar un modelo hidrodinámico bidimensional que permita representar con precisión la propagación del flujo en distintos escenarios de caudal, considerando la interacción entre el terreno, las estructuras y las dinámicas fluviales.

7.2 Fase de levantamiento de información

La fase de levantamiento de información constituyó uno de los pilares fundamentales de este estudio, ya que permitió obtener los datos espaciales y geométricos necesarios para la

construcción del modelo topográfico detallado, base sobre la cual se desarrolló la simulación hidrodinámica del río Pamplonita en el corregimiento El Diamante.

7.2.1 Levantamiento Fotogramétrico con Dron

Para obtener una cobertura completa de la zona de estudio, se planificó y ejecutó un vuelo fotogramétrico mediante dron en un área delimitada en Google Earth de aproximadamente 251.990 m², correspondiente al tramo crítico del río y su entorno inmediato o de posible inundación cercano al casco urbano. El dron se programó para capturar imágenes en línea base con traslape longitudinal y lateral, tomó un total de 139 fotografías aéreas a baja altura durante 15-20 minutos, permitiendo una alta resolución espacial del terreno.



Figura 9. Registro del inicio del vuelo fotogramétrico con dron para la captura de imágenes aéreas del cauce y su entorno. (Elaboración propia).

Para garantizar la precisión métrica del modelo generado, se establecieron siete (7) puntos de control terrestre, ubicados estratégicamente dentro del área de vuelo, estos puntos fueron señalizados en campo con marcas blancas hechas de cal en forma de cruz, con un centro resaltado en color rojo. Dichos puntos fueron georreferenciados con tecnología GNSS de doble

frecuencia tipo RTK, asegurando coordenadas precisas en el sistema MAGNA Bogotá Colombia.



Figura 10. Ubicación y visualización aérea de un punto de control terrestre (GCP) marcado en campo con cruz blanca y centro rojo, utilizado para la georreferenciación precisa del modelo. (Elaboración propia).



Figura 11. Puntos de control terrestre 4 y 5 ubicados sobre el eje vial que cruza el cauce del río, usados para la georreferenciación precisa del modelo. (Elaboración propia).



Figura 12. Punto de control terrestre 7 localizado en el margen vial junto a viviendas, correspondiente a un sector crítico cercano al cauce. (Elaboración propia).

7.2.2 Levantamiento Batimétrico del Cauce

Paralelamente al levantamiento aéreo, se llevó a cabo el levantamiento batimétrico del cauce del río Pamplonita, para esto se recorrió el lecho fluvial a pie con un receptor RTK montado sobre una mira, registrando cotas de fondo en múltiples perfiles transversales a lo largo del tramo analizado en colaboración con el equipo del ISER. Estos puntos se distribuyeron uniformemente para capturar la variación de profundidad, ancho y morfología del cauce, incluyendo zonas de remanso, pozas, rápidos y áreas de deposición de sedimentos.



Figura 13. Apoyo técnico del ISER durante la toma de datos topográficos en campo, empleando estación GNSS para la caracterización del cauce. (Elaboración propia).



Figura 14. Trabajo de campo en el cauce: toma de datos batimétricos mediante GPS RTK para el levantamiento detallado del perfil del río. (Elaboración propia).



Figura 15. Registro batimétrico desde el margen del río, empleando GPS RTK para obtener la geometría precisa del fondo del cauce. (Elaboración propia).

Durante esta etapa también se registraron las posiciones de estructuras hidráulicas significativas, como puentes vehiculares, pasarelas peatonales, defensas ribereñas (gaviones y rocas), bordes de vía y taludes estabilizados.

7.2.3 Fuentes Secundarias

Para complementar la información primaria recolectada en campo, se acudió a fuentes oficiales confiables, se descargaron series históricas de precipitación máxima diaria mensual y caudales desde la plataforma del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM (www.ideam.gov.co), especialmente de las estaciones “Pamplona”, “La Palmita”, “Blonay” y “Donjuana”, estos datos fueron fundamentales para generar curvas IDF, calibrar el modelo hidrológico y realizar análisis estadísticos de caudales mediante el método de Gumbel.

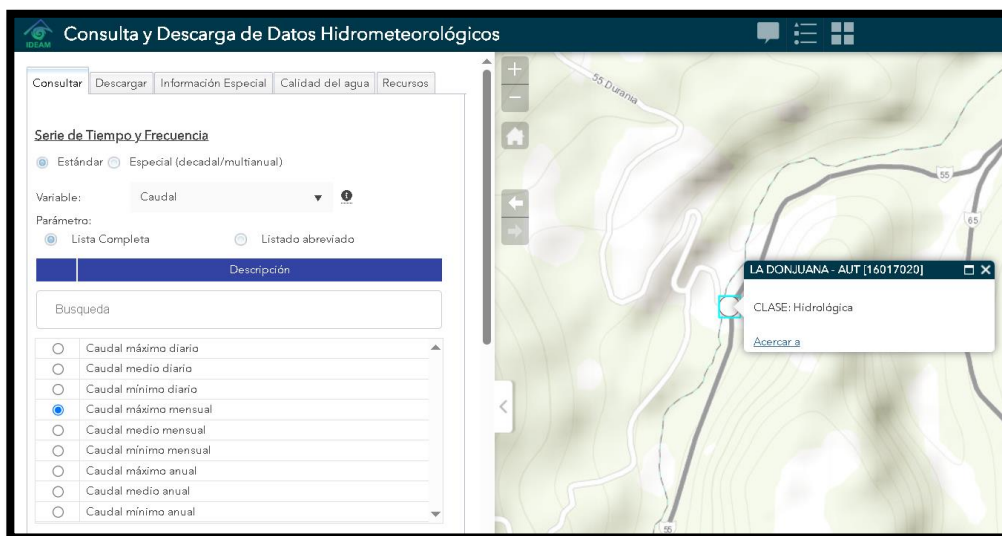


Figura 16. Interfaz de la plataforma IDEAM utilizada para la descarga de datos hidrometeorológicos de la estación Donjuana, fundamentales para el análisis de caudales y generación de curvas IDF. (Elaboración propia).

Asimismo se accedió al portal del Sistema de Información Ambiental de Colombia (SIAC) (www.siac.gov.co/recursos), donde se obtuvo cartografía base, mapas de cobertura del suelo, geología, y otras capas temáticas ambientales relevantes para el análisis SIG y la parametrización del modelo hidrológico.

SIAC2 / RECURSOS / CATÁLOGO DE MAPAS				límite			
			administrativo				
BIODIVERSIDAD	PORTAFOLIO DE CONSERVACION	Coberturas 2015		No disponible		PNN	
BIODIVERSIDAD	PORTAFOLIO DE CONSERVACION	Coberturas 2017		No disponible	No disponible	PNN	
BIODIVERSIDAD	PORTAFOLIO DE CONSERVACION	Coberturas 2012				PNN	
BIODIVERSIDAD	PORTAFOLIO DE CONSERVACION	Coberturas 2007				PNN	

Figura 17. Visualización del catálogo de mapas del portal del SIAC, utilizado para la obtención de coberturas temáticas como uso del suelo, geología y límites administrativos. (Elaboración propia).

Durante la recopilación de series históricas de precipitación diaria y mensual, se identificó la presencia de registros incompletos en los datos descargados del IDEAM,

especialmente para la estación climatológica ubicada en el municipio de Pamplona. Estos vacíos correspondían a periodos interrumpidos o no reportados dentro del intervalo de análisis hidrológico.

Para no comprometer la continuidad de la serie y mantener la validez estadística de los análisis, se aplicó un método de imputación basado en la generación de valores aleatorios acotados. Este procedimiento consistió en utilizar la distribución normal inversa (DISTR.NORM.INV en Excel) con una media y desviación estándar calculadas a partir de los datos válidos existentes. La fórmula utilizada permitió simular valores dentro del rango histórico observado, garantizando coherencia interna con el comportamiento de la estación.

Este tratamiento se aplicó solo cuando el porcentaje de datos faltantes no superaba el 40% del total, como se evidenció en el archivo de control. En el caso específico del año 2022, se imputaron valores en meses sin información utilizando esta técnica, con el fin de completar la serie y proceder a la elaboración de las curvas IDF y hietogramas necesarios para el modelo HEC-HMS.

El procedimiento se documentó debidamente en las hojas de cálculo, conservando la trazabilidad de los valores originales, los datos generados y el porcentaje de completitud final de la serie, lo que permitió una validación transparente del proceso.

Tabla 1. Estadísticas de calidad de la serie de datos hidrometeorológicos. Se muestra la cantidad de datos faltantes, el porcentaje respecto al total, la media y la desviación estándar, como parte del proceso de validación y trazabilidad de la información utilizada. (Elaboración propia).

datos faltantes	71
datos	109

% datos faltantes	39.44
Media	5.58
Desviación Estandar	4.32

7.3 Procesamiento de datos geoespaciales

7.3.1 Generación del Modelo Fotogramétrico en Agisoft Metashape

Una vez recolectadas las imágenes mediante dron y georreferenciados los puntos de control terrestre, se procedió a procesar los datos en el software Agisoft Metashape Professional, este programa permite la reconstrucción tridimensional del terreno mediante técnicas de fotogrametría automatizada y modelado por estructura desde el movimiento (SfM).

Se importaron 139 imágenes orientadas (algunas imágenes fueron eliminadas debido a la resolución o en su momento al movimiento del dron generando incongruencias), capturadas con una resolución promedio de 4.03 cm/píxel a una altura media de 99.3 metros sobre el terreno. Se utilizó el sistema de coordenadas MAGNA-SIRGAS / Colombia Bogotá Zona 18N, en cumplimiento con la normativa cartográfica nacional, durante el procesamiento se generaron los siguientes productos:

- Nube de puntos densa: compuesta por más de 33 millones de puntos con calidad alta.
- Modelo Digital de Elevación (MDE): con resolución espacial de 8.20 cm/píxel.
- Ortomosaico georreferenciado: de 12.526 x 14.136 píxeles, con una resolución de 4.10 cm/píxel.

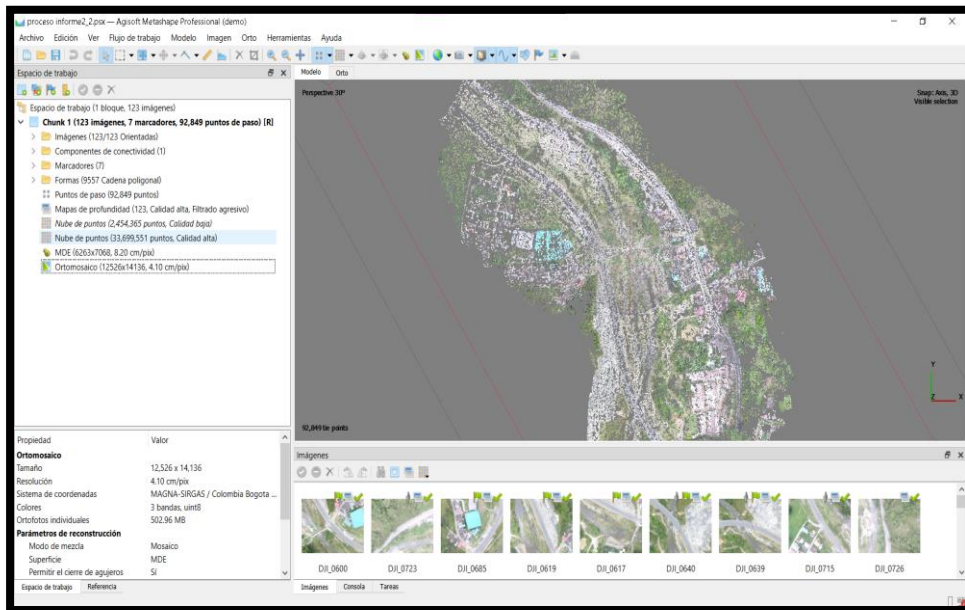


Figura 18. Interfaz del software de fotogrametría mostrando la nube de puntos y los productos generados tras el procesamiento del vuelo: ortomosaico, MDE y puntos de control. (Elaboración propia).

Para asegurar la precisión del modelo, se emplearon los 7 puntos de control RTK levantados en campo, los cuales fueron marcados como marcadores dentro del entorno de trabajo, la inclusión de estos puntos permitió una corrección geométrica precisa de la nube de puntos y del ortomosaico.

El proceso de alineación de imágenes y ajuste de modelo arrojó un error medio cuadrático (ECM) total de 4.29 cm, con un error horizontal (XY) de 3.85 cm y un error en altitud (Z) de apenas 1.89 cm, estas cifras son indicativas de una alta precisión geométrica, adecuadas para estudios hidráulicos que requieren una correcta representación del relieve, especialmente en áreas de cauce activo.

Los errores individuales por punto de control se representaron gráficamente en un mapa de precisión, mostrando niveles de incertidumbre inferiores a 4 cm para la mayoría de los puntos, lo cual confirma la calidad del modelo generado.

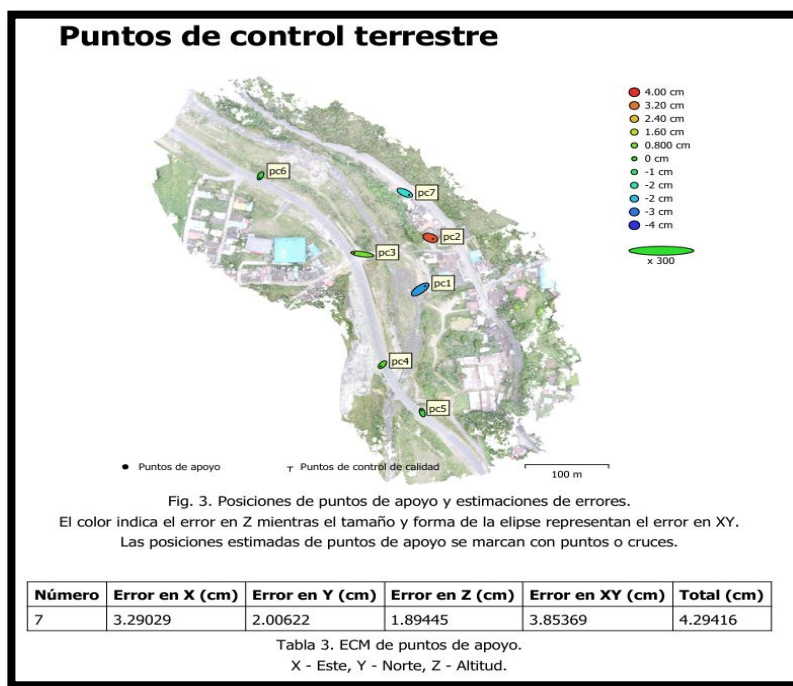


Figura 19. Distribución de puntos de control terrestre (GCP) y representación gráfica de los errores en XY y Z. Los niveles de incertidumbre muestran precisiones subcentimétricas y del orden de pocos centímetros, validando la calidad del modelo generado. (Elaboración propia).

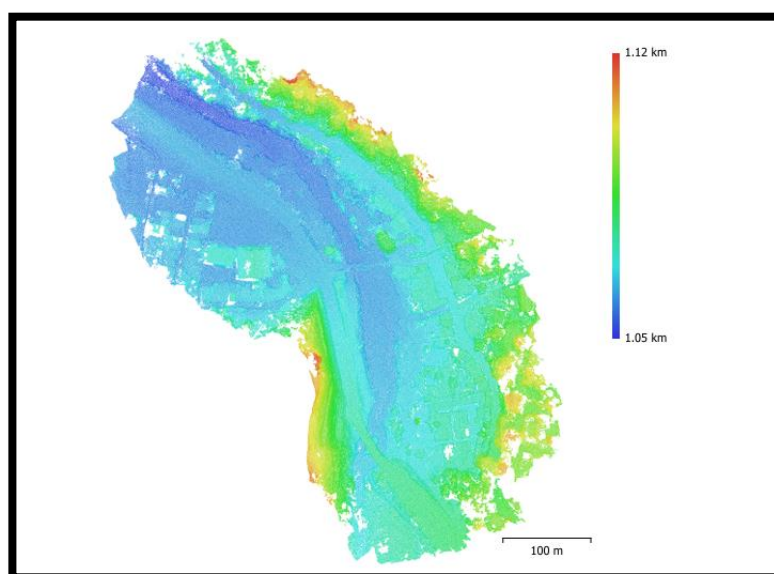


Figura 20. Modelo Digital de Elevación (MDE) generado a partir de la nube de puntos obtenida mediante fotogrametría con dron. Se visualizan las diferencias altimétricas del terreno en el tramo de estudio. (Elaboración propia).

Respecto a la precisión topográfica alcanzada en este estudio, es pertinente señalar que se ejecutó un levantamiento fotogramétrico utilizando tecnología en drones con procesamiento posterior en el software Agisoft Metashape. El proyecto logró una resolución espacial de 4.03 cm/píxel, y un error promedio de reproyección de 2.28 píxeles (como se logra observar en la figura 19). Además, se emplearon siete puntos de control terrestre georreferenciados con GPS diferencial (RTK), alcanzando un error medio total de 4.29 cm, lo cual se encuentra dentro de los márgenes aceptables para modelaciones hidrodinámicas bidimensionales con enfoque en la gestión del riesgo por inundaciones.

Complementariamente se ejecutó un levantamiento batimétrico manual en campo con GPS RTK, capturando puntos estratégicos del cauce, tanto en la línea central del río como en las márgenes y en los taludes (alto y bajo). Esta metodología permitió una caracterización detallada del perfil transversal del cauce, indispensable para modelaciones precisas en HEC-RAS 2D.

Considerando los estándares técnicos en estudios hidrológicos y fluviales, y la escala del proyecto aplicado al corregimiento El Diamante, se concluye que la topografía generada ofrece un grado de precisión adecuado, ya que permite representar de manera confiable la geometría del cauce y zonas adyacentes, siendo suficiente para simular distintos periodos de retorno, generar mapas de inundación, y establecer propuestas de gestión del riesgo.

7.3.2 Procesamiento de Datos Batimétricos en Civil 3D

Una vez recolectados los datos de campo mediante receptor RTK, se procedió a importar los puntos al entorno de trabajo del software Autodesk Civil 3D, herramienta especializada en modelado topográfico.

Los puntos obtenidos fueron organizados y filtrados, manteniéndose exclusivamente aquellos que correspondían al eje del cauce fluvial (batimetría) y a los taludes laterales que delimitan la zona hidráulicamente activa del río Pamplonita. Con esta información se generó una superficie topográfica (TIN) de alta precisión, representando con fidelidad el perfil transversal del cauce.

Posteriormente, se definieron y trazaron líneas de rotura (breaklines) en los siguientes elementos clave: Margen izquierda e izquierda del río, para delimitar la zona húmeda activa y evitar distorsiones del modelo digital. Base de talud izquierdo y derecho, lo que permitió una adecuada modelación del terreno inclinado y la generación de una geometría realista, estas líneas de rotura fueron integradas al modelo de superficie para dirigir el trazado de triángulos y asegurar que las pendientes fueran representadas correctamente.

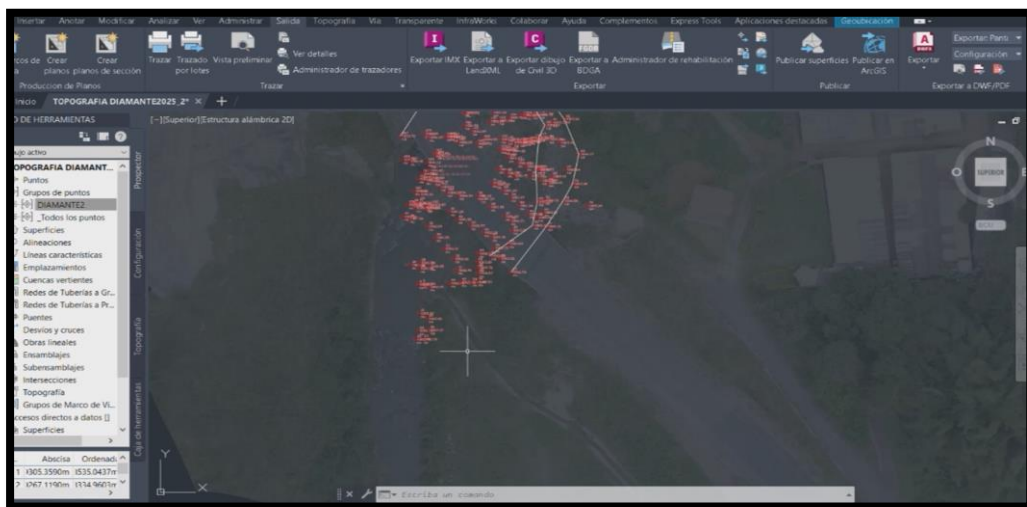


Figura 21. Puntos obtenidos en el levantamiento y superficie generada en Civil 3D. (Elaboración propia).

Una vez definida la superficie, se procedió a generar curvas de nivel equidistantes, útiles tanto para análisis visual como para exportación en entornos GIS, exportándose la superficie resultante en formato DEM, para ser unida posteriormente al modelo fotogramétrico creado en Agisoft.

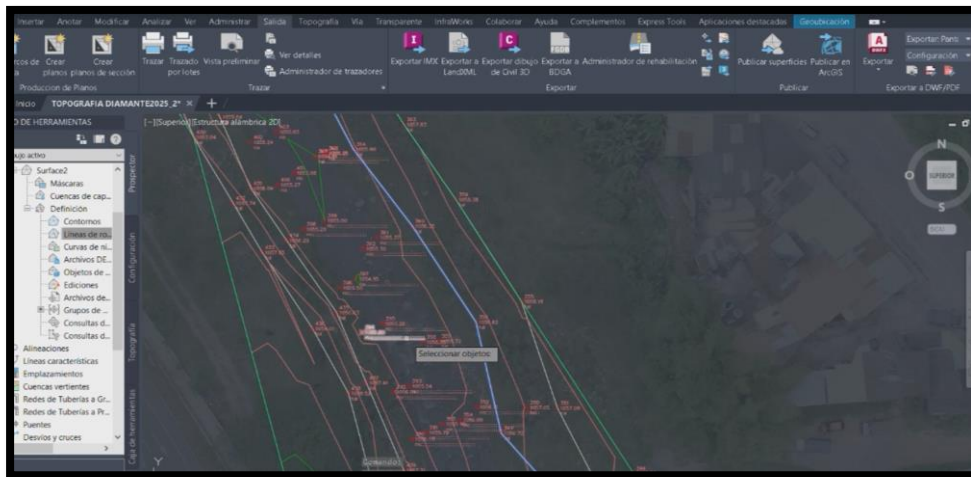


Figura 22. Visualización de curvas de nivel y líneas de rotura en AutoCAD Civil 3D, utilizadas para la definición precisa de la superficie topográfica y modelación del cauce. (Elaboración propia).

Este procedimiento permitió contar con un modelo del cauce realista y detallado, que complementó el DEM aéreo generado mediante dron, ofreciendo una representación tridimensional completa del sistema fluvial incluyendo la morfología subacuática.

7.3.3 Integración de Modelos Digitales de Elevación (DEM) en ArcGIS

Con el fin de obtener una superficie continua y realista del terreno para la modelación hidráulica, fue necesario integrar los productos obtenidos mediante dron con la topografía batimétrica generada en Civil 3D. El procedimiento se desarrolló en el entorno del software ArcGIS Desktop (ArcMap), empleando herramientas específicas del módulo ArcToolbox para el tratamiento y fusión de datos raster, el flujo de trabajo técnico aplicado fue el siguiente:

1. Importación de los DEM, se cargaron dos modelos raster:

- DEM DIAMANTE.tif: proveniente de Agisoft, basado en la fotogrametría aérea.
 - DEMCORTECEN.tif: exportado desde Civil 3D, correspondiente a la batimetría levantada con GPS RTK.
2. Creación del polígono de corte, se creó una capa tipo shapefile poligonal que delimitaba la franja central del cauce-sector donde el DEM aéreo presentaba vacíos por efectos de espejamiento o poca visibilidad del río.
- Herramienta usada: ArcCatalog > Create Feature Class > Polygon.
 - Se digitalizó el polígono manualmente sobre la vista del ortomosaico georreferenciado.
3. Extracción de la sección central del río, con el shapefile creado se procedió a recortar la zona de interés del DEM batimétrico.
- Herramienta usada: Extract by Mask (Spatial Analyst Tools > Extraction > Extract by Mask).
 - Resultado: raster del centro del cauce (demcortecen) ajustado espacialmente para encajar con el DEM original de dron.

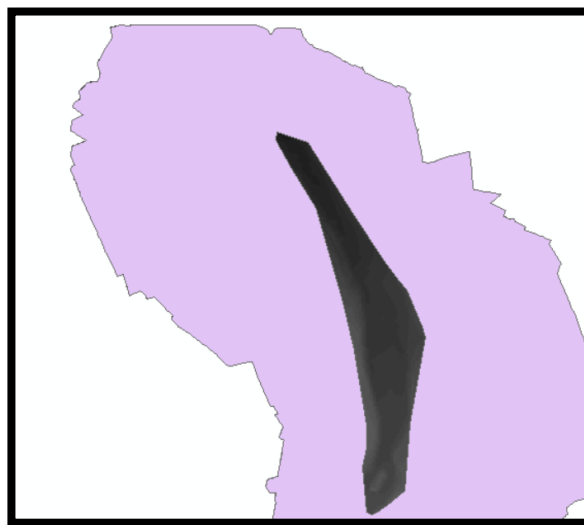


Figura 23. Resultado del recorte del DEM batimétrico mediante la herramienta “Extract by Mask”, mostrando la sección central del cauce ajustada espacialmente. (Elaboración propia).

4. Unión de modelos en un solo raster continuo, para obtener un único DEM completo, se aplicó la función Mosaic To New Raster (Data Management Tools > Raster > Raster Dataset > Mosaic To New Raster), donde se fusionó el DEM generado con Agisoft y el DEM batimétrico de Civil 3D.

Se definieron los siguientes parámetros:

- Número de bandas: 1.
 - Tipo de celda de salida: 32-bit float.
 - Sistema de coordenadas: MAGNA-SIRGAS / Colombia Bogotá.
5. Validación y visualización, finalmente, se aplicó un sombreado de elevación (hillshade) y simbologías clasificadas (escalas de color por intervalo) para verificar la continuidad topográfica y ausencia de artefactos o errores en la fusión.
 - Herramienta usada: Symbology > Classified > Stretch con rampa de color invertida o personalizada.

Este proceso permitió consolidar un único Modelo Digital de Elevación continuo, que representa con fidelidad tanto el terreno expuesto como el perfil sumergido del cauce del río en la zona de estudio, este modelo fue esencial para la fase posterior de simulación hidráulica en HEC-RAS 2D.

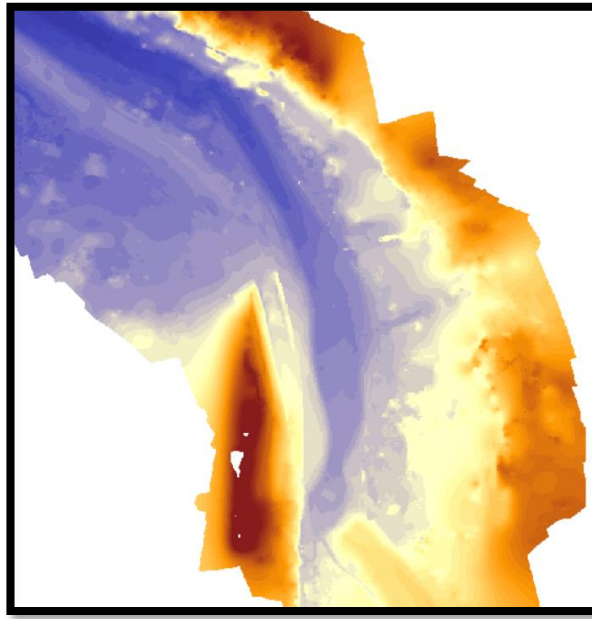


Figura 24. Modelo Digital de Elevación continuo generado a partir de la integración del DEM batimétrico y el levantado con dron, representando tanto el terreno expuesto como el cauce sumergido del río. (Elaboración propia).

Una vez consolidado el Modelo Digital de Elevación resultante en ArcGIS mediante la herramienta Mosaic To New Raster se procedió a su validación tridimensional utilizando ArcScene, componente del entorno de visualización 3D de ESRI. Este paso tuvo como propósito asegurar la correcta transición entre los modelos y detectar posibles saltos de elevación, solapamientos o discontinuidades producto de la unión de los DEM, en ArcScene se realizó lo siguiente:

- Se cargó el DEM fusionado (DEM Final) como capa de superficie.
- Se sobrepuso la capa de ortofoto para confirmar alineación con el relieve generado.
- Se inspeccionaron especialmente las zonas de borde entre el DEM de Agisoft y el DEM batimétrico, garantizando una interpolación suave y sin artefactos visuales.

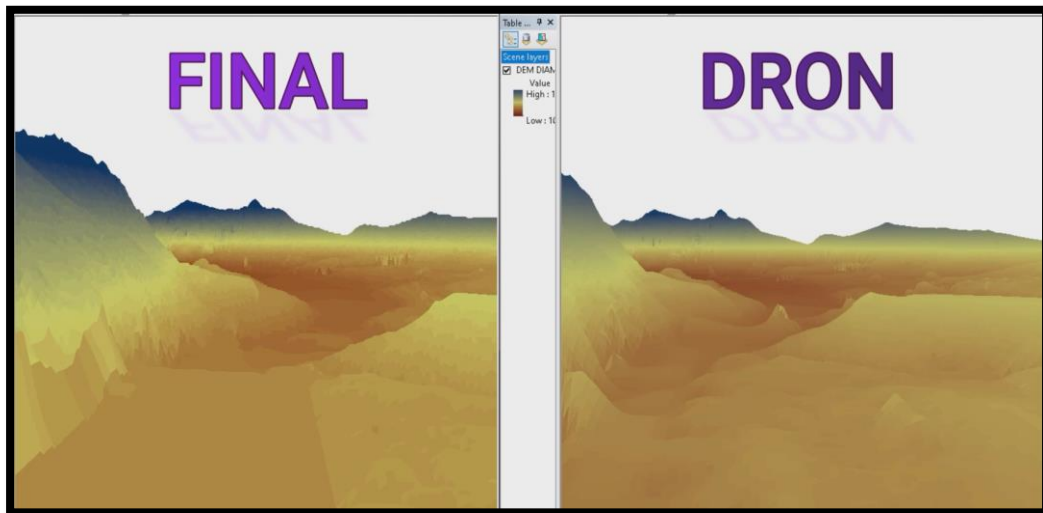


Figura 25. Comparación entre el Modelo Digital de Elevación original generado con dron (derecha) y el modelo final fusionado con batimetría (izquierda). Se evidencia una transición continua y coherente en la topografía. (Elaboración propia).

La inspección visual detallada confirmó que la fusión se realizó de manera satisfactoria, sin generar escalones abruptos en los datos de elevación, manteniendo la coherencia topográfica de todo el entorno modelado.

7.4 Clasificación de cobertura vegetal y asignación de coeficientes de rugosidad de Manning

Con el objetivo de caracterizar de manera precisa la rugosidad superficial del área de estudio para su posterior integración en el modelo hidráulico de HEC-RAS, se llevó a cabo un proceso de clasificación de cobertura del terreno mediante ArcGIS. Esta clasificación se basó en una fotointerpretación de la ortofoto generada por el dron y fue complementada con la información obtenida en campo.

Se procedió a generar un shapefile tipo polígono que representara las distintas coberturas del terreno en el corregimiento El Diamante. Este shapefile se delineó manualmente en ArcMap utilizando como referencia la ortofoto georreferenciada (ORTO_DIAMANTE.tif),

con el fin de capturar con alta fidelidad las características del entorno. Las categorías diferenciadas en la clasificación fueron las siguientes:

- Cauce del río (color azul): asignado con un coeficiente de Manning de $n = 0.03$. (El valor de Manning del cauce se modificó después ya que se calibro en el modelo hidráulico).
- Vegetación baja o rastrojo (verde claro): $n = 0.04$.
- Vegetación alta o arbolada (verde oscuro): $n = 0.11$.
- Zona urbana consolidada (rojo): $n = 0.015$.
- Vías vehiculares (gris): $n = 0.012$.
- Estructuras de protección o muro de contención (gris oscuro): $n = 0.01$.

A cada polígono del shapefile se le asignó un campo de atributo denominado $n_manning$, con el valor correspondiente al coeficiente de rugosidad hidráulica según la clasificación. Estos valores se basan en rangos comúnmente aceptados en literatura técnica (Chow, 1959) y ajustados según la observación local del comportamiento del terreno.



Figura 26. Clasificación del uso del suelo y asignación espacial de coeficientes de rugosidad de Manning (n) en el área de estudio. (Elaboración propia).

Este shapefile clasificado con su correspondiente campo *n_manning* fue posteriormente utilizado como capa de cobertura de rugosidad dentro del entorno de RAS Mapper en HEC-RAS 2D. Para ello, se exportó el shapefile desde ArcGIS asegurando el sistema de coordenadas MAGNA-SIRGAS Colombia Bogotá, y se verificó su compatibilidad con el proyecto hidráulico.

Tabla 2. Comparación entre los valores asignados de rugosidad de Manning para diferentes coberturas del terreno y los rangos recomendados en la literatura técnica. Se incluyen las fuentes de referencia utilizadas para la asignación de los coeficientes. (Elaboración propia).

Cobertura	Valor asignado (n)	Rango recomendado en la literatura	Fuente
Cauce del río	0.030	0.025 – 0.035	Ingeciv
Vegetación baja (rastrojo)	0.040	0.035 – 0.050	HidroJING
Vegetación alta (arbolada)	0.110	0.075 – 0.150	HidroJING
Zona urbana consolidada	0.015	0.012 – 0.020	Ingeciv
Vías vehiculares	0.012	0.010 – 0.015	Ingeciv
Muro de contención	0.010	0.010 – 0.014	Ingeciv

Estos valores se encuentran dentro de los rangos sugeridos por las fuentes técnicas consultadas, lo que valida su aplicación en este modelo hidráulico.

7.5 Modelado Hidrológico

7.5.1 Curvas IDF

Se utilizaron los datos históricos diarios de precipitación máxima en 24 horas registrados por la estación pluviométrica de Pamplona. A partir de esta serie temporal (2008–2022), se seleccionaron los máximos anuales para aplicar un análisis de frecuencias.

Se aplicó la distribución extrema de Gumbel para estimar las precipitaciones máximas probables PTP para distintos periodos de retorno (2, 5, 10, 25, 50, 100, 500 años). La fórmula utilizada fue:

$$x_T = \bar{x} + k_T \cdot \alpha$$

Ecuación 1. Estimación de la precipitación máxima probable mediante la distribución de Gumbel.

Donde:

- $\bar{x}$ = media de los máximos anuales
- $\alpha = \sqrt{\frac{6 \cdot S}{\pi}}$ desviación estándar corregida
- $K_T = -\ln(-\ln(F))$ = variable reducida de Gumbel
- $F = 1-(1/T)$ = probabilidad de excedencia

Esto permitió obtener los valores de precipitación máxima diaria asociados a cada periodo de retorno.

Con base en los valores de precipitación para 24 horas, se aplicaron los coeficientes de reducción temporal (según Campos, 1978) para calcular las precipitaciones máximas para menores duraciones (18 h, 12 h, 6 h, etc.):

$$\rho_d = P_{24h} \cdot Cd$$

Ecuación 2. Cálculo de la precipitación máxima para duraciones menores a 24 horas utilizando coeficientes de reducción temporal.

Donde:

- P_{24h} es la precipitación diaria máxima.
- Cd es el coeficiente correspondiente a la duración menor.

Las precipitaciones fueron transformadas en intensidades usando:

$$I = \frac{\rho_d}{t}$$

Ecuación 3. Transformación de precipitación acumulada en intensidad media de lluvia.

donde I es en mm/h, Pd en mm y t en horas. Esto da origen a la matriz de intensidades por duración y frecuencia, base de las curvas IDF.

Con los valores de intensidades para cada periodo de retorno, se ajustó una regresión tipo potencial para deducir una ecuación general del tipo:

$$I = k \cdot \frac{T^m}{\tau^n}$$

Ecuación 4. Modelo de regresión tipo potencial para curvas IDF (Intensidad–Duración–Frecuencia).

Donde:

- K = 52.8919
- m = 0.162648
- n = 0.61639

(Estos parámetros se obtuvieron mediante regresión logarítmica).

Las curvas IDF se graficaron (intensidad vs duración) para cada uno de los periodos de retorno analizados. El resultado son curvas suaves y decrecientes, coherentes con el comportamiento típico: a menor duración, mayor intensidad de precipitación.

$$I = \frac{52.8919 \cdot T^{0.162648}}{t^{0.61639}}$$

Ecuación 5. Expresión ajustada para curvas IDF de la cuenca, basada en regresión de tipo potencial.

Donde:

I = intensidad de precipitación (mm/hr)

T = Periodo de Retorno (años)
 t = Tiempo de duración de precipitación
 (min)

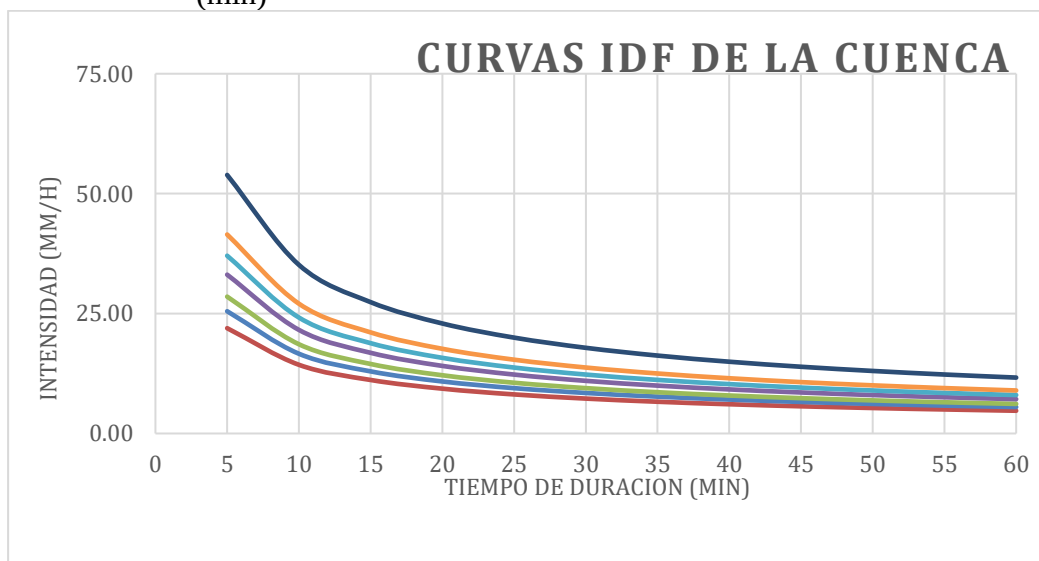


Figura 27. Curvas Intensidad–Duración–Frecuencia (IDF) generadas para la cuenca a partir de los registros de precipitación de estaciones IDEAM. Estas curvas permiten estimar la intensidad de lluvias para distintos tiempos de duración y periodos de retorno. (Elaboración propia).

7.5.2 Construcción de Hietogramas a partir de Curvas IDF

Para el modelado hidrológico de la cuenca bajo estudio, fue necesario generar hietogramas sintéticos representativos de diferentes periodos de retorno. Estos hietogramas fueron contruidos a partir de las curvas IDF (Intensidad – Duración – Frecuencia), previamente ajustadas mediante regresión potencial.

Las curvas IDF se derivaron de datos históricos de precipitación máxima diaria de la estación meteorológica de Pamplona. Se empleó el método de Gumbel para calcular las precipitaciones máximas probables (PMP) para diferentes periodos de retorno ($T = 2, 5, 10, 25, 50, 100$ y 500 años), luego se utilizaron coeficientes de reducción temporal (según Campos, 1978) para obtener precipitaciones para diferentes duraciones (de 1 a 24 horas). La expresión general de las curvas IDF ajustadas fue:

$$i = \frac{k \cdot T^m}{\tau^n}$$

Ecuación 6. Fórmula general ajustada para estimar la intensidad de precipitación en función del periodo de retorno y la duración de la tormenta, con parámetros obtenidos por regresión.

Donde:

- i: intensidad de precipitación (mm/h),
- T: periodo de retorno (años),
- t: duración de la tormenta (minutos),
- K = 52.8919, m = 0.162648, y n = 0.61639 fueron los parámetros obtenidos mediante regresión.

Se definió una tormenta de diseño con duración igual al tiempo de concentración de la cuenca, calculado con la fórmula de California:

$$\tau_c = 0.87 \cdot L^{0.385} \cdot S^{-0.77}$$

Ecuación 7. Cálculo del tiempo de concentración usando la fórmula de California, considerando la longitud del cauce principal y la pendiente media de la cuenca.

Con la intensidad media de la lluvia y cada periodo de retorno, se construyeron los hietogramas sintéticos mediante el método de bloques alternos, este método consiste en redistribuir los valores de intensidad desde el mayor hasta el menor, ubicando el mayor en el centro del hietograma y alternando los valores restantes hacia adelante y atrás.

Cada hietograma muestra:

- Intensidad (mm/h) por intervalo de tiempo (ej. cada 5 minutos).
- Precipitación acumulada.
- Precipitación parcial y acumulada ajustada.

Los hietogramas generados se presentan para los distintos periodos de retorno. Cada uno está acompañado por:

- La curva IDF correspondiente.
- El gráfico del hietograma (barras).
- Distribución de frecuencias de intensidades.

7.5.3 Estimación de Caudales Máximos con Gumbel y Calibración en HEC-HMS

La caracterización de eventos extremos de caudal en la cuenca se realizó aplicando la distribución de Gumbel para valores extremos (Tipo I), la cual es ampliamente utilizada para la estimación de caudales máximos anuales debido a su capacidad de modelar eventos raros. Se utilizaron registros históricos de caudales máximos diarios (en 24 horas) de la estación hidrométrica Don Juana, abarcando un periodo significativo desde 1990 hasta 2020, se calcularon las variables estadísticas requeridas: la media aritmética $\bar{x}$, la desviación estándar S , y el parámetro de escala α , definido como:

$$\alpha = \frac{\sqrt{6} \cdot S}{\pi}$$

Ecuación 8. Parámetro de escala α de la distribución de Gumbel, calculado a partir de la desviación estándar de los caudales máximos anuales.

El valor reducido de Gumbel y_T para un periodo de retorno T se obtuvo mediante:

$$y_T = -\ln(-\ln(F(x)))$$

Ecuación 9. Valor reducido y_T para un período de retorno T , empleado en la estimación de caudales extremos mediante Gumbel.

donde $F(x)$ es la probabilidad de no excedencia para cada periodo de retorno, calculada como:

$$F(x) = 1 - \frac{1}{T}$$

Ecuación 10. Cálculo de la probabilidad de no excedencia $F(x)$ para un determinado período de retorno.

El valor extremo de caudal x_T se calculó como:

$$x_T = \mu + \alpha \cdot y_T$$

Ecuación 11. Estimación del caudal extremo x_T para un período de retorno T , utilizando la distribución de Gumbel a partir de la media μ , el parámetro de escala α y el valor reducido y_T .

Los caudales máximos estimados para periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50, 100 y 500 años fueron registrados para su posterior comparación con resultados simulados en el modelo HEC-HMS.

Para la calibración hidrológica se utilizó el software HEC-HMS (versión 4.8), configurando un modelo conceptual de la subcuenca correspondiente a la estación Don Juana, la calibración consistió en ajustar los parámetros del modelo, principalmente el Número de Curva (CN) del método de pérdidas SCS y el método de transformación hidrológica también basado en el hidrograma unitario SCS.

Se simularon eventos de precipitación utilizando los hietogramas obtenidos a partir de las curvas IDF generadas para la estación de Pamplona, La Palmita, y Blonay (estaciones cercanas al cauce principal). Dichos hietogramas fueron implementados como datos de entrada en el modelo meteorológico de HEC-HMS para cada periodo de retorno evaluado.

El objetivo de la calibración fue lograr que los caudales simulados en la estación de control (Don Juana) se aproximaran a los caudales máximos estimados estadísticamente mediante la distribución de Gumbel. La comparación se realizó para cada uno de los periodos de retorno, validando el modelo al observar un buen ajuste entre los valores simulados y los teóricos, lo que permitió garantizar una correcta representación del comportamiento hidrológico de la cuenca.

Una vez calibrado el modelo con base en la estación Don Juana, se procedió a simular los caudales máximos esperados para cada periodo de retorno en el sector de interés, el Diamante.

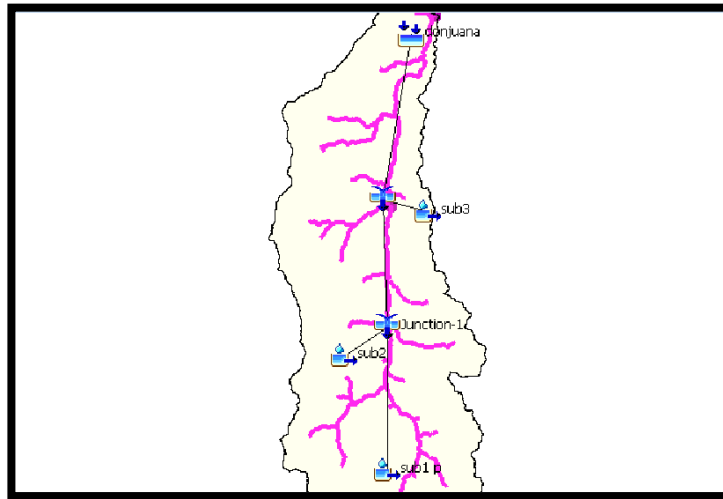


Figura 28. Modelo hidrológico configurado en HEC-HMS, delimitando la cuenca de aporte hacia el sector de El Diamante y utilizando como estación de control Don Juana. (Elaboración propia)

Para la calibración del modelo hidrológico en HEC-HMS, se recopilaron y procesaron datos de precipitación y caudal de estaciones cercanas a la zona de estudio, se utilizaron datos de precipitación máxima mensual de las estaciones de Pamplona, La Palmita y Chinácota. Cabe señalar que la estación de Chinácota no contaba con datos de precipitación máxima mensual, por lo que se aplicó un factor de corrección basado en un coeficiente regional del norte de Santander, el cual se ajustó a partir de una triangulación con las otras dos estaciones. Paralelamente, se obtuvieron registros de caudal de la estación hidrométrica Don Juana (IDEAM), ubicada aguas abajo del sector El Diamante, esta estación sirvió como referencia para validar los resultados del modelo calibrado.

Se elaboró una tabla en Excel con doce eventos de precipitación del año 2020 (uno por mes), en la que se analizaron las respuestas del modelo ante variaciones de los parámetros de

entrada, para cada evento, se calibraron tres parámetros principales: Lag Time (tiempo de retardo), Número de Curva (CN), Porcentaje de área impermeable (Impervious).

Además, se estimaron las áreas de influencia de cada estación para generar los hietogramas correspondientes y aplicar las curvas IDF de manera precisa en las subcuencas, la calibración fue un proceso iterativo, en el que se ajustaron los parámetros mencionados hasta lograr que los caudales simulados se aproximaran de forma satisfactoria a los valores observados en la estación Don Juana. Como criterio de ajuste se buscó minimizar el error porcentual entre el caudal simulado y el observado, utilizando también el análisis visual de la respuesta hidrológica.

El primer paso consistió en la creación del Basin Model, el cual se denominó “subcuenca”. En esta etapa, se cargaron archivos Shapefile con la delimitación geoespacial de la cuenca principal y del sistema de drenaje asociado (red hidrográfica). A continuación, se definieron tres subcuencas (Subcuenca 1, Subcuenca 2 y Subcuenca 3), que fueron integradas mediante puntos de unión jerárquicos: El Punto de Unión 1 recibe los aportes de la Subcuenca 1 y la Subcuenca 2, este punto se conecta con el Punto de Unión 2, al cual también se une la Subcuenca 3, finalmente, el Punto de Unión 2 desemboca en el nodo final Don Juana, que representa el punto de control aguas abajo.

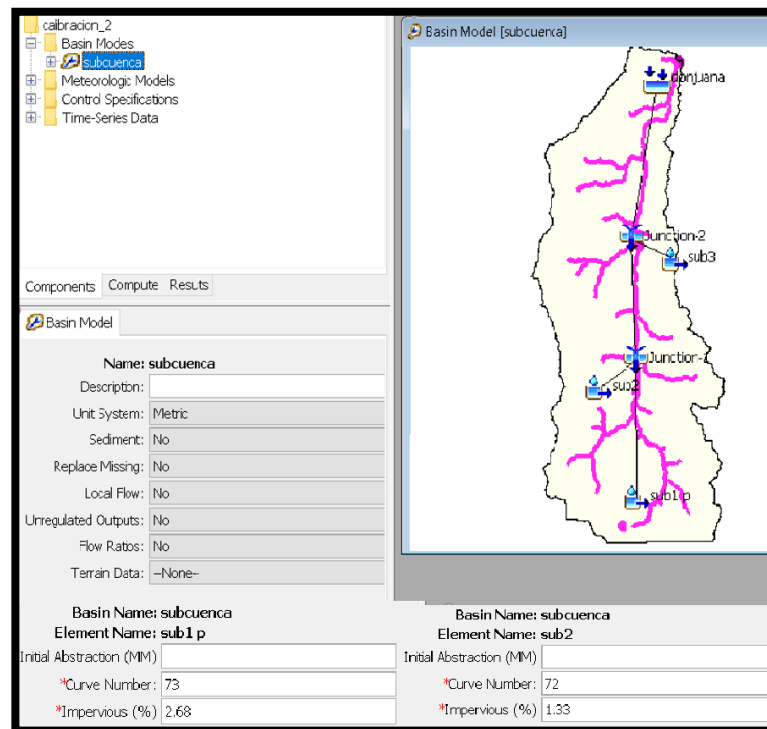


Figura 29. Modelo hidrológico configurado en HEC-HMS con datos calibrados (Elaboración propia).

Posteriormente se creó el módulo Time Series Data para cada estación meteorológica, en el cual se cargaron los hietogramas derivados a partir de las curvas IDF previamente calculadas. Estos hietogramas fueron específicos para cada subcuenca, considerando la cercanía a las estaciones de Pamplona, La Palmita y Chinácota.

Con los datos de precipitación establecidos, se configuró el Meteorologic Model, vinculando en este módulo cada subcuenca con su correspondiente serie temporal (Time Series Data). Se seleccionó el tipo de modelo de precipitación como "Specified Hyetograph", asegurando así que el sistema reconociera las lluvias de diseño.

Luego, se creó el componente Control Specifications, en el cual se definió la duración del evento de simulación, el intervalo temporal (timestep) y la fecha y hora de inicio y fin de

la corrida, este evento de simulación fue utilizado para ejecutar iterativamente el modelo durante el proceso de calibración.

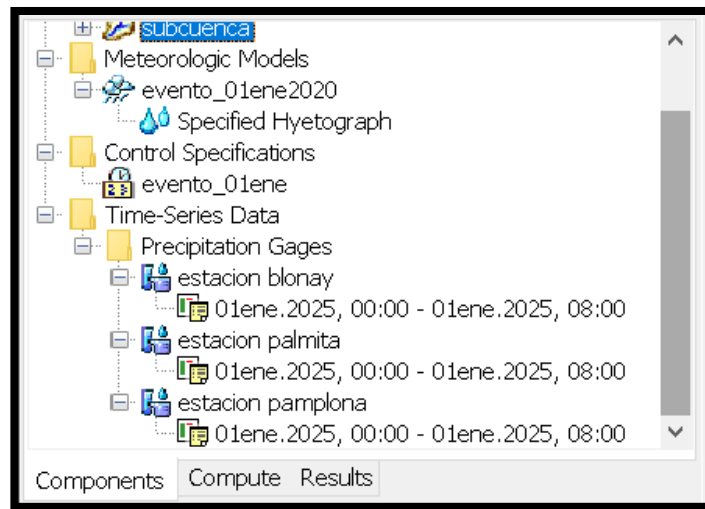


Figura 30. Hec-Hms Configuración de Time-Series Data, (Elaboración propia).

La calibración consistió en ajustar manualmente los parámetros de cada subcuenca, principalmente:

- Lag Time (tiempo de retardo).
- Número de Curva (Curve Number – CN).
- Porcentaje de superficie impermeable (Impervious %).

Se ejecutaron múltiples simulaciones modificando dichos parámetros hasta lograr que los caudales simulados se aproximaran al caudal registrado en la estación hidrométrica Don Juana. Esta validación se realizó evento por evento (mes a mes), comparando el caudal máximo simulado con el observado, finalmente se calcularon promedios de los parámetros ajustados por evento, los cuales fueron utilizados como valores definitivos para las simulaciones con diferentes periodos de retorno.

7.6 Modelado Hidráulico en HEC-RAS

Para la simulación hidráulica de la zona de estudio, se utilizó el software HEC-RAS 2D en conjunto con su herramienta gráfica RAS Mapper, permitiendo representar de manera precisa la dinámica del flujo superficial en condiciones reales, este proceso se desarrolló mediante las siguientes etapas:

7.6.1 Importación de Datos Geoespaciales

Inicialmente, se cargaron al entorno de RAS Mapper los siguientes elementos:

- Modelo Digital de Elevación (DEM) de alta resolución, generado a partir de la unión del ráster tomado de Agisoft y el ráster generado en Civil 3D.
- Ortofoto georreferenciada, utilizada como base de referencia visual para validar la correcta ubicación del modelo y elementos estructurales, con esto se logró colocar eficazmente la malla para el modelo 2D.
- Landcover rasterizado, el cual contiene la clasificación de uso del suelo codificada con coeficientes de rugosidad de Manning asignados según el tipo de superficie (vegetación alta, baja, zona urbana, vías, cauce, muros, etc.).

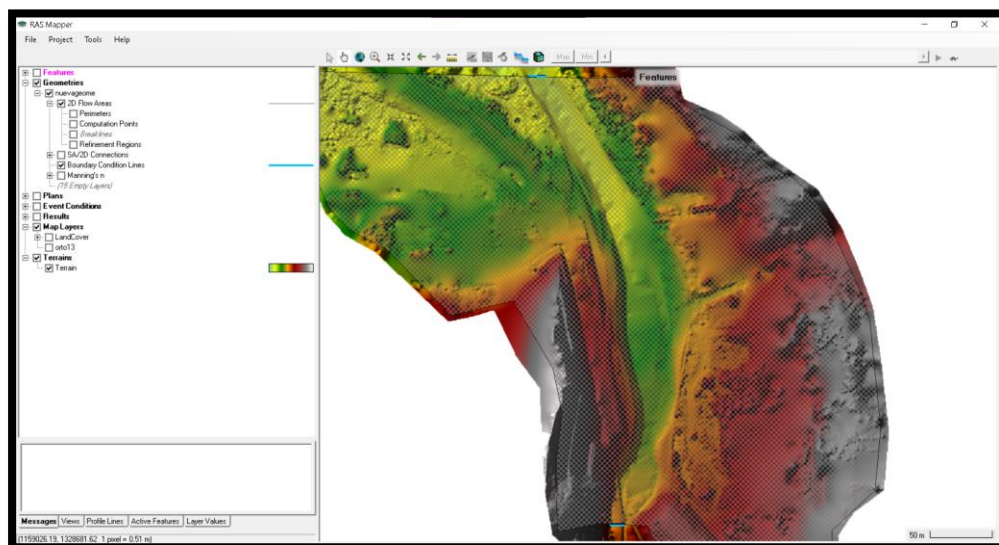


Figura 31. Visualización del modelo 2D en RAS Mapper con ortofoto georreferenciada y capa raster de clasificación de uso del suelo (landcover), codificada con coeficientes de Manning. (Elaboración propia).

Se delineó el área 2D de flujo (2D Flow Area) representando la zona de interés.

Posteriormente:

- Se estableció el perímetro de la malla, limitando la extensión espacial del modelo.
- Se generó automáticamente una malla de cálculo 2D, ajustada para tener una mayor densidad en la zona del cauce y áreas urbanas críticas.
- Se insertaron regiones de refinamiento (Refinement Regions) sobre el cauce principal para lograr una mejor resolución de los resultados hidráulicos en ese sector.

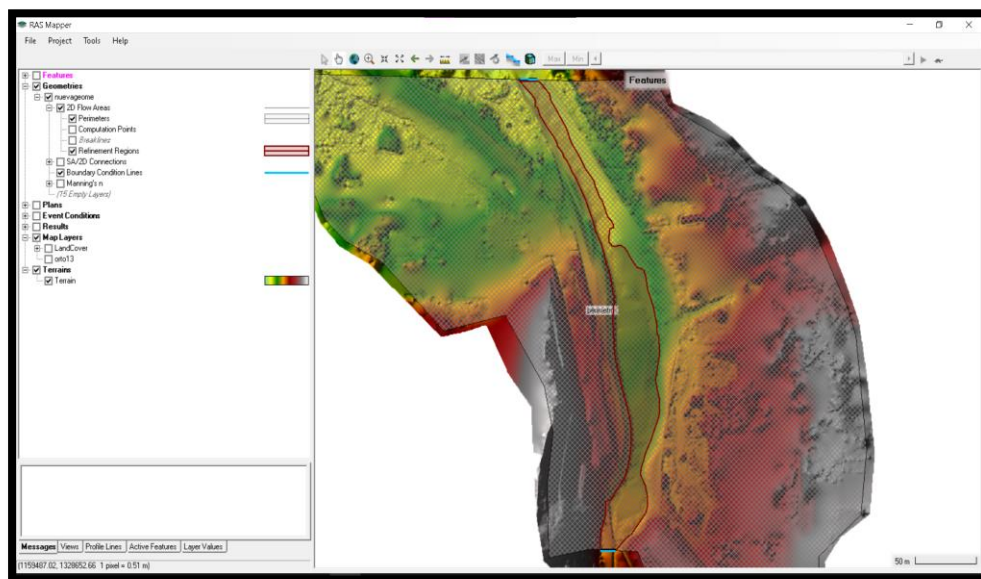


Figura 32. Inserción de regiones de refinamiento (Refinement Regions) sobre el cauce principal en el entorno del modelo 2D en HEC-RAS para mejorar la precisión hidráulica. (Elaboración propia).

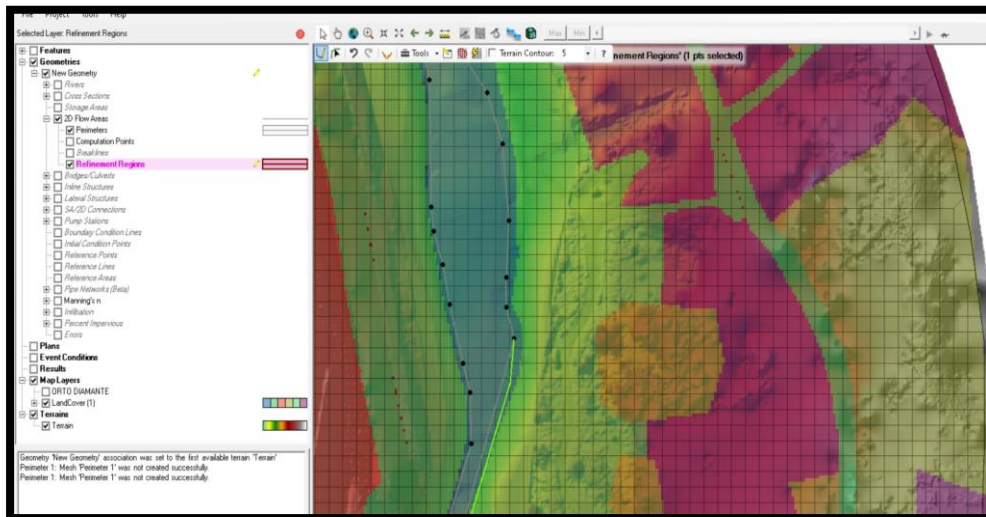


Figura 33. Visualización detallada de la malla de cálculo y las regiones de refinamiento en el cauce principal mediante HEC-RAS 2D. (Elaboración propia).

Se incluyeron:

Boundary Condition Lines: Líneas de entrada y salida del flujo, donde:

- En la entrada se utilizó un hidrograma de caudal (Flow Hydrograph).
- En la salida se empleó una condición de profundidad normal (Normal Depth), con una pendiente de fricción definida en GIS con el DEM.

Puentes y estructuras transversales:

- Se incorporaron dos puentes mediante el editor de conexiones. Uno fue definido como puente con flujo presurizado y sobrevertimiento (Bridge 2D Pressure/Overtopping).
- El segundo, de estructura más compleja, fue modelado con alcantarillas múltiples (culverts) y estructura de embalse (weir).

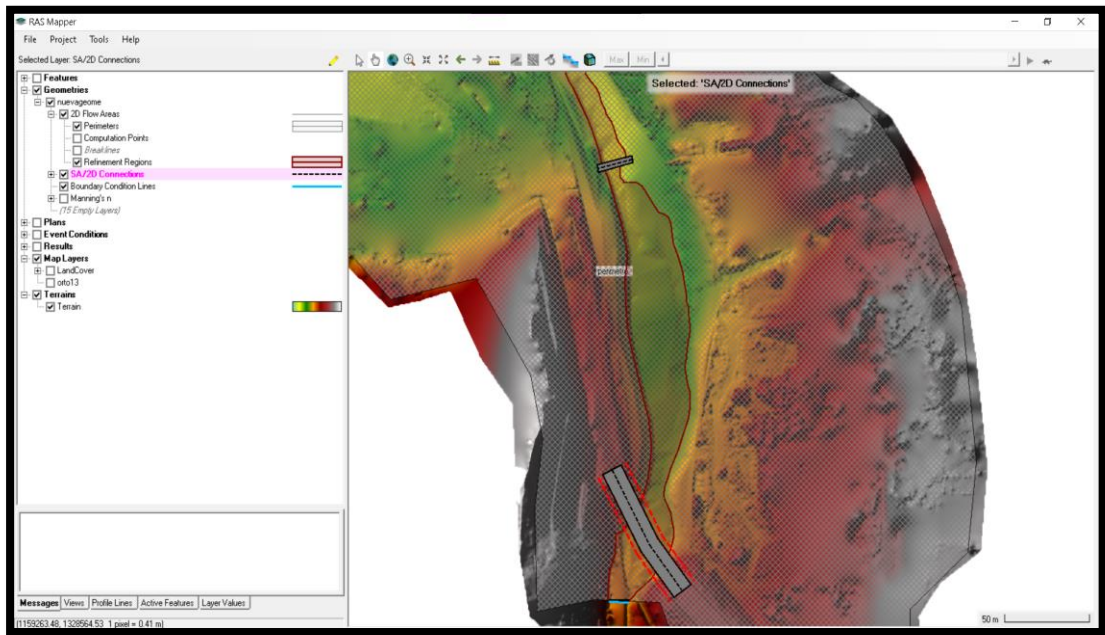


Figura 34. Representación de puentes modelados en HEC-RAS 2D, uno con flujo presurizado y sobreevertimiento, y otro con múltiples alcantarillas y estructura de embalse. (Elaboración propia).

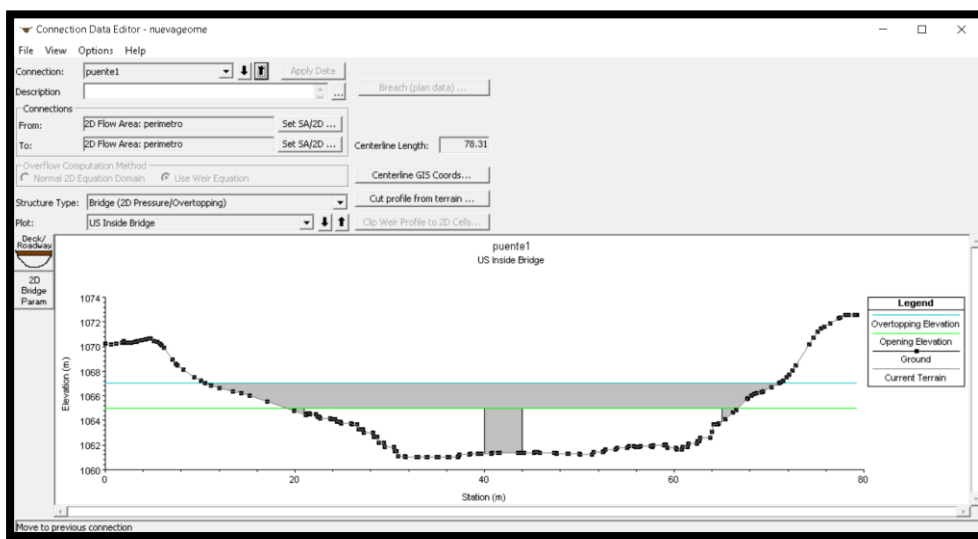


Figura 35. Sección transversal del primer puente modelado como estructura de tipo Bridge 2D (Pressure/Weir/Orifice), mostrando el perfil del cauce y la ubicación del tablero del puente. (Elaboración propia).

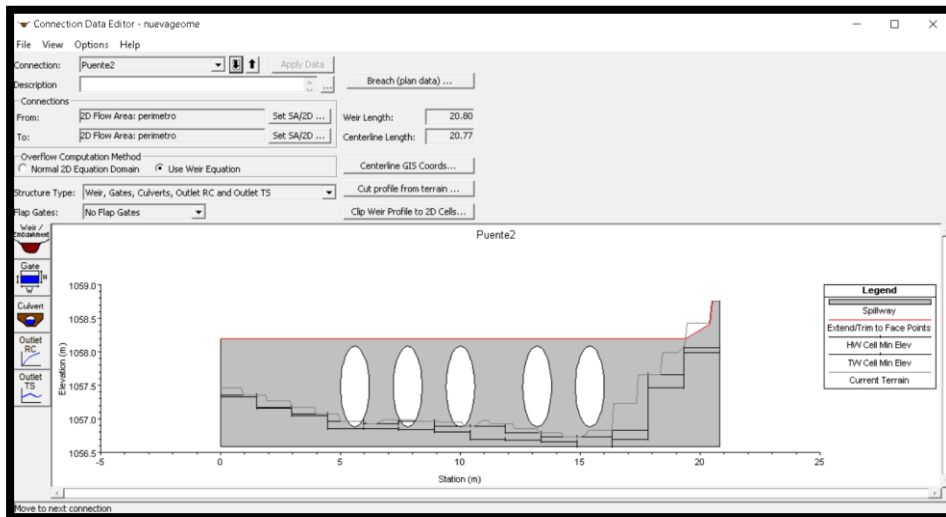


Figura 36. Representación del segundo cruce complejo modelado en HEC-RAS 2D, incorporando múltiples alcantarillas (culverts) y un vertedero (weir), visualizado en la ventana del editor de conexiones. (Elaboración propia).

7.6.2 Calibración del Modelo Hidráulico

Para garantizar la representatividad del modelo hidráulico del tramo de estudio, se llevó a cabo un proceso de calibración basado en datos de campo obtenidos durante una segunda visita a la zona. Esta etapa fue esencial para ajustar los parámetros del modelo de forma que reprodujera adecuadamente el comportamiento del cauce.

Durante la visita se realizó una práctica de aforo con el método de flotador. Se trazó una sección transversal del río en el punto conocido como “El Diamante”, donde se instalaron estacas en ambas orillas y se midió la distancia total (6.40 m), mediante una cinta métrica se marcaron puntos intermedios y se midieron las profundidades en cada uno, obteniendo así la sección transversal del canal.



Figura 37. Realización de aforo en el río Pamplonita mediante el método de flotador, en el sector conocido como “El Diamante”. Se observa la medición de profundidades para definir la sección transversal del canal. (Elaboración propia).

Esta información fue dibujada posteriormente en AutoCAD para calcular el área hidráulica.

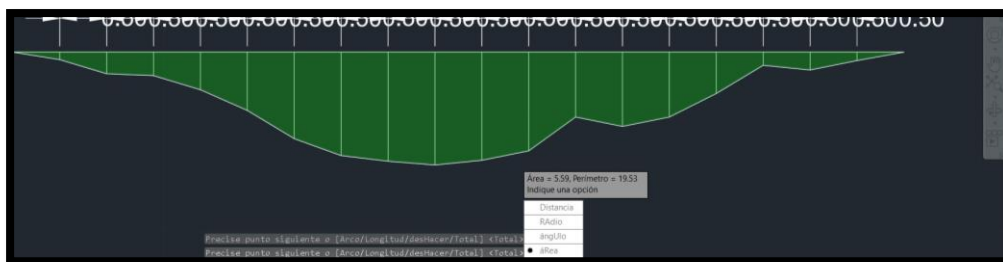


Figura 38. Representación de la sección transversal del río en AutoCAD, utilizada para calcular el área hidráulica a partir de los datos de campo levantados durante el aforo. (Elaboración propia).

Simultáneamente, se lanzó una esfera de icopor desde aguas arriba y se cronometró el tiempo que tardaba en recorrer el tramo medido.



Figura 39. Observación del desplazamiento de la esfera de icopor utilizada para el aforo por flotador, con el fin de determinar el tiempo de recorrido entre las estacas de la sección medida. (Elaboración propia).

A partir de múltiples mediciones, se calculó un tiempo promedio de 9.90 segundos. Con una distancia de 6.4 m, se estimó una velocidad media de 0.6462 m/s. Considerando un coeficiente de corrección (F_c) de 0.5, el caudal estimado fue de:

$$Q = A \cdot V \cdot F_c = 5.59 \cdot 0.6462 \cdot 0.5 = 1.806 \text{ m}^3/\text{s}$$

Ecuación 12. Cálculo del caudal estimado Q mediante el método del flotador, usando el área hidráulica A , la velocidad media V y un coeficiente de corrección F_c .

Luego con este valor, para la calibración, se utilizó una condición de flujo no permanente (unsteady flow), aunque se disponía de un único valor de caudal registrado en campo, este se mantuvo constante para simular el evento completo.



Figura 40. Visualización del flujo no permanente simulado con condición de caudal constante, empleado para la calibración del modelo hidráulico en el sector El Diamante. (Elaboración propia).

La calibración se realizó modificando iterativamente el valor de n de Manning en el cauce, hasta obtener profundidades simuladas que coincidieran con las medidas en campo en el tramo de salida del modelo:

- Orilla derecha: 0.45 m
- Centro del cauce: 0.75 m

Una vez que el modelo replicó adecuadamente estos valores, se consideró calibrado

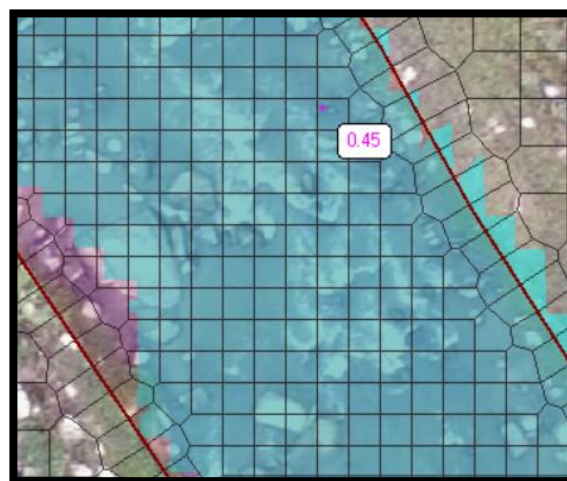


Figura 41. Resultados del modelo hidráulico calibrado mostrando la profundidad simulada de 0.45 m en la orilla derecha del cauce. (Elaboración propia).

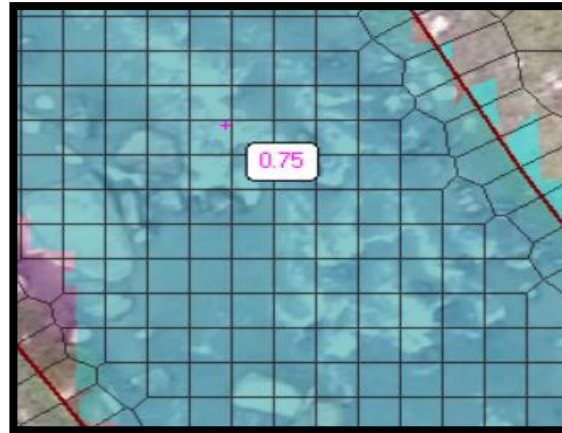


Figura 42. Resultados del modelo hidráulico calibrado mostrando la profundidad simulada de 0.75 m en el centro del cauce. (Elaboración propia).

Un $n = 0.09$ indica que el cauce no es liso ni canalizado, sino más bien natural, rugoso y con obstrucciones físicas significativas que afectan la velocidad y comportamiento del flujo.

- Presencia de rocas grandes o bloques.
- Vegetación densa en el lecho o márgenes (pastos altos, arbustos, raíces).
- Cauce irregular y con pendiente variable.

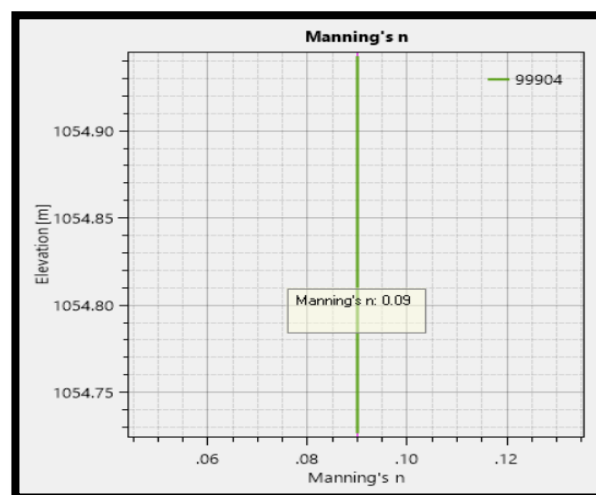


Figura 43. Asignación del coeficiente de rugosidad de Manning ($n = 0.09$) para el cauce principal en el modelo hidráulico, utilizado durante el proceso de calibración. (Elaboración propia).

7.6.3 Simulación de Eventos de Diseño

Con el modelo calibrado, se procedió a simular distintos escenarios de diseño hidráulico utilizando la opción de flujo permanente (steady flow) en HEC-RAS. Se ingresaron los caudales máximos estimados para distintos periodos de retorno (2, 5, 10, 25, 50, 100, 500 años), obtenidos previamente mediante análisis hidrológico. Finalmente, se obtuvieron las salidas hidráulicas del modelo:

- Láminas de profundidad (depth)
- Mapas de velocidad
- Extensión de áreas inundables

Estos resultados permitieron identificar zonas vulnerables y evaluar el comportamiento hidráulico de la quebrada y su interacción con la infraestructura urbana adyacente.

8. RESULTADOS

8.1 Análisis de precipitación

Para el análisis hidrológico del área de estudio, se recurrió a las series históricas de precipitación máxima diaria de tres estaciones pluviométricas cercanas: Pamplona, Palmita y Blonay (Chinácota). Esta información fue fundamental para construir las curvas IDF (Intensidad-Duración-Frecuencia) y los hietogramas que alimentaron el modelo HEC-HMS.

Estación Pamplona

Se recopilaron los datos de precipitación máxima en 24 horas entre los años 2008 y 2022. El valor máximo registrado fue de 53.7 mm, correspondiente al mes de julio del año 2016.

Tabla 3. PPT MAX 24 horas Pamplona. (Elaboración propia).

Año	Enero	Febre	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septie	Octub	Novie	Diciem	Max
2008	0.30	16.18	25.94	5.58	10.42	22.69	4.85	19.88	26.81	23.57	0.95	2.34	26.81
2009	10.15	1.13	15.89	9.77	26.21	3.13	3.49	14.91	4.00	25.24	2.64	5.28	26.21
2010	10.20	5.99	3.77	14.11	4.77	9.57	17.37	1.47	8.13	2.64	4.63	16.33	17.37
2011	9.36	10.90	1.38	16.00	9.10	5.17	26.85	2.16	9.09	22.43	4.72	13.35	26.85
2012	9.04	12.84	11.73	12.74	11.82	25.43	15.10	9.25	19.07	10.50	11.30	26.80	26.80
2013	28.30	4.80	3.50	21.00	8.20	5.30	6.30	20.10	15.30	4.60	10.60	12.20	28.30
2014	3.60	2.30	3.30	15.30	13.90	3.60	6.80	4.80	6.10	10.10	3.10	6.28	15.30
2015	4.51	10.13	5.84	5.83	6.22	3.44	2.97	3.55	10.64	8.70	14.00	4.70	14.00
2016	1.40	3.00	4.90	14.70	31.70	3.80	53.70	6.50	8.20	19.00	20.30	4.20	53.70
2017	2.70	5.10	24.50	7.00	4.40	11.20	4.40	5.50	4.10	13.60	28.90	12.70	28.90
2018	5.70	1.00	2.90	10.00	3.10	8.90	3.50	7.10	8.90	28.50	10.00	0.30	28.50
2019	6.70	2.20	5.70	13.80	7.70	16.30	7.30	4.60	13.80	14.30	10.90	3.10	16.30
2020	3.90	1.20	6.40	14.90	1.90	7.90	5.00	8.90	13.70	10.70	15.10	9.43	15.10
2021	18.59	7.66	3.29	5.10	8.50	3.30	0.50	7.40	9.20	15.50	10.70	2.70	18.59
2022	0.10	2.60	3.50	11.50	16.60	7.50	4.40	11.20	13.30	6.50	13.10	8.77	16.60
MAX	28.30	16.18	25.94	21.00	31.70	25.43	53.70	20.10	26.81	28.50	28.90	26.80	53.70

Estación Palmita

Esta estación proporcionó una serie más extensa, desde el año 2010 hasta el 2022. Se registró una precipitación máxima de 77.55 mm en el mes de octubre del año 2017.

Tabla 4. PPT MAX 24 horas La Palmita. (Elaboración propia).

Año	Enero	Febre	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiem	Octub	Noviemb	Diciemb	Máx
2010	29.04	10.26	18.14	2.97	35.72	16.33	40.33	14.00	38.99	33.68	51.27	21.68	51.27
2011	5.93	22.78	31.93	66.33	27.13	17.81	3.78	12.71	25.94	23.96	45.24	31.11	66.33
2012	16.76	3.48	27.77	15.12	24.13	32.76	8.39	16.35	23.47	42.86	21.61	34.47	42.86
2013	25.00	22.82	6.75	43.17	54.92	9.46	54.03	29.00	12.41	28.83	27.03	14.20	54.92
2014	25.90	44.40	2.18	17.42	0.83	7.21	20.39	7.97	5.69	39.13	18.75	7.66	44.40
2015	11.29	12.71	33.04	12.68	17.59	28.16	8.81	5.88	6.45	7.40	22.14	3.86	33.04
2016	1.20	3.11	6.81	33.41	26.14	6.38	5.46	5.98	13.42	30.12	30.04	17.63	33.41
2017	6.99	7.27	23.47	15.60	23.57	21.01	10.71	24.90	4.39	18.02	34.23	10.34	34.23
2018	8.48	6.06	21.58	23.86	9.00	12.88	7.90	6.73	15.54	77.55	32.29	2.12	77.55
2019	7.14	1.37	12.74	28.76	27.00	9.63	5.15	3.38	21.22	28.41	28.85	14.47	28.85
2020	6.02	2.89	12.14	5.62	8.07	17.10	11.82	15.47	24.32	38.38	43.12	6.18	43.12
2021	4.15	11.90	23.01	9.39	36.27	21.94	11.54	21.84	9.00	27.16	21.23	17.08	36.27
2022	2.96	12.39	24.62	35.97	38.84	12.61	22.90	24.90	1.65	2.35	1.60	33.32	38.84
MAX	29.04	44.40	33.04	66.33	54.92	32.76	54.03	29.00	38.99	77.55	51.27	34.47	77.55

Estación Blonay (Chinácota)

Los datos de esta estación sólo estuvieron disponibles hasta el año 1998. Dado que no se contaba con registros recientes de precipitación máxima diaria, se optó por una estimación indirecta, para esto se aplicó un coeficiente de ajuste regional basado en estudios de distribución espacial de la precipitación en el departamento de Norte de Santander, con el cual se ajustaron los valores de precipitación mensual registrados. Este factor de corrección se derivó de las diferencias estadísticas entre estaciones próximas como Palmita y Pamplona.

Esta metodología se respalda en estudios de la IDEAM y la literatura técnica en climatología regional, los cuales recomiendan el uso de factores multiplicativos para la reconstrucción de datos en estaciones con registros incompletos, especialmente cuando se cuenta con estaciones de referencia cercanas.

Tabla 5. PPT MAX 24 horas Blonay. (Elaboración propia).

Año	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiemb	Octub	Noviem	Diciemb	Máx
1986	10.77	53.28	7.2	60.03	84.27	30.54	4.98	11.58	30.51	104.28	19.26	8.97	104.28
1987	13.11	2.64	13.23	25.44	36.96	4.35	21.36	14.88	54.66	143.16	81.39	18.03	143.16
1988	3.99	11.79	7.29	22.35	22.23	36.57	29.34	73.14	72.18	99.99	112.26	49.05	112.26
1989	10.92	13.23	63.93	6.45	42.69	13.56	22.77	23.85	39.27	35.7	49.08	49.02	63.93
1990	14.22	45.12	23.55	77.7	22.8	18.69	21.24	27.9	26.52	122.37	43.32	61.02	122.37
1991	13.41	15.39	18.39	49.05	41.19	22.65	16.74	21.06	36.84	62.73	58.11	25.11	62.73
1992	0.45	3.27	3.15	14.79	25.65	16.32	17.58	27.27	28.95	11.07	32.58	38.52	38.52
1993	7.89	10.29	13.68	44.73	37.2	19.44	14.04	18.75	35.1	61.41	57.12	24.93	61.41
1994	31.41	13.23	17.94	40.98	21.18	17.22	19.86	10.83	58.98	76.74	40.77	38.4	76.74
1995	8.34	10.65	13.8	44.67	36.87	19.26	13.74	18.21	34.44	60.75	56.22	24.06	60.75
1996	11.25	13.59	16.68	47.55	39.69	22.2	16.65	21.12	37.32	63.69	59.1	27.03	63.69
1997	27.18	9.45	11.07	33.27	10.56	27.69	8.61	15.3	24.09	38.22	19.86	2.16	38.22
1998	0.09	37.47	17.94	53.76	32.13	32.22	31.92	24.42	36.27	99.84	94.83	74.01	99.84
MAX	31.41	53.28	63.93	77.7	84.27	36.57	31.92	73.14	72.18	143.16	112.26	74.01	143.16

Una vez determinadas las precipitaciones máximas diarias, se procedió a aplicar los coeficientes de reducción temporal propuestos por Campos (1978), con el fin de obtener las precipitaciones máximas para duraciones inferiores a 24 horas. Estas se organizaron en una tabla para diferentes tiempos de duración (1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 12, 18 y 24 horas) y periodos de retorno.

Posteriormente, las precipitaciones para cada duración fueron transformadas en intensidades de lluvia (mm/h) dividiendo por su tiempo respectivo. Este procedimiento permitió generar la tabla de intensidades para los distintos escenarios de retorno.

A partir de los datos de intensidades, se realizó un ajuste de regresión tipo potencia, de la forma:

$$I = k \cdot \frac{T^m}{t^n}$$

donde I es la intensidad de lluvia en mm/h, T el periodo de retorno en años, t el tiempo de duración en minutos, y k , m , y n son los coeficientes de regresión obtenidos mediante el ajuste de curvas. Los valores resultantes para la cuenca fueron:

- $k = 94.6435$
- $m = 0.195858$
- $n = 0.61639$

Estos parámetros fueron aplicados para obtener la expresión general de las curvas IDF de la cuenca. La siguiente tabla resume las intensidades obtenidas (en mm/h) para cada combinación de duración y periodo de retorno:

8.1.1 Curvas IDF

Tabla 6. Intensidades de lluvia Pamplona. (Elaboración propia).

Tabla de intensidades - Tiempo de duración												
Frecuen	Duración en minutos											
años	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
2	40.199	26.222	20.423	17.105	14.907	13.322	12.115	11.157	10.376	9.724	9.169	8.690
5	48.101	31.376	24.438	20.467	17.837	15.941	14.496	13.351	12.416	11.635	10.971	10.398
10	55.095	35.939	27.991	23.443	20.430	18.259	16.604	15.292	14.221	13.327	12.566	11.910
25	65.926	43.003	33.494	28.051	24.447	21.848	19.868	18.298	17.017	15.947	15.037	14.252
50	75.511	49.256	38.364	32.130	28.001	25.025	22.757	20.959	19.491	18.265	17.223	16.324
100	86.491	56.419	43.942	36.802	32.073	28.664	26.065	24.006	22.325	20.921	19.728	18.697
500	118.542	77.325	60.226	50.439	43.958	39.285	35.724	32.902	30.598	28.674	27.038	25.626

Finalmente, en la Figura 44 se presenta el conjunto de curvas IDF generadas para la estación Pamplona, las cuales muestran el comportamiento esperado: a menor duración, mayor intensidad de precipitación.

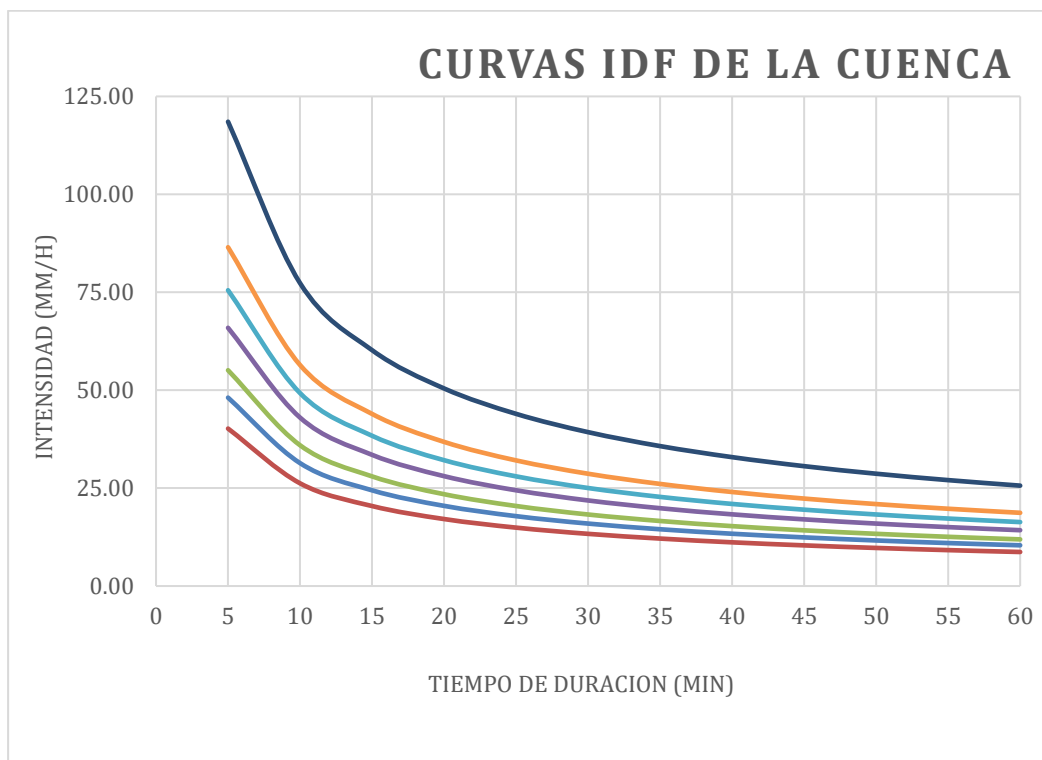


Figura 44. Curva IDF PAMPLONA (Elaboración propia).

Este proceso se realizó de igual forma para la estación La Palmita y Chinácota.

Tabla 7. Intensidades de lluvia La Palmita. (Elaboración propia).

Tabla de intensidades - Tiempo de duración												
Frecue	Duración en minutos											
años	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
2	74.0461	48.3005	37.6193	31.5065	27.4579	24.5392	22.3149	20.5518	19.1126	17.9108	16.8889	16.007
5	85.9868	56.0894	43.6858	36.5873	31.8857	28.4964	25.9134	23.866	22.1947	20.7992	19.6124	18.5883
10	96.2829	62.8056	48.9168	40.9683	35.7037	31.9086	29.0163	26.7237	24.8523	23.2896	21.9608	20.8141
25	111.809	72.9337	56.8052	47.5748	41.4613	37.0542	33.6955	31.0332	28.86	27.0453	25.5023	24.1705
50	125.198	81.6668	63.607	53.2715	46.4259	41.4911	37.7302	34.7491	32.3157	30.2838	28.5559	27.0647
100	140.189	91.4456	71.2234	59.6502	51.985	46.4592	42.2481	38.91	36.1853	33.91	31.9752	30.3055
500	182.289	118.908	92.6125	77.5638	67.5966	60.4114	54.9356	50.5951	47.0521	44.0935	41.5777	39.4065

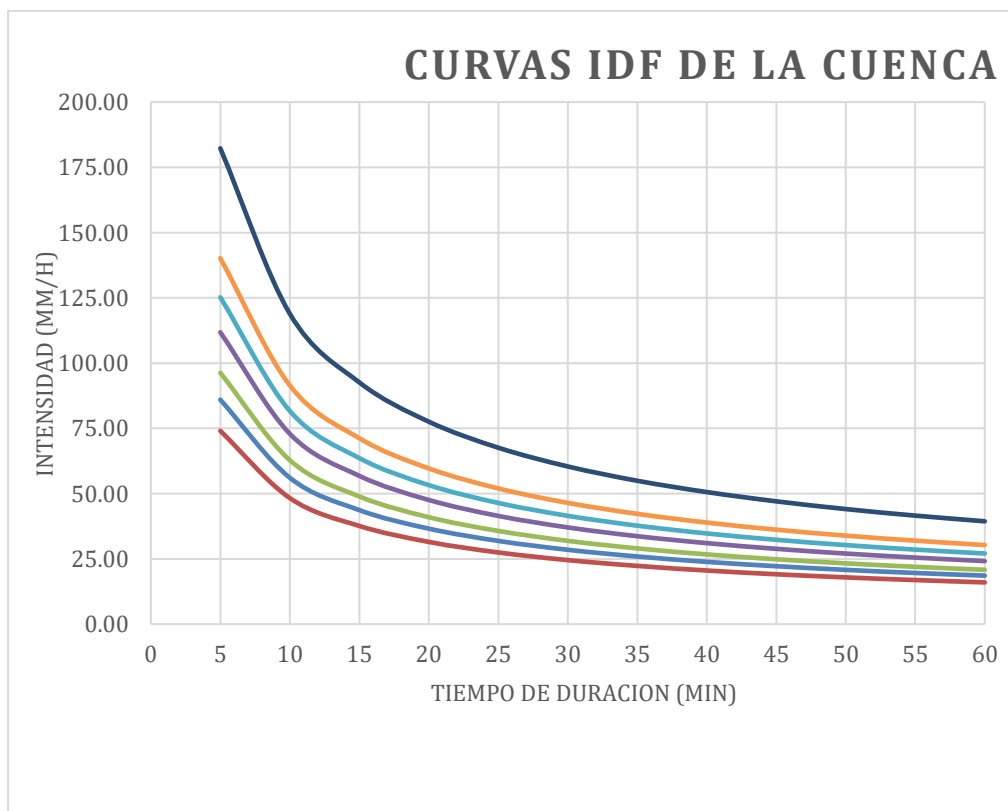


Figura 45. Curva IDF LA PALMITA (Elaboración propia).

Tabla 8. Intensidades de lluvia Blonay. (Elaboración propia).

Tabla de intensidades - Tiempo de duración												
Frecue	Duración en minutos											
años	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
2	134.893	87.9914	68.533	57.397	50.0213	44.7043	40.6522	37.4402	34.8184	32.6291	30.7674	29.1607
5	160.793	104.886	81.6914	68.4172	59.6254	53.2875	48.4574	44.6288	41.5035	38.8938	36.6747	34.7596
10	183.64	119.789	93.299	78.1387	68.0977	60.8592	55.3428	50.9701	47.4008	44.4203	41.8859	39.6986
25	218.899	142.788	111.212	93.1413	81.1724	72.5441	65.9686	60.7564	56.5018	52.949	49.928	47.3207
50	250.003	163.077	127.015	106.376	92.7063	82.852	75.3421	69.3893	64.5302	60.4726	57.0223	54.0446
100	285.526	186.249	145.062	121.491	105.879	94.6245	86.0476	79.2489	73.6993	69.0652	65.1246	61.7239
500	388.707	253.555	197.484	165.394	144.141	128.819	117.143	107.887	100.332	94.0234	88.6589	84.0291

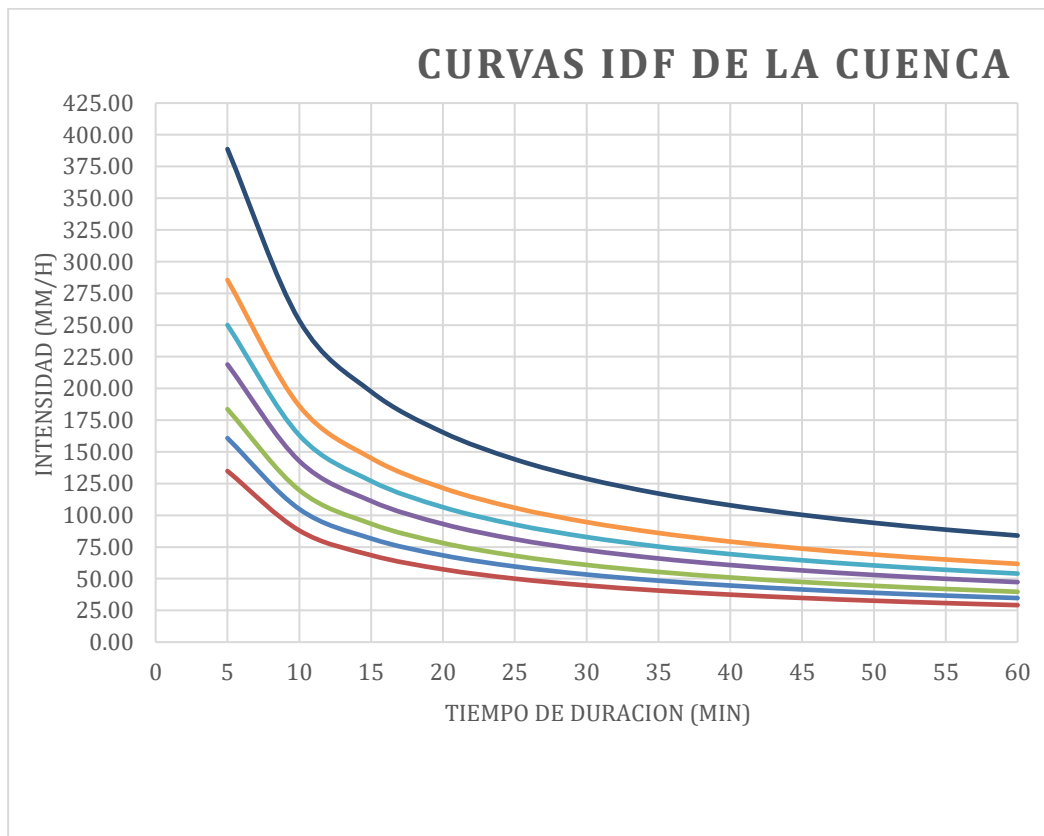


Figura 46. Curva IDF CHINACOTA (Elaboración propia).

Se desarrollaron hietogramas alternados con un intervalo de 60 minutos, utilizando como base las curvas IDF previamente obtenidas. La duración de la tormenta fue definida en 2.4 horas (144 minutos), conforme al tiempo de concentración calculado mediante la fórmula de California, considerando un cauce principal de 15 km y una pendiente de 0.002 m/m. Se generaron las intensidades de precipitación en función del tiempo de duración y los distintos periodos de retorno (2, 5, 10, 25, 50, 100 y 500 años). Estas intensidades fueron utilizadas para calcular la precipitación total esperada en un evento de diseño para cada periodo de retorno.

Luego, se construyeron los hietogramas alternados, que consisten en una distribución temporal de la precipitación, organizando las intensidades parciales en orden descendente en

torno al centro del evento. Esto permitió simular un evento crítico representativo para estudios hidrológicos y calibración de los modelos en HEC-HMS.

8.1.2 Hietogramas para periodos de retorno Pamplona:

Tabla 9. Periodo de retorno de 2 años, Pamplona (Elaboración propia).

Instante (min)	Intensidad (mm/h)	Precipitación acumulada (mm)	Precipitación (mm)	Intensidad parcial (mm/h)	Precipitación Alternada (mm)
60	8.690	8.690	8.690	8.690	0.489
120	5.668	11.337	2.647	2.647	0.518
180	4.415	13.245	1.908	1.908	0.552
240	3.698	14.790	1.545	1.545	0.592
300	3.222	16.112	1.322	1.322	0.641
360	2.880	17.279	1.167	1.167	0.703
420	2.619	18.332	1.053	1.053	0.783
480	2.412	19.295	0.963	0.963	0.892
540	2.243	20.187	0.892	0.892	1.053
600	2.102	21.020	0.833	0.833	1.322
660	1.982	21.802	0.783	0.783	1.908
720	1.879	22.542	0.740	0.740	8.690
780	1.788	23.245	0.703	0.703	2.647
840	1.708	23.916	0.670	0.670	1.545
900	1.637	24.557	0.641	0.641	1.167
960	1.573	25.173	0.616	0.616	0.963
1020	1.516	25.765	0.592	0.592	0.833
1080	1.463	26.336	0.571	0.571	0.740
1140	1.415	26.888	0.552	0.552	0.670
1200	1.371	27.422	0.534	0.534	0.616
1260	1.330	27.940	0.518	0.518	0.571
1320	1.293	28.443	0.503	0.503	0.534
1380	1.258	28.933	0.489	0.489	0.503
1440	1.225	29.409	0.476	0.476	0.476

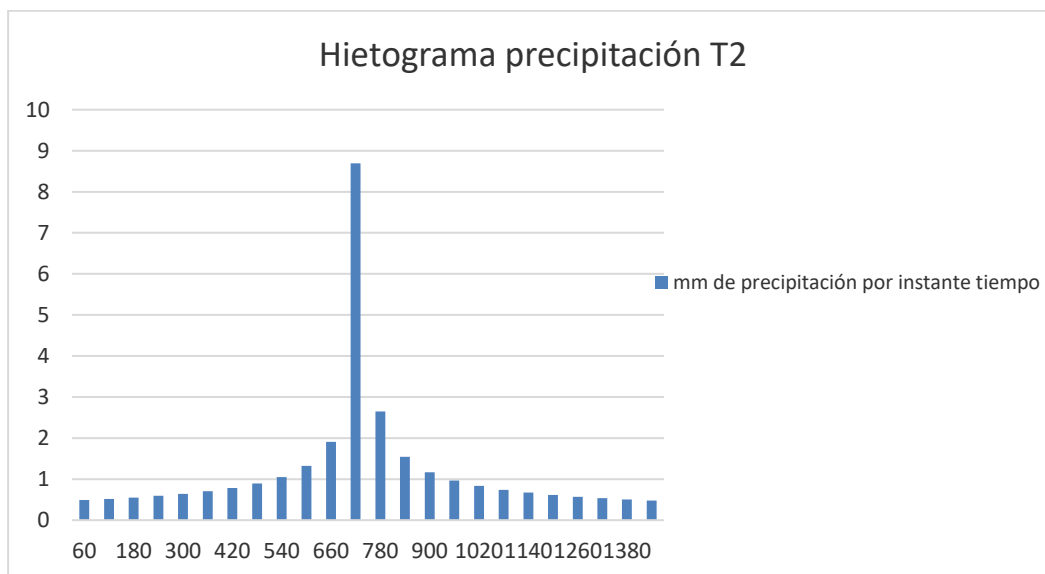


Figura 47. Hietograma PR 2 años (Elaboración propia).

Tabla 10. Periodo de retorno de 5 años, Pamplona (Elaboración propia).

Instante (min)	Intensidad (mm/h)	Precipitación acumulada (mm)	Precipitación (mm)	Intensidad parcial (mm/h)	Precipitación Alternada (mm)
60	10.398	10.398	10.398	10.398	0.585
120	6.783	13.565	3.167	3.167	0.620
180	5.283	15.848	2.283	2.283	0.660
240	4.424	17.697	1.849	1.849	0.709
300	3.856	19.279	1.582	1.582	0.767
360	3.446	20.676	1.397	1.397	0.841
420	3.134	21.935	1.260	1.260	0.937
480	2.886	23.088	1.153	1.153	1.067
540	2.684	24.155	1.067	1.067	1.260
600	2.515	25.152	0.996	0.996	1.582
660	2.372	26.088	0.937	0.937	2.283
720	2.248	26.974	0.885	0.885	10.398
780	2.140	27.815	0.841	0.841	3.167
840	2.044	28.617	0.802	0.802	1.849
900	1.959	29.384	0.767	0.767	1.397
960	1.883	30.121	0.737	0.737	1.153
1020	1.814	30.830	0.709	0.709	0.996
1080	1.751	31.513	0.683	0.683	0.885
1140	1.693	32.173	0.660	0.660	0.802
1200	1.641	32.813	0.639	0.639	0.737
1260	1.592	33.433	0.620	0.620	0.683
1320	1.547	34.035	0.602	0.602	0.639
1380	1.505	34.620	0.585	0.585	0.602
1440	1.466	35.190	0.570	0.570	0.570

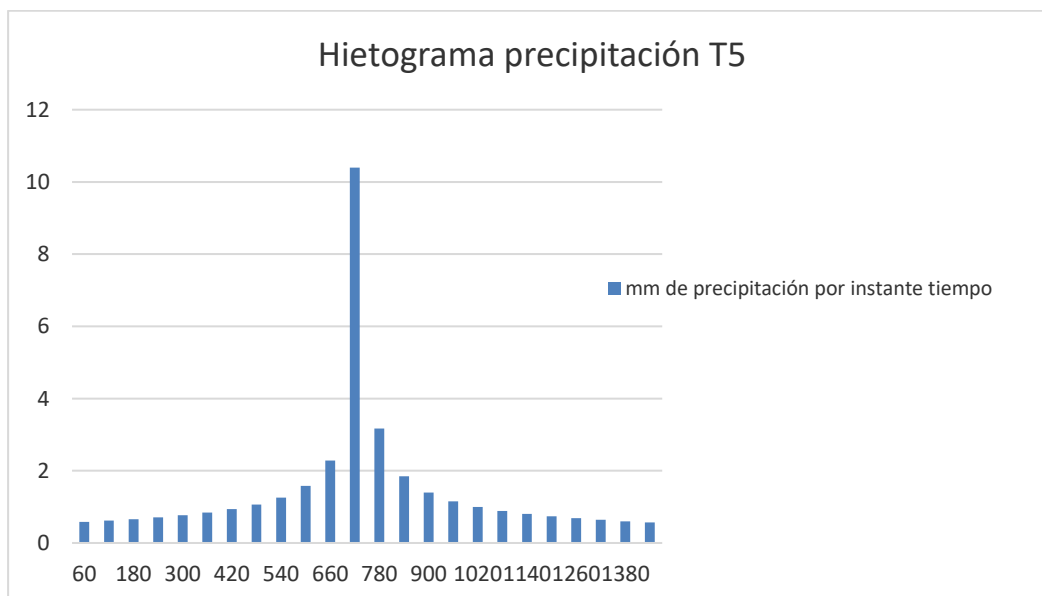


Figura 48. Hietograma PR 5 años (Elaboración propia).

Tabla 11. Periodo de retorno de 10 años, Pamplona (Elaboración propia).

Instante (min)	Intensidad (mm/h)	Precipitación acumulada (mm)	Precipitación (mm)	Intensidad parcial (mm/h)	Precipitación Alternada (mm)
60	11.910	11.910	11.910	11.910	0.670
120	7.769	15.538	3.628	3.628	0.710
180	6.051	18.153	2.615	2.615	0.756
240	5.068	20.271	2.118	2.118	0.812
300	4.416	22.082	1.812	1.812	0.879
360	3.947	23.682	1.600	1.600	0.963
420	3.589	25.125	1.443	1.443	1.073
480	3.306	26.445	1.321	1.321	1.222
540	3.074	27.668	1.222	1.222	1.443
600	2.881	28.809	1.141	1.141	1.812
660	2.717	29.882	1.073	1.073	2.615
720	2.575	30.896	1.014	1.014	11.910
780	2.451	31.859	0.963	0.963	3.628
840	2.341	32.778	0.919	0.919	2.118
900	2.244	33.657	0.879	0.879	1.600
960	2.156	34.501	0.844	0.844	1.321
1020	2.077	35.312	0.812	0.812	1.141
1080	2.005	36.095	0.783	0.783	1.014
1140	1.940	36.852	0.756	0.756	0.919
1200	1.879	37.584	0.732	0.732	0.844
1260	1.824	38.294	0.710	0.710	0.783
1320	1.772	38.984	0.690	0.690	0.732
1380	1.724	39.654	0.670	0.670	0.690
1440	1.679	40.307	0.653	0.653	0.653

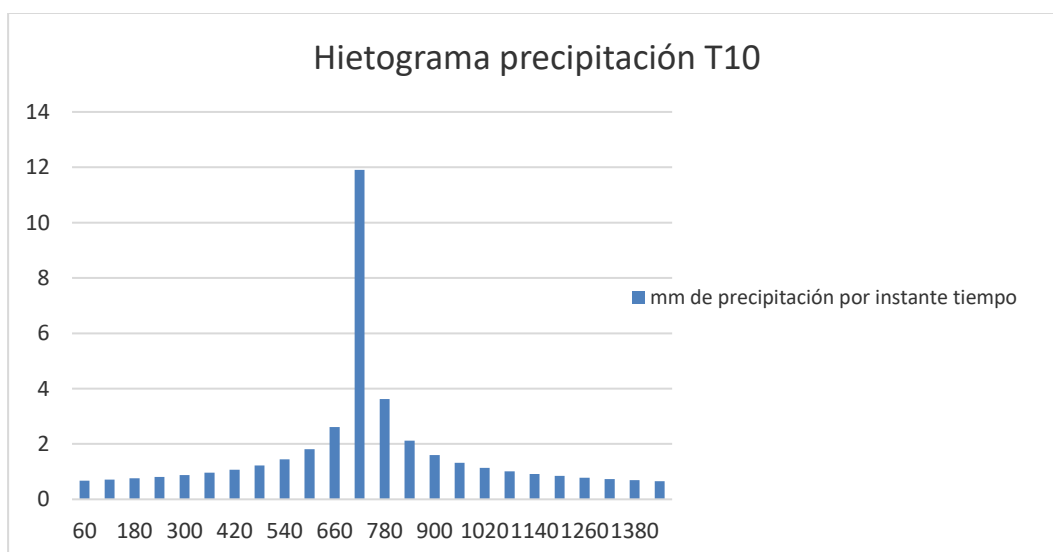


Figura 49. Hietograma PR 10 años (Elaboración propia).

Tabla 12. Periodo de retorno de 25 años, Pamplona (Elaboración propia).

Instante (min)	Intensidad (mm/h)	Precipitación acumulada (mm)	Precipitación (mm)	Intensidad parcial (mm/h)	Precipitación Alternada (mm)
60	14.251	14.251	14.251	14.251	0.802
120	9.296	18.592	4.341	4.341	0.850
180	7.240	21.721	3.129	3.129	0.905
240	6.064	24.255	2.534	2.534	0.971
300	5.285	26.423	2.168	2.168	1.052
360	4.723	28.337	1.914	1.914	1.153
420	4.295	30.064	1.726	1.726	1.284
480	3.955	31.644	1.580	1.580	1.463
540	3.678	33.106	1.463	1.463	1.726
600	3.447	34.472	1.365	1.365	2.168
660	3.250	35.755	1.284	1.284	3.129
720	3.081	36.969	1.214	1.214	14.251
780	2.932	38.122	1.153	1.153	4.341
840	2.802	39.221	1.099	1.099	2.534
900	2.685	40.273	1.052	1.052	1.914
960	2.580	41.283	1.010	1.010	1.580
1020	2.486	42.254	0.971	0.971	1.365
1080	2.399	43.191	0.937	0.937	1.214
1140	2.321	44.096	0.905	0.905	1.099
1200	2.249	44.972	0.876	0.876	1.010
1260	2.182	45.822	0.850	0.850	0.937

1320	2.120	46.647	0.825	0.825	0.876
1380	2.063	47.449	0.802	0.802	0.825
1440	2.010	48.230	0.781	0.781	0.781

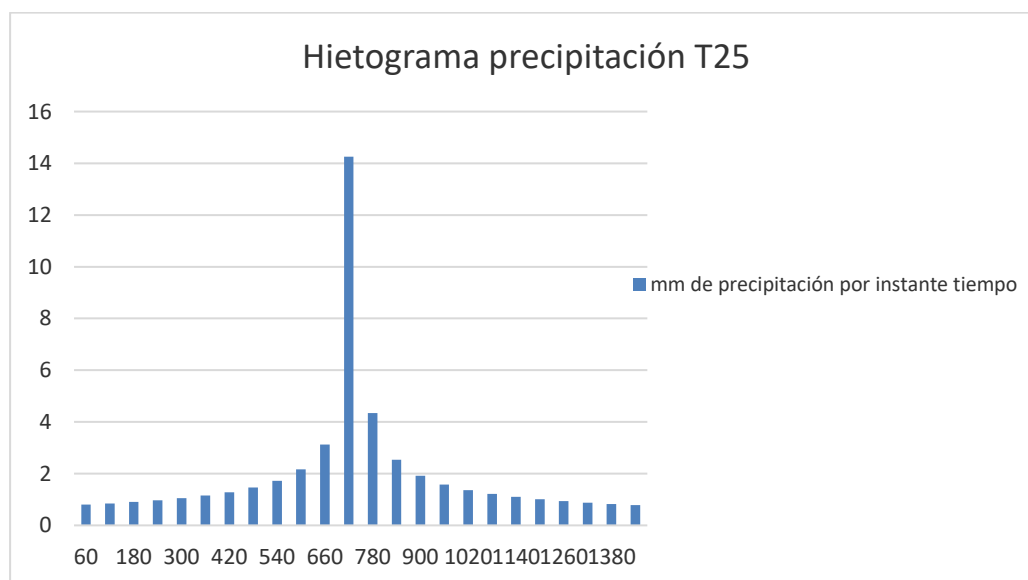


Figura 50. Hietograma PR 25 años (Elaboración propia).

Tabla 13. Periodo de retorno de 50 años, Pamplona (Elaboración propia).

Instante (min)	Intensidad (mm/h)	Precipitación acumulada (mm)	Precipitación (mm)	Intensidad parcial (mm/h)	Precipitación Alternada (mm)
60	16.323	16.323	16.323	16.323	0.919
120	10.648	21.296	4.972	4.972	0.973
180	8.293	24.879	3.584	3.584	1.037
240	6.946	27.782	2.903	2.903	1.113
300	6.053	30.265	2.483	2.483	1.205
360	5.410	32.458	2.193	2.193	1.320
420	4.919	34.435	1.977	1.977	1.470
480	4.531	36.245	1.810	1.810	1.675
540	4.213	37.920	1.675	1.675	1.977
600	3.948	39.484	1.564	1.564	2.483
660	3.723	40.955	1.470	1.470	3.584
720	3.529	42.345	1.390	1.390	16.323
780	3.359	43.665	1.320	1.320	4.972
840	3.209	44.924	1.259	1.259	2.903
900	3.075	46.129	1.205	1.205	2.193
960	2.955	47.285	1.156	1.156	1.810
1020	2.847	48.398	1.113	1.113	1.564
1080	2.748	49.471	1.073	1.073	1.390
1140	2.658	50.507	1.037	1.037	1.259

1200	2.576	51.511	1.004	1.004	1.156
1260	2.499	52.484	0.973	0.973	1.073
1320	2.429	53.429	0.945	0.945	1.004
1380	2.363	54.348	0.919	0.919	0.945
1440	2.302	55.243	0.895	0.895	0.895

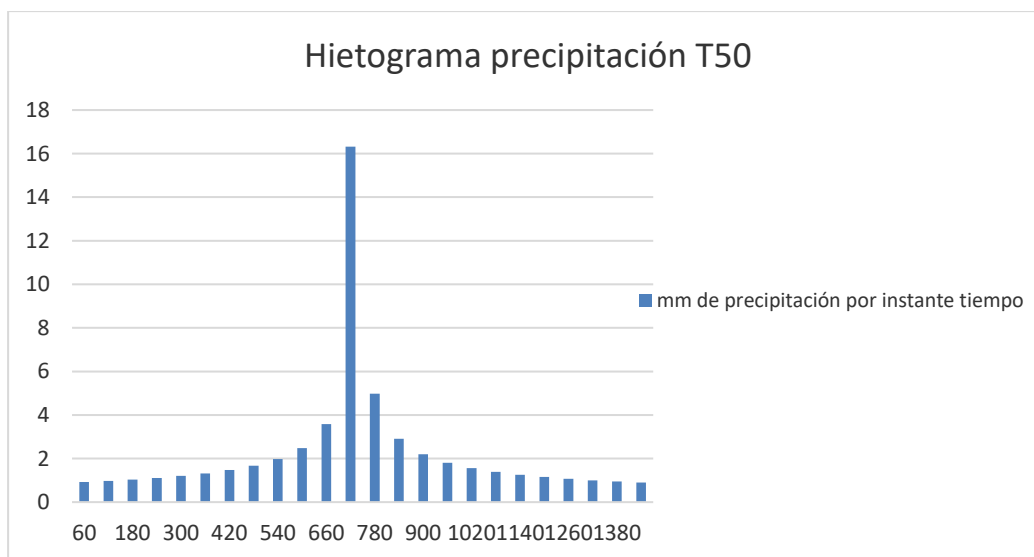


Figura 51. Hietograma PR 50 años (Elaboración propia).

Tabla 14. Periodo de retorno de 100 años, Pamplona (Elaboración propia).

Instante (min)	Intensidad (mm/h)	Precipitación acumulada (mm)	Precipitación (mm)	Intensidad parcial (mm/h)	Precipitación Alternada (mm)
60	18.697	18.697	18.697	18.697	1.053
120	12.196	24.392	5.695	5.695	1.115
180	9.499	28.497	4.105	4.105	1.188
240	7.956	31.822	3.325	3.325	1.274
300	6.933	34.666	2.844	2.844	1.380
360	6.196	37.177	2.511	2.511	1.512
420	5.635	39.442	2.265	2.265	1.684
480	5.189	41.515	2.073	2.073	1.919
540	4.826	43.434	1.919	1.919	2.265
600	4.523	45.225	1.791	1.791	2.844
660	4.264	46.909	1.684	1.684	4.105
720	4.042	48.502	1.592	1.592	18.697
780	3.847	50.014	1.512	1.512	5.695
840	3.675	51.456	1.442	1.442	3.325
900	3.522	52.836	1.380	1.380	2.511
960	3.385	54.161	1.324	1.324	2.073
1020	3.261	55.435	1.274	1.274	1.791
1080	3.148	56.664	1.229	1.229	1.592

1140	3.045	57.852	1.188	1.188	1.442
1200	2.950	59.001	1.150	1.150	1.324
1260	2.863	60.116	1.115	1.115	1.229
1320	2.782	61.198	1.082	1.082	1.150
1380	2.707	62.251	1.053	1.053	1.082
1440	2.636	63.275	1.025	1.025	1.025

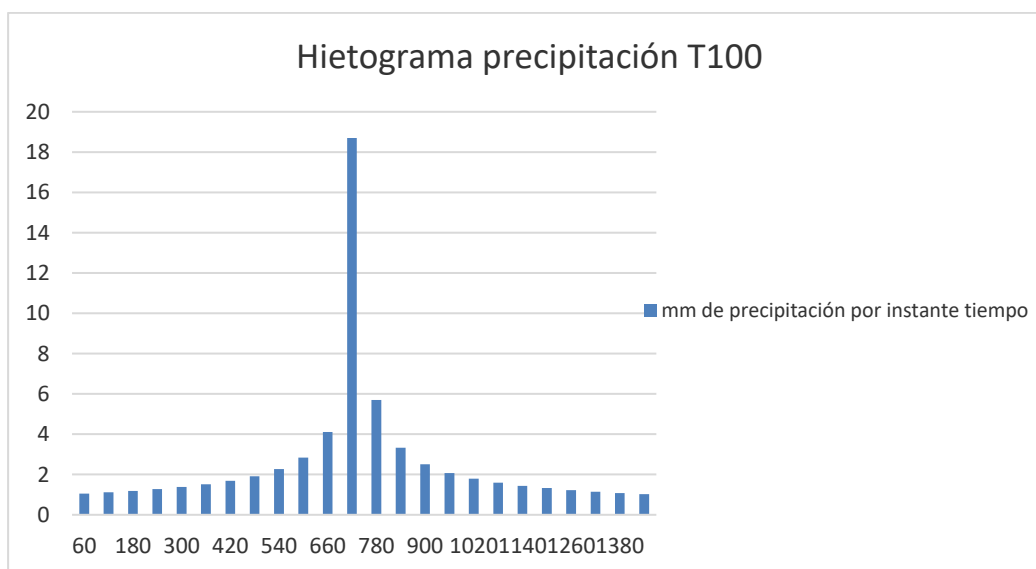


Figura 52. Hietograma PR 100 años (Elaboración propia).

Tabla 15. Periodo de retorno de 500 años, Pamplona (Elaboración propia).

Instante (min)	Intensidad (mm/h)	Precipitación acumulada (mm)	Precipitación (mm)	Intensidad parcial (mm/h)	Precipitación Alternada (mm)
60	25.625	25.625	25.625	25.625	1.443
120	16.715	33.431	7.806	7.806	1.528
180	13.019	39.057	5.626	5.626	1.628
240	10.904	43.614	4.557	4.557	1.747
300	9.502	47.512	3.898	3.898	1.891
360	8.492	50.954	3.442	3.442	2.073
420	7.723	54.058	3.104	3.104	2.308
480	7.112	56.899	2.841	2.841	2.630
540	6.614	59.529	2.630	2.630	3.104
600	6.198	61.984	2.455	2.455	3.898
660	5.845	64.292	2.308	2.308	5.626
720	5.540	66.475	2.182	2.182	25.625
780	5.273	68.547	2.073	2.073	7.806
840	5.037	70.524	1.977	1.977	4.557
900	4.828	72.415	1.891	1.891	3.442
960	4.639	74.231	1.815	1.815	2.841
1020	4.469	75.977	1.747	1.747	2.455

1080	4.315	77.662	1.684	1.684	2.182
1140	4.173	79.289	1.628	1.628	1.977
1200	4.043	80.865	1.576	1.576	1.815
1260	3.923	82.392	1.528	1.528	1.684
1320	3.813	83.876	1.484	1.484	1.576
1380	3.710	85.319	1.443	1.443	1.484
1440	3.613	86.723	1.404	1.404	1.404

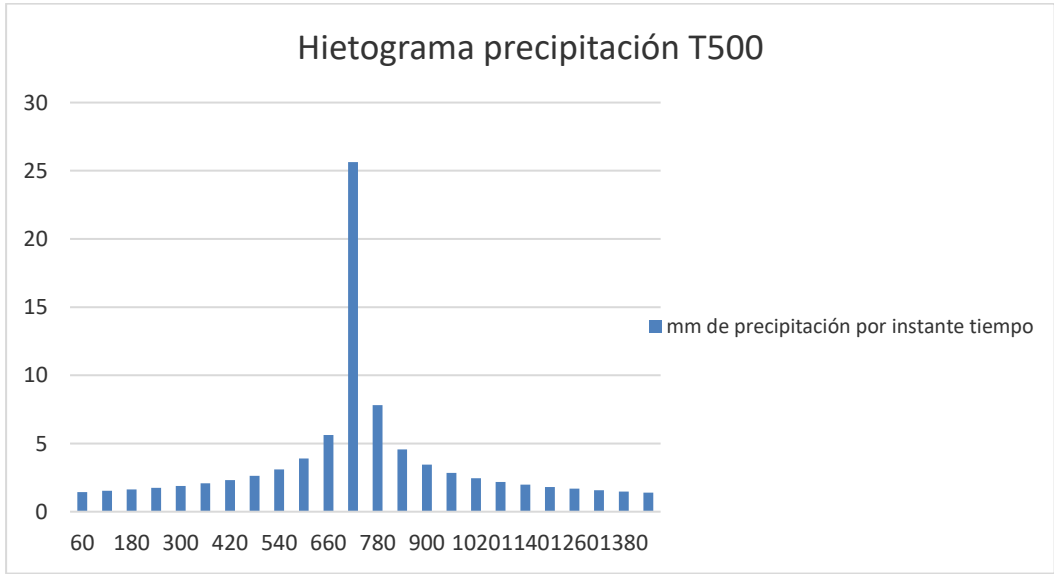


Figura 53. Hietograma PR 500 años (Elaboración propia).

8.1.3 Hietogramas para periodos de retorno Palmita

Tabla 16. Periodo de retorno de 2 años, Palmita (Elaboración propia).

Instante (min)	Intensidad (mm/h)	Precipitación acumulada (mm)	Precipitación (mm)	Intensidad parcial (mm/h)	Precipitación Alternada (mm)
60	16.140	16.140	16.140	16.140	0.909
120	10.528	21.056	4.916	4.916	0.962
180	8.200	24.599	3.543	3.543	1.025
240	6.867	27.469	2.870	2.870	1.100
300	5.985	29.924	2.455	2.455	1.191
360	5.349	32.092	2.168	2.168	1.305
420	4.864	34.047	1.955	1.955	1.454
480	4.480	35.837	1.789	1.789	1.656
540	4.166	37.493	1.656	1.656	1.955
600	3.904	39.039	1.546	1.546	2.455
660	3.681	40.493	1.454	1.454	3.543
720	3.489	41.867	1.374	1.374	16.140
780	3.321	43.173	1.305	1.305	4.916

840	3.173	44.418	1.245	1.245	2.870
900	3.041	45.609	1.191	1.191	2.168
960	2.922	46.752	1.143	1.143	1.789
1020	2.815	47.852	1.100	1.100	1.546
1080	2.717	48.913	1.061	1.061	1.374
1140	2.628	49.938	1.025	1.025	1.245
1200	2.547	50.931	0.992	0.992	1.143
1260	2.471	51.893	0.962	0.962	1.061
1320	2.401	52.827	0.934	0.934	0.992
1380	2.336	53.736	0.909	0.909	0.934
1440	2.276	54.620	0.885	0.885	0.885

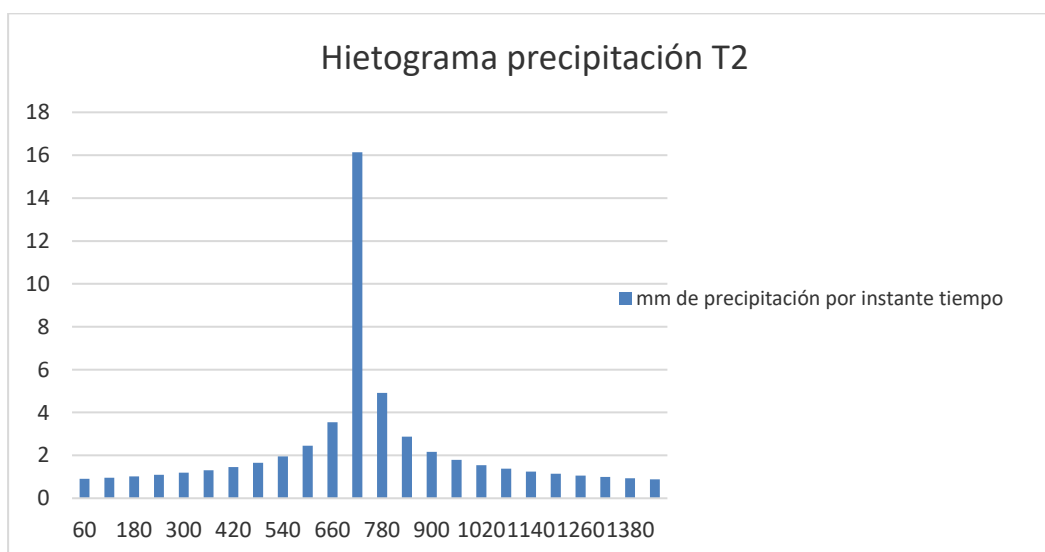


Figura 54. Hietograma PR 2 años (Elaboración propia).

Tabla 17. Periodo de retorno de 5 años, Palmita (Elaboración propia).

Instante (min)	Intensidad (mm/h)	Precipitación acumulada (mm)	Precipitación (mm)	Intensidad parcial (mm/h)	Precipitación Alternada (mm)
60	18.949	18.949	18.949	18.949	1.067
120	12.361	24.721	5.772	5.772	1.130
180	9.627	28.882	4.160	4.160	1.204
240	8.063	32.251	3.370	3.370	1.292
300	7.027	35.134	2.882	2.882	1.399
360	6.280	37.679	2.545	2.545	1.533
420	5.711	39.974	2.295	2.295	1.707
480	5.259	42.075	2.101	2.101	1.945
540	4.891	44.020	1.945	1.945	2.295
600	4.584	45.836	1.816	1.816	2.882
660	4.322	47.542	1.707	1.707	4.160
720	4.096	49.156	1.614	1.614	18.949
780	3.899	50.689	1.533	1.533	5.772

840	3.725	52.150	1.462	1.462	3.370
900	3.570	53.549	1.399	1.399	2.545
960	3.431	54.891	1.342	1.342	2.101
1020	3.305	56.183	1.292	1.292	1.816
1080	3.190	57.428	1.246	1.246	1.614
1140	3.086	58.632	1.204	1.204	1.462
1200	2.990	59.797	1.165	1.165	1.342
1260	2.901	60.927	1.130	1.130	1.246
1320	2.819	62.024	1.097	1.097	1.165
1380	2.743	63.091	1.067	1.067	1.097
1440	2.672	64.129	1.038	1.038	1.038

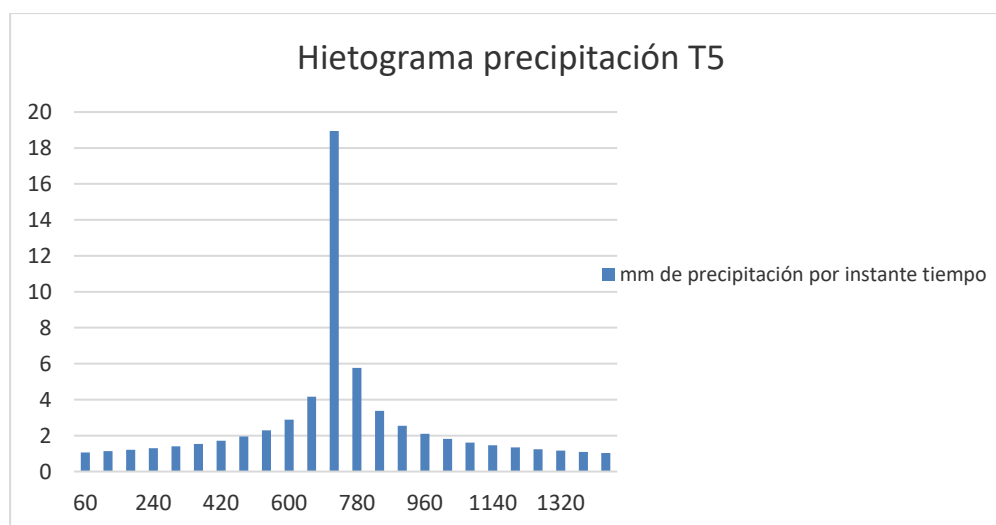


Figura 55. Hietograma PR 5 años (Elaboración propia).

Tabla 18. Periodo de retorno de 10 años, Palmita (Elaboración propia).

Instante (min)	Intensidad (mm/h)	Precipitación acumulada (mm)	Precipitación (mm)	Intensidad parcial (mm/h)	Precipitación Alternada (mm)
60	21.395	21.395	21.395	21.395	1.204
120	13.956	27.912	6.517	6.517	1.276
180	10.870	32.610	4.697	4.697	1.359
240	9.104	36.415	3.805	3.805	1.458
300	7.934	39.669	3.254	3.254	1.579
360	7.090	42.543	2.874	2.874	1.731
420	6.448	45.134	2.592	2.592	1.927
480	5.938	47.506	2.372	2.372	2.196
540	5.522	49.702	2.196	2.196	2.592
600	5.175	51.752	2.050	2.050	3.254
660	4.880	53.679	1.927	1.927	4.697
720	4.625	55.501	1.822	1.822	21.395
780	4.402	57.232	1.731	1.731	6.517

840	4.206	58.882	1.650	1.650	3.805
900	4.031	60.461	1.579	1.579	2.874
960	3.874	61.977	1.516	1.516	2.372
1020	3.731	63.435	1.458	1.458	2.050
1080	3.602	64.842	1.406	1.406	1.822
1140	3.484	66.200	1.359	1.359	1.650
1200	3.376	67.516	1.316	1.316	1.516
1260	3.276	68.792	1.276	1.276	1.406
1320	3.183	70.030	1.239	1.239	1.316
1380	3.097	71.235	1.204	1.204	1.239
1440	3.017	72.407	1.173	1.173	1.173

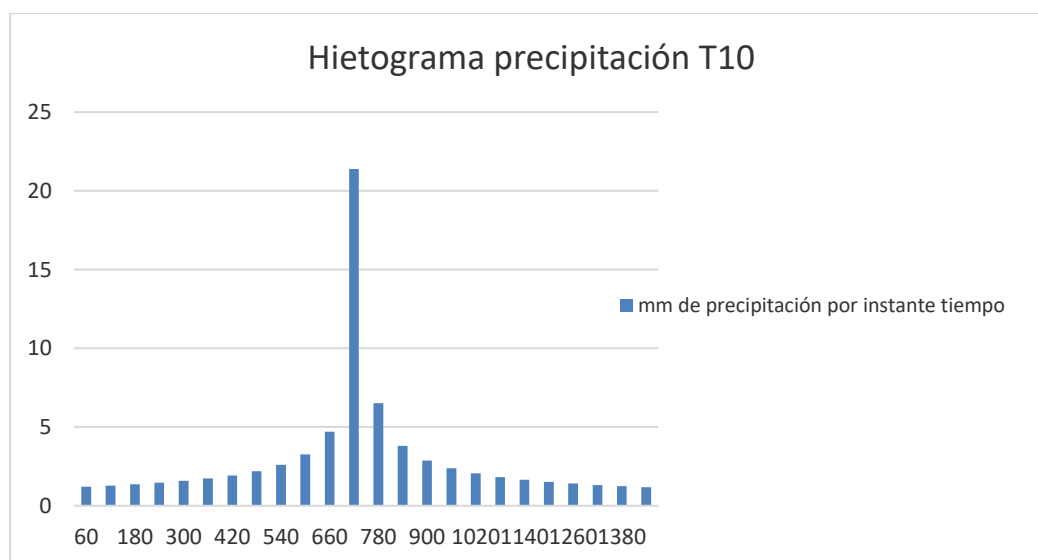


Figura 56. Hietograma PR 10 años (Elaboración propia).

Tabla 19. Periodo de retorno de 25 años, Palmita (Elaboración propia).

Instante (min)	Intensidad (mm/h)	Precipitación acumulada (mm)	Precipitación (mm)	Intensidad parcial (mm/h)	Precipitación Alternada (mm)
60	25.120	25.120	25.120	25.120	1.414
120	16.386	32.772	7.652	7.652	1.498
180	12.762	38.287	5.515	5.515	1.595
240	10.688	42.754	4.467	4.467	1.712
300	9.315	46.575	3.821	3.821	1.854
360	8.325	49.949	3.374	3.374	2.032
420	7.570	52.992	3.043	3.043	2.263
480	6.972	55.777	2.785	2.785	2.578
540	6.484	58.355	2.578	2.578	3.043
600	6.076	60.762	2.407	2.407	3.821
660	5.729	63.024	2.263	2.263	5.515
720	5.430	65.163	2.139	2.139	25.120

780	5.169	67.195	2.032	2.032	7.652
840	4.938	69.133	1.938	1.938	4.467
900	4.732	70.987	1.854	1.854	3.374
960	4.548	72.766	1.779	1.779	2.785
1020	4.381	74.479	1.712	1.712	2.407
1080	4.229	76.130	1.651	1.651	2.139
1140	4.091	77.725	1.595	1.595	1.938
1200	3.963	79.270	1.545	1.545	1.779
1260	3.846	80.767	1.498	1.498	1.651
1320	3.737	82.222	1.454	1.454	1.545
1380	3.636	83.636	1.414	1.414	1.454
1440	3.542	85.012	1.377	1.377	1.377

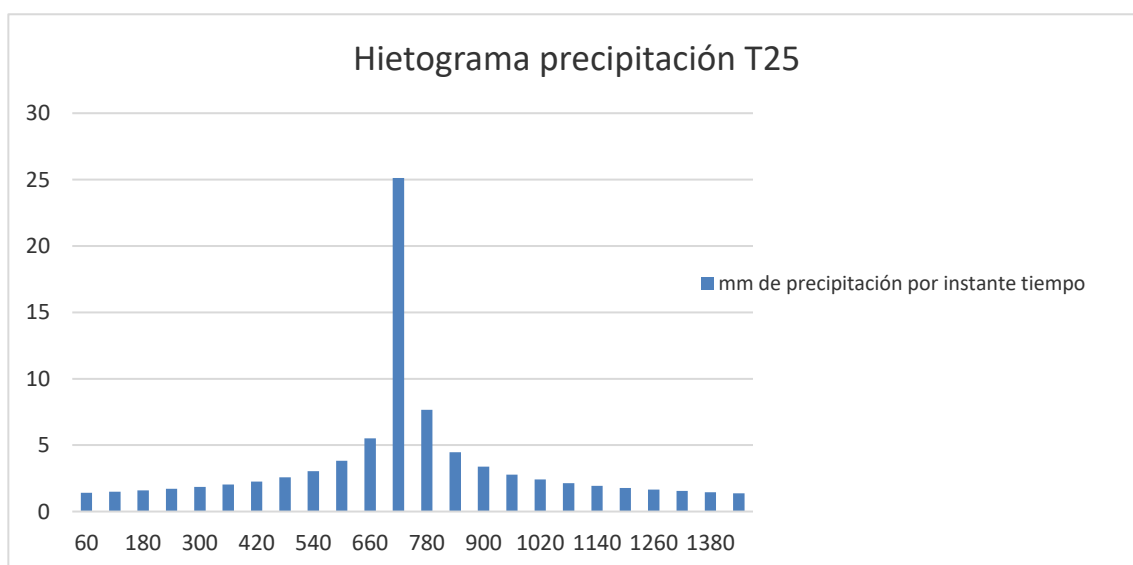


Figura 57. Hietograma PR 25 años (Elaboración propia).

Tabla 20. Periodo de retorno de 50 años, Palmita (Elaboración propia).

Instante (min)	Intensidad (mm/h)	Precipitación acumulada (mm)	Precipitación (mm)	Intensidad parcial (mm/h)	Precipitación Alternada (mm)
60	28.363	28.363	28.363	28.363	1.597
120	18.501	37.002	8.639	8.639	1.691
180	14.410	43.229	6.227	6.227	1.801
240	12.068	48.273	5.044	5.044	1.933
300	10.517	52.587	4.314	4.314	2.093
360	9.399	56.396	3.810	3.810	2.294
420	8.547	59.832	3.436	3.436	2.555
480	7.872	62.977	3.145	3.145	2.911
540	7.321	65.887	2.911	2.911	3.436
600	6.860	68.605	2.718	2.718	4.314
660	6.469	71.160	2.555	2.555	6.227
720	6.131	73.575	2.415	2.415	28.363

780	5.836	75.869	2.294	2.294	8.639
840	5.575	78.057	2.188	2.188	5.044
900	5.343	80.150	2.093	2.093	3.810
960	5.135	82.159	2.009	2.009	3.145
1020	4.947	84.093	1.933	1.933	2.718
1080	4.775	85.957	1.864	1.864	2.415
1140	4.619	87.758	1.801	1.801	2.188
1200	4.475	89.502	1.744	1.744	2.009
1260	4.343	91.193	1.691	1.691	1.864
1320	4.220	92.835	1.642	1.642	1.744
1380	4.106	94.432	1.597	1.597	1.642
1440	3.999	95.986	1.554	1.554	1.554

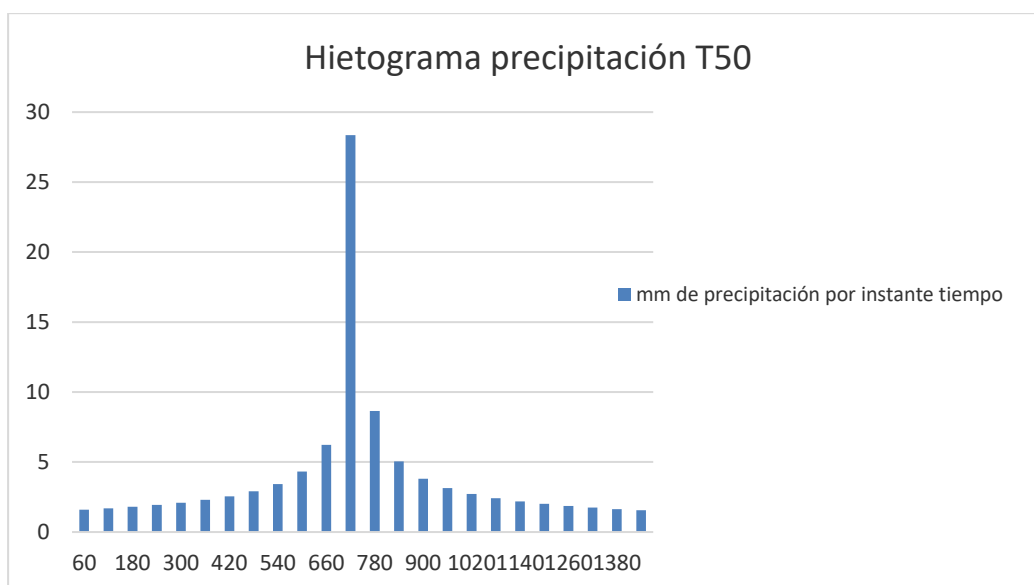


Figura 58. Hietograma PR 50 años (Elaboración propia).

Tabla 21. Periodo de retorno de 100 años, Palmita (Elaboración propia).

Instante (min)	Intensidad (mm/h)	Precipitación acumulada (mm)	Precipitación (mm)	Intensidad parcial (mm/h)	Precipitación Alternada (mm)
60	32.024	32.024	32.024	32.024	1.803
120	20.889	41.778	9.754	9.754	1.909
180	16.270	48.809	7.031	7.031	2.034
240	13.626	54.504	5.695	5.695	2.183
300	11.875	59.375	4.871	4.871	2.364
360	10.613	63.676	4.301	4.301	2.590
420	9.651	67.555	3.879	3.879	2.885
480	8.888	71.106	3.551	3.551	3.286
540	8.266	74.392	3.286	3.286	3.879
600	7.746	77.461	3.068	3.068	4.871
660	7.304	80.345	2.885	2.885	7.031
720	6.923	83.072	2.727	2.727	32.024

780	6.589	85.663	2.590	2.590	9.754
840	6.295	88.133	2.470	2.470	5.695
900	6.033	90.496	2.364	2.364	4.301
960	5.798	92.765	2.268	2.268	3.551
1020	5.585	94.948	2.183	2.183	3.068
1080	5.392	97.052	2.105	2.105	2.727
1140	5.215	99.086	2.034	2.034	2.470
1200	5.053	101.055	1.969	1.969	2.268
1260	4.903	102.965	1.909	1.909	2.105
1320	4.764	104.819	1.854	1.854	1.969
1380	4.636	106.621	1.803	1.803	1.854
1440	4.516	108.376	1.755	1.755	1.755

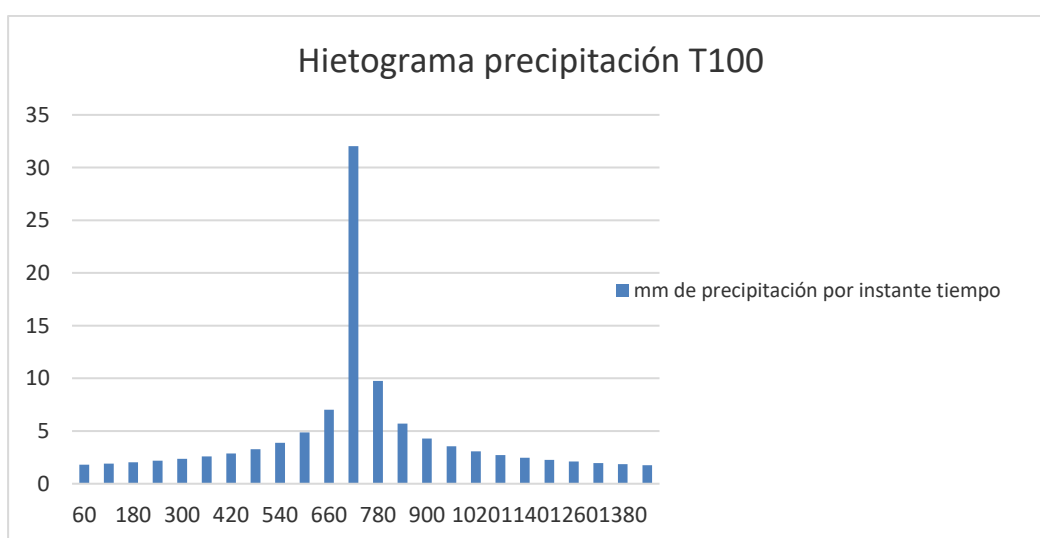


Figura 59. Hietograma PR 100 años (Elaboración propia).

Tabla 22. Periodo de retorno de 500 años, Palmita (Elaboración propia).

Instante (min)	Intensidad (mm/h)	Precipitación acumulada (mm)	Precipitación (mm)	Intensidad parcial (mm/h)	Precipitación Alternada (mm)
60	42.452	42.452	42.452	42.452	2.390
120	27.691	55.383	12.931	12.931	2.531
180	21.568	64.703	9.320	9.320	2.696
240	18.063	72.253	7.549	7.549	2.893
300	15.742	78.710	6.457	6.457	3.133
360	14.069	84.412	5.702	5.702	3.434
420	12.793	89.554	5.142	5.142	3.824
480	11.783	94.261	4.707	4.707	4.357
540	10.958	98.618	4.357	4.357	5.142
600	10.269	102.685	4.068	4.068	6.457
660	9.683	106.509	3.824	3.824	9.320
720	9.177	110.124	3.615	3.615	42.452
780	8.735	113.558	3.434	3.434	12.931
840	8.345	116.833	3.275	3.275	7.549

900	7.998	119.966	3.133	3.133	5.702
960	7.686	122.973	3.007	3.007	4.707
1020	7.404	125.867	2.893	2.893	4.068
1080	7.148	128.657	2.790	2.790	3.615
1140	6.913	131.353	2.696	2.696	3.275
1200	6.698	133.963	2.610	2.610	3.007
1260	6.500	136.494	2.531	2.531	2.790
1320	6.316	138.952	2.458	2.458	2.610
1380	6.145	141.342	2.390	2.390	2.458
1440	5.986	143.668	2.327	2.327	2.327

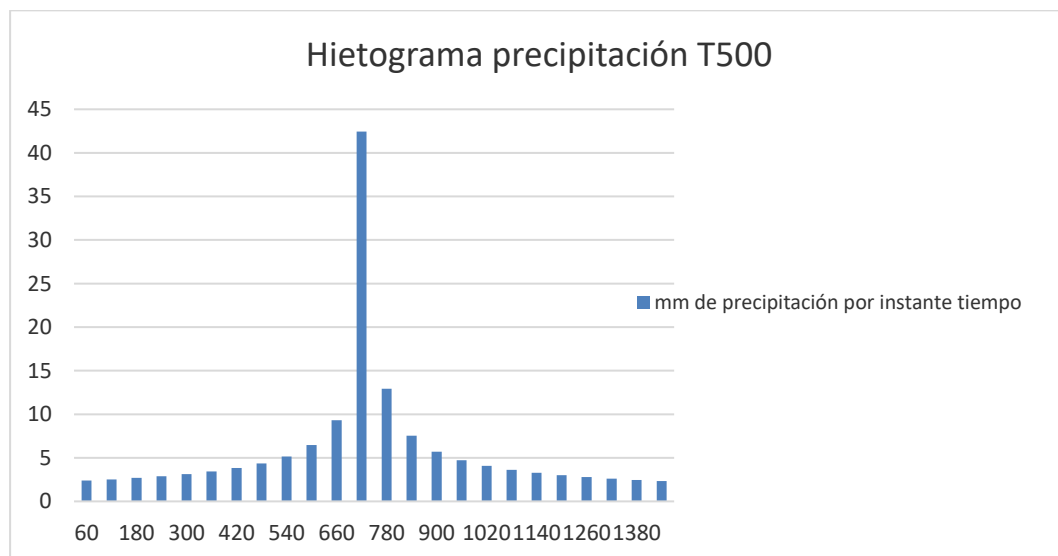


Figura 60. Hietograma PR 500 años (Elaboración propia).

8.1.4 Hietogramas para periodos de retorno Chinácota

Así mismo, se realizó el procedimiento para Chinácota, estos hietogramas fueron fundamentales para alimentar el modelo hidrológico HEC-HMS y realizar la simulación de caudales, permitiendo una calibración precisa frente a los registros históricos de caudal de la estación Don Juana.

Tabla 23. Periodo de retorno de 10 años, Palmita (Elaboración propia).

Instante (min)	Intensidad (mm/h)	Precipitación acumulada (mm)	Precipitación (mm)	Intensidad parcial (mm/h)	Precipitación Alternada (mm)
----------------	-------------------	------------------------------	--------------------	---------------------------	------------------------------

60	39.698	39.698	39.698	39.698	2.235
120	25.895	51.790	12.092	12.092	2.367
180	20.169	60.506	8.716	8.716	2.521
240	16.891	67.566	7.060	7.060	2.706
300	14.721	73.604	6.038	6.038	2.930
360	13.156	78.936	5.332	5.332	3.211
420	11.964	83.745	4.809	4.809	3.576
480	11.018	88.146	4.402	4.402	4.074
540	10.247	92.220	4.074	4.074	4.809
600	9.602	96.024	3.804	3.804	6.038
660	9.055	99.600	3.576	3.576	8.716
720	8.582	102.980	3.381	3.381	39.698
780	8.169	106.191	3.211	3.211	12.092
840	7.804	109.253	3.062	3.062	7.060
900	7.479	112.184	2.930	2.930	5.332
960	7.187	114.996	2.812	2.812	4.402
1020	6.924	117.701	2.706	2.706	3.804
1080	6.684	120.311	2.609	2.609	3.381
1140	6.465	122.832	2.521	2.521	3.062
1200	6.264	125.273	2.441	2.441	2.812
1260	6.078	127.640	2.367	2.367	2.609
1320	5.906	129.938	2.298	2.298	2.441
1380	5.747	132.173	2.235	2.235	2.298
1440	5.598	134.348	2.176	2.176	2.176

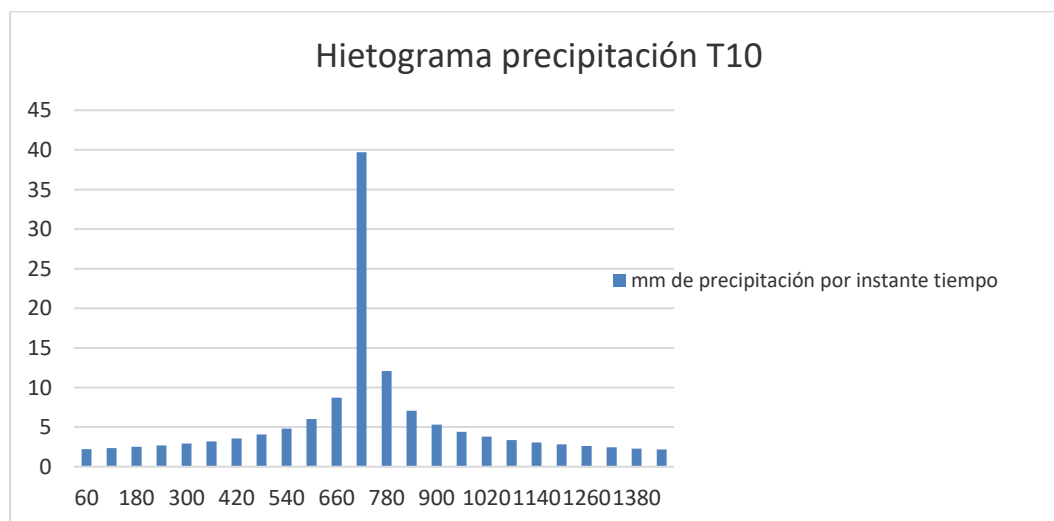


Figura 61. Hietograma PR 10 años (Elaboración propia).

Tabla 24. Periodo de retorno de 25 años, Palmita (Elaboración propia).

Instante (min)	Intensidad (mm/h)	Precipitación acumulada (mm)	Precipitación (mm)	Intensidad parcial (mm/h)	Precipitación Alternada (mm)
60	47.320	47.320	47.320	47.320	2.664
120	30.867	61.734	14.414	14.414	2.821
180	24.041	72.123	10.389	10.389	3.005
240	20.135	80.538	8.415	8.415	3.225
300	17.547	87.736	7.198	7.198	3.493
360	15.682	94.092	6.356	6.356	3.828
420	14.261	99.824	5.732	5.732	4.262
480	13.134	105.070	5.247	5.247	4.856
540	12.214	109.926	4.856	4.856	5.732
600	11.446	114.460	4.534	4.534	7.198
660	10.793	118.723	4.262	4.262	10.389
720	10.229	122.752	4.030	4.030	47.320
780	9.737	126.580	3.828	3.828	14.414
840	9.302	130.230	3.650	3.650	8.415
900	8.915	133.723	3.493	3.493	6.356
960	8.567	137.075	3.352	3.352	5.247
1020	8.253	140.300	3.225	3.225	4.534
1080	7.967	143.410	3.110	3.110	4.030
1140	7.706	146.416	3.005	3.005	3.650
1200	7.466	149.325	2.909	2.909	3.352
1260	7.245	152.146	2.821	2.821	3.110
1320	7.040	154.886	2.740	2.740	2.909
1380	6.850	157.550	2.664	2.664	2.740
1440	6.673	160.143	2.593	2.593	2.593

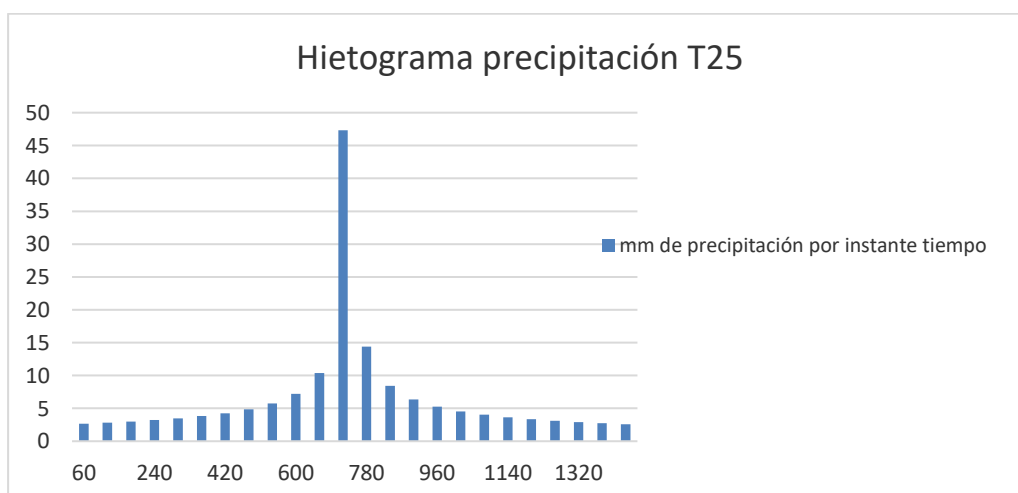


Figura 62. Hietograma PR 25 años (Elaboración propia).

Tabla 25. Periodo de retorno de 50 años, Palmita (Elaboración propia).

Instante (min)	Intensidad (mm/h)	Precipitación acumulada (mm)	Precipitación (mm)	Intensidad parcial (mm/h)	Precipitación Alternada (mm)
60	54.044	54.044	54.044	54.044	3.042
120	35.253	70.506	16.462	16.462	3.222
180	27.457	82.371	11.865	11.865	3.433
240	22.995	91.982	9.611	9.611	3.683
300	20.040	100.202	8.220	8.220	3.989
360	17.910	107.461	7.259	7.259	4.371
420	16.287	114.008	6.546	6.546	4.868
480	15.000	120.000	5.992	5.992	5.546
540	13.950	125.546	5.546	5.546	6.546
600	13.072	130.724	5.178	5.178	8.220
660	12.327	135.592	4.868	4.868	11.865
720	11.683	140.194	4.602	4.602	54.044
780	11.120	144.566	4.371	4.371	16.462
840	10.624	148.735	4.169	4.169	9.611
900	10.182	152.724	3.989	3.989	7.259
960	9.784	156.552	3.828	3.828	5.992
1020	9.426	160.235	3.683	3.683	5.178
1080	9.099	163.788	3.552	3.552	4.602
1140	8.801	167.220	3.433	3.433	4.169
1200	8.527	170.543	3.323	3.323	3.828
1260	8.275	173.765	3.222	3.222	3.552
1320	8.041	176.894	3.129	3.129	3.323
1380	7.823	179.936	3.042	3.042	3.129
1440	7.621	182.898	2.962	2.962	2.962

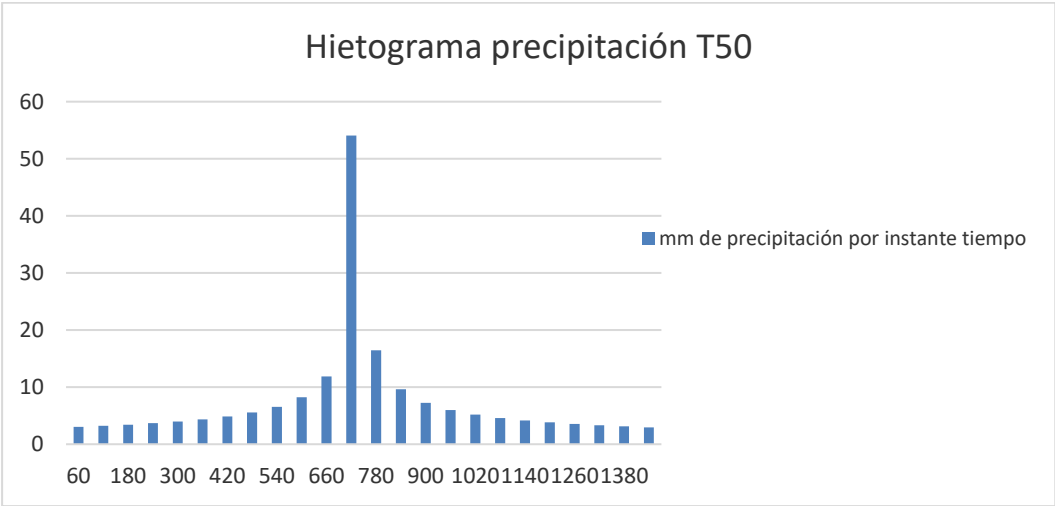


Figura 63. Hietograma PR 50 años (Elaboración propia).

Tabla 26. Periodo de retorno de 100 años, Palmita (Elaboración propia).

Instante (min)	Intensidad (mm/h)	Precipitación acumulada (mm)	Precipitación (mm)	Intensidad parcial (mm/h)	Precipitación Alternada (mm)
60	61.723	61.723	61.723	61.723	3.475
120	40.262	80.524	18.801	18.801	3.680
180	31.358	94.075	13.551	13.551	3.920
240	26.263	105.052	10.976	10.976	4.207
300	22.888	114.440	9.389	9.389	4.556
360	20.455	122.731	8.291	8.291	4.993
420	18.601	130.207	7.476	7.476	5.560
480	17.131	137.051	6.844	6.844	6.334
540	15.932	143.385	6.334	6.334	7.476
600	14.930	149.299	5.914	5.914	9.389
660	14.078	154.859	5.560	5.560	13.551
720	13.343	160.115	5.256	5.256	61.723
780	12.701	165.107	4.993	4.993	18.801
840	12.133	169.869	4.761	4.761	10.976
900	11.628	174.424	4.556	4.556	8.291
960	11.175	178.797	4.372	4.372	6.844
1020	10.765	183.003	4.207	4.207	5.914
1080	10.392	187.060	4.057	4.057	5.256
1140	10.052	190.981	3.920	3.920	4.761
1200	9.739	194.776	3.795	3.795	4.372
1260	9.450	198.456	3.680	3.680	4.057
1320	9.183	202.029	3.573	3.573	3.795
1380	8.935	205.504	3.475	3.475	3.573
1440	8.704	208.886	3.383	3.383	3.383

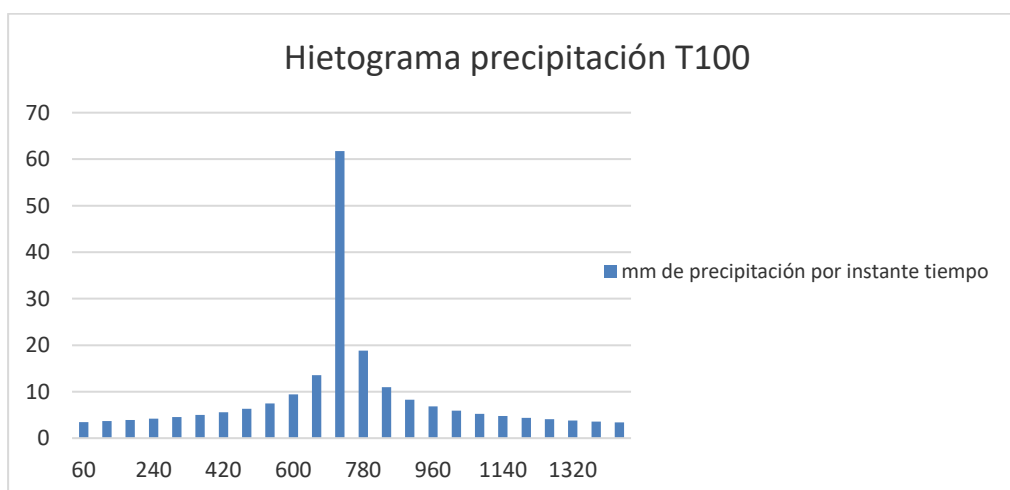


Figura 64. Hietograma PR 100 años (Elaboración propia).

8.2 Calibración y Validación del Modelo

El proceso de calibración del modelo hidrológico HEC-HMS se desarrolló mediante la comparación entre caudales simulados y caudales observados en la estación hidrométrica Don Juana. Para ello, se utilizaron registros de precipitación correspondientes al año 2020, provenientes de las estaciones de Pamplona, La Palmita y Chinácota.

Cada evento de precipitación fue descompuesto en porcentajes acumulados (5%, 10%, 15% y 20%) para estructurar hietogramas que alimentaron el modelo en HEC-HMS. Estos datos fueron transformados en series temporales de entrada y asignados a las subcuencas correspondientes. Durante la calibración, se ajustaron iterativamente tres parámetros clave en cada subcuenca:

- Lag Time (tiempo de retardo), en minutos.
- Número de curva (Curve Number - CN).
- Porcentaje de área impermeable (Impervious %).

Para cada evento, se ejecutaron tres simulaciones consecutivas. En cada iteración, se modificaron los valores de estos parámetros con el objetivo de que el caudal simulado coincidiera lo más posible con el caudal medido en Don Juana. La tercera simulación (Caudal Simulado 3) representa el valor más preciso, obteniendo en la mayoría de los casos una diferencia menor al 5%.

Tabla 27. Calibración de modelo Hec-Hms, Pamplona (Elaboración propia).

FECHA	PRECIPITACION PAMPLONA (mm)	5%	10%	15%	20%	LAG TIME (MIN)	NUMERO CURVA (CN)	Impervious %
1/1/2020	3.9	0.195	0.390	0.585	0.780	67	82	5
1/2/2020	1.2	0.060	0.120	0.180	0.240	40	85	6
1/3/2020	6.4	0.320	0.640	0.960	1.280	140	75	2.3
1/4/2020	14.9	0.745	1.490	2.235	2.980	125	80	3.2

1/5/2020	1.9	0.095	0.190	0.285	0.380	125	78	2.8
1/6/2020	7.9	0.395	0.790	1.185	1.580	140	73	2
1/7/2020	5	0.250	0.500	0.750	1.000	125	74	2
1/8/2020	8.9	0.445	0.890	1.335	1.780	135	68	1.5
1/9/2020	13.7	0.685	1.370	2.055	2.740	145	63	1.2
1/10/2020	10.7	0.535	1.070	1.605	2.140	145	63	1.2
1/11/2020	15.1	0.755	1.510	2.265	3.020	145	60	1.2
1/12/2020	9.5	0.475	0.950	1.425	1.900	120	75	3.8
					PROM	121	73	2.68

Tabla 28. Calibración de modelo Hec-Hms, Palmita (Elaboración propia).

PRECIPITACION PALMITA	5%	10%	15%	20%	LAG TIME (MIN)	NUMERO CURVA (CN)	Impervious %
13.9	0.695	1.389	2.084	2.778	44	80	2.9
6.7	0.333	0.666	0.999	1.332	32	85	4
23.0	1.151	2.302	3.453	4.604	135	75	1.2
13.0	0.648	1.296	1.944	2.592	110	80	1.4
18.6	0.932	1.863	2.795	3.726	105	78	1
32.5	1.623	3.245	4.868	6.490	139	68	0.7
25.3	1.264	2.527	3.791	5.054	115	72	0.7
31.7	1.585	3.170	4.755	6.340	135	67	0.4
40.1	2.007	4.013	6.020	8.026	144	62	0.4
45.6	2.278	4.556	6.834	9.112	130	62	0.4
63.5	3.176	6.351	9.527	12.702	135	60	0.4
14.3	0.713	1.425	2.138	2.850	115	75	2.4
				PROM	112	72	1.33

Tabla 29. Calibración de modelo Hec-Hms, Blonay (Elaboración propia).

PRECIPITACION CHINACOTA	5%	10%	15%	20%	LAG TIME (MIN)	NUMERO CURVA (CN)	Impervious %
12.5	0.625	1.250	1.875	2.500	32	80	1.5
6.0	0.300	0.599	0.899	1.199	25	85	3
16.1	0.806	1.611	2.417	3.223	125	75	0.4
11.7	0.583	1.166	1.750	2.333	110	80	0.8
16.8	0.838	1.677	2.515	3.353	90	77	0.6
21.1	1.055	2.109	3.164	4.219	139	73	0.3
17.7	0.884	1.769	2.653	3.538	110	74	0.3
15.9	0.793	1.585	2.378	3.170	135	68	0.1

14.0	0.702	1.405	2.107	2.809	144	62	0.1
7.3	0.364	0.729	1.093	1.458	130	61	0.1
15.9	0.794	1.588	2.382	3.176	135	60	0.1
12.8	0.641	1.283	1.924	2.565	115	75	0.9
					108	72.5	0.68

Tabla 30. Calibración datos de Caudal simulado (Elaboración propia).

CAUDAL DON JUANA (m ³ /s)	CAUDAL SIMULADO 1 (HMS)	CAUDAL SIMULADO 2 (HMS)	CAUDAL SIMULADO 3 (HMS)
4.47	3.5322	3.8732	4.2
3.17	1.7584	2.1542	2.6
3.3	8.8756	6.7105	4
4.56	6.5674	5.2578	4.55
2.78	5.2356	3.0423	2.77
4.55	11.2345	8.0672	4.52
2.78	4.8975	3.7658	2.88
2.42	5.6485	3.8479	2.72
2.78	6.4727	4.8427	3.52
4.72	7.2719	5.9531	4.75
16.21	23.9759	19.2763	17.66
4.2	7.5483	5.2695	4.26

8.3 Caudales para Distintos Periodos de Retorno

Una vez calibrado el modelo, se procedió a simular los caudales para eventos de diseño con periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50, 100 y 500 años. Se utilizaron los valores promedios de los parámetros calibrados (Lag Time, CN e Impervious) para cada subcuenca. Los hietogramas correspondientes a cada periodo fueron ingresados como series temporales en el modelo.

Los resultados indican un incremento progresivo del caudal pico a medida que aumenta el periodo de retorno, pasando de 34.99 m³/s para 2 años hasta 509.01 m³/s para 500 años. Estos resultados fueron obtenidos para el punto de salida de la cuenca denominado “Diamante”.

Periodo de retorno 2 años: 34.9928 m³/s

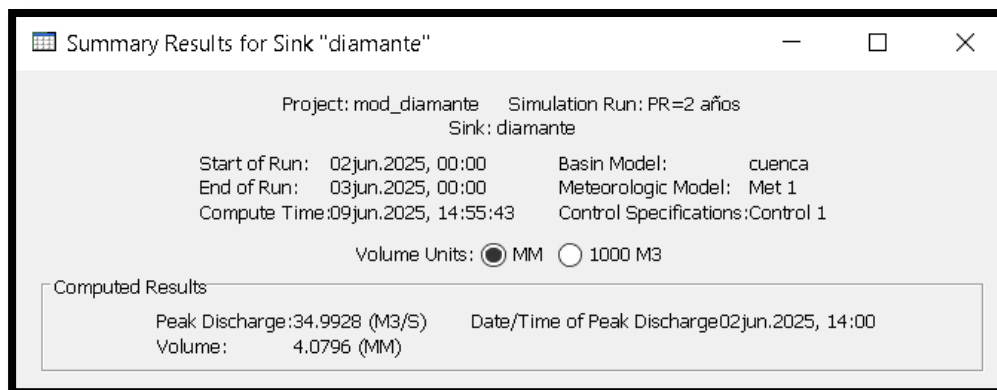


Figura 65. Resultado caudal modelado Hec-Hms, PR=2 (Elaboración propia).

Periodo de retorno 5 años: 64.3594 m³/s

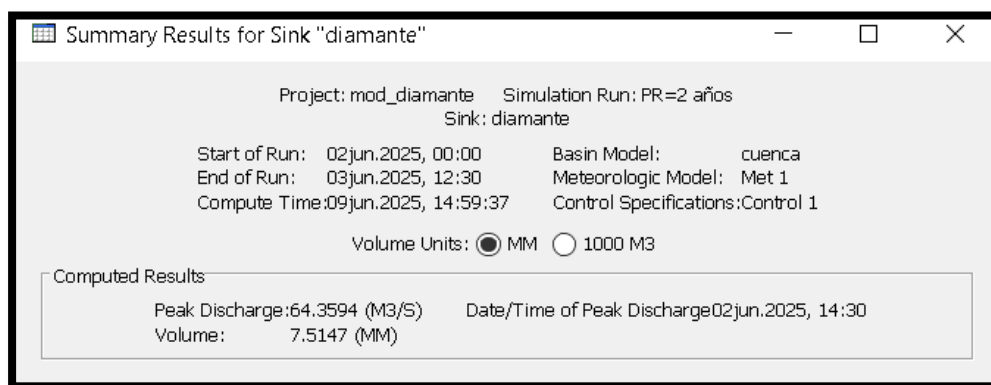


Figura 66. Resultado caudal modelado Hec-Hms, PR=5 (Elaboración propia).

Periodo de retorno 10 años: 93.6857 m³/s

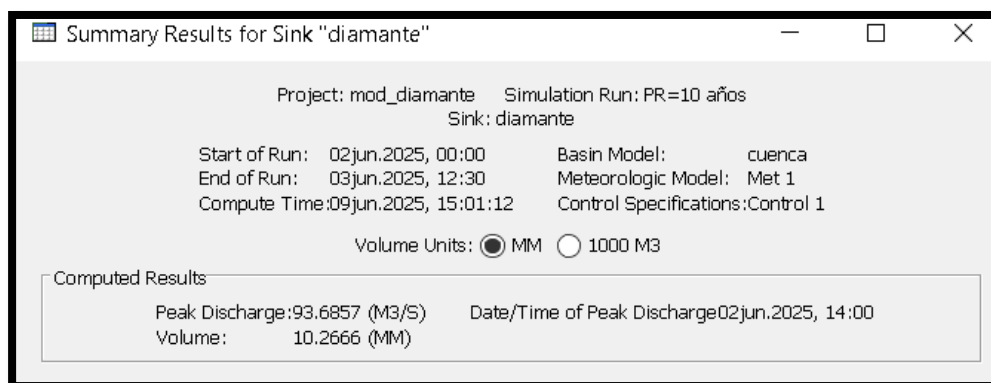


Figura 67. Resultado caudal modelado Hec-Hms, PR=10 (Elaboración propia).

Periodo de retorno 25 años: 148.7173 m³/s

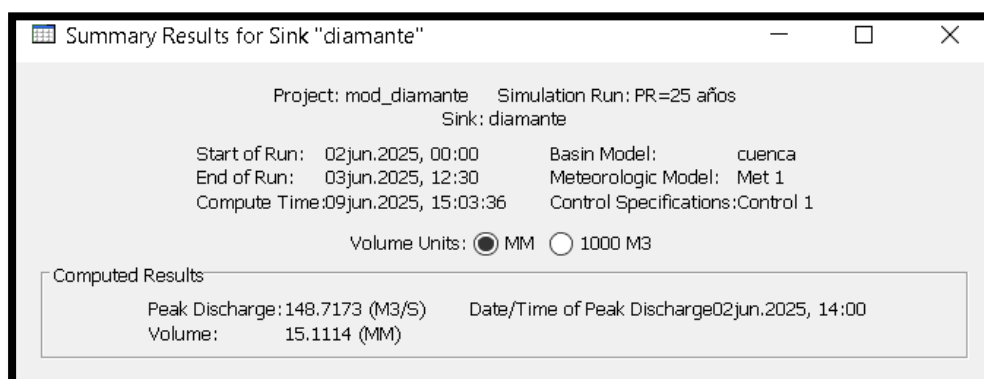


Figura 68. Resultado caudal modelado Hec-Hms, PR=25 (Elaboración propia).

Periodo de retorno 50 años: 204.6155 m³/s

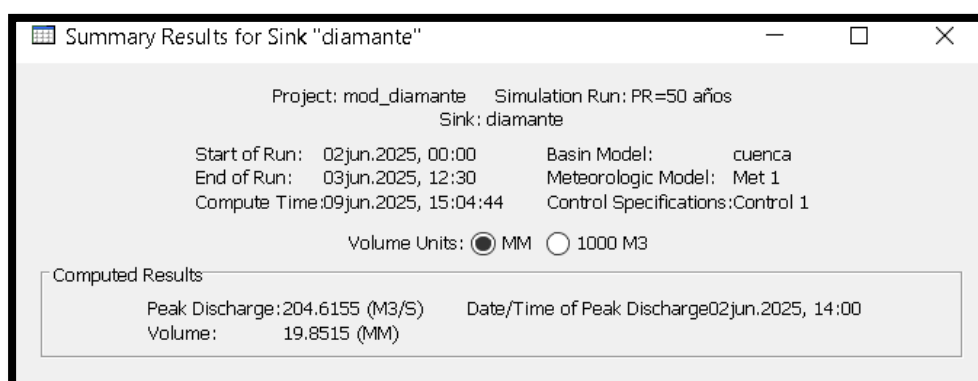


Figura 69. Resultado caudal modelado Hec-Hms, PR=50 (Elaboración propia).

Periodo de retorno 100 años: 275.3112 m³/s

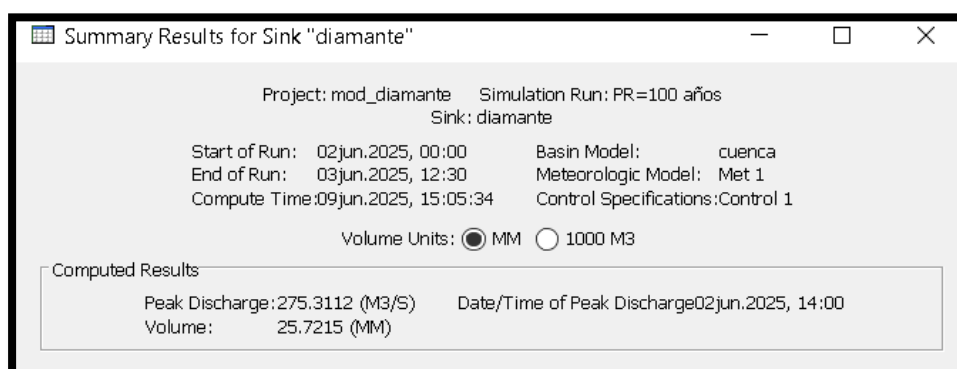


Figura 70. Resultado caudal modelado Hec-Hms, PR=100 (Elaboración propia).

Periodo de retorno 500 años: m³/s

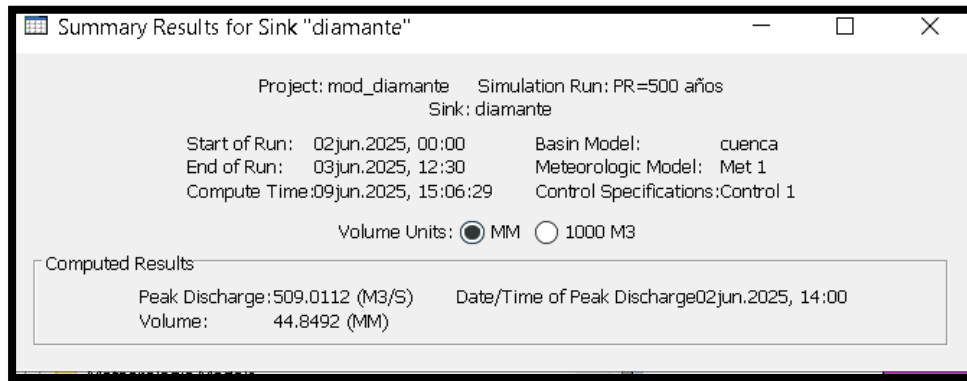


Figura 71. Resultado caudal modelado Hec-Hms, PR=100 (Elaboración propia).

8.4 Mapas de Inundación y Zonas Vulnerables

Para el análisis espacial del impacto de los caudales simulados, se procedió a modelar hidráulicamente la zona del río en HEC-RAS 2D, iniciando en el evento con periodo de retorno de 2 años. Se analizó la profundidad máxima (Depth Max) y la velocidad máxima (Velocity Max) del flujo en tres sectores:

Tramo Alto (aguas arriba):

- Profundidad: ± 1.64 m
- Velocidad: ± 1.80 m/s

Tramo Central:

- Profundidad: ± 1.43 m
- Velocidad: ± 1.34 m/s

Tramo Bajo (aguas abajo):

- Profundidad: ± 0.62 m
- Velocidad: ± 3.55 m/s



Figura 72. Resultado modelado RASMAPPER, Depth, PR=2 (Elaboración propia).

Periodo de retorno 5 años:



Figura 73. Resultado modelado RASMAPPER, Depth, PR=5 (Elaboración propia).

Tramo Alto

- Profundidad observada: 0.66 m
- Velocidad máxima observada: 3.54 m/s

- Este tramo presenta una sección más angosta y encañonada, con velocidades elevadas debido a la pendiente natural y confinamiento del cauce.
- La profundidad en esta zona indica riesgo moderado de desbordamiento, especialmente en márgenes con menor contención.

Tramo Medio

- Profundidad observada: 0.69 m
- Velocidad máxima observada: 1.17 m/s
- Esta sección es crítica por la cercanía con infraestructura urbana y vial (puente y vías). Aunque la profundidad no es extrema, se observa una expansión lateral del flujo, aumentando la amenaza para edificaciones cercanas.
- Las velocidades son moderadas, pero persistentes, lo que podría causar erosión progresiva de márgenes no protegidas.

Tramo Bajo

- Profundidad observada: 1.88 m
- Velocidad máxima observada: 1.94 m/s

El error máximo reportado en el modelo fue de 1.41 metros en el nivel de agua en una celda, lo cual se encuentra dentro de un rango aceptable para modelos 2D complejos como este, especialmente considerando la resolución espacial utilizada, el error de volumen fue de 0.002505%, indicando una alta fidelidad en la conservación de masa dentro de la simulación.

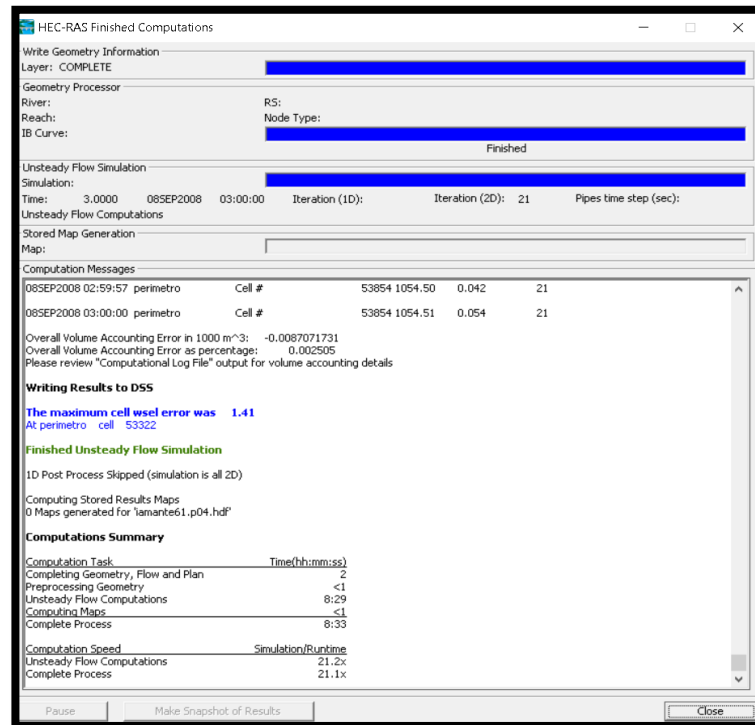


Figura 74. Resultado modelado HEC-RAS, PR=5 (Elaboración propia).

Periodo de retorno 10 años:

Tramo Alto:

- Profundidad máxima registrada: 2.56 m.
- Velocidad máxima registrada: 2.51 m/s.
- El flujo se mantiene canalizado, sin evidencia de desbordamientos.
- La energía del flujo es considerable, pero el cauce la contiene adecuadamente.

Tramo central:

- Profundidad bajo el puente: 1.09 m.
- Velocidad en zona crítica: 3.65 m/s.
- El flujo sigue sin rebasar el tablero del puente.
- La velocidad en esta sección es la más elevada, indicando una fuerte constricción del flujo.

Tramo bajo:

- Profundidad en este tramo: 0.84 m.
- Velocidad del flujo: 1.00 m/s.
- El comportamiento hidráulico sigue estable.
- No hay evidencia de desbordamiento ni erosión significativa aparente.

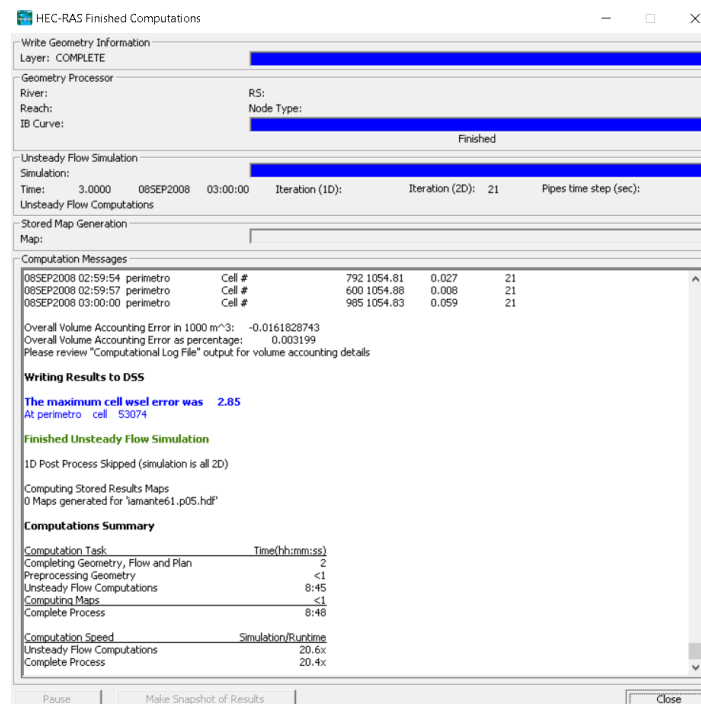


Figura 75. Resultado modelado HEC-RAS, PR=10 (Elaboración propia).

El error máximo reportado en el modelo fue de 2.85 metros en el nivel de agua en una celda.



Figura 76. Resultado modelado RASMAPPER, Depth, PR=10 (Elaboración propia).

Periodo de retorno de 25 años:

Tramo Alto:

- Profundidad: Se evidencia un incremento notable respecto a los escenarios anteriores, alcanzando aproximadamente 1.47 m en la zona de entrada al puente.
- Velocidad: Se observan velocidades mayores, con un valor referencial de 4.50 m/s, concentradas en el estrechamiento del cauce antes del puente, lo que podría generar erosión en la base.

Tramo central:

- Profundidad: Continúa el patrón creciente, con una lámina de agua en el orden de 1.35 m en el entorno del puente.
- Velocidad: Se mantiene alta, con valores cercanos a 1.29 m/s, indicando una aceleración del flujo en el paso por la infraestructura, sin pérdida de energía significativa.

Tramo Bajo:

- Profundidad: Alcanza aproximadamente 3.26 m, siendo esta una de las mayores observadas, evidenciando acumulación aguas abajo del puente.
- Velocidad: Presenta valores de hasta 2.87 m/s, lo que podría estar vinculado a un aumento del gradiente hidráulico y canalización del flujo.

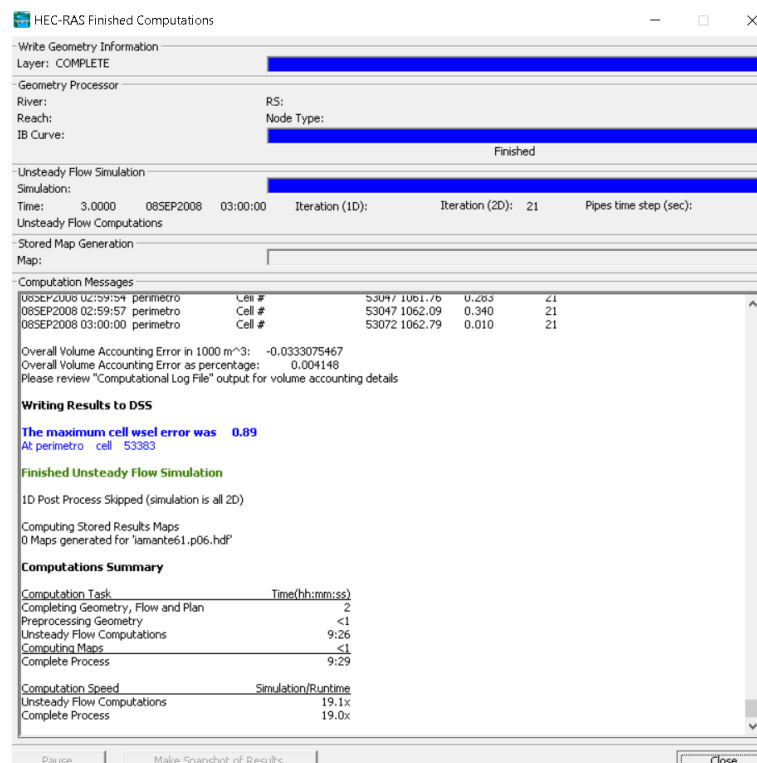


Figura 77. Resultado modelado Hec-Ras, PR=25 (Elaboración propia).

El error máximo reportado en el modelo fue de 0.89 metros en el nivel de agua en una celda.

Periodo de retorno de 50 años:

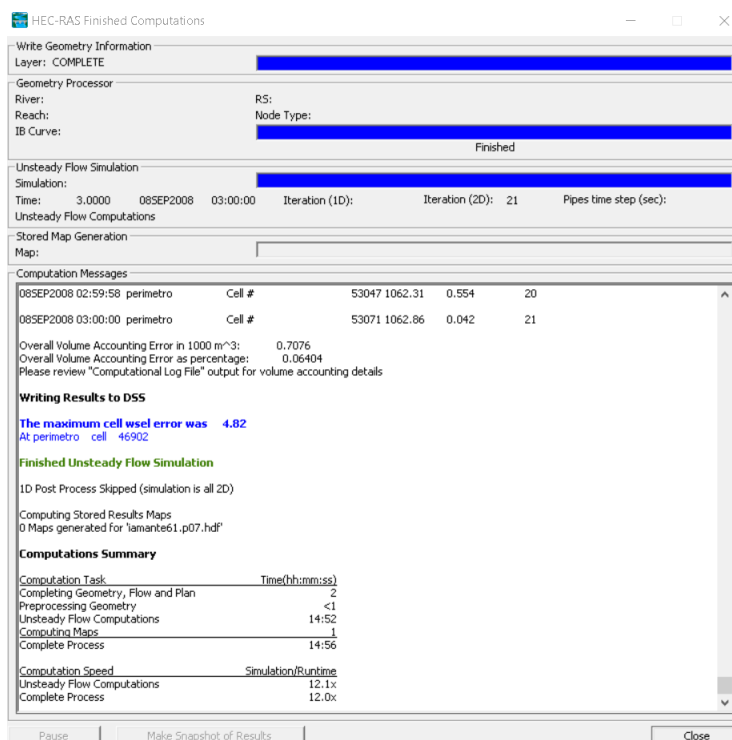


Figura 78. Resultado modelado Hec-Ras, PR=50 (Elaboración propia).

El error máximo reportado en el modelo fue de 4.82 metros en el nivel de agua en una celda.



Figura 79. Resultado modelado RASMAPPER, Depth, PR=50 (Elaboración propia).

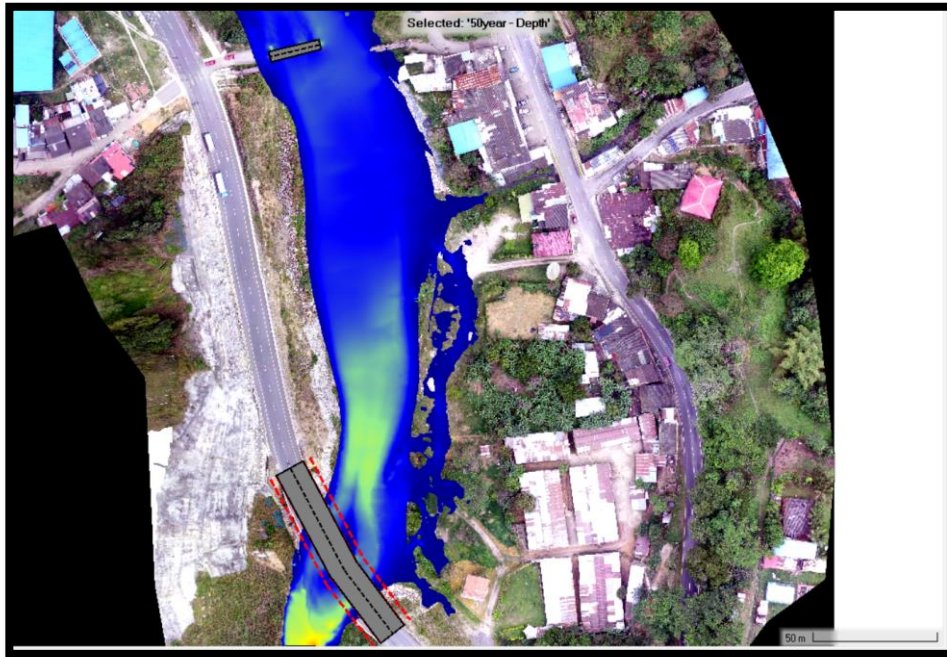


Figura 80. Resultado modelado RASMAPPER, Velocity, PR=50 (Elaboración propia).

Tramo Alto

- Profundidad: hasta 1.96 m.
- Velocidad: hasta 5.47 m/s.

Se observa una fuerte concentración de flujo en esta sección, con velocidades altas y profundidades relevantes, especialmente aguas abajo del puente. Puede haber efectos de aceleración importantes.

Tramo central

- Profundidad: alrededor de 1.63 m.
- Velocidad: aproximadamente 1.95 m/s.

El canal sigue amplio y bien contenido. La velocidad y profundidad indican un flujo estable sin desbordes visibles, sin embargo, se identifica un aumento general respecto a periodos menores.

Tramo Bajo

- Profundidad: hasta 3.96 m.

- Velocidad: hasta 3.32 m/s.

Aguas arriba del puente se mantiene un flujo profundo y veloz. Las condiciones pueden representar un riesgo hidrodinámico creciente, sobre todo en márgenes no canalizadas.

Periodo de retorno de 100 años:

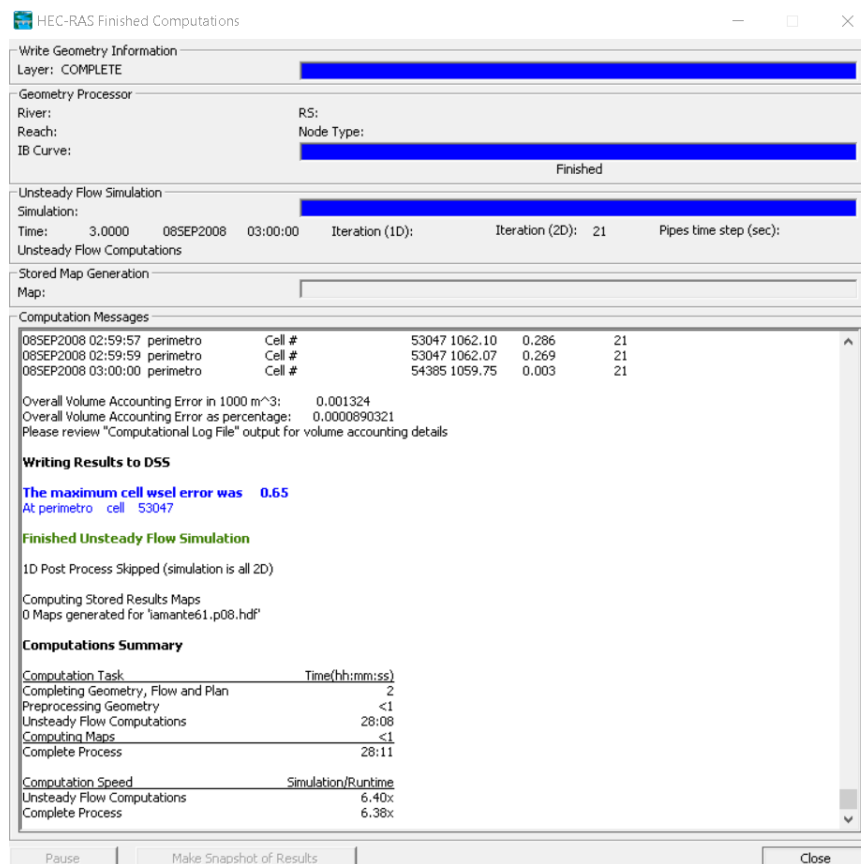


Figura 81. Resultado modelado Hec-Ras, PR=100 (Elaboración propia).

El error máximo reportado en el modelo fue de 0.65 metros en el nivel de agua en una celda.



Figura 82. Resultado modelado RASMAPPER, Depth, PR=100 (Elaboración propia).

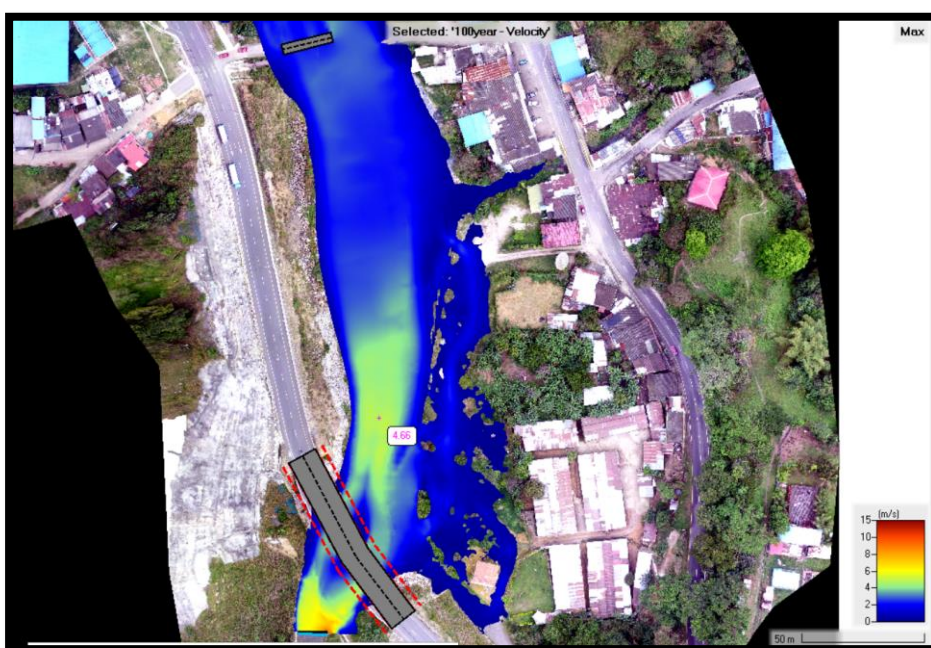


Figura 83. Resultado modelado RASMAPPER, Velocity, PR=100 (Elaboración propia).

Tramo Alto

- Profundidad: Se alcanza un valor referencial de 2.30 m.

- Velocidad: Se evidencian velocidades de hasta 6.43 m/s, concentradas justo antes del ingreso al puente, indicando un flujo más turbulento y acelerado.

Tramo central

- Profundidad: Se mantiene en un rango cercano a 2.49 m, lo que implica una acumulación moderada de agua.
- Velocidad: El flujo se estabiliza ligeramente con valores referenciales de 2.15 m/s, pero sigue mostrando aceleración por el encauzamiento estructural del puente.

Tramo Bajo

- Profundidad: Aumenta significativamente, con un valor representativo de 4.77 m, lo que sugiere una mayor capacidad de almacenamiento o retención en esta zona.
- Velocidad: Se mantiene elevada en 3.76 m/s, indicando una energía importante antes del ingreso al puente, posiblemente por el estrechamiento del cauce.

Periodo de retorno 500 años:

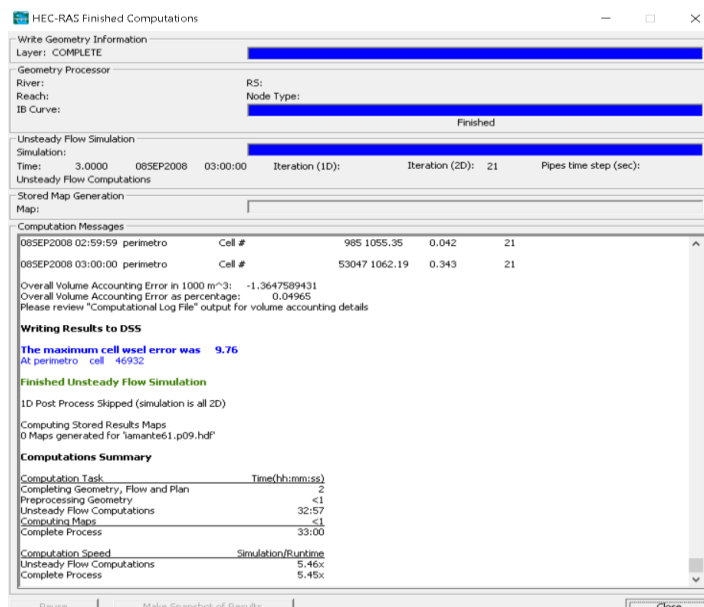


Figura 84. Resultado modelado Hec-Ras, PR=500 (Elaboración propia).

El error máximo reportado en el modelo fue de 9.76 metros en el nivel de agua en una celda.

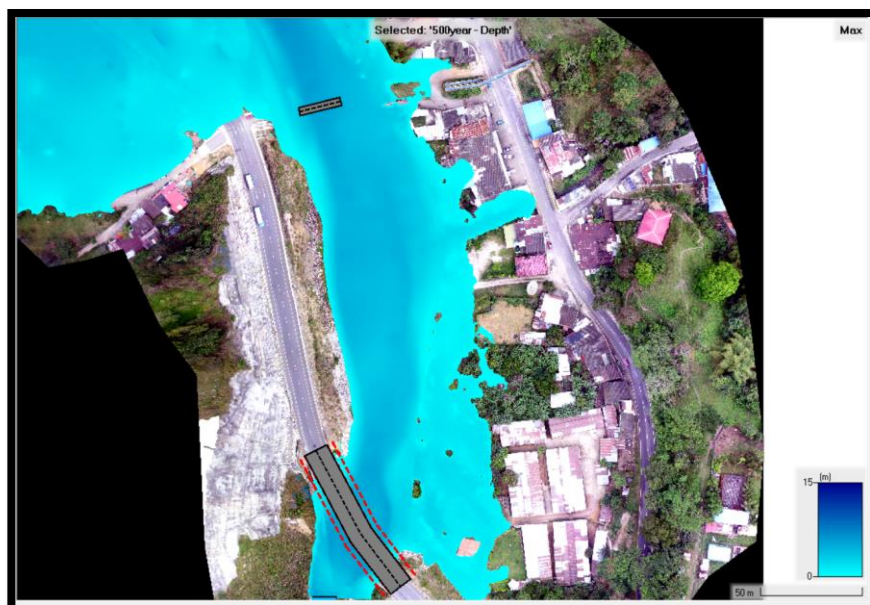


Figura 85. Resultado modelado RSMAPPER, Depth, PR=500 (Elaboración propia).

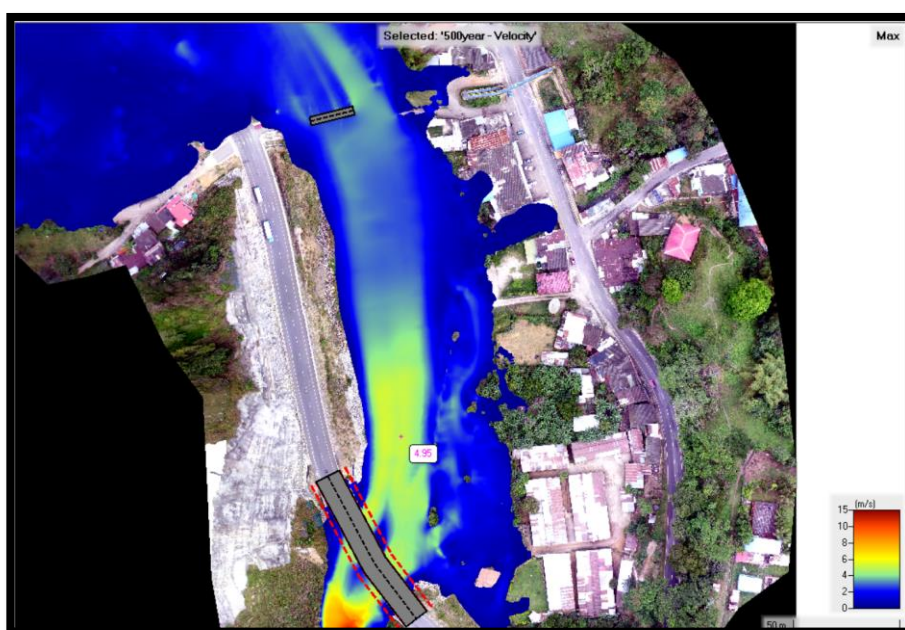


Figura 86. Resultado modelado RSMAPPER, Velocity, PR=500 (Elaboración propia).

Tramo Alto

- La profundidad máxima alcanzó 4.03 m, mostrando un aumento respecto a escenarios con menor periodo de retorno.
- Se observa una amplia expansión lateral del flujo, acercándose a zonas urbanizadas.
- La velocidad máxima fue de 8.00 m/s, la más alta registrada en todo el modelo, lo que sugiere condiciones altamente erosivas y potencialmente peligrosas para estructuras cercanas.

Tramo Central

- La profundidad del agua se incrementó hasta 4.45 m, evidenciando acumulación por efecto del puente como elemento obstructivo.
- La velocidad del flujo disminuyó a 2.63 m/s, debido a la pérdida de energía provocada por el paso a través del puente.
- Se confirma un comportamiento de embalsamiento local, con una transición de régimen que podría generar presión estructural sobre la obra.

Tramo Bajo

- Se registró una profundidad máxima de 7.02 m, la más alta en todo el dominio modelado, lo que indica acumulación significativa.
- La velocidad máxima fue de 4.27 m/s, revelando un reacomodo de flujo post-obstáculo con incremento de energía.
- Este comportamiento sugiere un riesgo de desbordamiento e impacto sobre viviendas e infraestructura aguas abajo.

El análisis hidrodinámico realizado en el tramo del río que atraviesa la zona de estudio muestra una evolución progresiva tanto en la extensión de las áreas inundadas como en los

parámetros hidráulicos fundamentales (profundidad y velocidad), a continuación se presenta un desglose por periodo de retorno:

Periodo de Retorno de 2 años: El agua permanece contenida en el cauce, con una extensión lateral mínima, la zona de inundación es reducida y no representa amenaza a estructuras o zonas pobladas, no se supera ninguna infraestructura ni punto crítico.

Periodo de Retorno de 5 años: Se comienza a notar una expansión más notable de la lámina de agua, el flujo alcanza zonas cercanas a la barricada de piedras y cemento que protege el segundo puente pequeño, aguas abajo se detecta una incipiente expansión hacia zonas verdes.

Periodo de Retorno de 10 años: El agua sobrepasa las estructuras de piedra y alcanza el nivel inferior del puente central (puente 2), se evidencia mayor expansión lateral, afectando zonas verdes en ambas riberas. Se incrementa el riesgo de socavación en márgenes y estructuras.

Periodo de Retorno de 25 años: Manchas de inundación se distribuyen a lo largo del cauce. El agua alcanza zonas residenciales en los bordes del mapa, especialmente aguas abajo, varias áreas verdes quedan anegadas, se comprometen márgenes urbanas no protegidas, el puente central queda completamente anegado.

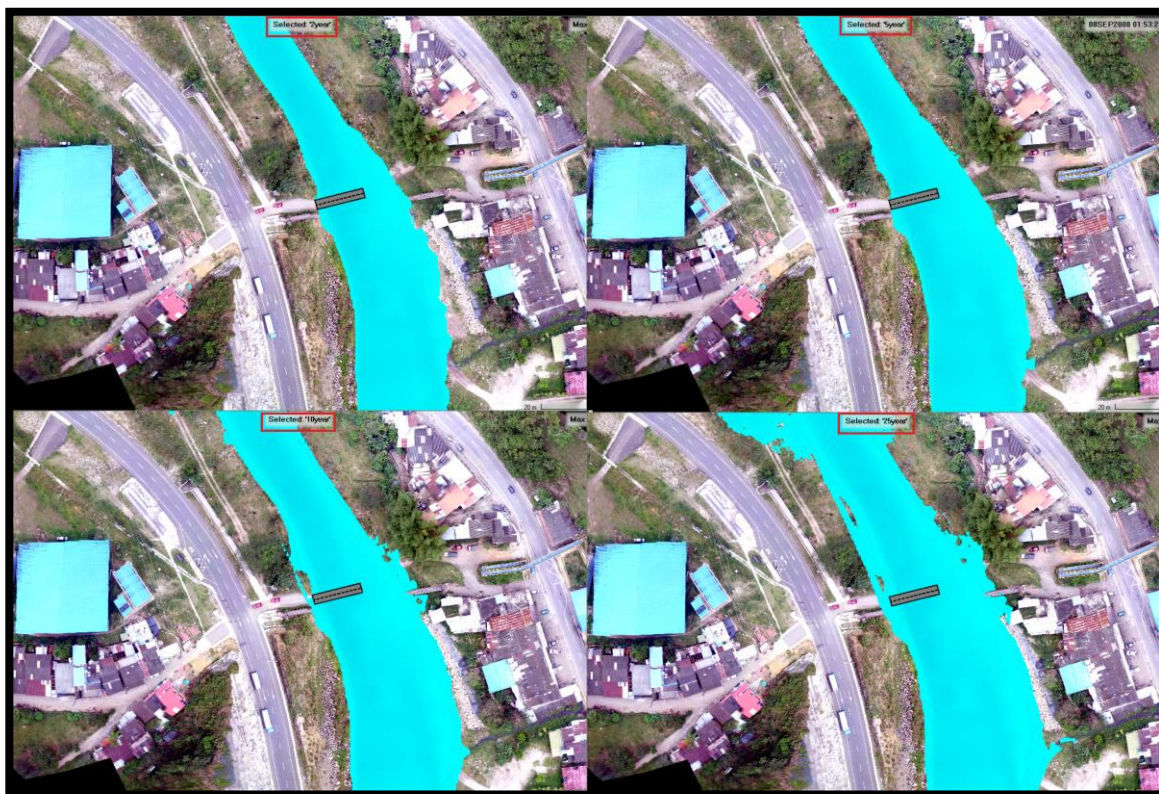


Figura 87. Comparativa Depth 2, 5, 10, 25 años (Elaboración propia).

Periodo de Retorno de 50 años: Zonas de inundación se amplían notablemente, se evidencia que el flujo cubre por completo las estructuras de contención (barricadas) y anula la funcionalidad del puente central, el flujo alcanza zonas urbanizadas en ambos márgenes, presentando riesgo estructural para viviendas y vías.

Periodo de Retorno de 100 años: El agua invade parcialmente zonas residenciales aguas abajo, circulando por la vía que conecta los márgenes, las casas cercanas al cauce comienzan a mostrar afectaciones directas, la capacidad hidráulica del cauce resulta totalmente superada.

Periodo de Retorno de 500 años: Se produce la inundación completa de las zonas residenciales aguas abajo, especialmente aquellas ubicadas al norte y este del mapa, se reporta

expansión lateral masiva del flujo. El riesgo de colapso estructural en viviendas y pérdida de infraestructura es altísimo.



Figura 88. Comparativa Depth 50, 500 años (Elaboración propia).

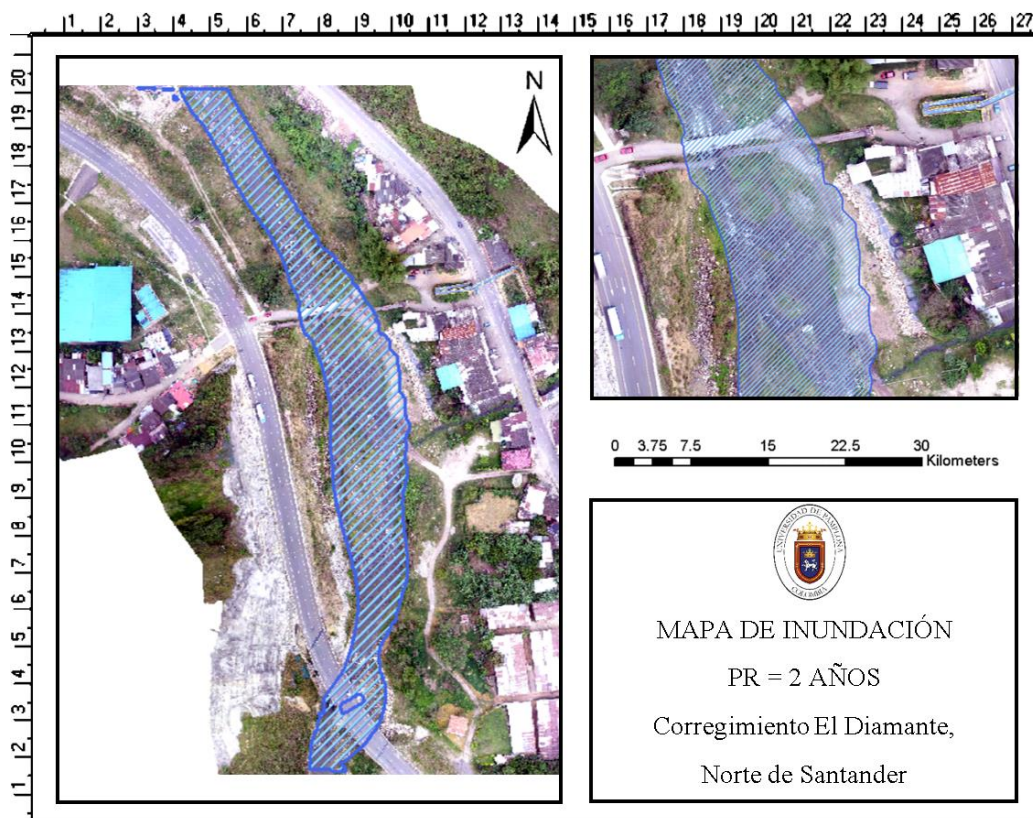


Figura 89. Mapa de inundación periodo de retorno 2 años (Elaboración propia).

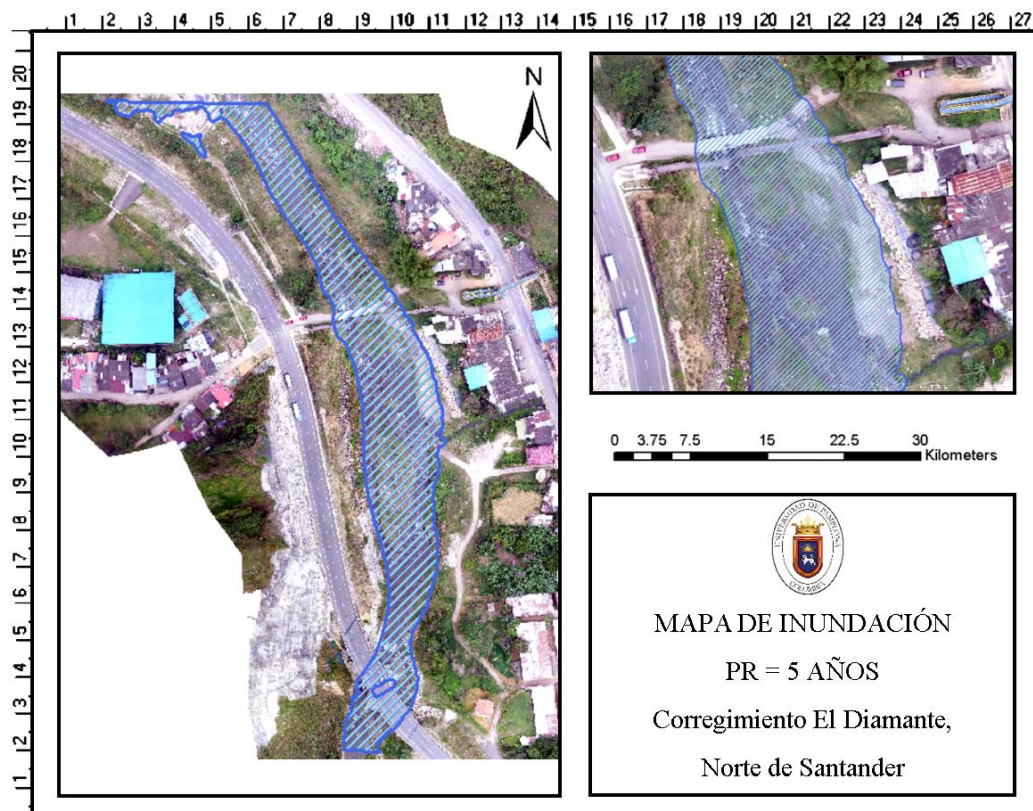


Figura 90. Mapa de inundación periodo de retorno 5 años (Elaboración propia).

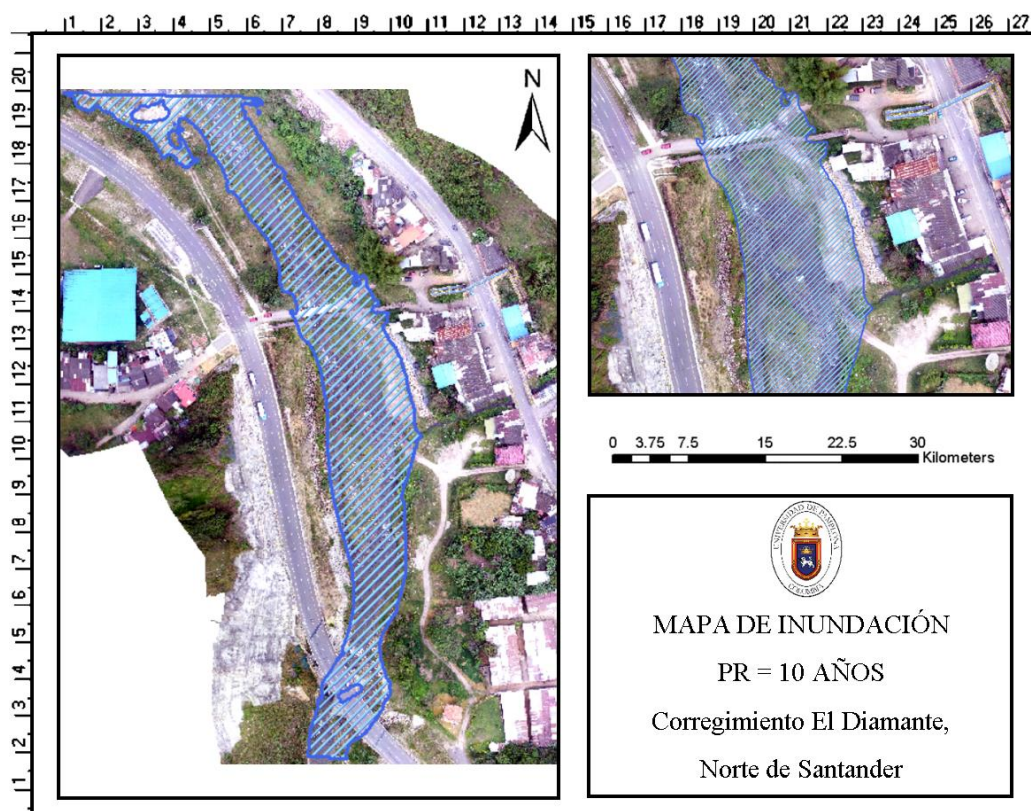


Figura 91. Mapa de inundación periodo de retorno 10 años (Elaboración propia).

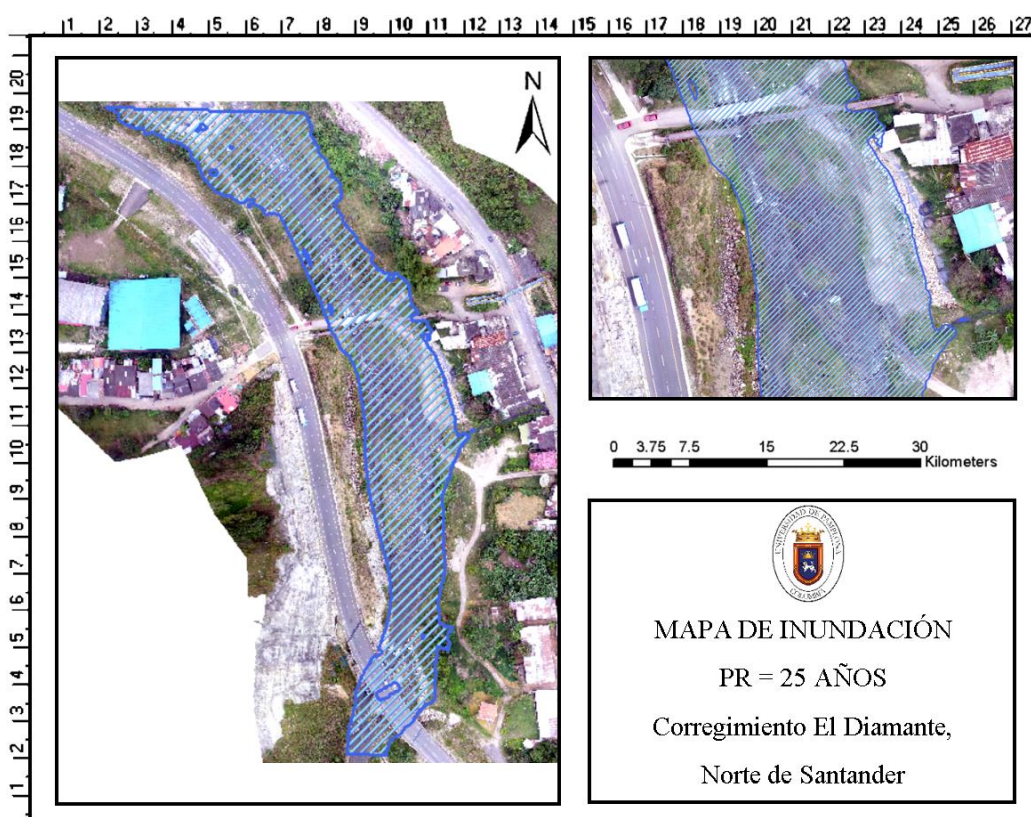


Figura 92. Mapa de inundación periodo de retorno 25 años (Elaboración propia).

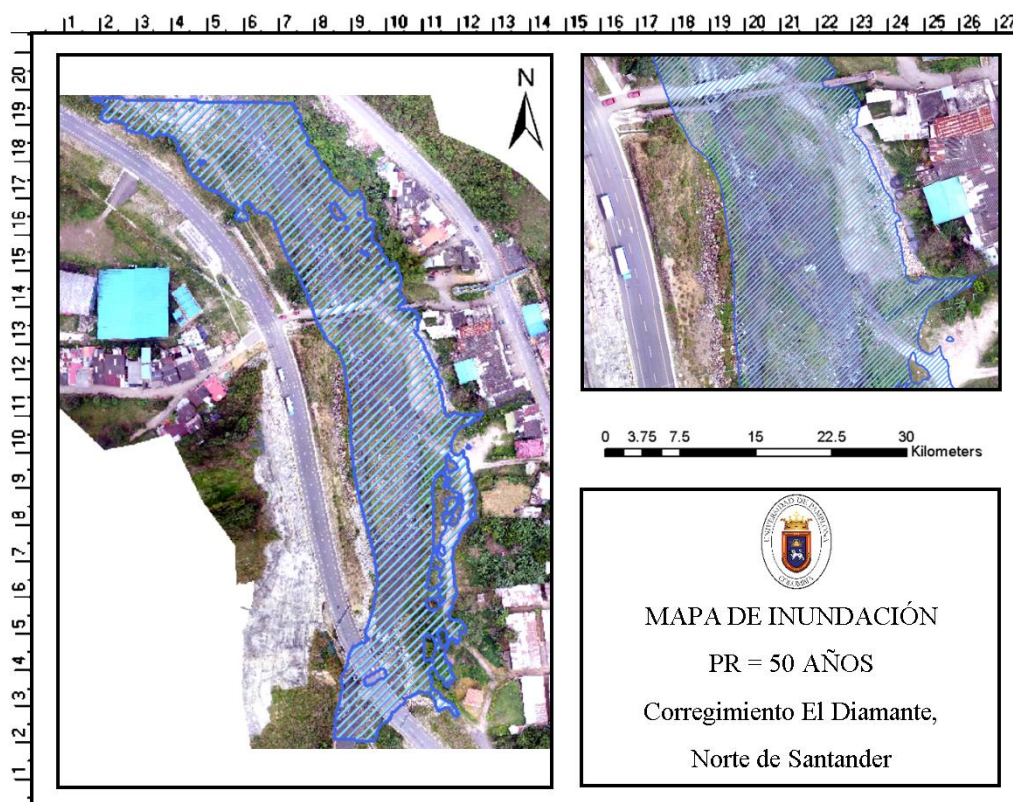


Figura 93. Mapa de inundación periodo de retorno 50 años (Elaboración propia).

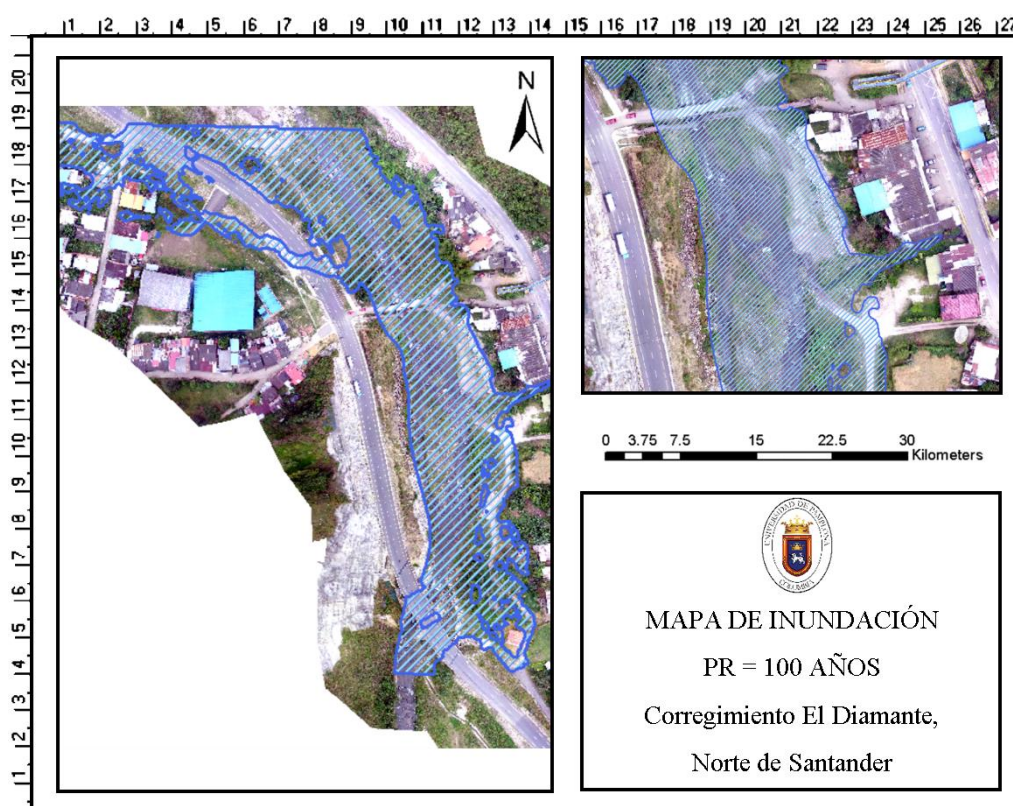


Figura 94. Mapa de inundación periodo de retorno 100 años (Elaboración propia).

9. CONCLUSIONES

- Se logró desarrollar un modelo hidrodinámico bidimensional de alta precisión mediante el software HEC-RAS, alimentado con datos calibrados del modelo hidrológico HEC-HMS, este modelo simula adecuadamente el comportamiento del flujo en el corregimiento El Diamante para distintos periodos de retorno (2, 5, 10, 25, 50, 100 y 500 años), permitiendo una representación fiel de la respuesta hidráulica del sistema.
- El modelo evidenció cómo a medida que aumentan los periodos de retorno, también lo hacen la profundidad y la velocidad del flujo, superando límites críticos en estructuras como el puente central y alcanzando áreas residenciales en escenarios de mayor recurrencia.
- Se generaron mapas detallados de inundación para cada uno de los periodos de retorno analizados, estos mapas muestran con claridad la evolución de las zonas afectadas, incluyendo datos visuales de profundidad y velocidad del agua.
- El análisis espacial y temporal permitió identificar zonas de alto riesgo de inundación, particularmente las áreas residenciales ubicadas aguas abajo y el puente vehicular central, que se ve comprometido a partir del periodo de retorno de 10 años.
- Se observaron afectaciones significativas en zonas verdes, caminos de acceso, áreas agrícolas y estructuras protectoras (como barreras de piedra y cemento), especialmente en eventos con retornos superiores a 25 años.
- Con base en los resultados, se sugiere la implementación de estrategias para la mitigación del riesgo: Mejoras estructurales en el puente central y reforzamiento de márgenes vulnerables, revisión del uso del suelo en zonas residenciales ubicadas en áreas inundables.

10. RECOMENDACIONES

Con base en los resultados obtenidos del modelamiento hidrológico e hidráulico, y en la identificación de zonas vulnerables ante eventos de inundación, se proponen las siguientes recomendaciones técnicas orientadas a la gestión del riesgo y al desarrollo sostenible en el corregimiento El Diamante:

- **Diseño e implementación de obras de control hidráulico:** Se recomienda proyectar defensas ribereñas en puntos críticos del cauce, especialmente en el tramo inferior donde las simulaciones muestran una mayor afectación a zonas residenciales. Se sugiere evaluar la viabilidad de espigones, muros de contención en concreto ciclópeo y gaviones, priorizando la estabilidad del talud y el control de desbordamientos.
- **Desarrollo de un sistema de monitoreo hidrometeorológico:** Es esencial implementar estaciones automáticas de medición de caudal y precipitación, que permitan alimentar en tiempo real un sistema de alerta temprana. Esto contribuiría significativamente a la reducción del tiempo de respuesta ante eventos extremos y a la protección de la vida humana.
- **Revisión y control del uso del suelo en zonas de amenaza alta:** Con base en los mapas generados, se recomienda declarar como no urbanizables las zonas con mayor probabilidad de inundación, especialmente las cercanas al puente vehicular central. Es indispensable incluir esta información en los instrumentos de planificación urbana y territorial.
- **Protección y recuperación de zonas de amortiguamiento natural:** Se aconseja promover la revegetalización con especies nativas en las márgenes del cauce, especialmente en el tramo superior, como medida para estabilizar los suelos, reducir la velocidad del flujo

y mejorar la infiltración. Estas medidas también contribuirán a conservar la biodiversidad local.

- Educación y capacitación comunitaria en gestión del riesgo: Desde una perspectiva de sostenibilidad y corresponsabilidad, es recomendable articular programas de formación técnica básica en gestión de riesgos con las Juntas de Acción Comunal y líderes comunitarios, con énfasis en interpretación de escenarios de inundación y protocolos de evacuación.

11. BIBLIOGRAFÍA

- ARMIJOS, G., FIGUEROA MONTTOYA, P., & MAURICIO, J. (2019). REPOSITORIO UNESUM. Obtenido de Aplicación del Hec-RAS para la modelación hidráulica y determinación de zonas de inundación en las riberas del río Jipijapa: <https://repositorio.unesum.edu.ec/handle/53000/2016>
- Arteaga, J. M. (2020). REPOSITORIO UNESUM. Obtenido de <https://repositorio.unesum.edu.ec/bitstream/53000/2724/1/Tesis%20Cede%C3%B1o%20Arteaga%20Jos%C3%A9%20Miguel-%20ORIGINAL.pdf>
- BUSTOS, W., MEJIA, E., & PARDO, E. (2017). REPOSITORY. Obtenido de <https://repository.ucatolica.edu.co/server/api/core/bitstreams/1048138f-bbc0-4578-8bcc-7d77f3e4f77d/content>
- C., B., & J. E., M. (2022). Hacia la elaboración de un modelo hidrogeológico. Boletín de Geología.
- Cierto, J. Z. (2018). REPOSITORIO PUCP. Obtenido de <https://repositorio.pucp.edu.pe/index/handle/123456789/147331>
- DUQUE, S., & P., P. (2019). Evaluación del Sistema de Modelamiento Hidrológico HEC-HMS para la Simulación Hidrológica de una Microcuenca Andina Tropical. SCIELO. Obtenido de SCIELO.
- E., A., & E., S. (2015). MODELAMIENTO HIDROLÓGICO DE LAS MICROCUENCAS OLARTE Y TOBAL. UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS SECCIONAL TUNJA.
- GRANADINO, P. O. (2021). REPOSITORIO USAT. Obtenido de <https://tesis.usat.edu.pe/handle/20.500.12423/4312>
- Granados, S., & Ricardo, G. (2015). REPOSITORIO ESCUELAING. Obtenido de <https://repositorio.escuelaing.edu.co/handle/001/193>
- HUAMAN, S., MENDOZA, E., & ROMELIO, G. (2022). REPOSITORIO UPEU. Obtenido de <https://repositorio.upeu.edu.pe/handle/20.500.12840/5686>
- LOAIZA, J., & CASAMITJANA, M. (2008). Caracterización del caudal en dos subcuencas de. Avances en Recursos Hidráulicos.
- MAMANI, L. (2020). RENATI. Obtenido de <https://renati.sunedu.gob.pe/handle/sunedu/3578419>
- MONTERO, A., MORENO, G., & ALVARO, C. (2021). REPOSITORIO UPC. Obtenido de <https://repositorioacademico.upc.edu.pe/handle/10757/656880>
- MORA MARIÑO, W., & GILBERTO OCHOA, R. (2016). REPOSITORIO UPTC. Obtenido de <https://repositorio.uptc.edu.co/handle/001/1677>

- MOYA, T., & RICARDO, R. (2019). REPOSITORIO UO. Obtenido de <https://repositorio.uo.edu.cu/handle/123456789/1594>
- Osorio, W. C. (2016). REVISTAS UNIPAMPLONA. Obtenido de https://revistas.unipamplona.edu.co/ojs_viceinves/index.php/RA/article/view/3267
- PÉREZ MARTÍNEZ, J., & BARBOSA CADENA, C. (2018). REPOSITORIO USTA. Obtenido de <https://repository.usta.edu.co/handle/11634/13971>
- Quispe Orosco, F., & Valeriano Salcedo, F. (2018). REPOSITORIO UNSA. Obtenido de <https://repositorio.unsa.edu.pe/items/ff917a2e-871a-4b62-8b67-d1a57dfa4cbb>
- Rodriguez Garzon, S., & Muñoz López, S. (2022). REPOSITORIO USTA. Obtenido de <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/50573/2023sebastianmu%c3%b1ozsantiagorodriguez.pdf?sequence=1>
- Salazar, A., & Ronald , E. (2023). REPOSITORIO UPAO. Obtenido de <https://repositorio.upao.edu.pe/handle/20.500.12759/16891>
- SANABRIA DIAZ, W. (2021). Análisis Comparativo de los Modelos HEC RAS e IBER en la Determinación de las Zonas de Amenaza por Inundación en el Corregimiento de Santa Fe de Morichal, Municipio de Yopal, Departamento de Casanare. . Repositorio institucional, Universidad Católica de Colombia.
- Tamayo García, G., & Rivera Tacoamán, M. (2020). DSPACE UEB. Obtenido de <https://dspace.ueb.edu.ec/handle/123456789/3730>
- Lewis. (2024, August 27). What are Hyetographs? - Lewis - Medium. Medium. <https://lewis-thehydrologist.medium.com/what-are-hyetographs-c8259289a0a5>
- Step by Step: Flood Hazard Mapping Using HEC-RAS Mapper | UN-SPIDER Knowledge Portal. (n.d.). Ww.un-Spider.org. <https://www.un-spider.org/advisory-support/recommended-practices/recommended-practice-flood-hazard-mapping/hecras-mapper-step-by-step>
- Hernández-Romero , P. (2024). MANUAL PARA EL USO DE MODELO HIDROLÓGICO HEC-HMS 4.10 [Review of MANUAL PARA EL USO DE MODELO HIDROLÓGICO HEC-HMS 4.10]. https://www.researchgate.net/publication/382652489_MANUAL_PARA_EL_USO_DEL_MODELO_HIDROLOGICO_HEC-HMS_410_HYDROLOGIC_MODELING_SYSTEM_HEC-HMS
- TANDALLA, B., & SALAZAR , J. (2020). Plan de gestión de recurso hídrico para una microcuenca interandina usando el modelo hidrológico hydro-bid. Repositorio Digital de la Universidad Internacional SEK.
- Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1994). Applied Hydrology (2nd ed.). McGraw-Hill. Fundamentos de hidrología aplicada, métodos de estimación de escorrentía y análisis de cuencas.

U.S. Army Corps of Engineers. (2016). HEC-RAS River Analysis System: Hydraulic Reference Manual (Version 5.0). Hydrologic Engineering Center.

Manual oficial del HEC-RAS que explica los conceptos teóricos y prácticos de modelación hidráulica unidimensional y bidimensional..

U.S. Army Corps of Engineers. (2021). HEC-HMS Hydrologic Modeling System User's Manual (Version 4.9). Hydrologic Engineering Center.

Referencia clave para el uso de HEC-HMS, incluyendo eventos de diseño, transformaciones lluvia–escorrentía y calibración.

Bedient, P. B., Huber, W. C., & Vieux, B. E. (2019). Hydrology and Floodplain Analysis (6th ed.). Pearson. Revisión completa sobre el análisis de inundaciones, métodos de predicción y herramientas de simulación.

Fernández, B. (2011). Gestión del riesgo de inundación: Enfoque integral para la planificación territorial. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). Describe conceptos de vulnerabilidad, riesgo y herramientas para la prevención de desastres por inundaciones