

Anexo 1. Tablas del Servicio de Conservación de Recursos Naturales (NRCS)

Tabla 2-2a. Números de curvas de escorrentía para zonas urbanas ^{1/}

Descripción de la cubierta		Números de curva para el grupo hidrológico del suelo			
Tipo de cubierta y estado hidrológico	Porcentaje medio de superficie impermeable ^{2/}	A	B	C	D
Zonas urbanas completamente desarrolladas (vegetación establecida)					
Espacios abiertos (césped, parques, campos de golf, cementerios, etc.) ^{3/}					
Mal estado (cubierta herbácea < 50%)		68	79	86	89
Estado aceptable (cubierta herbácea del 50% al 75%)		49	69	79	84
Buen estado (cubierta herbácea > 75%)		39	61	74	80
Zonas impermeables:					
Aparcamientos pavimentados, tejados, calzadas, etc. (excluida la calzada)		98	98	98	98
Calles y carreteras:					
Pavimentado; aceras y alcantarillas pluviales (excluida la calzada de paso)		98	98	98	98
Pavimentado; zanjas abiertas (incluida la calzada de paso)		83	89	92	93
Grava (incluida la calzada de paso)		76	85	89	91
Tierra (incluida la calzada de paso)		72	82	87	89
Zonas urbanas del desierto occidental:					
Paisajismo desértico natural (sólo zonas permeables)		63	77	85	88
Paisajismo desértico artificial (barrera impermeable contra las malas hierbas, arbustos desérticos con mantillo de arena o grava de 1 a 2 pulgadas y bordes de cuenca)		96	96	96	96
Distritos urbanos:					
Comercial y empresarial	85	89	92	94	95
Industrial	72	81	88	91	93
Distritos residenciales por tamaño medio de parcela:					
1/8 acre o menos (casas adosadas)	65	77	85	90	92
1/4 acre	38	61	75	83	87
1/3 acre	30	57	72	81	86
1/2 acre	25	54	70	80	85
1 acre	20	51	68	79	84
2 acres	12	46	65	77	82
Desarrollo de zonas urbanas					
Zonas recién niveladas (sólo zonas permeables, sin vegetación) ^{4/}	77	86	91	94	
Tierras ociosas (los CN se determinan utilizando tipos de cubierta similares a los de la tabla 2-2c).					

1. Condición de escorrentía media, y $I_a = 0,2S$.
2. El porcentaje medio de superficie impermeable indicado se ha utilizado para elaborar los CN compuestos. Otros supuestos son los siguientes: las zonas impermeables están conectadas directamente al sistema de drenaje, las zonas impermeables tienen un CN de 98 y las zonas permeables se consideran equivalentes a espacios abiertos en buenas condiciones hidrológicas.

- Los CN mostrados son equivalentes a los de los pastos. Los CN compuestos pueden calcularse para otras combinaciones de tipo de cubierta de espacio abierto.
- (CN = 98) y el CN de superficie permeable. Los CN de área permeable se suponen equivalentes a los arbustos desérticos en malas condiciones hidrológicas.

Fuente: Technical Release 55 Urban Hydrology for Small Watersheds

Tabla 2-2b. Números de curvas de escorrentía para tierras agrícolas cultivadas ^{1/}

Descripción de la cubierta			Números de curva para el grupo hidrológico del suelo			
Tipo de cubierta	Tratamiento ^{2/}	Condición hidrológica ^{3/}	A	B	C	D
Barbecho	Suelo desnudo	-	77	86	91	94
	Cobertura de residuos de cultivos (CR)	Pobre	76	85	90	93
Buena		74	83	88	90	
Cultivos en hileras	Fila recta (SR)	Pobre	72	81	88	91
		Buena	67	78	85	89
	SR + CR	Pobre	71	80	87	90
		Buena	64	75	82	85
	Contorneado (C)	Pobre	70	79	84	88
		Buena	65	75	82	86
	C + CR	Pobre	69	78	83	87
		Buena	64	74	81	85
	Contorneado y aterrazado (C&T)	Pobre	66	74	80	82
		Buena	62	71	78	81
	C&T+ CR	Pobre	65	73	79	81
		Buena	61	70	77	80
Pequeños granos	SR	Pobre	65	76	84	88
		Buena	63	75	83	87
	SR + CR	Pobre	64	75	83	86
		Buena	60	72	80	84
	C	Pobre	63	74	82	85
		Buena	61	73	81	84
	C + CR	Pobre	62	73	81	84
		Buena	60	72	80	83
	C&T	Pobre	61	72	79	82
		Buena	59	70	78	81
	C&T+ CR	Pobre	60	71	78	81
		Buena	58	69	77	80
Leguminosas de siembra directa o al voleo o praderas de rotación	SR	Pobre	66	77	85	89
		Buena	58	72	81	85
	C	Pobre	64	75	83	85
		Buena	55	69	78	83
	C&T	Pobre	63	73	80	83
		Buena	51	67	76	80

- Condición de escorrentía media, y $I_a=0,2S$
- La cubierta de residuos de cultivos sólo se aplica si los residuos están en al menos el 5% de la superficie durante todo el año.
- La condición hidrológica se basa en una combinación de factores que afectan a la infiltración y la escorrentía, entre los que se incluyen: a) la densidad y el dosel de las zonas vegetales, b) cantidad de cobertura a lo largo de todo el año, c) cantidad

de hierba o leguminosas de siembra cercana, d) porcentaje de cobertura de residuos en la superficie del terreno (bueno $\geq 20\%$), y e) grado de rugosidad de la superficie.

Pobre: Los factores perjudican la infiltración y tienden a aumentar la escorrentía.

Bueno: Los factores favorecen la infiltración media y superior a la media y tienden a

disminuir la escorrentía.

Fuente: Technical Release 55 Urban Hydrology for Small Watersheds

Tabla 2-2c. Números de curvas de escorrentía para otras tierras agrícolas ^{1/}

Descripción de la cubierta		Números de curva para el grupo hidrológico del suelo			
Descripción de la cubierta	Condición hidrológica	A	B	C	D
Pastos, praderas o pastizales: forraje continuo para el pastoreo. ^{2/}	Pobre	68	79	86	89
	Regular	49	69	79	84
	Buena	39	61	74	80
Pradera: hierba continua, protegida del pastoreo y generalmente segada para la producción de heno.	—	30	58	71	78
Matorral-mezcla de maleza y hierba con el matorral como elemento principal. ^{3/}	Pobre	48	67	77	83
	Regular	35	56	70	77
	Buena	30 ^{4/}	48	65	73
Combinación de bosque y hierba (huerto o explotación forestal). ^{5/}	Pobre	57	73	82	86
	Regular	43	65	76	82
	Buena	32	58	72	79
Bosque. ^{6/}	Pobre	45	66	77	83
	Regular	36	60	73	79
	Buena	30 ^{4/}	55	70	77
Explotaciones agrícolas: edificios, caminos, vías de acceso y terrenos circundantes.	—	59	74	82	86

- Condición de escorrentía media, y $I_a = 0,2S$.
- Pobre*: < 50% cubierta vegetal o muy pastoreada sin mantillo.

Regular: 50 a 75% de cubierta vegetal y sin pastoreo intenso.

Buena: > 75% de cubierta vegetal y pastoreo ligero u ocasional.
- Pobre*: < 50% de cubierta vegetal.

Regular: 50 a 75% de cubierta vegetal.

Buena: > 75% de cobertura del suelo.
- El número de curva real es inferior a 30; utilizar $CN = 30$ para los cálculos de escorrentía.
- Los CN indicados se han calculado para zonas con un 50% de cubierta forestal y un 50% de cubierta herbácea (pastos). Otras combinaciones de condiciones pueden calcularse a partir de los CN para bosques y pastos.

6. *Pobre:* La hojarasca forestal, los árboles pequeños y la maleza son destruidos

por el pastoreo intensivo o la quema regular.

Regular: Los bosques se pastan, pero no se queman, y algo de hojarasca forestal

cubre el suelo.

Buena: Los bosques están protegidos del pastoreo y la hojarasca y la maleza

cubren adecuadamente el suelo.

Fuente: Technical Release 55 Urban Hydrology for Small Watersheds

Tabla 2-2d. Números de curvas de escorrentía para pastizales áridos y semiáridos ^{1/}

Descripción de la cubierta		Números de curva para el grupo hidrológico del suelo			
Descripción de la cubierta	Condición hidrológica ^{2/}	A ^{3/}	B	C	D
Herbáceo-mezcla de hierba, maleza y matorral de bajo crecimiento, siendo el matorral el elemento menor.	Pobre		80	87	93
	Regular		71	81	89
	Buena		62	74	85
Mezcla de roble, álamo temblón, caoba de montaña, arce y otros arbustos.	Pobre		66	74	79
	Regular		48	57	63
	Buena		30	41	48
Piñón-juniper-piñón, enebro o ambos; sotobosque de hierba.	Pobre		75	85	89
	Regular		58	73	80
	Buena		41	61	71
Artemisa con sotobosque herbáceo.	Pobre		67	80	85
	Regular		51	63	70
	Buena		35	47	55
Arbustos desérticos: las plantas principales son el arbusto salado, el palo verde, el arbusto creosote, el arbusto negro, el palo verde, la bursa, el mezquite y los cactus.	Pobre	63	77	85	88
	Regular	55	72	81	86
	Buena	49	68	79	84

1. Condición de escorrentía media, y $I_a = 0,2S$. Para el rango en regiones húmedas, utilice la Tabla 2-2c.

2. *Pobre:* < 30% de cobertura del suelo (hojarasca, hierba y matorral).

Regular: 30 a 70% de cobertura del suelo.

Buena: > 70% de cobertura del suelo.

3. Los números de curva del grupo A sólo se han desarrollado para los arbustos desérticos.

Fuente: Technical Release 55 Urban Hydrology for Small Watersheds

Tabla 3. Números de curvas de escorrentía condición II. $I_a = 0,2S$

N	Descripción de la Unidades de Vegetación	Complejos Hidrológicos				Clasificación
		A	B	C	D	
1	Bosque denso a ralo mayormente siempre verde, transicional, montano	25	55	70	77	Bosque bueno
2	Bosque ralo mayormente siempre verde, transicional, montano	34	58	72	77	Bosque regular
3	Bosque ralo mayormente caducifolio, transicional, montano.	36	60	73	79	Bosque regular
4	Matorral semidenso, medio a alto, mayormente siempre verde, transicional, montano.	35	56	70	77	Maleza regular
5	Matorral denso, medio a alto, mayormente caducifolio, semideciduo, montano.	35	56	70	77	Maleza regular
6	Matorral denso a ralo, medio a alto, mayormente caducifolio, semideciduo, montano	35	56	70	77	Maleza regular
7	Matorral ralo a denso, alto, xeromórfico, deciduo por sequía, montano.	48	67	77	83	Maleza pobre
8	Matorral ralo a semidenso, alto, xeromórfico, deciduo por sequía, montano.	48	67	77	83	Maleza pobre
9	Matorral ralo, alto, xeromórfico, deciduo por sequía, montano. Tierras eriales	77	86	91	94	Maleza pobre
10	Vegetación herbácea, graminoide baja, con sinusia arbustiva, montano.	25	59	75	83	Pradera C regular
11	Vegetación herbácea, graminoide intermedia, sin sinusia arbustiva, montano.	25	59	75	83	Pradera C regular
12	Vegetación herbácea, graminoide baja, sin sinusia arbustiva, montano.	25	59	75	83	Pradera C regular
13	Vegetación herbácea, graminoide baja, mixto, montano.	25	59	75	83	Pradera regular
14	Vegetación herbácea, graminoide baja, mixto, montano	25	59	75	83	Pradera regular
15	Áreas antrópicas y matorral, xeromórfico deciduo por sequía, montano.	57	71	80	85	
16	Áreas antrópicas (cultivos agrícolas) Matorrales	67	78	85	89	Cultivo hilera SR
						Buena
17	Matorral denso, medio, mayormente caducifolio, deciduo por sequía, subalpino	35	56	70	77	Maleza regular
18	Vegetación herbácea, graminoide intermedia, con sinusia arbustiva, subalpino	25	59	75	83	Pradera regular
19	Vegetación herbácea graminoide baja sin sinusia arbustiva, cespitoso, subalpino	63	73	80	83	Granos pequeños C y T pobre
20	Vegetación herbácea, graminoide baja, sin sinusia arbustiva, cespitoso, subalpino.	61	73	81	84	Granos pequeños C buena
21	Áreas antrópicas (cultivos aerícolas)	63	75	83	87	Granos pequeños SR buena
22	Vegetación herbácea graminoide baja, sin sinusia arbustiva, alpino	65	76	84	85	Granos pequeños. Pobre
23	Plantaciones forestales	45	66	77	83	Bosque malo
24	Río Tolomosa, río Tilo Molino, río Pinos, Sola, Queñual	59	74	82	86	Cascos de estancia
25	Embalse San Jacinto	100	100	100	100	Cuerpo de agua
26	Poblaciones de San Andrés y Tolomosa	74	84	90	92	Superficie dura
27	Matorral ralo a semidenso, alto, xeromórfico, deciduo por sequía, montano moderadamente degradado	67	78	85	89	Hilera SR buena MD
28	Matorral ralo a semidenso, alto, xeromórfico, deciduo por sequía, montano degradado a muy degradado	72	81	88	91	Hilera SR mala D
						MD

29	Vegetación herbácea, graminoide baja, montano ligeramente degradado	49	69	79	84	Pradera regular
30	Vegetación herbácea, graminoide baja, montano moderadamente degradado	65	75	82	86	Hilera C buena MD
31	Vegetación herbácea, graminoide baja, montano degradado a muy degradado	68	79	86	89	Pradera mala D MD

Fuente: Documento Hidrología. ESTUDIO TESA: "CONSTRUCCIÓN PRESA IPA"

Tabla 4. Número de curvas de escorrentía para complejos hidrológicos de tierras para cuencas en condición II. $I_a = 0,2S$

Uso de suelos y cubierta	Tratamiento o método	Condición para la infiltración	Grupo hidrológico del suelo			
			A	B	C	D
Barbecho	SR		77	86	91	94
Cultivo en hilera	SR	Mala	72	81	88	91
	SR	Buena	67	78	85	89
	C	Mala	70	79	84	88
	C	Buena	65	75	82	86
	C & T	Mala	66	74	80	82
	C & T	Buena	62	71	78	81
Gramíneas	SR	Mala	65	76	84	88
	SR	Buena	63	75	83	87
	C	Mala	63	74	82	85
	C	Buena	61	73	81	84
	C & T	Mala	61	72	79	82
	C & T	Buena	59	70	78	81
Legumbres tupidas o rotación de praderas	SR	Mala	66	77	85	89
	SR	Buena	58	72	81	85
	C	Mala	64	75	83	85
	C	Buena	55	69	78	83
	C & T	Mala	63	73	80	83
	C & T	Buena	51	67	76	80
Pradera o pastizal		Mala	68	79	86	89
		Regular	49	69	79	84
		Buena	39	61	74	80
	C	Mala	47	67	81	88
	C	Regular	25	59	75	83
	C	Buena	6	35	70	79
Pradera (permanente)			30	58	71	78
Bosques (lotes de bosques)		Mala	45	66	77	78
		Regular	36	60	73	79
		Buena	25	55	70	77
Cascos de los ranchos (alquerías)			59	74	82	86
Caminos fangosos			72	82	87	89
Superficie dura			74	84	90	92

SR: Hileras rectas

C: Por líneas de nivel

C & T: Terrazas a nivel

Fuente: HIDROLOGÍA APLICADA. Estilita Ruiz Romera, Miren Martínez Santos

Tabla de Contenido – Anexo 3

Anexo 3. Estudio hidrológico	109
1 Registros pluviométricos	109
2 Análisis de precipitación.....	110
2.1 Análisis de consistencia.....	110
2.2 Análisis de homogeneidad.....	113
2.2.1 Test de Mann Kendall	113
2.2.2 Prueba estadística t de Student.....	113
3 Precipitaciones máximas	114
3.1 Lluvias máximas horarias.....	116
3.2 Hietograma de diseño	118
4 Caudal de máxima crecida.....	122
4.1 Número de Curva (CN)	122
4.2 Simulación de crecidas en HEC-HMS	122
4.3 Caudales máximos generados.....	130

Índice de Tablas

Tabla 1. Registro de precipitación de las estaciones próximas a la cuenca	110
Tabla 2. Resumen análisis de consistencia método dobles acumuladas	112
Tabla 3. Resumen análisis de homogeneidad.....	114
Tabla 4. Precipitaciones máximas en 24 horas.....	114
Tabla 5. Serie de datos de Pmax.....	115
Tabla 6. Delta teórico para diferentes distribuciones	115
Tabla 7. Pmax para diferentes T	116
Tabla 8. Lluvias máximas horarias para diferentes duraciones y periodos de retorno... 116	
Tabla 9. Int. máximas [mm/h] para diferentes duraciones y periodos de retorno	117
Tabla 10. Hietograma de diseño para periodo de retorno T=25 años	118
Tabla 11. Hietograma de diseño para periodo de retorno T=50 años.....	119
Tabla 12. Hietograma de diseño para periodo de retorno T=100 años	120
Tabla 13. Hietogramas para simulación en HEC-HMS	121
Tabla 14. Parámetros ingresados al modelo HEC-HMS	124

Tabla 15. Caudales máximos según periodo de retorno.....	130
Tabla 16. Hidrograma de crecidas.....	130

Índice de Figuras

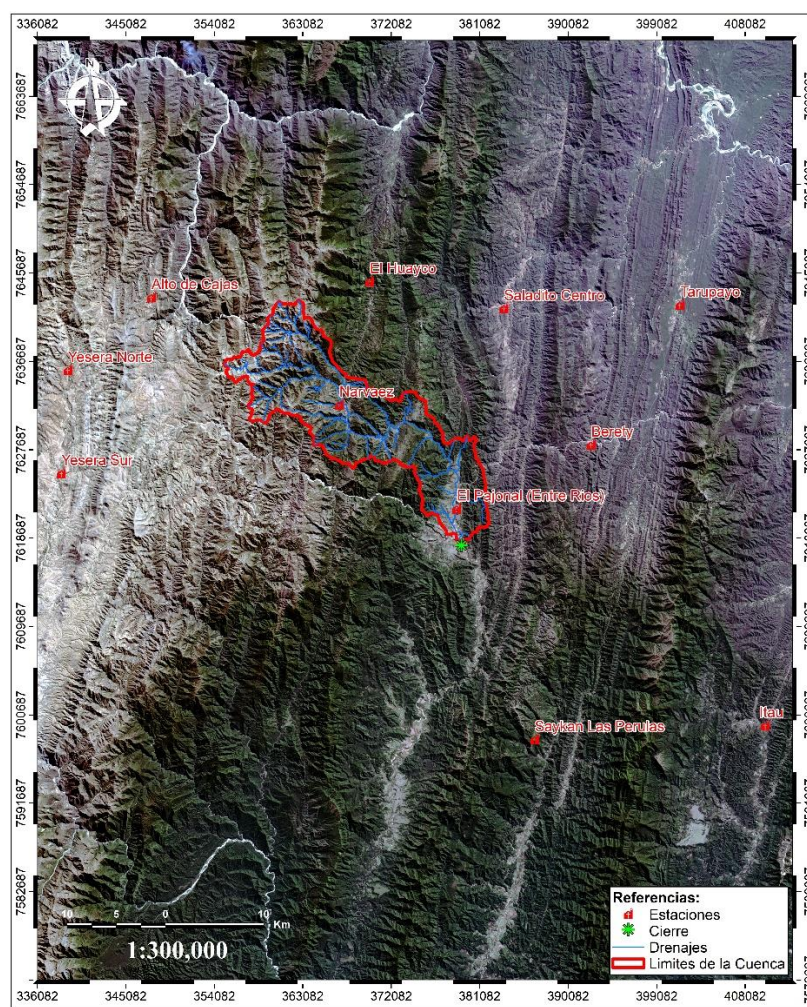
Figura 1. Ubicación de las estaciones próximas a la cuenca (SENAMHI).....	109
Figura 2. Análisis de consistencia doble masa acumulada.....	110
Figura 3. Curvas I.D.F. para diferentes periodos de retorno	117
Figura 4. Tormenta de diseño para T=25 años	119
Figura 5. Tormenta de diseño para T=50 años	120
Figura 6. Tormenta de diseño para T=100 años	121
Figura 7. Hietograma de diseño para HEC-HMS	122
Figura 8. Esquema de drenaje en HEC-HMS	123
Figura 9. Resultados generados para T = 25 años.....	125
Figura 10. Hidrograma generado para T = 25 años.....	126
Figura 11. Resultados generados para T = 25 años.....	126
Figura 12. Resultados generados para T = 50 años.....	127
Figura 13. Hidrograma generado para T = 50 años.....	127
Figura 14. Resultados generados para T = 50 años.....	128
Figura 15. Resultados generados para T = 100 años.....	128
Figura 16. Hidrograma generado para T = 100 años.....	129
Figura 17. Resultados generados para T = 100 años.....	129
Figura 18. Hidrograma de crecidas	130

Anexo 3. Estudio hidrológico

1 Registros pluviométricos

La información pluviométrica utilizada, consiste de registros a nivel mensual, provenientes de la red del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI), las estaciones fueron seleccionadas en base a criterios de mayor disponibilidad de datos y proximidad al área de estudio, según el manual de hidrología de la FAO pueden ser utilizadas las estaciones dentro del radio de 50 km circundantes a la unidad hidrográfica analizada. Existen dos estaciones dentro del área de aporte; en el análisis de consistencia el promedio de las estaciones se utiliza como estación patrón, en el siguiente mapa, se presenta la ubicación de las estaciones próximas a la cuenca.

Figura 1. Ubicación de las estaciones próximas a la cuenca (SENAMHI)



Fuente: Elaboración propia.

Se ha trabajado en el intervalo 2005 – 2020 para la información pluviométrica por ser este intervalo el que presenta menos lagunas de información en los registros manejados.

Tabla 1. Registro de precipitación de las estaciones próximas a la cuenca

		DATOS DE: PRECIPITACIÓN TOTAL (mm)																			
N	Estación	Periodo disponible		Periodo Utilizado		2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
		1	Alto Cajas	1977	2020	2005	2020														
2	El Pajonal (Entre Ríos Tarija)	1943	2020	2005	2020																
3	Saykan Las Perulas	2001	2020	2005	2020																
4	Saladito Centro	2005	2020	2005	2020																
5	Berety	1979	2020	2005	2020																
6	El Huayco	2006	2019	2006	2019																
7	Yesera Sur	2002	2020	2005	2020																
8	Yesera Norte	1977	2020	2005	2020																
9	Itaú	1973	2019	2005	2019																
10	Tarupayo	1979	2020	2005	2020																
11	Narvárez	1978	2020	2005	2020																

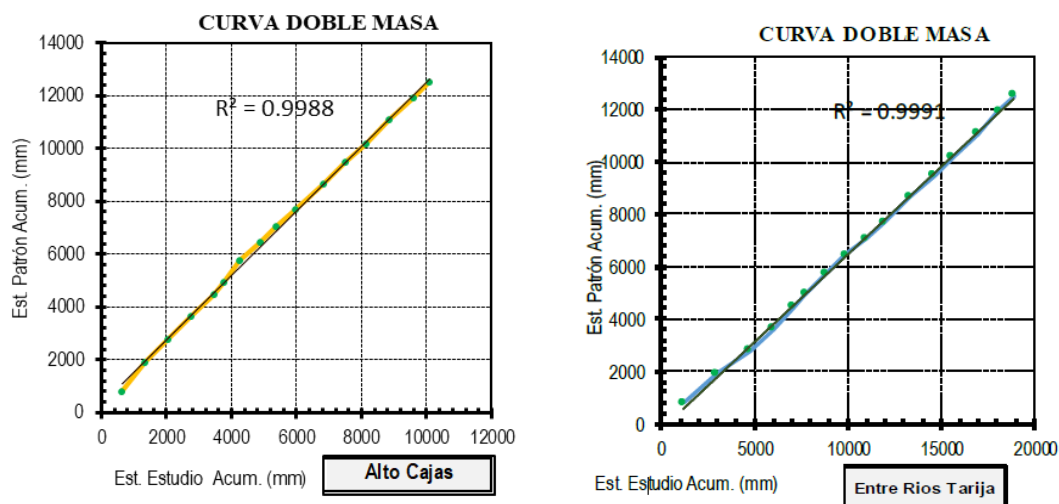
Fuente: Elaboración propia.

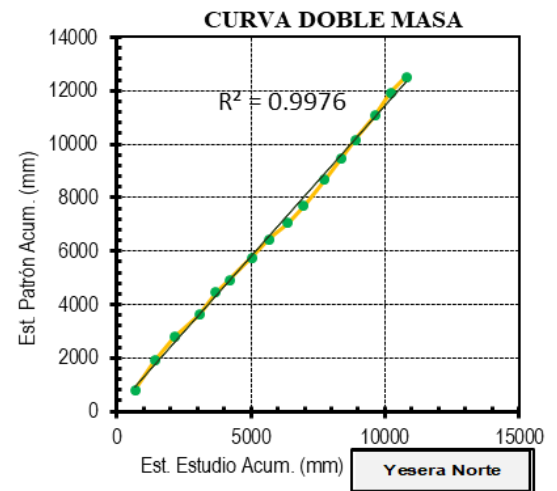
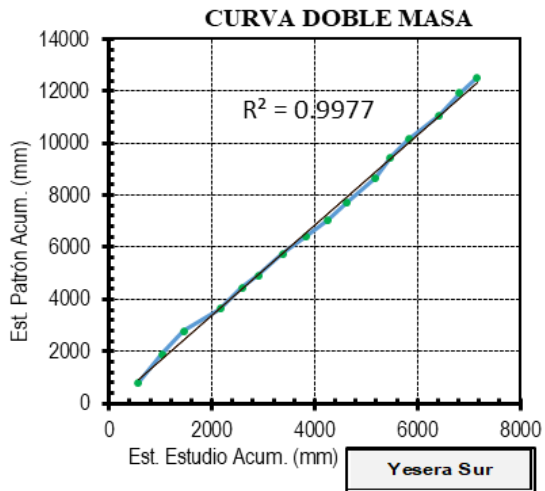
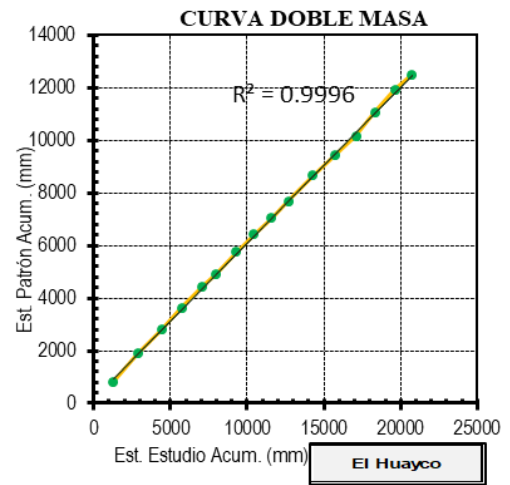
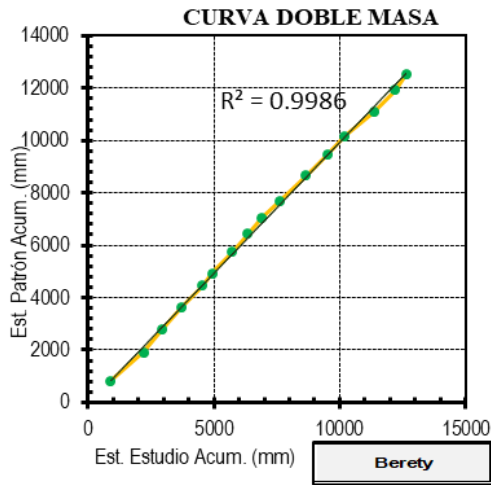
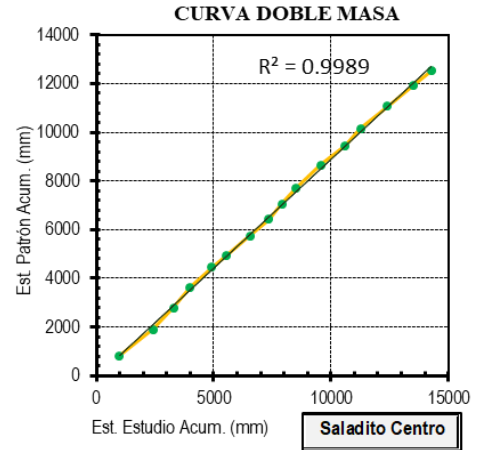
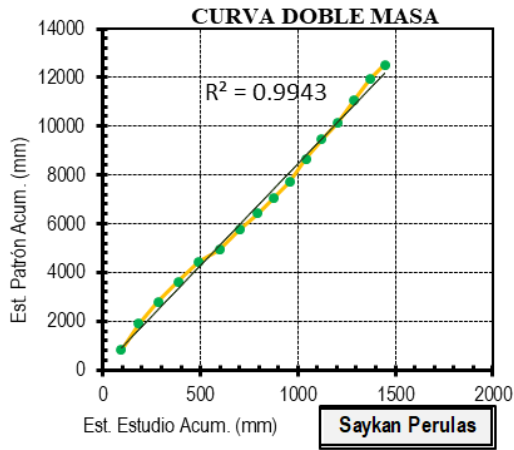
2 Análisis de precipitación

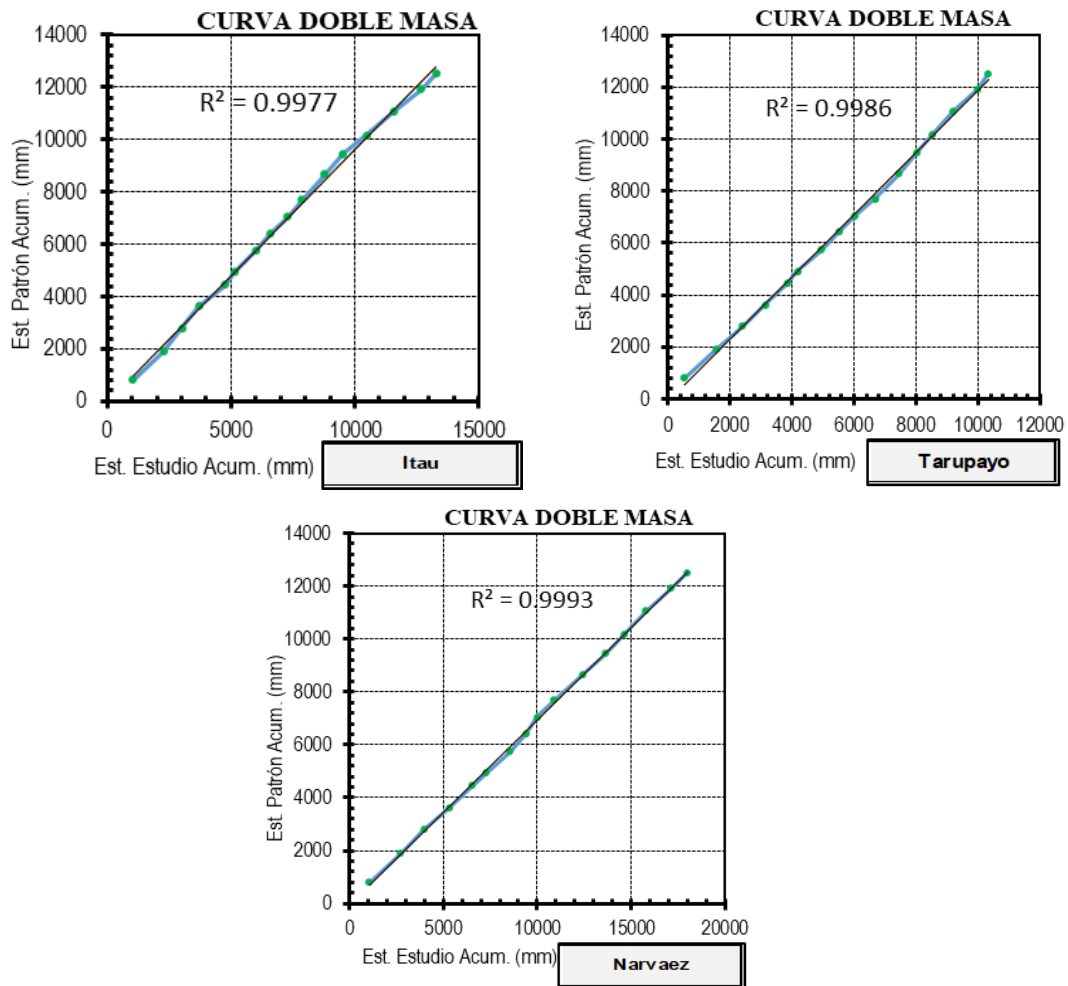
2.1 Análisis de consistencia

Utilizando la precipitación media de todas las estaciones como estación patrón, se realiza el análisis de consistencia con los datos de precipitaciones medias anuales de cada estación.

Figura 2. Análisis de consistencia doble masa acumulada







Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2. Resumen análisis de consistencia método dobles acumuladas

N°	Estación	Coef. R2 (%)	Consistencia de datos	Periodos analizados	Año	
					Inicial	Final
1	Alto Cajas	99.88	Consistente	16	2005	2020
2	Entre Ríos Tarija	99.91	Consistente	16	2005	2020
3	Saykan Perulas	99.43	Consistente	16	2005	2020
4	Saladito Centro	99.89	Consistente	16	2005	2020
5	Berety	99.86	Consistente	16	2005	2020
6	El Huayco	99.96	Consistente	16	2005	2020
7	Yesera Sur	99.77	Consistente	16	2005	2020
8	Yesera Norte	99.76	Consistente	16	2005	2020
9	Itaú	99.77	Consistente	16	2005	2020
10	Tarupayo	99.86	Consistente	16	2005	2020
11	Narvárez	99.93	Consistente	16	2005	2020

Fuente: Elaboración propia.

2.2 Análisis de homogeneidad

2.2.1 Test de Mann Kendall

La prueba de homogeneidad de Mann-Kendall es un test no paramétrico, tiene una hipótesis nula sencilla y fácil de satisfacer. Este test detecta cualquier forma de tendencia, ya sean lineales o en forma de saltos, siempre que den una tendencia global, este test no es adecuado para series que presentan un componente estacional. La prueba de homogeneidad de Mann-Kendall es en realidad un test estadístico que conduce a elegir alguna de las siguientes respuestas:

- Hipótesis nula: Todos los valores de la serie son datos aleatorios de una sola población (es una serie homogénea).
- Hipótesis alternativa: Es una serie no homogénea con tendencia monótona.

$V = \frac{S - 1}{\sqrt{\frac{n(n-1)(2n+5)}{18}}}$ $S = T - I$ $T = \sum_{i=1}^{n-1} s_i$ $I = \sum_{i=1}^{n-1} t_i$	<p>Donde N = Número de registros S = Índice de desviación calculado s_i = Número de valores de x_j > x_i para i < j < n t_i = Número de valores de x_j < x_i para i < j < n Luego se elige un nivel de significancia α o valor de confiabilidad en función al cual se definirá la condición de homogeneidad de la serie. Este índice se relaciona con un valor de V_{crit} a través de la función de distribución normal.</p> <table border="1"> <tr> <td>α =</td> <td>0.50%</td> <td>1.00%</td> <td>2.50%</td> <td>5.00%</td> <td>10.00%</td> </tr> <tr> <td>α =</td> <td>0,005</td> <td>0,01</td> <td>0,025</td> <td>0,05</td> <td>0,1</td> </tr> <tr> <td>Vcrit</td> <td>2.58</td> <td>2.33</td> <td>1.96</td> <td>1.64</td> <td>1.28</td> </tr> </table>	α =	0.50%	1.00%	2.50%	5.00%	10.00%	α =	0,005	0,01	0,025	0,05	0,1	Vcrit	2.58	2.33	1.96	1.64	1.28
α =	0.50%	1.00%	2.50%	5.00%	10.00%														
α =	0,005	0,01	0,025	0,05	0,1														
Vcrit	2.58	2.33	1.96	1.64	1.28														

2.2.2 Prueba estadística t de Student

Si se considera una serie Q_i^j para $i = 1, 2, 3, \dots, n_j$, del sitio j , la cual se divide en dos conjuntos de tamaño $n_1 = n_2 = \frac{n_j}{2}$, entonces el estadístico de prueba se define con la siguiente expresión.

$$t_d = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\left[\frac{n_1 * s_1^2 + n_2 * s_2^2}{n_1 + n_2 - 2} * \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right) \right]^{1/2}}$$

Donde:

\bar{x}_1, s_1^2 = Son la media y la varianza de la primera parte del registro de tamaño n_1

\bar{x}_2, s_2^2 = Son la media y la varianza de la segunda parte del registro de tamaño n_2

El valor absoluto de t_d se compara con el valor de la distribución t de Student, de dos colas y con $v = n_1 + n_2 - 2$ grados de libertad y para un nivel de significancia: $\alpha = 0.05$.

Si y solo el valor absoluto de t_d es mayor que aquel de la distribución t de Student, se concluye que la diferencia entre las medias es evidencia de inconsistencia, y por lo tanto la serie Q_i^j se considera no homogénea. En caso contrario la serie es homogénea.

Tabla 3. Resumen análisis de homogeneidad

Nº	Estación	Test de Mann-Kendall	Prueba estadística de t de Student
1	Alto Cajas	Homogénea	Homogénea
2	Entre Ríos Tarija	Homogénea	Homogénea
3	Saykan Perulas	Homogénea	Homogénea
4	Saladito Centro	Homogénea	Homogénea
5	Berety	Homogénea	Homogénea
6	El Huayco	Homogénea	Homogénea
7	Yesera Sur	Homogénea	Homogénea
8	Yesera Norte	No Homogénea	Homogénea
9	Itaú	Homogénea	Homogénea
10	Tarupayo	Homogénea	Homogénea
11	Narváez	Homogénea	Homogénea

Fuente: Elaboración propia.

Según el análisis se utilizaron las 11 estaciones para calcular las series de datos para la cuenca del río Pajonal.

3 Precipitaciones máximas

La precipitación máxima en 24 horas para la cuenca fue calculada a la base de datos históricos de lluvias máximas en 24 horas registradas en las estaciones de la tabla siguiente.

Tabla 4. Precipitaciones máximas en 24 horas

Año	Alto Cajas	Entre Ríos Tarija	Saykan Perulas	Saladito Centro	Berety	El Huayco	Yesera Sur	Yesera Norte	Itaú	Tarupayo	Narváez
2005	25.8	95	57	72.7	****	****	46	52.5	71	30	62
2006	35.8	65.8	74.2	92.8	90	83.5	39	43.5	104	73.9	80
2007	56.5	85.8	78	66.3	57	107.5	46	56	52	95.2	80
2008	40.6	93.3	48.2	81.3	31	94.1	54	68	67.5	62.6	82
2009	30.6	56.7	40.8	91.5	72.4	45	34.3	40	104.6	75.3	86.6
2010	23.3	55.9	20.2	80	50.2	39	34	43	34	45.3	75
2011	38.3	70.8	53.2	120.7	75.2	77	47	64.5	96.8	76	100.6
2012	43.5	55.8	35.2	40.3	75.3	50	37	35	59	140	57.5
2013	30.8	82.3	19.7	68.3	42	68	43	53	85	57	49.3
2014	40.2	69	57.2	40.2	62.3	40	46	43.5	****	48	84.5

2015	48.2	59	78.3	92	75.2	68	34.5	55	60	83	167
2016	37.2	111	63	89	78.8	85	48	34.5	60.2	63.5	77
2017	49.00	75.00	60.1	84.20	67.00	88	40	59.2	94	64.5	64.50
2018	46.00	65.00	76.2	111.00	79.00	80.00	34.00	47.00	95.00	38.00	65.00
2019	29.50	101.00	59.2	85.50	****	****	48.00	72.40	102.00	100.00	111.50
2020	33.00	69.00	79.5	84.00	****	****	63.00	****	****	48.50	67.00

Fuente: Elaboración propia.

A partir de estas series de datos podemos interpolar con el método IDW hacia el centro de gravedad de la cuenca del río Pajonal. de coordenadas UTM E: 369048.896 N: 7630839.363

Tabla 5. Serie de datos de Pmax

Año	P máx.
2005	78.70
2006	74.70
2007	76.20
2008	71.30
2009	63.10
2010	51.00
2011	74.60
2012	59.70
2013	62.70
2014	62.70
2015	72.00
2016	89.00
2017	71.40
2018	70.50
2019	92.30
2020	69.20

Fuente: Elaboración propia.

Con apoyo del software hidroesta y con datos de las precipitaciones máximas en 24 horas interpoladas se ha realizado el análisis de ajuste a las leyes de distribución como son: gamma de 2 parámetros, gamma de 3 parámetros (Pearson TIII), distribución Gumbel, log-Gumbel, mediante el test Smirnov Kolmogorov, se estima el menor Δ teórico del test para calcular la precipitación máxima con la ley de mejor ajuste.

Tabla 6. Delta teórico para diferentes distribuciones

Distribución	Δ teórico
Gamma de 2 P	0.0866
Gamma de 3 P	0.08889
Log Pearson TIII	0.1107
Gumbel	0.1348

Log Gumbel	0.1646
Δ teórico min	0.0866

Fuente: Elaboración propia.

Con el ajuste realizado se calcula las precipitaciones máximas para diferentes periodos de retorno con la ley gamma de 2 P.

Tabla 7. Pmax para diferentes T

T (años)	Pmáx gamma de 2 P
2	70.72
5	79.51
10	84.38
20	88.55
25	89.79
30	90.77
50	93.39
100	96.72
500	103.61
1000	106.29
5000	111.75
10000	113.65

Fuente: Elaboración propia.

3.1 Lluvias máximas horarias

La generación de precipitaciones máximas inferiores a la horaria, los podemos calcular a partir de los coeficientes de desagregación, en este caso se utilizó los coeficientes de desagregación de la estación Tarija Aeropuerto.

Tabla 8. Lluvias máximas horarias para diferentes duraciones y periodos de retorno

Duración		Periodo de Retorno T [años]							Coeficiente de desagregación TARIJA AEROPUERTO	
(hr)	(min)	2	25	50	100	500	1000	5000	Intervalo	Coef.
0.08	5	14.52	18.44	19.18	19.86	21.28	21.83	22.95	5 min \ 30 min	0.40
0.25	15	26.87	34.11	35.48	36.74	39.36	40.38	42.45	15 min \ 30 min	0.74
0.50	30	36.30	46.09	47.94	49.65	53.19	54.56	57.37	30 min \ 1 hr	0.77
1.00	60	47.15	59.86	62.26	64.48	69.08	70.86	74.50	1 hr \ 24 hr	0.59
6.00	360	62.33	79.14	82.31	85.25	91.32	93.68	98.50	6 hr \ 24 hr	0.78
24.00	1440	79.91	101.46	105.53	109.29	117.08	120.11	126.28	24 hr \ 1 día	1.13

Fuente: Elaboración propia.

Las intensidades máximas se las calcula dividiendo la precipitación máxima entre el intervalo de tiempo de duración. $I_{max} [mm/h] = P_{max} [mm] / Duración (hr)$.

Tabla 9. Int. máximas [mm/h] para diferentes duraciones y periodos de retorno

Duración (hr)	Duración (min)	Periodo de Retorno T [años]						
		2	25	50	100	500	1000	5000
0.083	5	174.26	221.25	230.12	238.33	255.31	261.91	275.37
0.250	15	107.46	136.44	141.91	146.97	157.44	161.51	169.81
0.500	30	72.61	92.19	95.89	99.30	106.38	109.13	114.74
1.000	60	47.15	59.86	62.26	64.48	69.08	70.86	74.50
6.000	360	10.39	13.19	13.72	14.21	15.22	15.61	16.42
24.000	1440	3.33	4.23	4.40	4.55	4.88	5.00	5.26

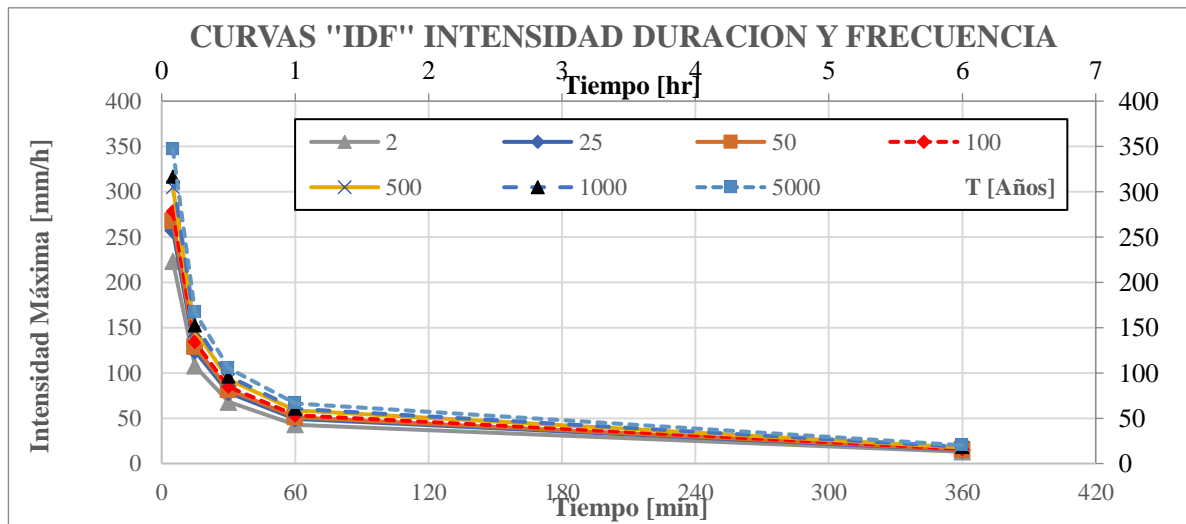
Fuente: Elaboración propia.

El cálculo de las intensidades máximas podemos generalizarlas mediante el ajuste de las curvas IDF con datos de intensidad máxima calculada, esto a través de regresión por mínimos cuadrados mediante la ecuación de Bernard.

<p>EC. IDF BERNARD</p> $I = \frac{K \times T^m}{t^L}$	$I = \frac{626.7420 \times T^{0.056288}}{t^{0.66513}}$
---	--

$k = 626.7420391, m = 0.056288303, L = 0.6651$

Figura 3. Curvas I.D.F. para diferentes periodos de retorno



Fuente: Elaboración propia.

3.2 Hietograma de diseño

A partir de las ecuaciones de regresión IDF, podemos calcular las intensidades para la duración de la tormenta de diseño de duración igual al tiempo de concentración de la cuenca, con estos datos podemos calcular el hietograma de la tormenta a través del método de bloque alterno. Se recomienda que el intervalo de simulación sea menor a 0.29 de T lag $\Delta t < 0.29 * T \text{ lag}$.

$$\Delta t < 0.29 * T \text{ lag}$$

$$T \text{ lag} = 0.6 * T_c \quad T \text{ lag} = \text{tiempo de rezago}$$

$$T_c = 260 \text{ minutos}$$

$$T \text{ lag} = 156 \text{ minutos}$$

$$\Delta t < 45.2 \text{ minutos}$$

$$\Delta t = 20 \text{ minutos}$$

Tiempo base mínimo

$$T_b \text{ min} = 5 * T_c$$

$$T_b \text{ mínimo} = 1300 \text{ minutos}$$

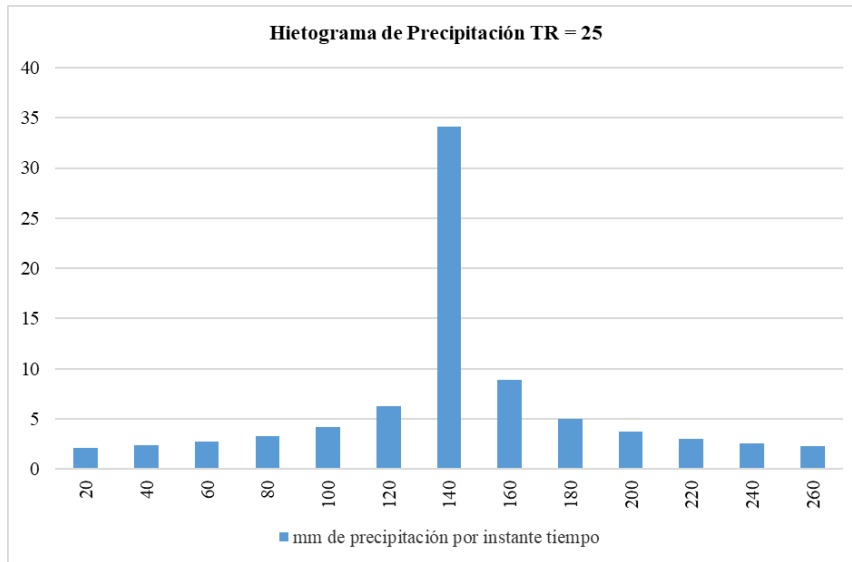
Tormenta de diseño para una duración igual al tiempo de concentración T_c .

Tabla 10. Hietograma de diseño para periodo de retorno $T=25$ años

Duración [min]	I (mm/h)	P[mm]	ΔP	Orden	P[mm]
20	102.43	34.14	34.14	13	2.13
40	64.60	43.06	8.92	11	2.39
60	49.33	49.33	6.26	9	2.76
80	40.74	54.31	4.99	7	3.30
100	35.12	58.53	4.21	5	4.21
120	31.11	62.21	3.68	3	6.26
140	28.08	65.51	3.30	1	34.14
160	25.69	68.51	3.00	2	8.92
180	23.75	71.26	2.76	4	4.99
200	22.15	73.82	2.56	6	3.68
220	20.79	76.21	2.39	8	3.00
240	19.62	78.47	2.25	10	2.56
260	18.60	80.60	2.13	12	2.25
		Σ	80.60	Σ	80.60

Fuente: Elaboración propia.

Figura 4. Tormenta de diseño para T=25 años



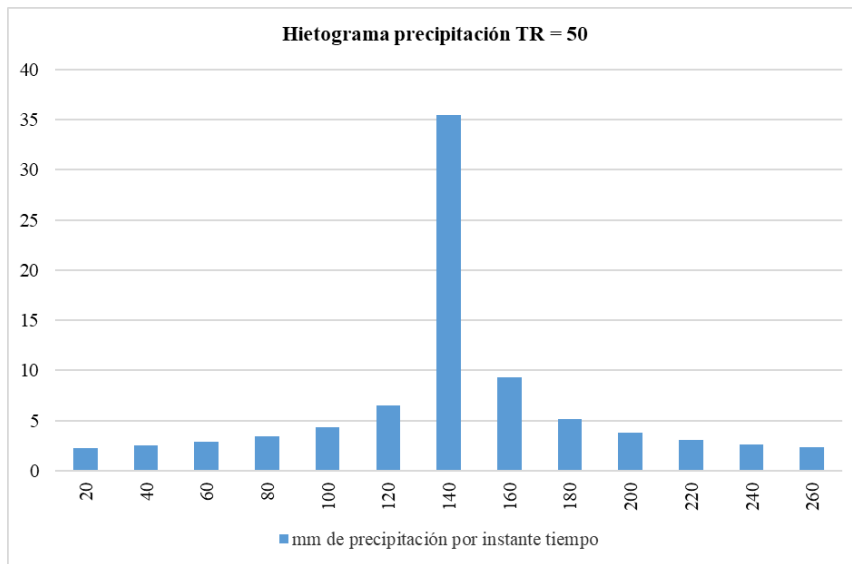
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 11. Hietograma de diseño para periodo de retorno T=50 años

Duración [min]	I (mm/h)	P[mm]	ΔP	Orden	P[mm]
20	106.50	35.50	35.50	13	2.22
40	67.17	44.78	9.28	11	2.49
60	51.29	51.29	6.51	9	2.87
80	42.36	56.48	5.19	7	3.43
100	36.51	60.86	4.38	5	4.38
120	32.34	64.69	3.83	3	6.51
140	29.19	68.12	3.43	1	35.50
160	26.71	71.23	3.11	2	9.28
180	24.70	74.10	2.87	4	5.19
200	23.03	76.76	2.66	6	3.83
220	21.61	79.25	2.49	8	3.11
240	20.40	81.59	2.34	10	2.66
260	19.34	83.81	2.22	12	2.34
		Σ	83.81	Σ	83.81

Fuente: Elaboración propia.

Figura 5. Tormenta de diseño para T=50 años



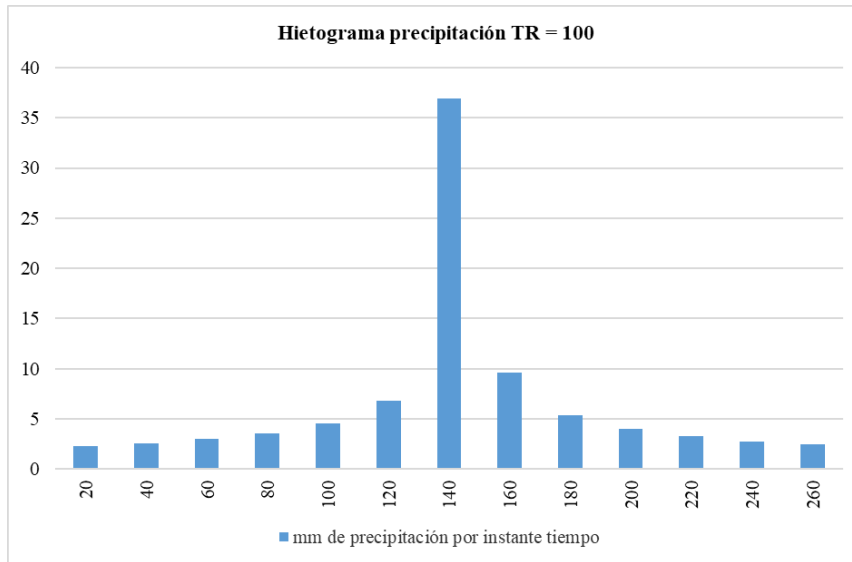
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 12. Hietograma de diseño para periodo de retorno T=100 años

Duración [min]	I (mm/h)	P[mm]	ΔP	Orden	P[mm]
20	110.74	36.91	36.91	13	2.30
40	69.84	46.56	9.64	11	2.59
60	53.33	53.33	6.77	9	2.98
80	44.04	58.72	5.39	7	3.56
100	37.97	63.28	4.56	5	4.56
120	33.63	67.26	3.98	3	6.77
140	30.35	70.83	3.56	1	36.91
160	27.77	74.06	3.24	2	9.64
180	25.68	77.04	2.98	4	5.39
200	23.94	79.81	2.77	6	3.98
220	22.47	82.40	2.59	8	3.24
240	21.21	84.84	2.44	10	2.77
260	20.11	87.14	2.30	12	2.44
		Σ	87.14	Σ	87.14

Fuente: Elaboración propia.

Figura 6. Tormenta de diseño para T=100 años



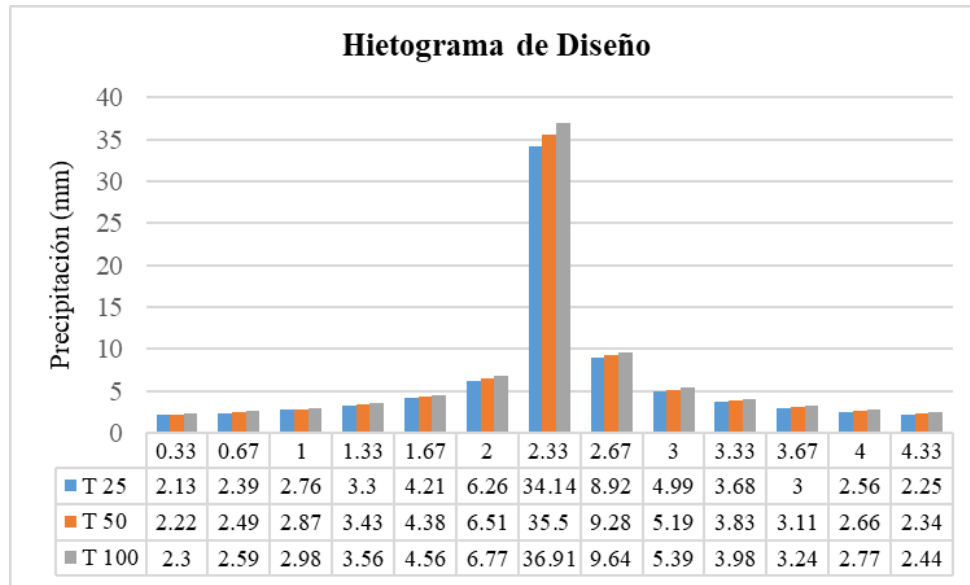
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 13. Hietogramas para simulación en HEC-HMS

Tiempo min	Tiempo hr	T 25 Pmax	T 50 Pmax	T 100 Pmax
20	0.33	2.13	2.22	2.30
40	0.67	2.39	2.49	2.59
60	1.00	2.76	2.87	2.98
80	1.33	3.30	3.43	3.56
100	1.67	4.21	4.38	4.56
120	2.00	6.26	6.51	6.77
140	2.33	34.14	35.50	36.91
160	2.67	8.92	9.28	9.64
180	3.00	4.99	5.19	5.39
200	3.33	3.68	3.83	3.98
220	3.67	3.00	3.11	3.24
240	4.00	2.56	2.66	2.77
260	4.33	2.25	2.34	2.44

Fuente: Elaboración propia.

Figura 7. Hietograma de diseño para HEC-HMS



Fuente: Elaboración propia.

4 Caudal de máxima crecida

4.1 Número de Curva (CN)

El coeficiente de escorrentía equivalente para el método del NRCS es el CN, su valor depende de elementos como el tipo de suelo, cobertura vegetal, pendiente del terreno, geología y otros factores de incidentes. Estos valores se estiman mediante cruce de mapas temáticos de los factores mencionados y se validan con inspección directa en campo. Los valores encontrados en el mapa se ponderan para el área de la cuenca, en este caso tenemos $CN = 62.07$.

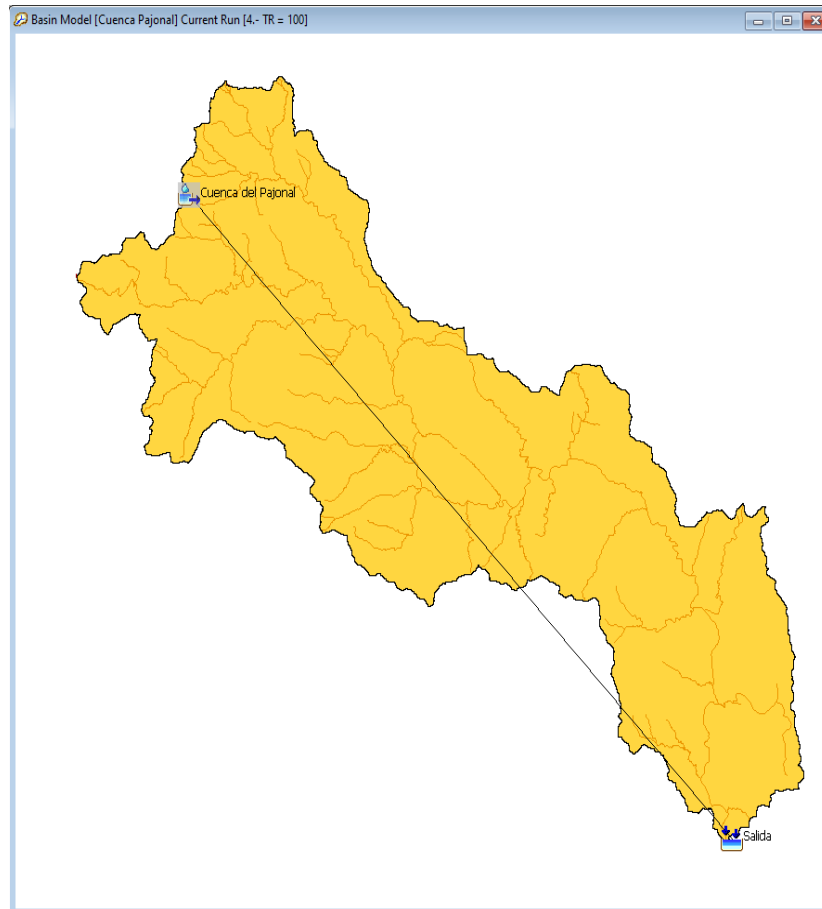
4.2 Simulación de crecidas en HEC-HMS

El modelo HEC-HMS fue empleado para la modelación de las avenidas debido a su potencial en la simulación hidrológica, gran capacidad del algoritmo de cálculo y su amplio uso internacional. El modelo tiene un carácter lineal y semi-distribuido; posibilitando estimar los hidrogramas de salida en una cuenca o varias subcuencas a partir de eventos extremos de precipitación. Para ello aplica algunos de los métodos de cálculo de hidrogramas de diseño, pérdidas por infiltración, flujo base y conversión en escorrentía directa. La simulación calcula la transformación de lluvia-caudal en el modelo de la cuenca, siendo los datos requeridos un modelo meteorológico y las especificaciones de

control que definen el período para realizar la simulación y el intervalo a utilizar (USACE, 2013).

El método para estimar pérdidas se hizo a través del método del número de curva del NRCS, la transformación de precipitación efectiva en escurrimiento se hizo a través del método del hidrograma unitario del NRCS. Natural Resources Conservation Service.

Figura 8. Esquema de drenaje en HEC-HMS



Fuente: Elaboración propia.

La simulación de crecidas se realizó para períodos de retorno de 25, 50 y 100 años (probabilidades de ocurrencia de 4%, 2% y 1%).

Tabla 14. Parámetros ingresados al modelo HEC-HMS

<h3 style="text-align: center;">1. Datos de la cuenca</h3> <p>Subbasin Loss Transform Options</p> <p>Basin Name: Cuenca Pajonal Element Name: Cuenca del Pajonal</p> <p>Downstream: Salida</p> <p>*Area (KM2) 225.07</p> <p>Latitude Degrees: <input type="text"/></p> <p>Latitude Minutes: <input type="text"/></p> <p>Latitude Seconds: <input type="text"/></p> <p>Longitude Degrees: <input type="text"/></p> <p>Longitude Minutes: <input type="text"/></p> <p>Longitude Seconds: <input type="text"/></p> <p>Discretization Method: --None--</p> <p>Canopy Method: --None--</p> <p>Snow Method: --None--</p> <p>Surface Method: --None--</p> <p>Loss Method: SCS Curve Number</p> <p>Transform Method: SCS Unit Hydrograph</p> <p>Baseflow Method: --None--</p>	<h3 style="text-align: center;">2. Método de pérdida</h3> <p>Subbasin Loss Transform Options</p> <p>Basin Name: Cuenca Pajonal Element Name: Cuenca del Pajonal</p> <p>Initial Abstraction (MM) 24.47</p> <p>*Curve Number: 62.07</p> <p>*Impervious (%) 0.0</p>																				
<h3 style="text-align: center;">3. Método de transformación</h3> <p>Subbasin Loss Transform Options</p> <p>Basin Name: Cuenca Pajonal Element Name: Cuenca del Pajonal</p> <p>Graph Type: Standard (PRF 484)</p> <p>*Lag Time (MIN) 176.77</p>	<h3 style="text-align: center;">4. Datos de series de tiempo</h3> <p>Time-Series Data</p> <ul style="list-style-type: none"> Precipitation Gages <ul style="list-style-type: none"> 1.- TR = 10 <ul style="list-style-type: none"> 01ene2024, 00:00 - 01ene2024, 04:20 2.- TR = 25 <ul style="list-style-type: none"> 01ene2024, 00:00 - 01ene2024, 04:20 3.- TR = 50 <ul style="list-style-type: none"> 01ene2024, 00:00 - 01ene2024, 04:20 4.- TR = 100 <ul style="list-style-type: none"> 01ene2024, 00:00 - 01ene2024, 04:20 <p>Components Compute Results</p> <p>Time-Series Gage Time Window Table Graph</p> <table border="1"> <caption>Approximate data from the precipitation graph</caption> <thead> <tr> <th>Time (01Jan2024)</th> <th>Precipitation (MM)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>00:00</td><td>0</td></tr> <tr><td>00:30</td><td>2</td></tr> <tr><td>01:00</td><td>3</td></tr> <tr><td>01:30</td><td>6</td></tr> <tr><td>02:00</td><td>33</td></tr> <tr><td>02:30</td><td>8</td></tr> <tr><td>03:00</td><td>4</td></tr> <tr><td>03:30</td><td>2</td></tr> <tr><td>04:00</td><td>0</td></tr> </tbody> </table>	Time (01Jan2024)	Precipitation (MM)	00:00	0	00:30	2	01:00	3	01:30	6	02:00	33	02:30	8	03:00	4	03:30	2	04:00	0
Time (01Jan2024)	Precipitation (MM)																				
00:00	0																				
00:30	2																				
01:00	3																				
01:30	6																				
02:00	33																				
02:30	8																				
03:00	4																				
03:30	2																				
04:00	0																				

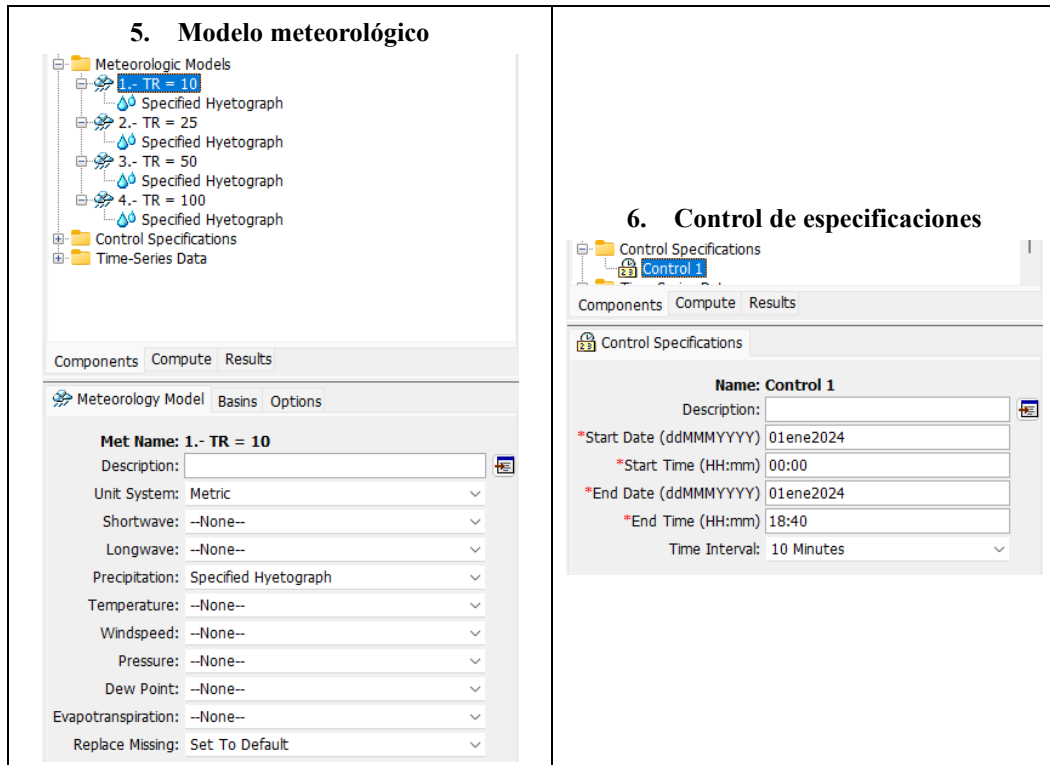


Figura 9. Resultados generados para T = 25 años

Global Summary Results for Run "2.- TR = 25"

Project: Rio Pajonal Simulation Run: 2.- TR = 25

Start of Run: 01ene2024, 00:00 Basin Model: Cuenca Pajonal

End of Run: 01ene2024, 18:40 Meteorologic Model: 2.- TR = 25

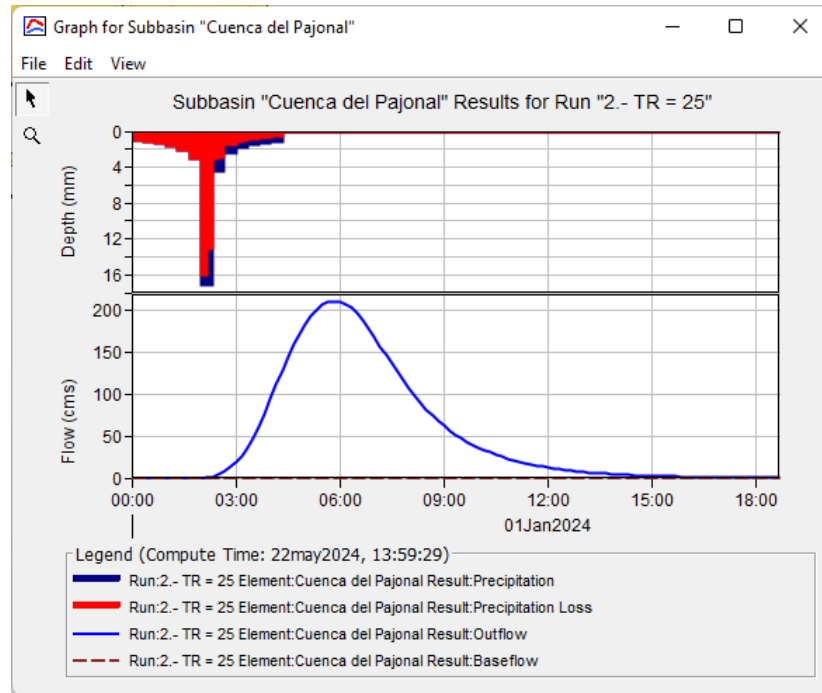
Compute Time: 22may2024, 13:59:29 Control Specifications: Control 1

Show Elements: Initial Selection Volume Uni... MM 1000 M3 Sorting: Watershed Explorer

Hydrologic Element	Drainage Area (KM2)	Peak Discharge (M3/S)	Time of Peak	Volume (1000 M3)
Cuenca del Pajonal	225.1	211.3	1 January 2024, 0...	3354.1
Salida	225.1	211.3	1 January 2024, 0...	3354.1

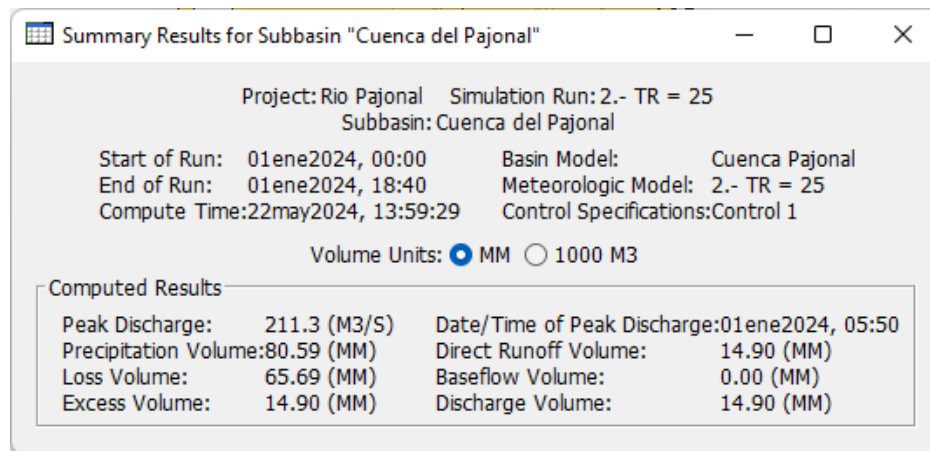
Fuente: Elaboración propia.

Figura 10. Hidrograma generado para T = 25 años



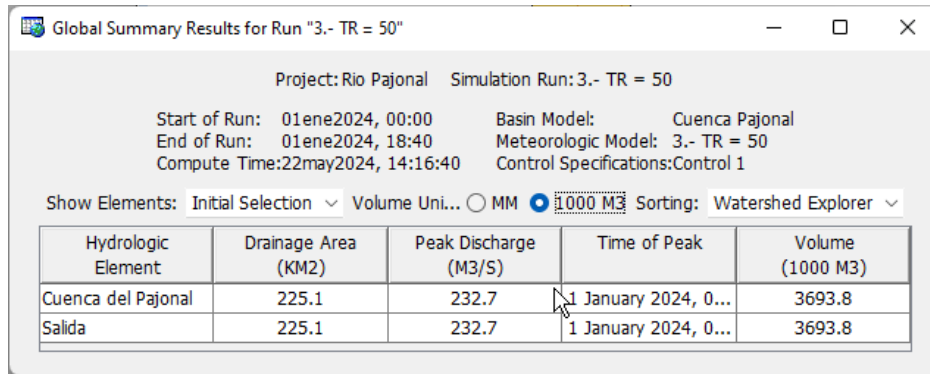
Fuente: Elaboración propia.

Figura 11. Resultados generados para T = 25 años



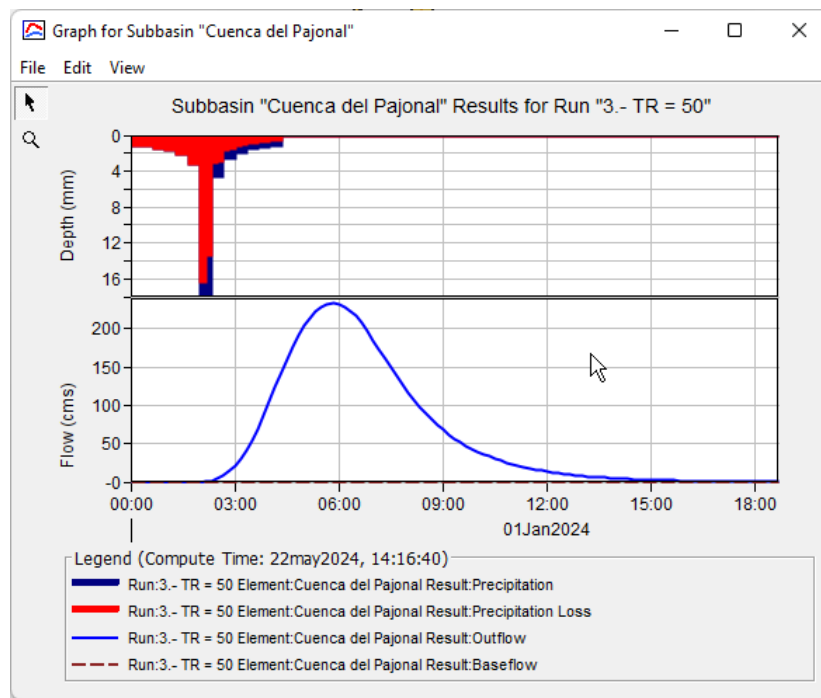
Fuente: Elaboración propia.

Figura 12. Resultados generados para T = 50 años



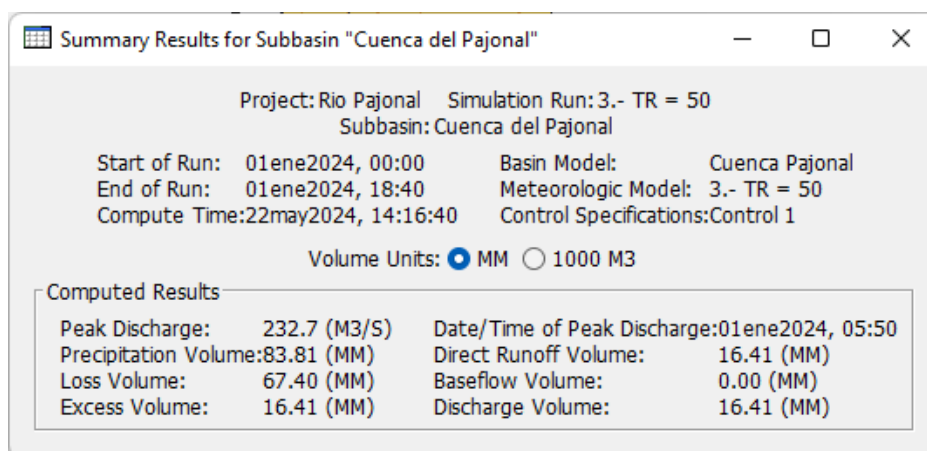
Fuente: Elaboración propia.

Figura 13. Hidrograma generado para T = 50 años



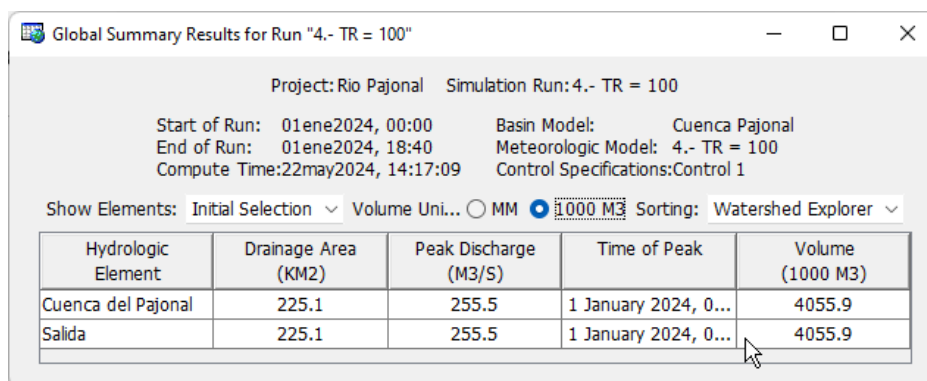
Fuente: Elaboración propia.

Figura 14. Resultados generados para T = 50 años



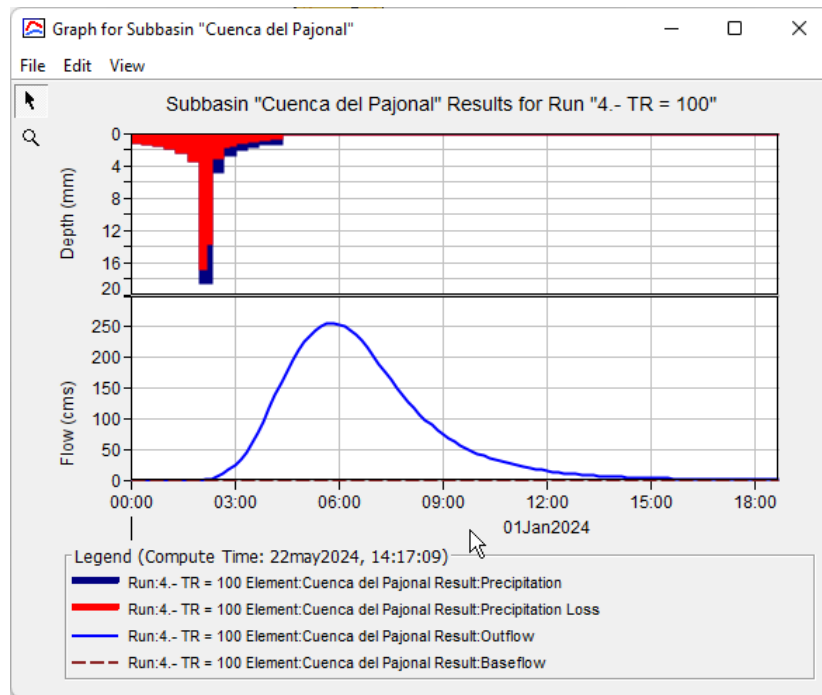
Fuente: Elaboración propia.

Figura 15. Resultados generados para T = 100 años



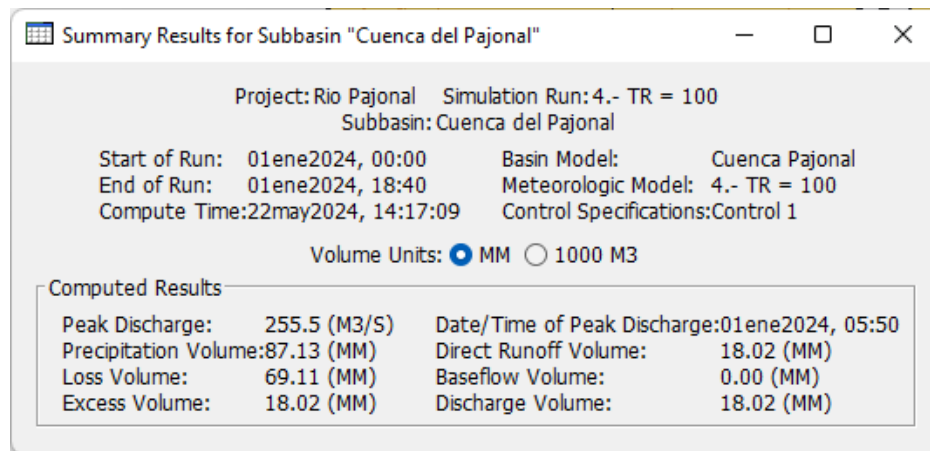
Fuente: Elaboración propia.

Figura 16. Hidrograma generado para T = 100 años



Fuente: Elaboración propia.

Figura 17. Resultados generados para T = 100 años



Fuente: Elaboración propia.

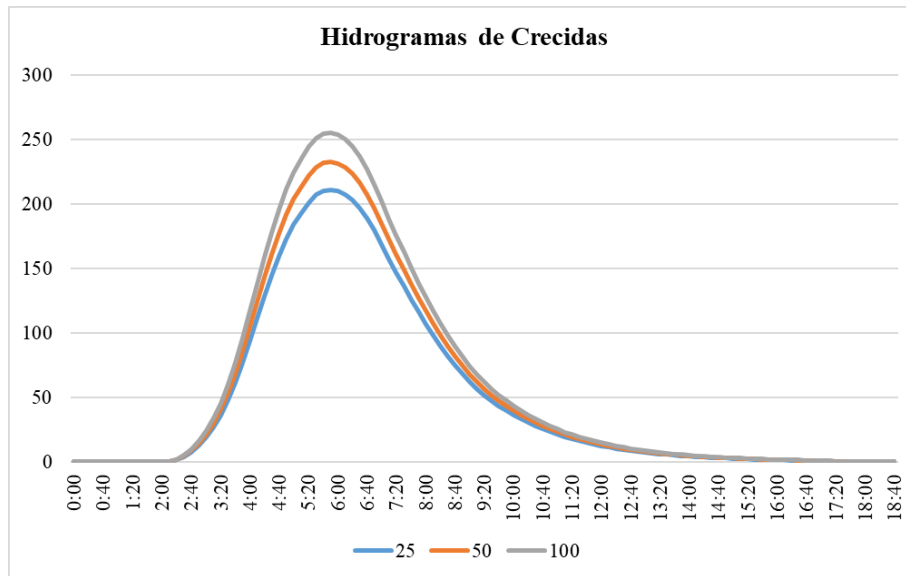
4.3 Caudales máximos generados

Tabla 15. Caudales máximos según periodo de retorno

T (años)	25	50	100
Q _{máx} (m ³ /s)	211.30	232.70	255.50

Fuente: Elaboración propia.

Figura 18. Hidrograma de crecidas



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 16. Hidrograma de crecidas

	T años	25	50	100
FECHA	HORA	Q (m ³ /s)	Q (m ³ /s)	Q (m ³ /s)
01/01/2024	0:00	0.00	0.00	0.00
01/01/2024	0:10	0.00	0.00	0.00
01/01/2024	0:20	0.00	0.00	0.00
01/01/2024	0:30	0.00	0.00	0.00
01/01/2024	0:40	0.00	0.00	0.00
01/01/2024	0:50	0.00	0.00	0.00
01/01/2024	1:00	0.00	0.00	0.00
01/01/2024	1:10	0.00	0.00	0.00
01/01/2024	1:20	0.00	0.00	0.00
01/01/2024	1:30	0.00	0.00	0.00
01/01/2024	1:40	0.00	0.00	0.00
01/01/2024	1:50	0.00	0.00	0.00
01/01/2024	2:00	0.00	0.00	0.00
01/01/2024	2:10	0.20	0.30	0.30
01/01/2024	2:20	1.40	1.60	1.90
01/01/2024	2:30	3.70	4.20	4.80
01/01/2024	2:40	7.50	8.50	9.70

01/01/2024	2:50	12.60	14.30	16.10
01/01/2024	3:00	19.00	21.40	24.00
01/01/2024	3:10	26.80	30.10	33.70
01/01/2024	3:20	36.30	40.80	45.60
01/01/2024	3:30	47.80	53.60	59.80
01/01/2024	3:40	61.40	68.80	76.70
01/01/2024	3:50	77.10	86.30	96.10
01/01/2024	4:00	94.10	105.10	116.90
01/01/2024	4:10	111.50	124.30	138.00
01/01/2024	4:20	128.50	143.00	158.50
01/01/2024	4:30	144.70	160.80	178.00
01/01/2024	4:40	159.60	177.10	195.80
01/01/2024	4:50	172.90	191.60	211.50
01/01/2024	5:00	184.10	203.80	224.70
01/01/2024	5:10	193.50	213.90	235.70
01/01/2024	5:20	201.40	222.40	244.80
01/01/2024	5:30	207.20	228.60	251.40
01/01/2024	5:40	210.40	231.90	254.80
01/01/2024	5:50	211.30	232.70	255.50
01/01/2024	6:00	210.40	231.50	254.00
01/01/2024	6:10	207.70	228.40	250.40
01/01/2024	6:20	203.30	223.40	244.80
01/01/2024	6:30	197.10	216.50	237.10
01/01/2024	6:40	189.20	207.60	227.30
01/01/2024	6:50	179.60	197.00	215.40
01/01/2024	7:00	168.90	185.00	202.20
01/01/2024	7:10	157.70	172.70	188.70
01/01/2024	7:20	146.80	160.70	175.50
01/01/2024	7:30	136.20	149.10	162.80
01/01/2024	7:40	126.00	137.90	150.50
01/01/2024	7:50	116.20	127.10	138.70
01/01/2024	8:00	106.90	116.90	127.50
01/01/2024	8:10	98.00	107.20	117.00
01/01/2024	8:20	89.80	98.20	107.10
01/01/2024	8:30	82.10	89.80	98.00
01/01/2024	8:40	75.00	82.00	89.50
01/01/2024	8:50	68.40	74.80	81.70
01/01/2024	9:00	62.30	68.20	74.50
01/01/2024	9:10	56.80	62.20	67.90
01/01/2024	9:20	51.90	56.70	61.90
01/01/2024	9:30	47.40	51.80	56.60
01/01/2024	9:40	43.30	47.40	51.70
01/01/2024	9:50	39.60	43.30	47.30
01/01/2024	10:00	36.30	39.70	43.30
01/01/2024	10:10	33.20	36.30	39.70
01/01/2024	10:20	30.40	33.30	36.30
01/01/2024	10:30	27.80	30.40	33.20
01/01/2024	10:40	25.40	27.80	30.40

01/01/2024	10:50	23.20	25.40	27.70
01/01/2024	11:00	21.20	23.20	25.30
01/01/2024	11:10	19.30	21.10	23.10
01/01/2024	11:20	17.70	19.30	21.10
01/01/2024	11:30	16.10	17.70	19.30
01/01/2024	11:40	14.80	16.10	17.60
01/01/2024	11:50	13.50	14.80	16.10
01/01/2024	12:00	12.40	13.50	14.80
01/01/2024	12:10	11.30	12.40	13.50
01/01/2024	12:20	10.30	11.30	12.30
01/01/2024	12:30	9.40	10.30	11.30
01/01/2024	12:40	8.60	9.40	10.30
01/01/2024	12:50	7.90	8.60	9.40
01/01/2024	13:00	7.20	7.90	8.60
01/01/2024	13:10	6.60	7.20	7.90
01/01/2024	13:20	6.00	6.60	7.20
01/01/2024	13:30	5.50	6.00	6.60
01/01/2024	13:40	5.00	5.50	6.00
01/01/2024	13:50	4.60	5.00	5.50
01/01/2024	14:00	4.20	4.60	5.00
01/01/2024	14:10	3.90	4.20	4.60
01/01/2024	14:20	3.50	3.90	4.20
01/01/2024	14:30	3.20	3.60	3.90
01/01/2024	14:40	3.00	3.30	3.60
01/01/2024	14:50	2.70	3.00	3.30
01/01/2024	15:00	2.50	2.70	3.00
01/01/2024	15:10	2.30	2.50	2.80
01/01/2024	15:20	2.10	2.30	2.50
01/01/2024	15:30	1.90	2.10	2.30
01/01/2024	15:40	1.80	1.90	2.10
01/01/2024	15:50	1.60	1.80	1.90
01/01/2024	16:00	1.50	1.60	1.80
01/01/2024	16:10	1.30	1.50	1.60
01/01/2024	16:20	1.20	1.30	1.40
01/01/2024	16:30	1.10	1.20	1.30
01/01/2024	16:40	0.90	1.00	1.10
01/01/2024	16:50	0.80	0.90	0.90
01/01/2024	17:00	0.70	0.70	0.80
01/01/2024	17:10	0.50	0.60	0.60
01/01/2024	17:20	0.40	0.50	0.50
01/01/2024	17:30	0.30	0.40	0.40
01/01/2024	17:40	0.30	0.30	0.30
01/01/2024	17:50	0.20	0.20	0.30
01/01/2024	18:00	0.20	0.20	0.20
01/01/2024	18:10	0.10	0.10	0.20
01/01/2024	18:20	0.10	0.10	0.10
01/01/2024	18:30	0.10	0.10	0.10
01/01/2024	18:40	0.00	0.00	0.00

Fuente: Elaboración propia.

Tabla de Contenido – Anexo 4

Anexo 4. Estudio hidráulico.....	133
1 Breve descripción	133
2 HEC-RAS	133
2.1 Tipo de modelamiento usado.....	135
2.2 Modelo de terreno de elevación	136
2.3 Coeficientes de Manning.....	137
2.4 Condiciones de contorno	138
2.4.1 Condiciones de contorno aguas arriba	139
2.4.2 Condiciones de contorno aguas abajo	140
3 Configuración del programa	141
3.1 Configuración de la malla 2D.....	141
3.2 Líneas de quiebre.....	142
3.3 Región de refinamiento de la malla.....	142
3.4 Configuración de los datos de flujo no permanente	144
4 RAS Mapper	145
4.1 Sistema de referencia espacial.....	145
5 Ejecución y configuración del modelo	148
5.1 Resumen de la configuración del programa	150
6 Resultados.....	152
6.1 Tirantes	152
6.2 Velocidades.....	152
6.3 Tirante en el estribo izquierdo del puente	153
6.4 Tirante en el estribo derecho del puente.....	154
6.5 Tirante en el pilar del puente	154
7 Resumen	156

Índice de Tablas

Tabla 1. Resumen de los coeficientes de Manning	137
Tabla 2. Hidrograma de flujo para 100 años	139
Tabla 3. Resumen de los tirantes.....	156

Índice de Mapas

Mapa 1. Área de inundación	135
Mapa 2. DEM del área de inundación.....	136
Mapa 3. Coeficientes de Manning	138

Índice de Gráficos

Gráfico 1. Representación esquemática en RAS Mapper	141
Gráfico 2. Configuración de la malla.....	141
Gráfico 3. Líneas de quiebre	142
Gráfico 4. Región de refinamiento.....	143
Gráfico 5. Espaciado de la región de refinamiento	143
Gráfico 6. Datos de flujo no permanente	144
Gráfico 7. Hidrograma de flujo.....	144
Gráfico 8. Pendiente del modelo.....	145
Gráfico 9. Referencia especial del modelo	146
Gráfico 10. Terreno en formato HDF	146
Gráfico 11. Nuevos datos para los coeficientes de Manning	147
Gráfico 12. Opciones y tolerancias 2D de cálculo	149
Gráfico 13. Configuración de la ejecución del modelo.....	150
Gráfico 14. Tirantes en el tramo de estudio	152
Gráfico 15. Velocidades en tramo de estudio.....	153
Gráfico 16. Tirante en el estribo izquierdo del puente	153
Gráfico 17. Tirante en el estribo derecho del puente	154
Gráfico 18. Tirante en el pilar del puente.....	154

Índice de Fotografías

Fotografía 1. Composición del lecho aguas arriba del puente	147
Fotografía 2. Composición del lecho aguas arriba del puente	147
Fotografía 3. Composición del lecho aguas abajo del puente.....	148
Fotografía 4. Composición del lecho en el pilar central del puente.....	148
Fotografía 5. Marca alta de agua en el puente	155

Anexo 4. Estudio hidráulico

1 Breve descripción

Todos los modelos, numéricos o a escala, son representaciones simplificadas del mundo real (prototipo). Afortunadamente, hay numerosos problemas de ingeniería práctica para los cuales los modelos numéricos simplificados del prototipo son suficientes para proporcionar descripciones utilizables del comportamiento del sistema. El desafío para el modelador es seleccionar un modelo apropiado para resolver su problema particular de ingeniería, reconociendo al mismo tiempo que el modelo no es una representación perfecta del prototipo. La selección de un modelo comienza con el desarrollo de una comprensión de qué aspectos del complejo sistema del mundo real son los más importantes para el problema de ingeniería que se está tratando.

2 HEC-RAS

La aplicación de los modelos numéricos para describir el comportamiento de un flujo de agua se convierte en la actualidad en una herramienta de mucha importancia debido a que existe la necesidad imperiosa de predecir los fenómenos naturales para anticipar el comportamiento y tomar ciertas medidas preventivas y correctivas sobre la zona de influencia del paso del agua.

Inicialmente los modelos numéricos basaban su aplicación en que el flujo simulado sea unidimensional (1D), es decir que solo se consideraba el componente de la velocidad en la dirección del flujo, lo que resultaba en una gran limitante para conocer el comportamiento real del agua con mayor precisión; siendo esto una de las causas, el hecho de que no se ajustaba adecuadamente a la morfología del terreno por donde circula el flujo de agua.

En la actualidad los modelos numéricos, asistidos con la capacidad de procesamiento de los nuevos ordenadores, permiten adecuarse a un esquema en dos dimensiones (2D), donde predominan las dimensiones horizontales sobre la vertical, y de esta manera conocer con mayor precisión las variables hidráulicas cuantificables (calado, velocidad, caudal, etc.) sobre la planicie de influencia al paso del agua.

Hydrologic Engineering Center River Analysis System (HEC-RAS) es una herramienta que ha venido evolucionando, y que a la fecha en su versión 5.0.1, cuenta con una extensión que permite simular el flujo de agua combinando modelos 1D y 2D, así como solo modelamiento 2D; basa su aplicación en las ecuaciones de la onda de difusión y saint venant las cuales se resuelven mediante el algoritmo de volúmenes finitos implícitos. Lo novedoso de esta nueva versión, es que incorpora la ventana de interface RAS Mapper en la que se introduce el modelo digital de elevación, el cual es fundamental para la simulación en 2D.

Las simulaciones hidráulicas permiten un análisis de la interrelación entre la topografía del cauce de un río, los volúmenes de agua y los sedimentos transportados, y muestra de qué manera las obstrucciones u obras hidráulicas que se presentan en el cauce influyen en el nivel de agua. La extensión HEC-GeoRAS es una poderosa herramienta técnica y constituye de hecho el estándar internacional en los estudios relativos a inundaciones.

Utilizando la extensión GeoRAS, es posible obtener el alineamiento del cauce principal y las características de las bancas y secciones transversales como insumo para el modelo HEC-RAS. Esta información permite realizar el análisis hidráulico del tramo en cuestión a partir de las condiciones de contorno y la calibración de los parámetros del modelo, fundamentalmente el coeficiente de rugosidad de Manning, utilizando datos registrados de niveles en varias secciones transversales.

HEC-GeoRAS es un conjunto de herramientas y utilidades para procesar datos georreferenciados en ArcGIS. La interface permite preparar los datos geométricos para ser utilizados con HEC-RAS, así como convertir los resultados del cálculo para ser visualizados o tratados en ArcGIS. La extensión permite a los usuarios en Sistemas de Información Geográfica (SIG) crear un archivo de importación a HEC-RAS que contiene datos geométricos de un Modelo Digital de Elevación (MDE) existente y conjuntos de datos complementarios.

HEC-GeoRAS crea un archivo de importación, llamado aquí RAS GIS Import File, incluyendo el cauce del río, secciones transversales, etc. Datos complementarios relativos a la definición geométrica de las alineaciones de los diques, las zonas de flujo inefectivas,

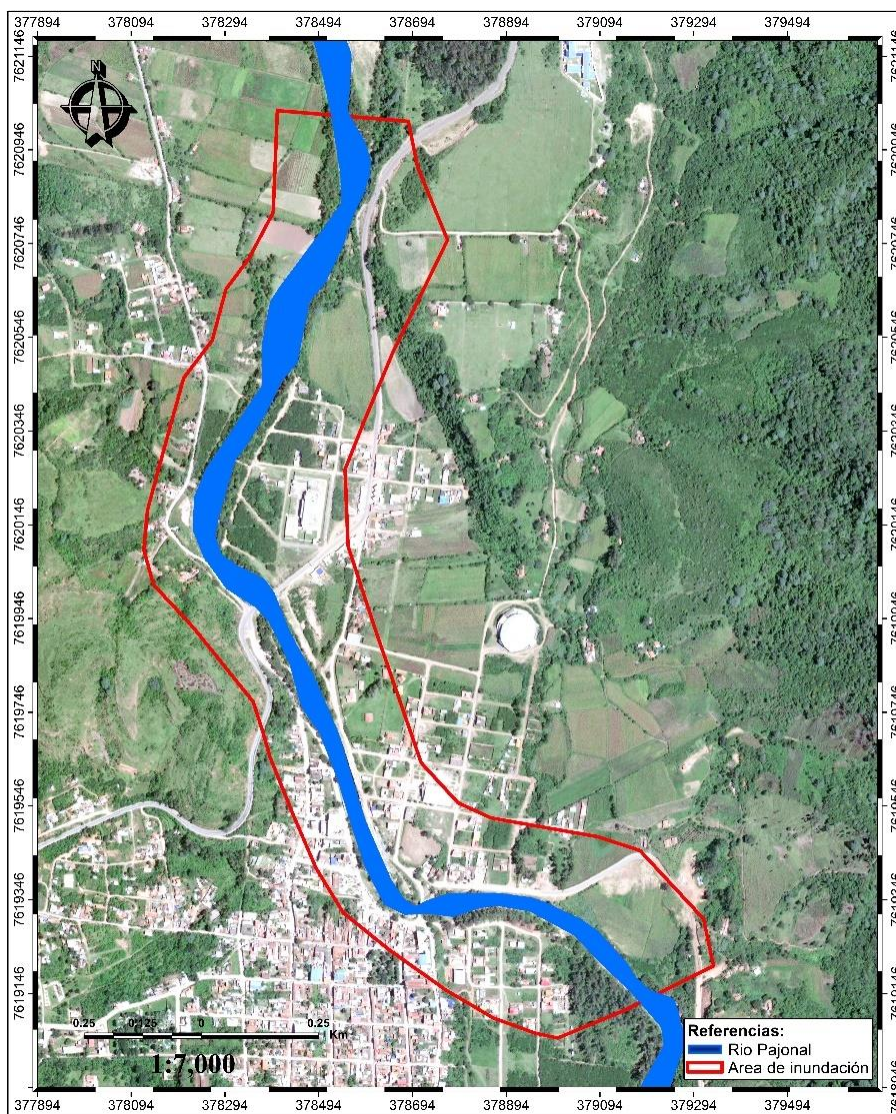
obstáculos, y de las zonas de almacenamiento pueden ser escritos en el archivo RAS GIS Import File.

2.1 Tipo de modelamiento usado

HEC-RAS en sus versiones más recientes ya puede realizar tránsitos bidimensionales (2D) dentro de la porción de análisis de flujo no permanente del software. En este estudio se usó el modelamiento bidimensional en flujo no permanente.

Para modelar toda el área de inundación se usa una malla de área de flujo 2D junto con un polígono que representa los coeficientes de rugosidad de Manning.

Mapa 1. Área de inundación

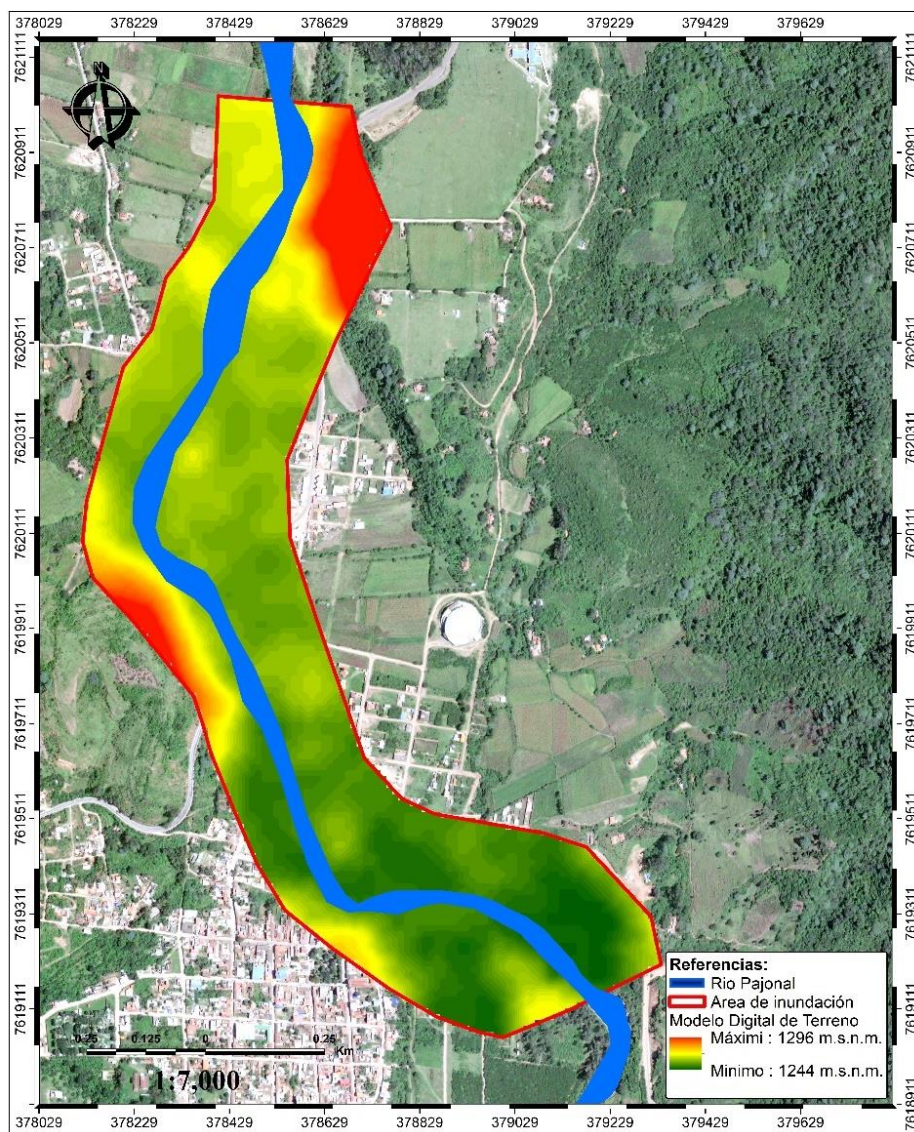


Fuente: Elaboración propia.

2.2 Modelo de terreno de elevación

Es esencial tener un modelo detallado y preciso del terreno para crear un modelo hidráulico detallado y preciso. La calidad de los datos del terreno puede ser un factor limitante en la calidad del modelo hidráulico que el usuario puede crear. Los datos del terreno provienen de muchas fuentes, formatos y niveles de detalle diferentes. Actualmente, HEC-RAS utiliza datos de grillas en varios formatos para representar el terreno.

Mapa 2. DEM del área de inundación



Fuente: Elaboración propia.

2.3 Coeficientes de Manning

Los coeficientes de rugosidad representan la resistencia a los flujos de inundación en canales y llanuras de inundación. Todos los cálculos hidráulicos que implican flujo en canales abiertos requieren una evaluación de las características de rugosidad del canal. A falta de un procedimiento cuantitativo satisfactorio, esta evaluación sigue siendo principalmente un arte.

Los datos de rugosidad necesarios para un modelo incluyen estimaciones de los coeficientes de rugosidad del terreno, o valores de fricción superficial, para el canal y las áreas de la llanura de inundación derecha e izquierda para cada sección transversal del modelo.

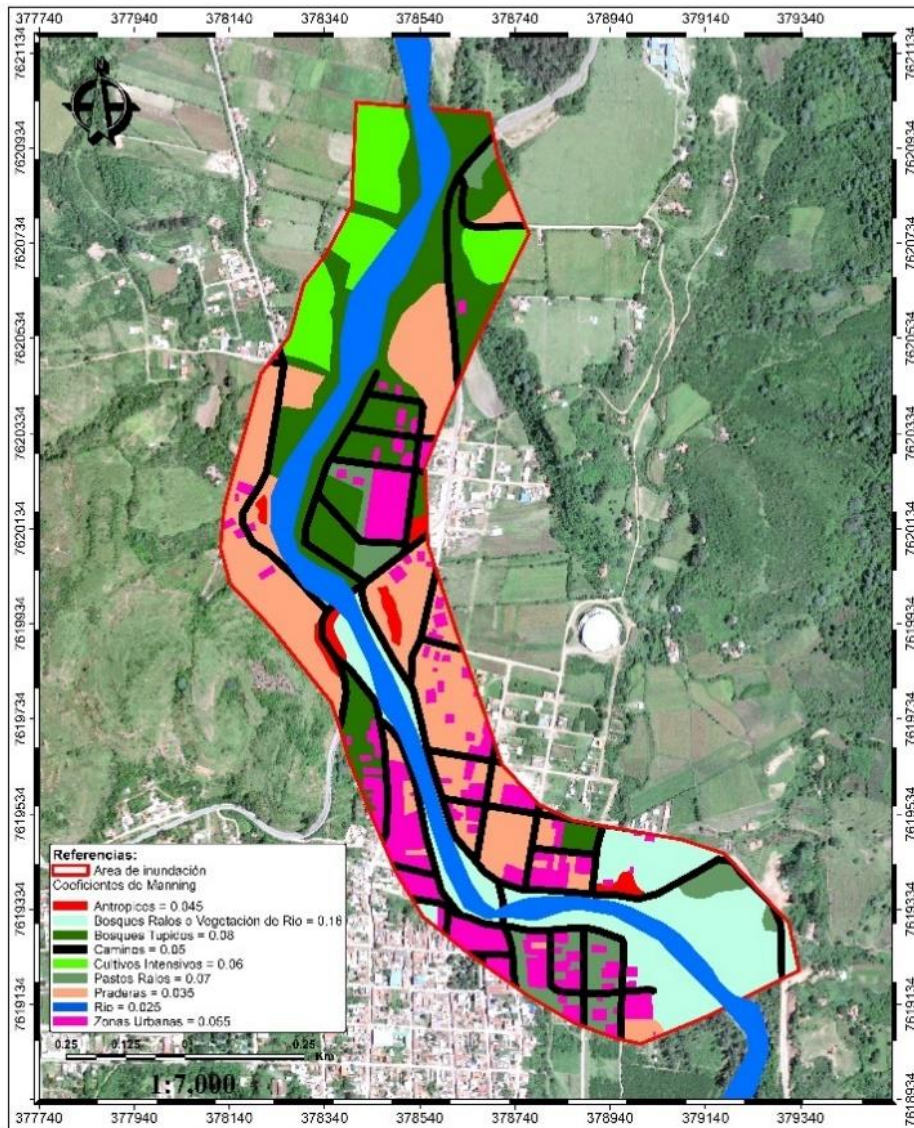
Tabla 1. Resumen de los coeficientes de Manning

N°	Detalle	n	Área (km ²)	Porcentaje
1	Antrópicos	0.045	0.011	1.28
2	Bosques ralos o vegetación de río	0.16	0.105	12.53
3	Bosques tupidos	0.08	0.129	15.31
4	Caminos	0.05	0.137	16.27
5	Cultivos intensivos	0.06	0.060	7.18
6	Pastos ralos	0.07	0.035	4.20
7	Praderas	0.035	0.161	19.07
8	Rio	0.025	0.115	13.61
9	Zonas urbanas	0.055	0.089	10.54
TOTAL			0.842	100.00

Fuente: Elaboración propia.

Para asignar los coeficientes de Manning a la llanura de inundación se delimito los sectores con la ayuda de un programa de SIG.

Mapa 3. Coeficientes de Manning



Fuente: Elaboración propia.

2.4 Condiciones de contorno

Las condiciones de contorno se requieren en los límites externos al modelo y deben definirse para todos los intervalos de tiempo. Por lo tanto, las condiciones de contorno en los modelos de flujo no permanente se especifican a menudo como datos de series de tiempo en lugar de valores fijos que se utilizan en los modelos de flujo permanente. Los hidrogramas de caudal de entrada (que describen el caudal de entrada a lo largo del tiempo) se definen a menudo en los límites aguas arriba. En los límites aguas abajo,

generalmente se suele definir un tirante normal (en cuyo caso el modelo generará el nivel de agua en cada intervalo de tiempo dependiendo del flujo en ese intervalo de tiempo).

2.4.1 Condiciones de contorno aguas arriba

La condición de contorno usado aguas arriba es el hidrograma de flujo calculado para cien años de periodo de retorno, esta condición de contorno puede ser aguas arriba o aguas abajo, pero comúnmente es más usado como una condición de contorno aguas arriba.

Tabla 2. Hidrograma de flujo para 100 años

N	Flujo (m ³ /s)	N	Flujo (m ³ /s)
1	0.30	51	36.30
2	0.30	52	33.20
3	1.90	53	30.40
4	4.80	54	27.70
5	9.70	55	25.30
6	16.10	56	23.10
7	24.00	57	21.10
8	33.70	58	19.30
9	45.60	59	17.60
10	59.80	60	16.10
11	76.70	61	14.80
12	96.10	62	13.50
13	116.90	63	12.30
14	138.00	64	11.30
15	158.50	65	10.30
16	178.00	66	9.40
17	195.80	67	8.60
18	211.50	68	7.90
19	224.70	69	7.20
20	235.70	70	6.60
21	244.80	71	6.00
22	251.40	72	5.50
23	254.80	73	5.00
24	255.50	74	4.60
25	254.00	75	4.20
26	250.40	76	3.90
27	244.80	77	3.60
28	237.10	78	3.30
29	227.30	79	3.00
30	215.40	80	2.80
31	202.20	81	2.50
32	188.70	82	2.30
33	175.50	83	2.10
34	162.80	84	1.90
35	150.50	85	1.80
36	138.70	86	1.60
37	127.50	87	1.40
38	117.00	88	1.30

39	107.10	89	1.10
40	98.00	90	0.90
41	89.50	91	0.80
42	81.70	92	0.60
43	74.50	93	0.50
44	67.90	94	0.40
45	61.90	95	0.30
46	56.60	96	0.30
47	51.70	97	0.20
48	47.30	98	0.20
49	43.30	99	0.10
50	39.70	100	0.10

Fuente: Elaboración propia.

2.4.2 Condiciones de contorno aguas abajo

Probablemente, la condición de contorno aguas abajo más común y más utilizada en HEC-RAS tanto en flujo permanente y flujo no permanente es la asunción de tirante normal. Esta opción, asume que su río fluye bajo condiciones de flujo normal (flujo uniforme) en el contorno aguas abajo del modelo. Esta opción permite proporcionar una pendiente de energía, y luego HEC-RAS volverá a calcular automáticamente el tirante utilizando la ecuación de Manning. La popularidad de este método se debe a su facilidad de uso y a sus propiedades semi dinámicas (es decir, a medida que cambia el flujo, también lo hará el tirante del contorno aguas abajo).

La ecuación de Manning, tal y como se utiliza hoy en día, es.

$$V = \frac{k}{n} R^{2/3} S_o^{1/2}$$

Donde:

k = 1.486 para el sistema inglés y 1.0 para el sistema internacional

n = El coeficiente de rugosidad de Manning

La *n* de Manning tiene el mismo valor si se utiliza en el sistema de unidades inglesas o en el Sistema Internacional (SI).

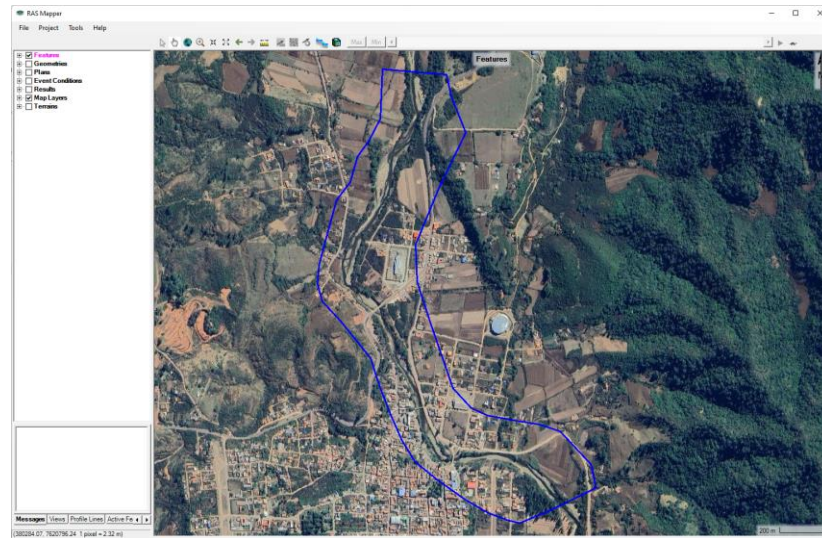
Para este tipo de condición de contorno, se debe introducir el valor de la pendiente de energía. Este valor se utiliza para calcular el tirante normal (ecuación de Manning) en esa ubicación. Se puede calcular un tirante normal para cada perfil basándose en la pendiente introducida por el usuario. Cuando se aplique esta condición de contorno, debe colocarse

lo suficientemente lejos aguas abajo, de forma que cualquier error que produzca no afecte a los resultados en el tramo de estudio, el valor usado es de 0.004.

3 Configuración del programa

Para simular la llanura de inundación de la zona donde se encuentra emplazado el puente se usó una malla de área de flujo 2D.

Gráfico 1. Representación esquemática en RAS Mapper

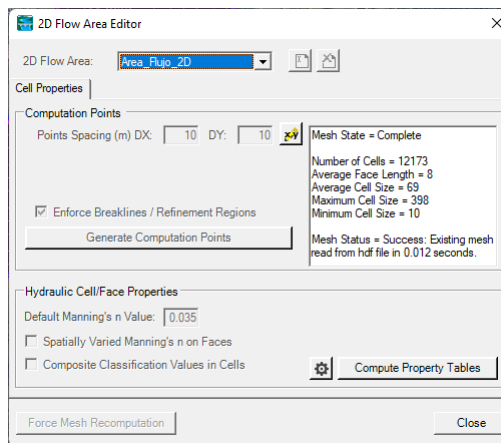


Fuente: Elaboración propia.

3.1 Configuración de la malla 2D

La malla del área de flujo 2D general se configuro con tamaño de celda de 10 metros, para toda la extensión del área de inundación.

Gráfico 2. Configuración de la malla

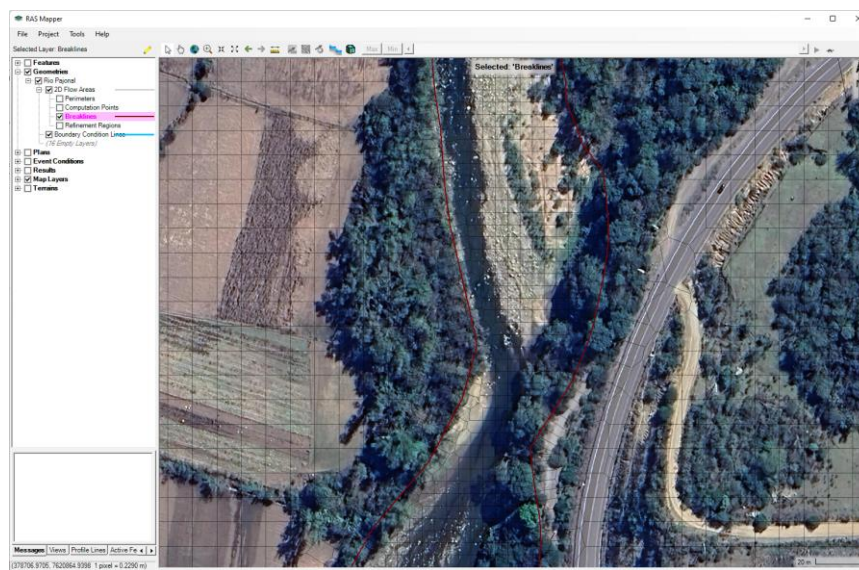


Fuente: Elaboración propia.

3.2 Líneas de quiebre

Después de que se cree la malla computacional, se añadió líneas de quiebre para forzar la malla a alinear las caras de las celdas computacionales a lo largo de las líneas de quiebre. En general, las líneas de quiebre se incorporó en los márgenes donde termina la llanura de inundación que son una barrera para el flujo, y que controle el flujo/dirección. Luego se alineo las caras de la malla 2D para las áreas que son barreras para el flujo con el fin de capturar con precisión el terreno elevado con las caras de las celdas.

Gráfico 3. Líneas de quiebre

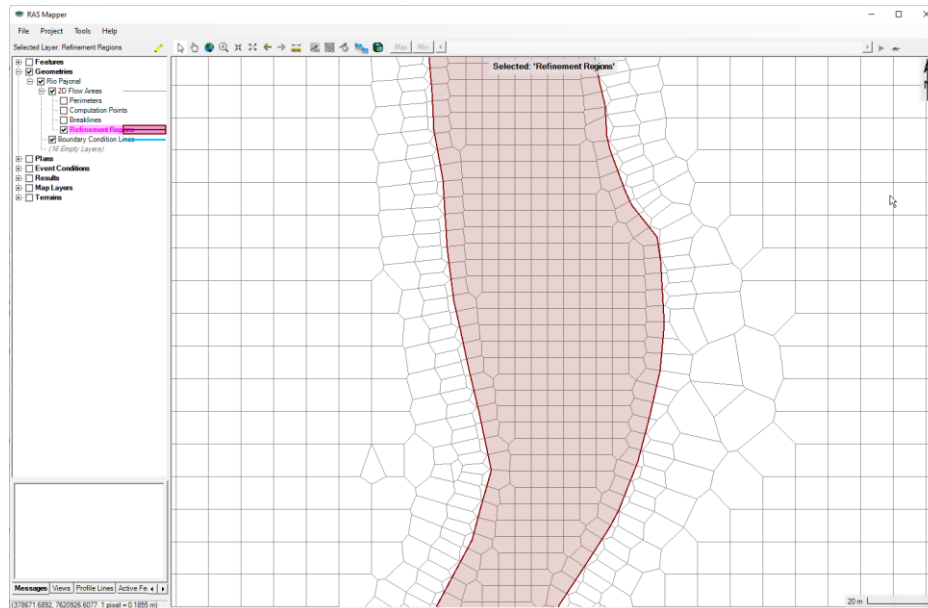


Fuente: Elaboración propia.

3.3 Región de refinamiento de la malla

Las regiones de refinamiento son una herramienta de edición de la malla que permite refinar o hacer más gruesa un área de la malla. Se utilizó una región de refinamiento para densificar un área en la que se deseen obtener resultados más detallados debido a los rápidos cambios en el terreno o en la elevación de la lámina del agua, o para simplificar un área en la que la elevación de la lámina del agua no varíe mucho y en las que se quiso reducir el número de puntos de cálculo en el área de flujo 2D. Esta región de refinamiento se usó para crear una buena malla en zona del canal principal del modelo.

Gráfico 4. Región de refinamiento



Fuente: Elaboración propia.

La configuración de la región de refinamiento se utilizó un tamaño de celda X de 5 metros y un tamaño de celda Y de 5 metros. Un tamaño mucho menor que la malla del área de flujo 2D.

Gráfico 5. Espaciado de la región de refinamiento

The screenshot shows the 'Refinement Regions - Layer Properties' dialog box. The 'Features' tab is active, displaying a table with the following data:

FID	Name	Cell Size X	Cell Size Y	Cell Shift DX	Cell Shift DY	Generate as Hexagon	Perim Spac
0	Area de Refinami...	5	5			<input type="checkbox"/>	

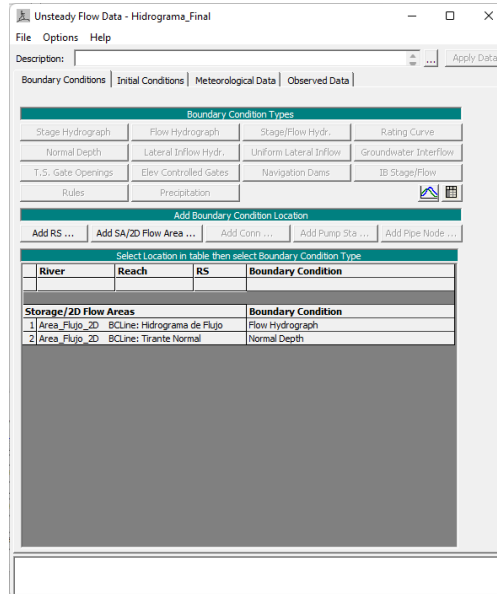
At the bottom of the dialog, there are checkboxes for 'Zoom To Selected' and 'Only Show Last Selected', and buttons for 'Add Column', 'Delete Column', and 'Import Features'.

Fuente: Elaboración propia.

3.4 Configuración de los datos de flujo no permanente

Los datos de flujo no permanente fueron configurados de la siguiente forma para las dos condiciones de contornos (aguas arriba y aguas abajo) del modelo.

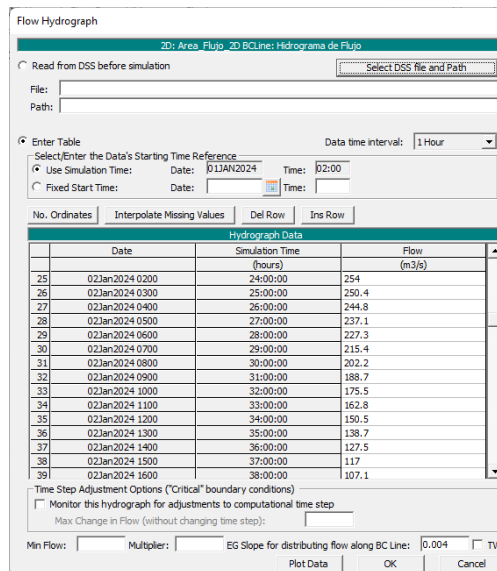
Gráfico 6. Datos de flujo no permanente



Fuente: Elaboración propia.

Aguas arriba del modelo se introdujo un hidrograma de caudal de entrada lateral de 100 años de periodo de retorno (1%).

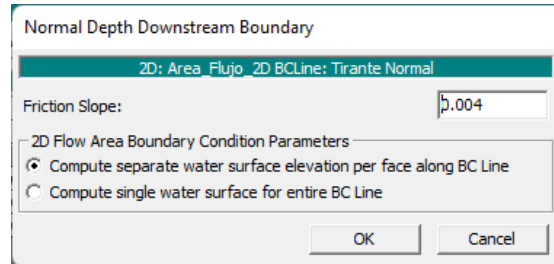
Gráfico 7. Hidrograma de flujo



Fuente: Elaboración propia.

Aguas abajo del modelo se introdujo la pendiente del modelo que se calculó en 0.004 una pendiente moderada.

Gráfico 8. Pendiente del modelo



Fuente: Elaboración propia.

4 RAS Mapper

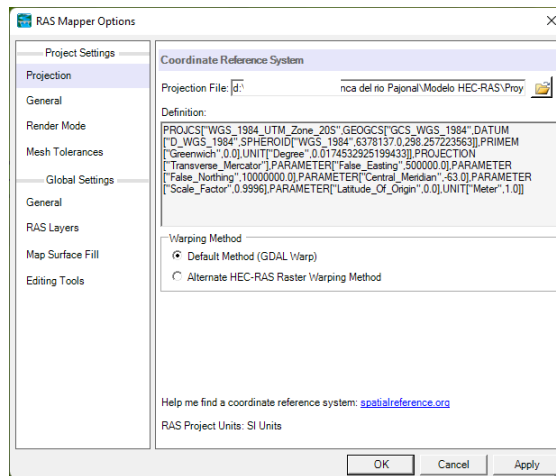
El módulo de RAS Mapper es una interfaz a la que se accede desde el programa principal de HEC-RAS y proporciona una visualización geoespacial de la geometría de HEC-RAS, los resultados de la simulación y otros datos geoespaciales pertinentes para ayudar a crear eficazmente modelos hidráulicos fluviales.

4.1 Sistema de referencia espacial

El primer paso para crear un proyecto en el RAS Mapper es establecer el sistema de coordenadas en el que se va a trabajar para los datos geoespaciales del proyecto. El establecimiento de la proyección para un proyecto asegurará que el terreno y los datos geométricos estén todos en un sistema de coordenadas común y le permitirá utilizar los datos de fondo de otro sistema de coordenadas para ayudar en el desarrollo y análisis del modelo.

La georreferencia establecida en el modelo es el UTM WGS 84 Zona 20 Sur, es la posición espacial donde se ubica el proyecto.

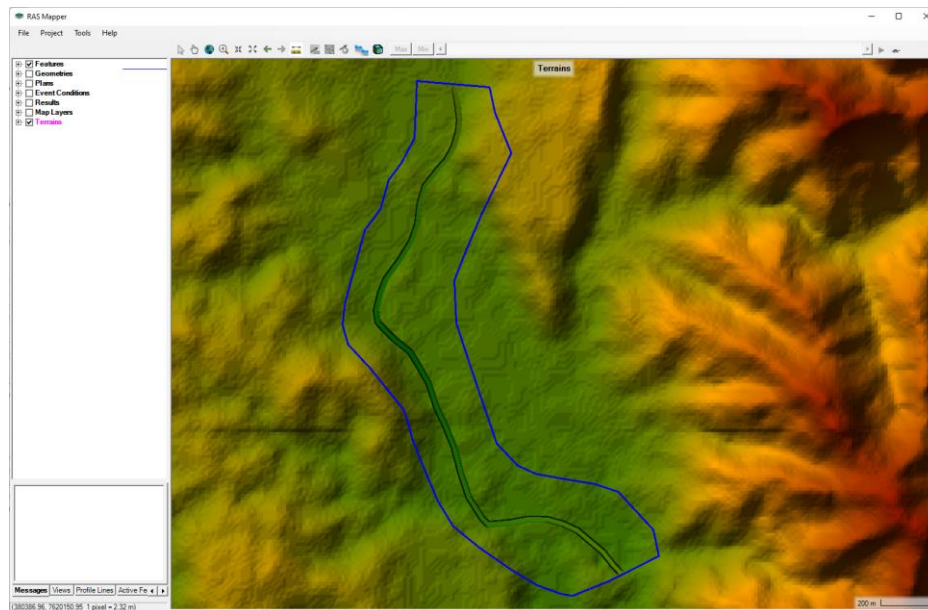
Gráfico 9. Referencia especial del modelo



Fuente: Elaboración propia.

Los datos del terreno se exportaron de un DEM de extensión *.tif, luego el programa lo convierte a un terreno de extensión *.hdf

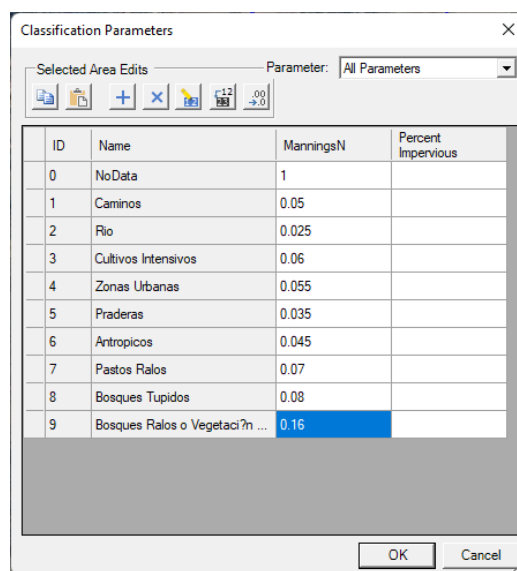
Gráfico 10. Terreno en formato HDF



Fuente: Elaboración propia.

Los coeficientes de Manning se exportaron desde polígonos creados en ArcGIS. El programa los convierte a un formato ráster, anulando así el coeficiente de Manning por defecto y utilizando en su lugar estos nuevos datos personalizados creados específicamente para el área de inundación.

Gráfico 11. Nuevos datos para los coeficientes de Manning



ID	Name	ManningsN	Percent Impervious
0	NoData	1	
1	Camino	0.05	
2	Rio	0.025	
3	Cultivos Intensivos	0.06	
4	Zonas Urbanas	0.055	
5	Praderas	0.035	
6	Antropicos	0.045	
7	Pastos Ralos	0.07	
8	Bosques Tupidos	0.08	
9	Bosques Ralos o Vegetaci?n ...	0.16	

Fuente: Elaboración propia.

Fotografía 1. Composición del lecho aguas arriba del puente



Fuente: Elaboración propia

Fotografía 2. Composición del lecho aguas arriba del puente



Fuente: Elaboración propia

Fotografía 3. Composición del lecho aguas abajo del puente



Fuente: Elaboración propia

Fotografía 4. Composición del lecho en el pilar central del puente



Fuente: Elaboración propia

5 Ejecución y configuración del modelo

En la configuración del modelo se activó el preprocesamiento geométrico, la simulación de flujo no permanente y el post procesamiento. El intervalo del tiempo computacional se configuró en 3 segundos. Este intervalo se determinó resolviendo la condición de Courant, se obtendría lo siguiente para el intervalo de tiempo:

$$C = \frac{V_w \Delta t}{\Delta X} \leq 1.0$$

Por lo tanto, asumiendo un número de Courant de 1 se obtiene:

$$\Delta t \leq \frac{\Delta X}{V_w} = \frac{10}{2.75} = 3.64 \text{ segundos}$$

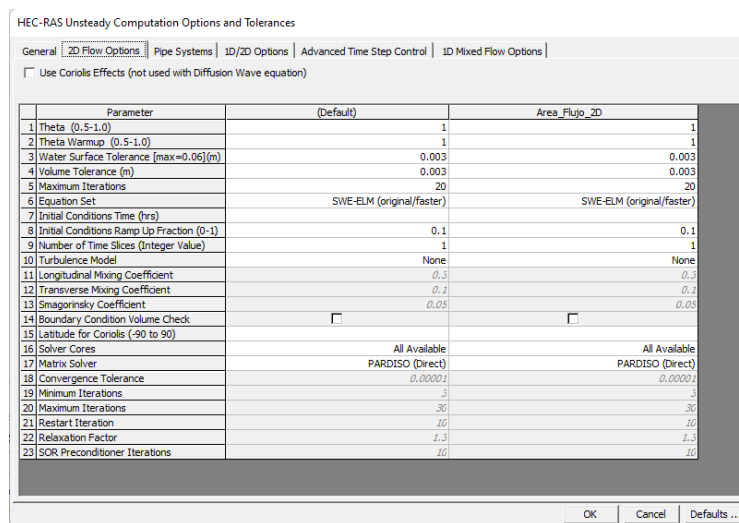
Donde:

Símbolo	Descripción	Unidades
C	Numero de Courant	
ΔT	Intervalo de tiempo	segundo
ΔX	Tamaño promedio de las celdas	metros
V_w	Velocidad de la onda de la inundación	metros/segundo

Fuente: Manual de usuario de modelamiento 2D de Hydrologic Engineering Center, 2023

Para la solución del modelo se usó las ecuaciones de aguas poco profundas (SWE-EM), este método utiliza un esquema de solución explícito para resolver las ecuaciones. Aunque este método es más conservador en cuanto al momentum, requiere intervalos de tiempo computacional más pequeños (es decir, en general, debe seleccionarse un intervalo de tiempo adecuado para asegurar que el número de Courant sea inferior a 1,0).

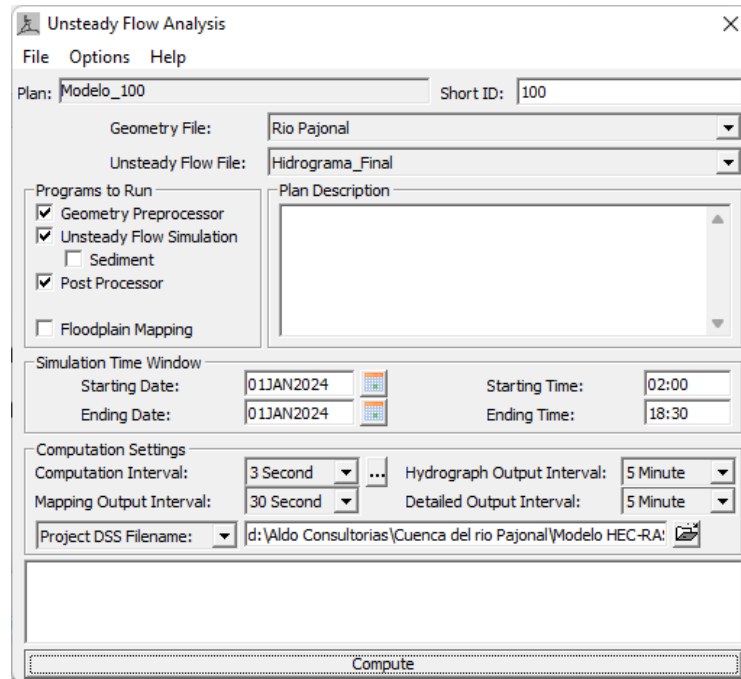
Gráfico 12. Opciones y tolerancias 2D de cálculo



Fuente: Elaboración propia.

La configuración de la ejecución del modelo en flujo no permanente, se realizó con los siguientes datos, fecha de inicio 1 de junio del 2024, hora de inicio 02:00, fecha de finalización 1 de junio del 2024 y hora de finalización 18:30, intervalo de cálculo de 3 segundos, el intervalo de salida del mapeo en 30 segundos, y el intervalo de salida del hidrograma de 5 minutos.

Gráfico 13. Configuración de la ejecución del modelo



Fuente: Elaboración propia.

5.1 Resumen de la configuración del programa

1. Se estableció una proyección de coordenadas horizontales para usarla en el modelo, desde el RAS Mapper. Esto se hace normalmente seleccionando un archivo de proyección existente de un archivo shapefile de ESRI o de otra capa de mapeo.
2. Se desarrollo un modelo de terreno en el RAS Mapper. El modelo del terreno es un requisito para el modelamiento 2D, ya que se utiliza para establecer las propiedades geométricas e hidráulicas de las celdas 2D y las caras de las celdas. También se necesita un modelo de terreno para realizar cualquier mapeo de inundaciones en el RAS Mapper.
3. Se elaboro un conjunto de datos de capas de la n de Manning usando ArcGIS, utilizando capas de datos de cobertura terrestre y capas de polígonos, con el fin de establecer los valores de la n de Manning dentro de las áreas de flujo 2D. Además, el HEC-RAS tiene una opción para los polígonos definidos por el usuario que se puede utilizar para anular los valores de la n de Manning de base. Estos polígonos definidos por el usuario pueden ser usados como zonas de calibración.

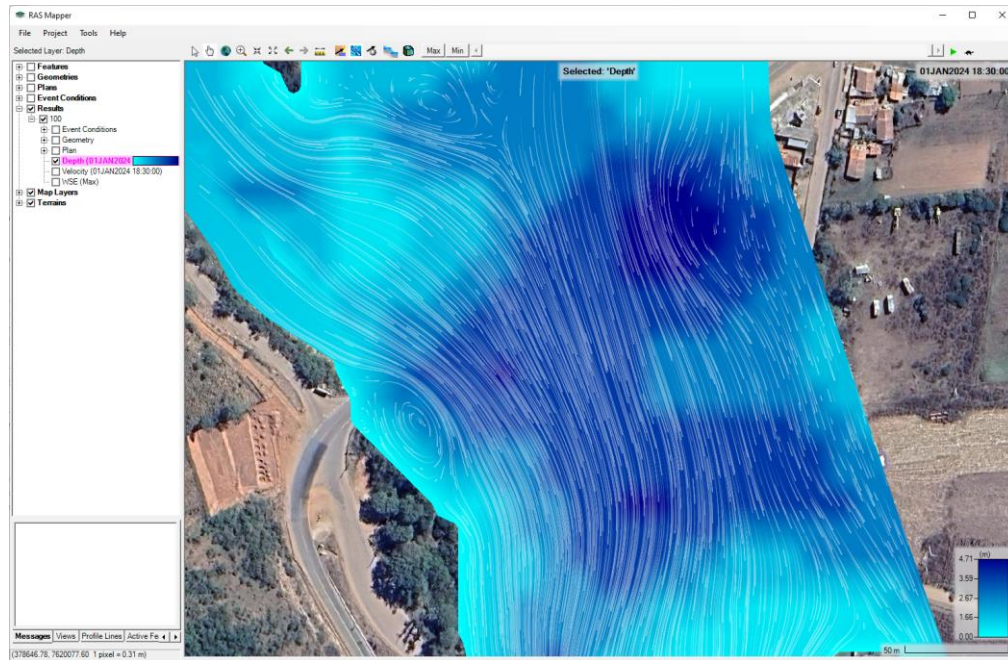
4. Se incorporo cualquier capa de mapeo adicional que pueda ser necesaria para la visualización, como la fotografía aérea, la ubicación de la presa, las redes de carreteras, el puente, etc.
5. Desde el interior del RAS Mapper se dibuja un polígono límite para el área de flujo 2D a modelar. O puede importarse las coordenadas de los límites X, Y de otra fuente.
6. Utilizando el editor de área de flujo 2D, se creó la malla computacional 2D para el área de flujo 2D.
7. Editar la malla del área de flujo 2D para mejorarla, como, por ejemplo: agregar líneas de quiebre adicional; usar la opción de regiones de refinamiento para aumentar o disminuir la densidad de las celdas según sea necesario; añadir, mover o eliminar centros de celdas donde sea necesario. Se usó la herramienta de región de refinamiento de la malla para hacer una malla bonita del canal.
8. Es importante ejecutar el preprocesamiento geométrico 2D del RAS Mapper para crear las tablas de propiedades hidráulicas de las celdas y las caras de la grilla.
9. Se introdujo todos los datos de las condiciones iniciales y de contorno necesarios para el área de flujo 2D en el editor de datos de flujo no permanente.
10. Desde la ventana de simulación de flujo no permanente, se estableció las opciones y configuraciones de cálculo necesarias para las áreas de flujo 2D.
11. Finalmente se ejecutó la simulación de flujo no permanente.

6 Resultados

6.1 Tirantes

Los tirantes en la llanura de inundación próximos al puente varían, desde 0 metros, hasta 4.71 metros en el canal mismo del tramo de estudio.

Gráfico 14. Tirantes en el tramo de estudio

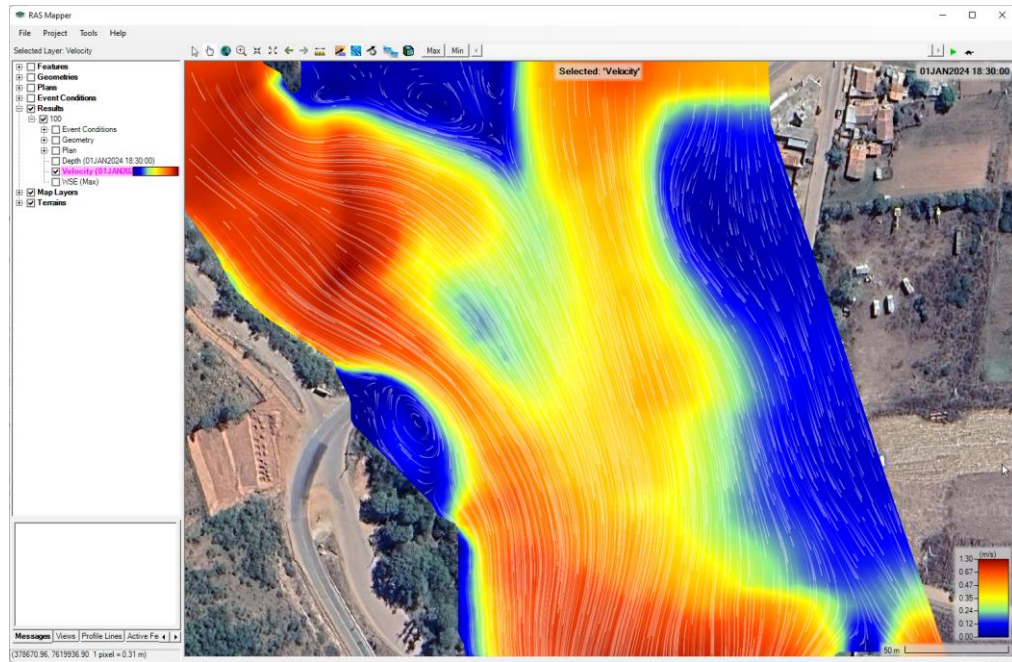


Fuente: Elaboración propia.

6.2 Velocidades

Las velocidades en las zonas de la planicie de inundación generalmente son de agua estancada, con una velocidad de 0 m/s. Sin embargo, en el canal del tramo, las velocidades alcanzan un valor de 1.30 m/s.

Gráfico 15. Velocidades en tramo de estudio

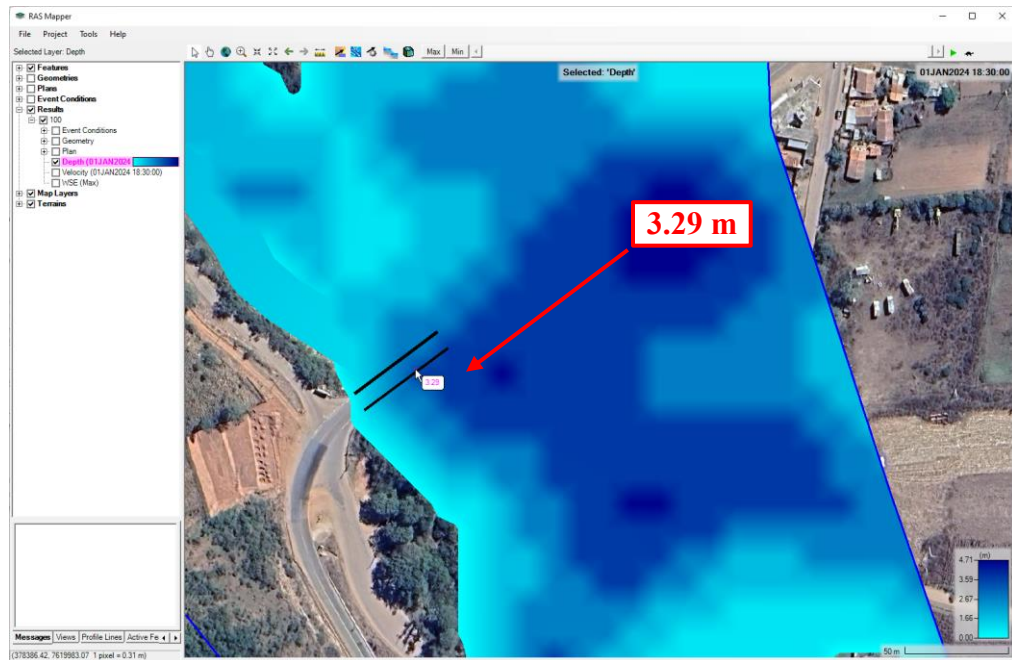


Fuente: Elaboración propia.

6.3 Tirante en el estribo izquierdo del puente

El tirante máximo que se registró en el estribo izquierdo del puente fue de 3.29 metros.

Gráfico 16. Tirante en el estribo izquierdo del puente

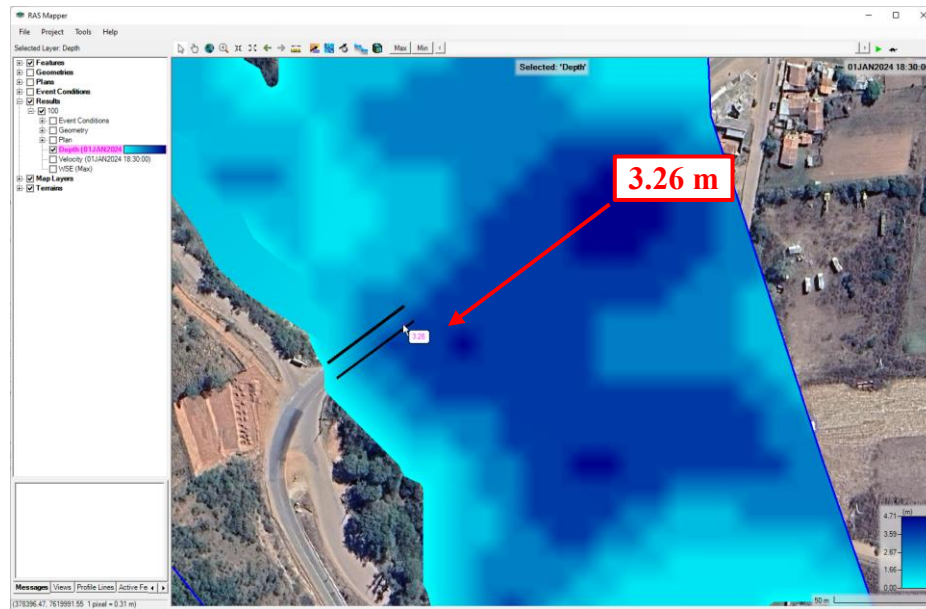


Fuente: Elaboración propia.

6.4 Tirante en el estribo derecho del puente

El tirante máximo que se registró en el estribo derecho del puente fue de 3.26 metros.

Gráfico 17. Tirante en el estribo derecho del puente



Fuente: Elaboración propia.

6.5 Tirante en el pilar del puente

El tirante máximo que se registró cerca del pilar del puente fue de 3.11 metros.

Gráfico 18. Tirante en el pilar del puente



Fuente: Elaboración propia.

Este valor se aproxima al medido en el puente Salinas. El valor calculado es de 3.29 metros, mientras que la marca más alta registrada en el puente es de 3.40 metros.

Fotografía 5. Marca alta de agua en el puente



Fuente: Elaboración propia.

7 Resumen

En la siguiente tabla se resumen los tirantes calculados por HEC-RAS para tres ubicaciones dentro del puente: uno en el estribo izquierdo, otro en el pilar del tablero del puente y el tercero en el estribo derecho.

Tabla 3. Resumen de los tirantes

Tirantes calculados en el puente Salinas de Entre Ríos		
Periodo de retorno de 100 años (1%)		
Perfil	Caudal máximo m³/segundo	Valor del tirante
Estribo izquierdo del puente	255.5	3.29
Estribo derecho del puente	255.5	3.26
Tirante en el pilar del puente	255.5	3.11

Fuente: Elaboración propia.