

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA
FACULTAD DE INGENIERÍA
Escuela Académico Profesional de Ingeniería Hidráulica



TESIS

**“ZONIFICACIÓN DE ÁREAS INUNDABLES EN EL CENTRO POBLADO DE
POLLOC OCASIONADO POR AVENIDAS EXTRAORDINARIAS DEL RIO LA
ENCAÑADA-CAJAMARCA”**

Para Optar el Título Profesional de
INGENIERO HIDRÁULICO

Presentado por:

Bach. CARUANAMBO RUDAS EDWAR PAÚL

Asesor:

Dr. Ing. GASPAR V. MENDEZ CRUZ

Cajamarca - Perú
2023

AGRADECIMIENTO

De manera especial a Dios que siempre está apoyando en los momentos desesperantes, a mi querida Madre por el coraje y esfuerzo para sacar adelante a sus hijos, a mis Hermanos por todo su apoyo incondicional y sincero; y en especial a mi hermosa esposa e hijos por todo su amor, comprensión y apoyo oportuno.

A todos ellos, mi eterna gratitud.

DEDICATORIA

El esfuerzo, sacrificio, unión y humildad prevalece en nuestra familia por lo que este logro está dedicado a toda mi familia: Padre Alindor en el cielo y mi Querida Madre Rosa.

A mis Hermanos Vila, Nancy, Chio, Mi Peche, Jhony, Alex y Omar por todo su cariño y apoyo incondicional.

A mi esposa Gloria, por toda su comprensión y paciencia para poder avanzar de a pocos y lograr muchas cosas juntos.

A mi hijo Andy mi rey y mis hijas hermosas Ariana y Aricel, mi mayor proyecto.

¡Gracias a ustedes!

ÍNDICE DE CONTENIDO

	Pág.
AGRADECIMIENTO.....	i
DEDICATORIA.....	ii
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	iii
LISTA DE TABLAS.....	vi
LISTA DE FIGURAS	vii
DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS.	ix
RESUMEN	xi
ABSTRACT	xii
CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN	13
1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	13
1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	14
1.3. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	14
1.4. ALCANCE O LIMITACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	15
1.5. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	15
CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO.....	16
2.1. ANTECEDENTES TEÓRICOS DE LA INVESTIGACIÓN	16
2.2. BASES TEÓRICAS	17
2.2.1. ASPECTOS GENERALES	17
2.2.1.1. <i>Inundación</i>	17
2.2.1.2. <i>Tipos de flujos de lodos y escombros</i>	18
2.2.1.3. <i>Composición de los flujos de lodos y escombros</i>	20
2.2.1.4. <i>Factores que desencadenan los flujos de detritos</i>	22
2.2.1.5. Reología de los flujos de escombros	23
2.2.2. MODELAMIENTO HIDROLOGICO.....	24
2.2.2.1. Parámetros de Forma	24
2.2.2.2. Parámetros de Relieve	26
2.2.2.3. Parámetros de Drenaje.....	27

2.2.3.	TIEMPO DE RETORNO	28
2.2.3.1.	<i>Criterios económicos</i>	28
2.2.3.2.	<i>Criterios usuales</i>	28
2.2.4.	TIEMPO DE CONCENTRACIÓN.....	29
2.2.5.	ANÁLISIS DE FRECUENCIAS	29
2.2.6.	TRÁNSITO DE AVENIDAS.....	31
2.2.6.1.	<i>Método de Muskingum</i>	32
2.2.7.	CAUDALES MÁXIMOS.....	33
2.2.8.	MODELAMIENTO HIDRÁULICO	33
2.2.8.1.	<i>Modulo hidrodinámico</i>	33
CAPÍTULO III MATERIALES Y MÉTODOS		40
3.1	UBICACIÓN.....	40
3.1.1.	UBICACIÓN POLÍTICA.....	40
3.1.2.	UBICACIÓN HIDROGRÁFICA.....	41
3.3	INFORMACIÓN BÁSICA	42
3.3.1.	MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN	42
3.3.2.	DEFINICIÓN DE SUBCUENCAS	43
3.3.3.	INFORMACIÓN PLUVIOMÉTRICA	44
3.3.4.	TOPO-BATIMETRÍA.....	46
3.3.5.	AFORO Y HUELLAS HÍDRICAS	47
3.4	ANÁLISIS HIDROLÓGICO	49
3.4.1.	PARÁMETROS GEOMORFOLÓGICOS DE LA CUENCA	50
3.4.2.	ANÁLISIS ESTADÍSTICOS DE DATOS PLUVIOMÉTRICOS	55
3.4.3.	ANÁLISIS DE FRECUENCIA Y AJUSTE A UN MODELO DE DISTRIBUCIÓN.....	58
3.4.4.	HIETOGRAMA DE DISEÑO	59
3.4.5.	CURVA NÚMERO	62
3.4.6.	TRÁNSITO DE AVENIDAS.....	65
3.5	SIMULACIÓN HIDRÁULICA.....	70
CAPÍTULO IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN		74

4.1	MODELAMIENTO HIDROLÓGICO.....	74
4.1.1	CARACTERIZACIÓN DEL TRAMO DE RÍO ESTUDIADO	74
4.1.2	CARACTERIZACIÓN DE LAS ÁREAS INUNDABLES	74
4.1.3	PARÁMETROS GEOMORFOLÓGICOS	76
4.1.4	DISTRIBUCIÓN DE FRECUENCIAS.....	77
4.1.5	CURVA NÚMERO	77
4.1.6	CAUDALES MÁXIMOS.....	78
4.2	MODELAMIENTO HIDRÁULICO Y EVALUACIÓN DE ÁREAS INUNDABLES.....	78
4.2.1	RESULTADOS – AGUAS CLARAS	79
4.2.2	RESULTADOS - FLUJOS HIPERCONCENTRADOS	81
4.2.2.1	<i>Áreas de Inundación y velocidades</i>	<i>81</i>
4.2.2.2	<i>Perfil Longitudinal</i>	<i>85</i>
4.2.2.3	<i>Secciones Transversales.....</i>	<i>90</i>
4.2.3	IDENTIFICACIÓN DE ZONAS CRÍTICAS	96
4.3	MEDIDAS DE PREVENCIÓN	100
CAPÍTULO V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		101
5.1	CONCLUSIONES.....	101
5.2	RECOMENDACIONES.....	102
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		103
ANEXOS.....		105

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Formas de cuencas hidrográficas	25
Tabla 2. Periodos de retorno usuales	29
Tabla 3. Valores críticos d para la prueba Kolmogorov – Smirnov	31
Tabla 4. Ubicación hidrográfica del tramo y del punto emisor.	41
Tabla 5. Datos de la estación meteorologica La Encañada	44
Tabla 6. Precipitación máxima en 24 horas Estación La Encañada (1998-2021).44	
Tabla 7. Mediciones realizadas en la campaña de aforo.	48
Tabla 8. Tiempo de recorrido del flujo.....	48
Tabla 9. Parámetros de forma de las subcuencas	50
Tabla 10. Estadísticos de muestra.....	55
Tabla 11. Estadísticos de logaritmos y límites permisibles de muestra.	56
Tabla 12. Precipitación máxima 24 horas histórica y corregida.....	57
Tabla 13. Prueba de Kolmogórov-Smirnov a un nivel de significancia de 5%	58
Tabla 14. Predicción de P _{máx} 24 horas para la distribución Gamma 2	59
Tabla 15. Número de curva ponderado.....	64
Tabla 16. Estimación del área en la Sección 1	66
Tabla 17. Estimación del área en la Sección 2	66
Tabla 18. Valores de los parámetros K y X.....	68
Tabla 19. Uso de suelo para el río La Encañada.	71
Tabla 20. Parámetros de forma de la cuenca	76
Tabla 21. Prueba de Kolmogórov-Smirnov a un nivel de significancia de 5%	77
Tabla 22. Número de curva ponderado.....	77
Tabla 23. Caudales máximos	78
Tabla 24. Rango de los niveles de peligrosidad.....	79
Tabla 25. Zonificación de áreas inundables por peligrosidad, TR 10 años.....	96
Tabla 26. Zonificación de áreas inundables por uso de suelo, TR 10 años.....	97
Tabla 27. Zonificación de áreas inundables por peligrosidad, TR 50 años.....	98
Tabla 28. Zonificación de áreas inundables por uso de suelo, TR 50 años.....	98
Tabla 29. Zonificación de áreas inundables por peligrosidad, TR 100 años.....	99
Tabla 30. Zonificación de áreas inundables por uso de suelo, TR 100 años.....	99
Tabla 31. Zonificación de áreas inundables por peligrosidad, TR 200 años.....	100
Tabla 32. Zonificación de áreas inundables por uso de suelo, TR 200 años.....	100

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Relación entre el esfuerzo cortante y la tasa de deformación.....	19
Figura 2. Esquema de flujo de detritos	20
Figura 3. Clasificación de flujos según Meunier.....	20
Figura 4. Clasificación de flujos según Coussot.	21
Figura 5. Clasificación de flujos según Coussot y Meunier.	21
Figura 6. Flujo de detritos.....	22
Figura 7. Curvas de coherencia para fluidos no newtonianos.....	23
Figura 8. Esquema de curva hipsométrica y de frecuencia de altitudes	26
Figura 9. Costos anuales vs periodos de retorno.	28
Figura 10. Efecto del tránsito de crecientes a lo largo de un río o canal.	31
Figura 11. Representación de los términos en la Ecuación de Energía	36
Figura 12. Asignación del coeficiente de rugosidad el Manning.	37
Figura 13. Ventana de las condiciones de contorno en HEC RAS.....	38
Figura 14. Metodología de flujos no newtonianos en HEC RAS	38
Figura 15. Ventana de configuración de parámetros de simulación.....	39
Figura 16. Ubicación política del tramo en estudio.	40
Figura 17. Río La Encañada.....	41
Figura 18. Modelo de elevación digital de la cuenca	42
Figura 19. Subdivisión de cuenca del río La Encañada	43
Figura 20. Pmáx 24 horas (1998-2021) en la estación La Encañada	45
Figura 21. Drone Phantom 4 Pro.....	46
Figura 22. Drone Phantom 4 Pro.....	46
Figura 23. Modelo Digital de Terreno	47
Figura 24. Sección del cauce, aguas arriba del punto de aforo.	47
Figura 25. Evidencias de las huellas hídricas	49
Figura 26. Mapa de pendientes de la cuenca del río La Encañada	51
Figura 27. Curva hipsométrica de la cuenca del río La Encañada	52
Figura 28. Frecuencia de altitudes de la cuenca del río La Encañada.....	53
Figura 29. Cauces principales de la cuenca del río La Encañada.....	54
Figura 30. Perfil longitudinal del río La Encañada.	55
Figura 31. Análisis de datos atípicos de los datos de precipitación.	56
Figura 32. Hietograma de tormenta de diseño para $Tr=2.2$ años.....	60
Figura 33. Hietograma de tormenta de diseño para $Tr=10$ años.....	60
Figura 34. Hietograma de tormenta de diseño para $Tr=50$ años.....	61
Figura 35. Hietograma de tormenta de diseño para $Tr=100$ años.....	61
Figura 36. Hietograma de tormenta de diseño para $Tr=200$ años.....	62
Figura 37. Número de curva para la cuenca en condiciones húmedas.....	63
Figura 38. Cobertura vegetal de la cuenca del río La Encañada.	64
Figura 39. Presencia de árboles y casas en la cuenca del río La Encañada.	65

Figura 40. Esquema hidrológico del río La Encañada	69
Figura 41. Hidrograma asociado al periodo de retorno de 100 años.	69
Figura 42. Modelo Digital de Terreno del río La Encañada.....	70
Figura 43. Uso de suelo para el río La Encañada.....	71
Figura 44. Condiciones de entrada y salida.....	72
Figura 45. Generación de la malla computacional.....	73
Figura 46. Viviendas expuestas a inundaciones del río La Encañada.	75
Figura 47. Casas y pastizales.....	75
Figura 48. Hidrograma asociado al periodo de retorno de 100 años.	78
Figura 49. Tirantes máximos, TR de 100 años – Aguas claras.....	79
Figura 50. Velocidades máximas, TR de 100 años – Aguas claras	80
Figura 51. Tirantes máximos del flujo hiperconcentrado, TR 10 años	81
Figura 52. Velocidades máximas del flujo hiperconcentrado, TR 10 años	82
Figura 53. Tirantes máximos del flujo hiperconcentrado, TR 50 años	82
Figura 54. Velocidades máximas del flujo hiperconcentrado, TR 50 años	83
Figura 55. Tirantes máximos del flujo hiperconcentrado, TR 100 años	83
Figura 56. Velocidades máximas del flujo hiperconcentrado, TR 100 años.	84
Figura 57. Tirantes máximos del flujo hiperconcentrado, TR 200 años	84
Figura 58. Velocidades máximas del flujo hiperconcentrado, TR 100 años.	85
Figura 59. Eje del río y secciones.....	86
Figura 60. Perfil de flujo hiperconcentrado 0+000 – 0+250m.....	87
Figura 61. Perfil de flujo hiperconcentrado 0+250 – 0+500m.....	87
Figura 62. Perfil de flujo hiperconcentrado 0+500 – 0+750m.....	88
Figura 63. Perfil de flujo hiperconcentrado 0+750 – 1+000m.....	88
Figura 64. Perfil de flujo hiperconcentrado 1+000 – 1+200m.....	89
Figura 65. Perfil de flujo hiperconcentrado para TR 100 años.	89
Figura 66. Sección Transversal 0+100m	90
Figura 67. Sección Transversal 0+200m	90
Figura 68. Sección Transversal 0+300m.	91
Figura 69. Sección Transversal 0+400m	91
Figura 70. Sección Transversal 0+500m.	92
Figura 71. Sección Transversal 0+600m.	92
Figura 72. Sección Transversal 0+700m.	93
Figura 73. Sección Transversal 0+800m.	93
Figura 74. Sección Transversal 0+900m.	94
Figura 75. Sección Transversal 1+000m	94
Figura 76. Sección Transversal 1+100m	95
Figura 77. Sección Transversal 1+200	95
Figura 78. Áreas inundables por peligrosidad, TR de 10 años.	96
Figura 79. Áreas inundables por peligrosidad, TR de 50 años.	97
Figura 80. Áreas inundables por peligrosidad, TR de 100 años.	98
Figura 81. Áreas inundables por peligrosidad, TR de 200 años.	99

DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS.

Parámetros morfométricos: El análisis de las características morfométricas y funcionales de una cuenca hidrográfica a través de parámetros de forma, relieve y red de drenaje, es básico en la modelación hidrológica para determinar el movimiento y captación del agua de lluvia (Gaspari et al, 2009).

Precipitación: La precipitación incluye la lluvia, la nieve y otros procesos mediante los cuales el agua cae a la superficie terrestre, tales como granizo y nevisca. La formación de precipitación requiere la elevación de una masa de agua en la atmósfera de tal manera que se enfríe y parte de su humedad se condense (Chow, V. (2000).

Período de retorno: es el promedio del número de años que han de pasar para que una determinada severidad sea igualada o excedida. Se calcula por medio de la siguiente expresión matemática: $T=1/P$ (Ayala-Carcedo y Olcina, 2002).

Probabilidad: Se refiere a un período de tiempo, esto es, la probabilidad anual de que una determinada peligrosidad sea excedida. Es lo contrario al período de retorno: $P_{excedencia}=1/Tr$ (Ayala-Carcedo y Olcina, 2002).

Fluidos newtonianos: Es un fluido cuya viscosidad puede considerarse constante en el tiempo. Para un fluido Newtoniano, la relación entre el esfuerzo cortante y la tasa de deformación (gradiente de velocidades) es lineal (Cotos, 2019).

Fluidos no newtonianos: Los fluidos no-Newtonianos comprenden en general mezclas complejas muy viscosas. Dentro de este tipo de fluido (fluido no-Newtoniano) se analizan los flujos de lodos o escombros. (Cotos, 2019).

Hidrograma: Es la representación gráfica de las descargas instantáneas (Q) de un curso de agua en función del tiempo (t), cuya función matemática responde a $Q=f(t)$. Chow et al, indican que el hidrograma es una expresión integral de las características fisiográficas y climáticas que rigen las relaciones entre la lluvia y el escurrimiento de una cuenca de drenaje particular (Chow et al., 1994).

HEC-HMS Es un modelo agregado debido a que el alcance espacial se limita a un punto, cada unidad (subcuenca) es tratada como un promedio ponderado de la superficie real. Es un programa libre de acceso gratuito en la web, que permite simular la transformación de lluvia histórica o hipotética en escurrimiento, a través de un sistema que integra diferentes métodos hidrológicos ya sea concentrados o distribuidos para el tránsito de caudales. Esta particularidad le otorga gran flexibilidad ya que permite combinar diferentes rutinas obteniendo así una mayor aproximación a la realidad. (Disponible en: www.hec.usace.army.mil/software/hech-hms/.)

SIG Es un sistema de hardware, software y procedimientos elaborados para facilitar la obtención, gestión, manipulación, análisis, modelado, representación y salida de datos espacialmente referenciados, para resolver problemas complejos de planificación y gestión (1990, Disponible en <http://www.ncgia.ucsb.edu/>).

HEC-RAS Está diseñado para realizar cálculos hidráulicos unidimensionales y bidimensionales para una red completa de canales naturales y construidos. contiene varios componentes de análisis de ríos para: (1) cálculos del perfil de la superficie del agua de flujo constante; (2) simulación de flujo no estacionario unidimensional y bidimensional; (3) cálculos de transporte de sedimentos de límite móvil; y (4) análisis de la calidad del agua. (Disponible en <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/features.aspx>).

RESUMEN

El presente estudio tiene como objetivo principal la zonificación de áreas a ser inundadas en la parte baja de centro poblado de Polloc ocasionado por avenidas extraordinarias del río La Encañada-Cajamarca. La zona de estudio comprende un tramo de río de 1200 m y un área de drenaje de 56.43 km². Para obtención de caudales se ha utilizado la estación meteorológica convencional La Encañada que tiene una longitud de registros de 24 años, para el tránsito hidrológico se ha utilizado el método de Muskingum con parámetro $X=0.33$ y $K=0.93$ obtenido a partir de los datos medidos en campo del tramo de estudio, los caudales máximo obtenidos son 60.5, 87, 97.8, 108.2 m³/s, para períodos de retorno de 10, 50, 100 y 200 años respectivamente, finalmente se ha utilizado el modelo hidráulico bidimensional HEC RAS (módulo de flujo no newtoniano) para obtener el mapa de tirantes y velocidades, a partir de estos resultados y con ayuda de las herramientas del sistema de información geográfica (SIG), se identificó y cuantifico las áreas inundables según el nivel de peligrosidad. El centro poblado de Polloc tiene afectación del tipo peligrosidad baja con extensiones de 10.10 ha, 10.65 ha, 10.83 ha y 10.97 ha para periodos de retorno de 10, 50, 100 y 200 respectivamente.

Palabras Claves: Caudales Máximos, Modelamiento Hidrológico e Hidráulico, zonificar, Periodo de Retorno, Hec-Ras, SIG, Áreas Inundables.

ABSTRACT

The study has as its main objective the zoning of areas to be flooded in the lower part of the town center of Polloc caused by extraordinary avenues of the La Encañada-Cajamarca river. The study area includes a 1200 m stretch of river and a drainage area of 56.43 km². To obtain flows, the conventional meteorological station La Encañada has been used, which has a record length of 24 years. For hydrological transit, the Muskingum method has been used with parameter $X=0.33$ and $K=0.93$ obtained from the measured data. In the field of the study section, the maximum flows obtained are 60.5, 87, 97.8, 108.2 m³/s, for return periods of 10, 50, 100 and 200 years respectively. Finally, the two-dimensional hydraulic model HEC RAS (module of non-Newtonian flow) to obtain the map of depths and velocities, from these results and with the help of the tools of the geographic information system (GIS), the floodable areas were identified and quantified according to the level of danger. The Polloc populated center has a low hazard type affectation with extensions of 10.10 ha, 10.65 ha, 10.83 ha and 10.97 ha for return periods of 10, 50, 100 and 200 respectively

Keywords: Maximum Flows, Hydrological and Hydraulic Modeling, zoning, Return Period, Hec-Ras, GIS, Floodplains.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

Perú se encuentra situado en una región afectada por diversos fenómenos naturales que traen como consecuencias pérdidas económicas y lamentablemente hasta pérdidas de vidas humanas.

Cajamarca es una de las ciudades que ha sido afectado por avenidas extraordinarias por lo que se debe realizar estudios sobre los riesgos de inundación de las cuencas bajas de los diferentes ríos frente a fenómenos pluviométricos extraordinarios.

Se tiene el caso del aprovechamiento del recurso hídrico donde los estudios de inundación hacen parte importante de la planificación hidrológica, esto permitirá diseñar las diferentes estructuras de protección frente a posibles inundaciones asimismo la determinación de la viabilidad del uso de las llanuras en las inmediaciones de los ríos. En el río La Encañada, tramo zonas agrícolas del Valle de Polloc, el crecimiento poblacional y sus principales actividades de ingreso económico como la ganadería y agricultura son vulnerables a la presencia de fenómenos pluviométricos extraordinarios, por lo que es importante contar con un sistema de contingencia y así poder contrarrestar sus efectos. Sin embargo, aún no se tiene estudios que permitan zonificar las áreas inundables teniendo en cuenta el alto riesgo de inundación en la cuenca baja del río Encañada, parte baja del Centro Poblado de Polloc distrito de La Encañada Provincia y departamento de Cajamarca, frente a fenómenos pluviométricos extraordinarios.

1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los daños en los entornos urbanos dada la concentración de población e infraestructura son más intensos, costosos y difíciles de manejar. Según la Oficina de las Naciones Unidas para la reducción de Riesgo de desastres, indica que son

250 millones de personas en promedio que han sido afectados cada año por las inundaciones durante los últimos años y 40 mil millones de dólares americanos es la cifra que se estima en pérdidas económicas en los años 1998 y 2010. En el Perú el 29% de los fenómenos que desencadenan emergencias entre 1995 y 2005 fueron inundaciones.

Según el instituto nacional de Defensa Civil en el INFORME DE EMERGENCIA N°145-11FEB 2012/COEN-INDECI/01:30 HORAS (Informe N° 06), más de 14 zonas de la Ciudad de Cajamarca han sido afectadas por Fenómenos Hidrometeorológicos; ocasionando 146 personas damnificadas, 77 afectadas, 6 heridas y 2 fallecidas, así mismo se indica que se tiene 51 viviendas colapsadas, 18 viviendas afectadas y más de 50 Has de cobertura natural afectadas. Cabe mencionar que este informe solo data de los meses de enero y febrero del año 2012.

En el valle de Polloc las principales actividades son el turismo, ganadería y agricultura, las mismas que son vulnerables a inundaciones del río La Encañada durante los fenómenos pluviométricos extraordinarios

1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Alto riesgo de Inundación en la cuenca baja del Río La Encañada, conlleva a realizar la siguiente interrogante ¿Cuáles son las áreas inundadas en la parte baja del Centro poblado de Polloc, a orillas del río La Encañada, ocasionado por avenidas extraordinarias?

1.3. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

Actualmente no se tiene precisión en cuánto incrementa los tirantes y/o velocidades en un tramo de río cuando se considera como flujo hiperconcentrados. Este estudio permitirá identificar y zonificar áreas de inundación de la cuenca del río La

Encañada, esta información geoespacial servirá para plantear alternativas de protección contra inundaciones y afectaciones a los sistemas ecológicos, socioeconómicos y humanos.

1.4. ALCANCE O LIMITACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

La presente investigación considera aproximadamente un tramo de 1.2 km del río La Encañada, en esta zona de estudio es limitante la información hidrométrica (caudales).

1.5. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

OBJETIVO GENERAL

Zonificar áreas a ser inundadas en el tramo de estudio del río la encañada, ocasionado por avenidas extraordinarias con flujos hiperconcentrados.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar la cuenca colectora del río La Encañada.
- Caracterizar hidráulicamente el tramo del río en estudio en 1,200 m.
- Caracterizar las áreas inundables de acuerdo a la peligrosidad.
- Determinar caudales máximos para los períodos de retorno de 10, 50, 100 y 200 años respectivamente.
- Identificar puntos críticos de desborde para los periodos de retorno de 10, 50, 100 y 200 años respectivamente.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. ANTECEDENTES TEÓRICOS DE LA INVESTIGACIÓN

En la tesis “Diseño y estudio de defensas fluviales en la ribera sur del río blanco en Chaitén” (Rute, 2014) La presente memoria busca encontrar una solución a la problemática presentada en la comuna de Chaitén, tras el embancamiento del Río Blanco. Se estudió la situación actual que existe y se presenta una solución para proteger la ribera sur del río y así evitar que éste desborde y comprometa la seguridad de la gente que aún vive ahí. Para desarrollar el siguiente estudio, se desarrollaron modelos hidráulicos y se hizo un estudio de suelo.

En la tesis “Identificación de áreas inundables mediante modelamiento hidráulico del río Chonta tramo de la Alameda La Chonta distrito de los Baños del Inca” (Villena, 2018), El objetivo de la tesis es identificar las áreas inundables en la zona urbana del Distrito de los Baños del Inca, mediante modelamiento Hidráulico del río Chonta en el tramo que atraviesa la Alameda la Chonta, el puente Chonta y el Puente Atahualpa en presencia de fenómenos pluviométricos extraordinarios. Se recopiló información cartográfica y topográfica de la cuenca baja del río Chonta y se caracterizó el tramo del río que atraviesa la alameda la Chonta siendo este un río maduro, recto, gravoso, de pendiente baja, y que tiene dos grados de libertad. También se modeló hidrológicamente empezando por la caracterización geomorfológica de la cuenca del río Chonta teniendo como punto de concentración de la cuenca el Puente Atahualpa, obteniendo un área de 349.7 Km² y una altura media de la cuenca de 3484.510 msnm, luego se transfirió las intensidades máximas a la altura media de la cuenca, después se simuló caudales máximos de acuerdo a la vida útil de los componentes y el riesgo de falla de las estructuras, mediante el método Racional. Se estableció tres escenarios posibles con caudales del orden de 369.62 m³/s, 387.64 m³/s y 396.53 m³/s. Se modeló hidráulicamente

el río Chonta a través del programa Iber, obteniendo las áreas inundables y el grado de peligrosidad de las mismas.

En la tesis “Zonificación de áreas inundables del caserío El Molino - Huambocancha Baja ocasionado por avenidas extraordinarias del río Mashcón - Cajamarca” (Nizama, 2018), Esta investigación tiene como objetivo principal identificar y zonificar las áreas inundables del caserío el Molino -CP Huambocancha Baja- Cajamarca para ello, se estudió la incidencia de las intensidades máximas anuales en la generación de caudales máximos, para la cuenca del río Mashcón tomando como punto de descarga el Puente Chinchimachay - C.P. Huambocancha Baja - Cajamarca, con la finalidad de identificar las zonas vulnerables frente a inundaciones en el Caserío el Molino- Huambocancha Baja- Cajamarca. Se analizó y pronosticó la información de lluvia mediante herramientas estadísticas para distintos periodos de retorno “T” (20.63; 40.75;101.12;201.74 y 402.98 años) asociados a la vida útil “N” de 5;10;25;50;100 años y riesgo de falla “J” del 22% de alguna estructura de protección frente a inundaciones.

2.2. BASES TEÓRICAS

2.2.1. ASPECTOS GENERALES

2.2.1.1. Inundación

Las inundaciones fluviales son los desastres naturales que mayor que impactan al ámbito socioeconómico. Los mayores desastres por inundación han ocurrido en China, donde su población ha ocupado frecuentemente las riberas de los ríos (Lario y Bardají, 2016).

Las inundaciones naturales pueden ser de dos tipos: terrestres o litorales. Las terrestres se caracterizan por el anegamiento de territorios por aguas dulces en el interior de los continentes. Se pueden producir por diversas causas: desbordamiento de ríos; precipitaciones intensas; topografía, tamaño y forma de la cuenca hidrográfica; o tipo de suelo y vegetación que perjudica la velocidad de

escorrentía (Lario y Bardají, 2016). El riesgo de inundación se refiere a la situación potencial de pérdida o daño de personas, bienes o servicios, por lo que la exposición y vulnerabilidad debe valorarse tanto en su aspecto social como económico.

En cuanto a los estudios de los riesgos naturales, los aspectos de la vulnerabilidad son los menos trabajados, pues se suelen dedicar a la peligrosidad. Por lo que se refiere a la propia vulnerabilidad, el crecimiento de la población y su consecuente ocupación del territorio han estimulado que actualmente en el análisis de riesgo se preste más atención al estudio de la parte social (Olcina, 2009). Sin embargo, el conocimiento de los aspectos sociales de la vulnerabilidad sigue siendo escaso, al contrario que sus componentes físicos, que han sido cuantiosamente estudiados (Ruiz-Pérez y Grimalt, 2012). Se considera que este tipo de estudios son muy necesarios, pues pueden servir para reforzar la resiliencia de las sociedades.

2.2.1.2. Tipos de flujos de lodos y escombros

La hidráulica de los flujos de escombros o hidráulica torrencial, es el estudio de las avenidas torrenciales en la que el transporte de sólidos es tan grande que las nociones de hidráulica fluvial se desvanecen. La fase sólida influye en el flujo, es decir, no puede separarse el flujo de agua, por un lado, con sus ecuaciones de movimiento, y el transporte sólido por otro (Castillo, 2006).

En un flujo de lodos y escombros el caudal de lodo alcanzado es mayor que en un flujo de agua clara debido al aporte y transporte sólido. Un fluido es una sustancia que se deforma continuamente en el tiempo ante la aplicación de una presión o tensión tangencial sin importar la magnitud de ésta.

- **Fluidos newtonianos**

Es un fluido cuya viscosidad puede considerarse constante en el tiempo.

Para un fluido Newtoniano, la relación entre el esfuerzo cortante y la tasa de deformación (gradiente de velocidades) es lineal, como lo indica el caso (a).

- **Fluidos no newtonianos**

Es aquel cuya viscosidad varía con la temperatura, la presión y la tensión cortante que se le aplica. (Cotos, 2019)

Los fluidos no-Newtonianos comprenden en general mezclas complejas muy viscosas. Estos fluidos exhiben un comportamiento diferente, tal como se observa en los casos (b), (c) y (d). Dentro de este tipo de fluido (fluido no-Newtoniano) se analizan los flujos de lodos o escombros.

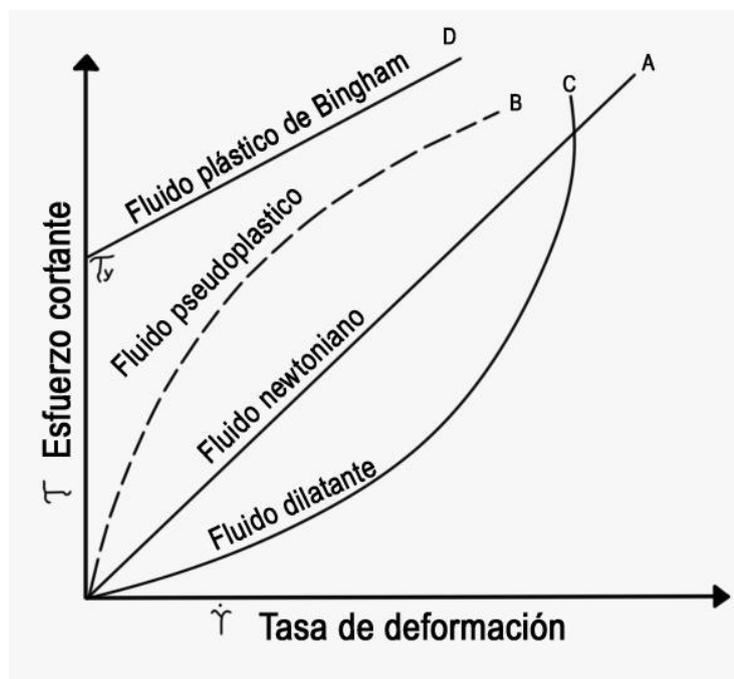


Figura 1. Relación entre el esfuerzo cortante y la tasa de deformación

Fuente: USACE, 2002

- **Lodos y escombros**

En los flujos de detritos los sedimentos gobiernan enteramente el flujo y el elemento agua es menos importante. El movimiento de los flujos de detritos se le puede asociar por lo regular como un “flujo turbulento de granos”. Este proceso no solicita la presencia de una fase gaseosa o líquida y el movimiento se produce por transferencia de momentum al colisionar las partículas o bloques que se mueven. Su conducta se aleja del modelo hidráulico particular. (Suárez, 2004)

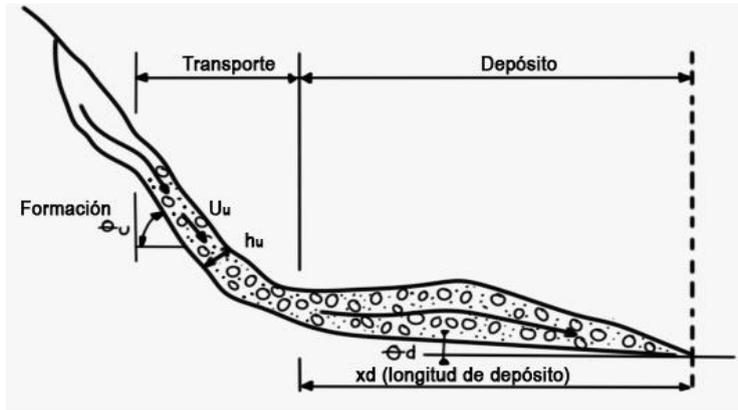


Figura 2. Esquema de flujo de detritos

Fuente: USACE, 2002

2.2.1.3. Composición de los flujos de lodos y escombros

El tamaño de partículas varía desde materiales finos hasta cantos rodados sostenidos (suspendidos) en una matriz viscosa. Por lo tanto, entre los principales componentes tenemos: el agua, la matriz fina y los granos gruesos. Meunier (1991) clasifica los flujos con una alta concentración y con pendientes que van desde los 30 a los 50% marcando el inicio de la formación de huaycos. La hidráulica fluvial como disciplina caería dentro del rango de pendientes naturales menores que el 2%.

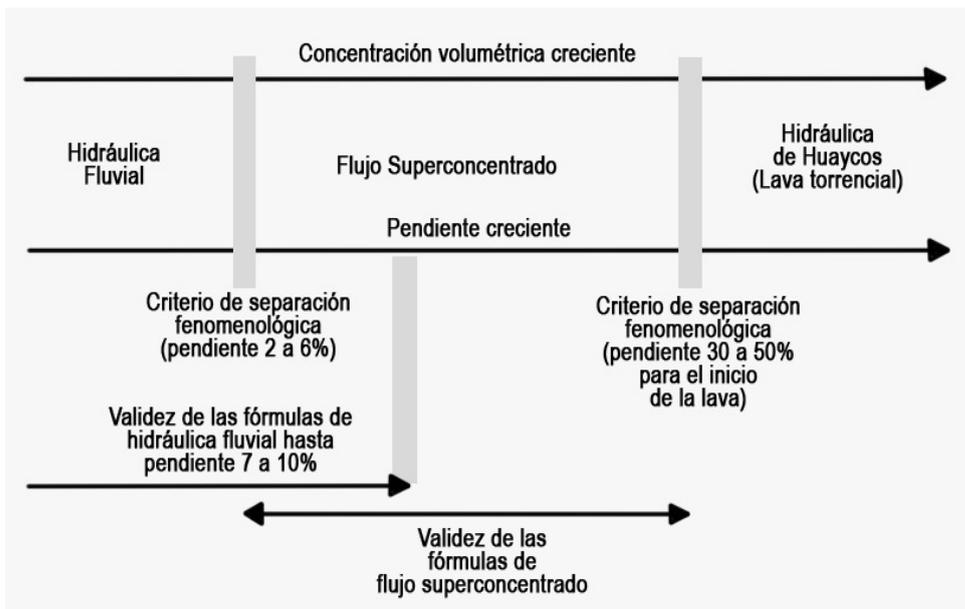


Figura 3. Clasificación de flujos según Meunier.

Fuente: Meunier, 1991.

Coussot (1997) clasifica los huaycos utilizando como parámetros la concentración y la granulometría del material sólido (ver Figura 4). El flujo torrencial, flujo hiperconcentrado, así como también los deslizamientos de suelos llegan a ser contemplados dentro de esta clasificación de flujos.

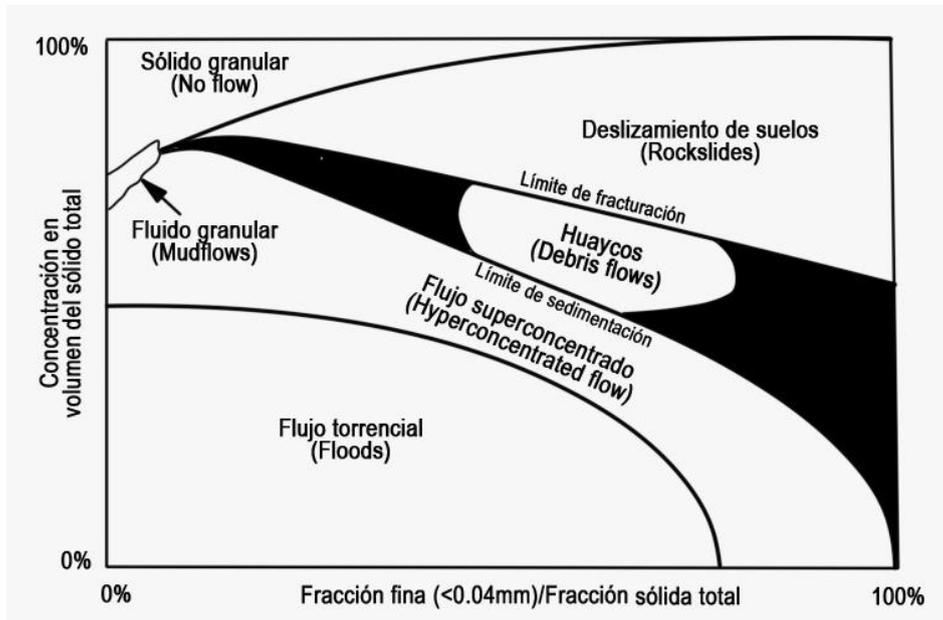


Figura 4. Clasificación de flujos según Coussot.

Fuente: Coussot, 1997

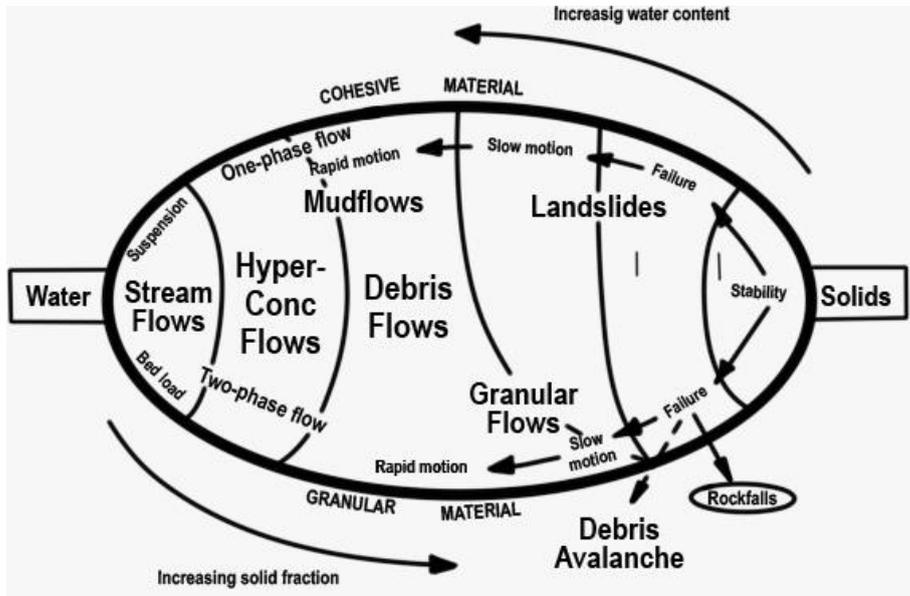


Figura 5. Clasificación de flujos según Coussot y Meunier.

Fuente: Coussot, 1997

2.2.1.4. Factores que desencadenan los flujos de detritos

El desplazamiento de los flujos de detritos se acciona con las lluvias, a causa de la pérdida de resistencia por el decrecimiento de la succión al saturarse el material o por el incremento de fuerzas causadas por el movimiento del agua subterránea (Collins y Znidarcic, 1997).

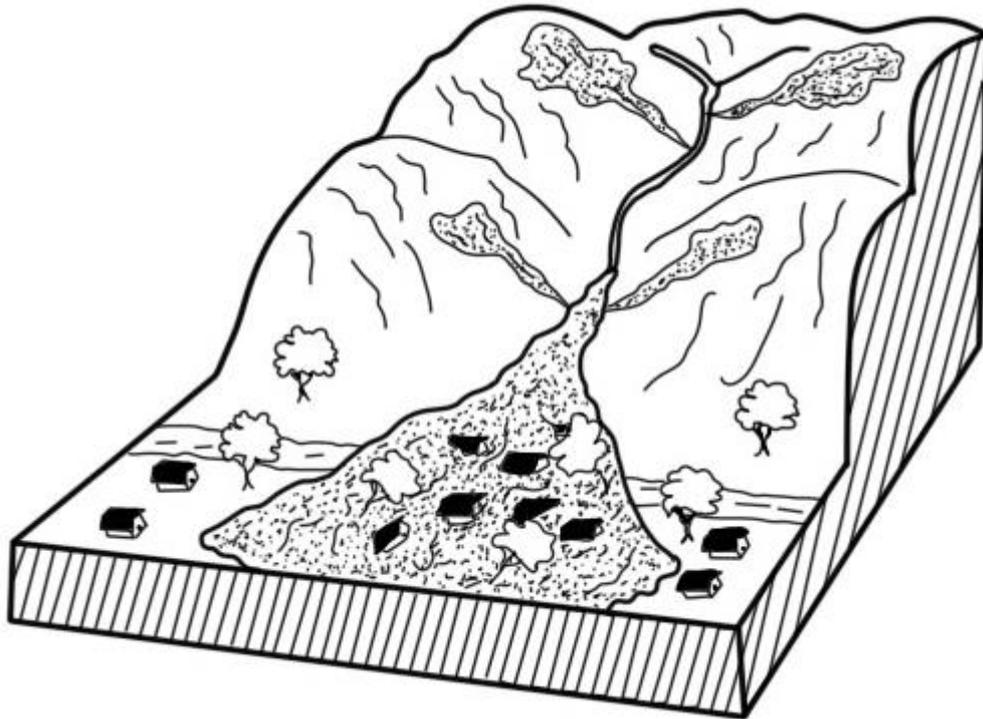


Figura 6. Flujo de detritos.

Fuente: Znidarcic, 1997

Según Castillo (2006), los factores que influyen en el tipo de flujo y que ayudan a definir la probabilidad de ocurrencia del flujo son:

- **Área de la cuenca de recepción:** A mayor área, mayor será la cantidad de agua que captará, y mayor el volumen del flujo.
- **Pendiente:** A mayor pendiente mayor será la velocidad del flujo, y habrá mayor posibilidad de erosión e inestabilidad de la zona.

- **Clima:** Donde se produzcan intensas precipitaciones se activará la quebrada y el flujo de escombros será el desenlace.
- **Tipo de suelo:** Depende del tipo del suelo (presencia de material fino y grueso), la capacidad para soportar el efecto erosivo, la permeabilidad, la cobertura vegetal que serán aportes para el flujo.

2.2.1.5. Reología de los flujos de escombros

La reología es la disciplina que busca aprender y relacionar la conducta de las deformaciones y la fluidez de la materia con los esfuerzos. (Escusa, 2016)

Escoger un modelo reológico adecuado definirá el comportamiento y las velocidades de los flujos de detritos.

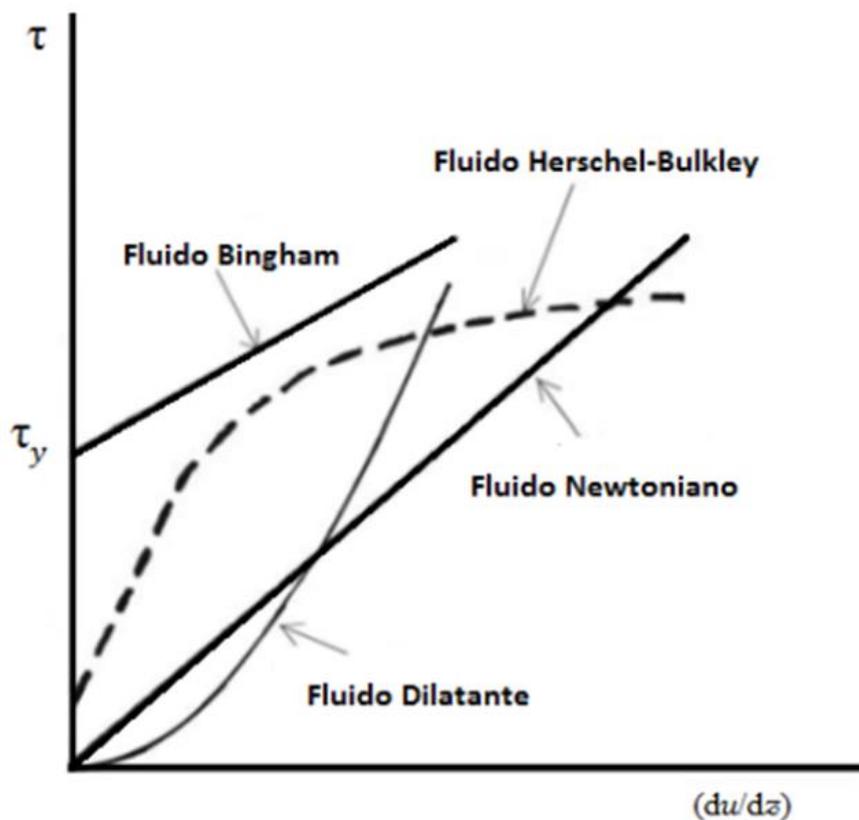


Figura 7. Curvas de coherencia para fluidos no newtonianos.

Fuente: Escusa, 2016

2.2.2. MODELAMIENTO HIDROLOGICO

(Gaspari et al. 2012) Nos describe los parámetros de forma de relieve y de drenaje y los cuales se detallan a continuación.

2.2.2.1. Parámetros de Forma

Perímetro: El perímetro es la medición de la línea envolvente de la cuenca hidrográfica, por la divisoria de aguas topográficas.

Longitud axial: La longitud axial, es la distancia existente entre la desembocadura y el punto más lejano de la cuenca. Es el mismo eje de la cuenca.

Área: Es la superficie encerrada por la divisoria de aguas. Su unidad de medida es kilómetro cuadrado.

Ancho promedio: Es la relación entre el área de la superficie de la cuenca y la longitud axial.

Longitud del cauce principal: Es la longitud definida con la sumatoria de las longitudes de todos los cursos de agua que drenan por la cuenca.

Factor de forma: Este factor adimensional que indica cómo se regula la concentración del escurrimiento superficial. Se expresa como la relación entre el ancho promedio de la cuenca y la longitud axial o longitud del río hasta su punto más alto. Manifiesta la tendencia de la cuenca hacia las crecidas. Cuando IF es similar a 1, representa una cuenca de forma redondeada. La cuenca con IF bajo, se caracteriza por ser una cuenca alargada, que con un colector de mayor longitud que la totalidad de los tributarios, estará sujeta a crecientes de menor magnitud. Una cuenca de forma triangular, con dos vértices en las cabeceras, afluentes de similar longitud y sincronismo en la llegada, provocará crecidas más significativas.

$$IF = \frac{A}{L^2} \quad (1)$$

Donde:

A = Área de la cuenca, en km²

L = Longitud axial, en km

Coeficiente de compacidad de Gravelius (K_c)

El límite define la forma y la superficie que abarca la cuenca vertiente, teniendo influencia sobre los escurrimientos y sobre la marcha del hidrograma resultante de una precipitación. El K_c es adimensional y permite relacionar el perímetro de la cuenca con el perímetro de un círculo de área equivalente al de la cuenca, y de esta manera representar esta característica.

$$K_c = \frac{0.28P}{\sqrt{A}} \quad (2)$$

Donde:

K_c = coeficiente de compacidad, sin dimensiones

P = perímetro, en km

A = Área de la cuenca, en km²

El K_c está relacionado estrechamente con el tiempo de concentración, que es el tiempo que tarda una gota de lluvia en moverse desde la parte más lejana de la cuenca hasta la salida. En este momento ocurre la máxima concentración de agua, puesto que están llegando las gotas de lluvia de todos los puntos de la cuenca. Según el valor que tome este coeficiente, la cuenca tendrá diferente forma.

Tabla 1. Formas de cuencas hidrográficas

Clase de geometría	Rango de clase	Forma de cuenca
K _c	K _c = 1	Redonda
K _c	K _c = 1.25	Oval redonda
K _c	K _c = 1.50	Oblonga
K _c	K _c ≥ 1.75	Rectangular-oblonga

Fuente: Gaspari et al. 2012

Su valor será mayor que la unidad y crecerá con la irregularidad de la forma de la cuenca. A medida que su K_c tiende a 1, es decir cuando tiende a ser redonda, la peligrosidad de la cuenca a las crecidas es mayor, porque las distancias relativas de los puntos de la divisoria con respecto a uno central, no presenta diferencias mayores y el tiempo de concentración se hace menor, por lo tanto, mayor será la posibilidad de que las ondas de crecidas sean continuas.

2.2.2.2. Parámetros de Relieve

Curva hipsométrica adimensional: Expresa el potencial evolutivo de la cuenca hidrográfica, por medio de un gráfico de dos ejes donde la ordenada es la Altura relativa (h/H) y la abscisa es Área relativa (a/A), donde h : Intervalo entre curvas de nivel (m), H : Desnivel total de la cuenca (m), A : Superficie total de la cuenca (ha) y a : Área entre curvas de nivel (ha). Su forma es sigmoideal, cóncava hacia arriba en la parte superior y convexa en la parte baja. El grado de sinuosidad es muy variable, igual que la pendiente en el punto de inflexión. Cuando las curvas hipsométricas presentan variaciones, ya sea por apartarse de las teóricas o por presentar más de un punto de inflexión, puede relacionarse con controles tectónicos o litológicos particulares.

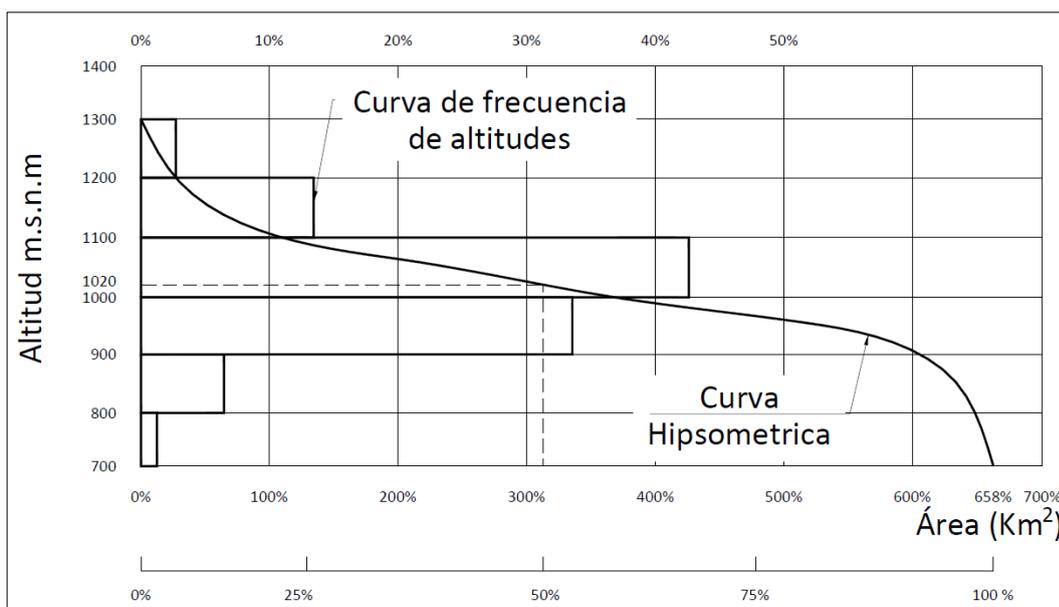


Figura 8. Esquema de curva hipsométrica y de frecuencia de altitudes

Pendiente media de la cuenca: El proceso de degradación a que se ve sometida una cuenca hidrográfica, al igual que el caudal máximo, está muy influenciados por la configuración topográfica, debido a que el poder erosivo se manifiesta en mayor o menor grado de acuerdo a los distintos grados de pendiente. Para determinar la pendiente media de la cuenca se utilizó el mapa topográfico y el modelo digital de elevación, cuyo procedimiento, se expresa a continuación.

$$PM = 100 \left[\frac{HL}{A} \right] \quad (3)$$

Donde:

PM = Pendiente media en %

H = Distancia vertical entre curvas medidas (equidistancia), en km

L = Longitud total de las curvas de nivel, en km

A = Superficie, en km²

2.2.2.3. Parámetros de Drenaje

Densidad de drenaje: Está definida para cada cuenca como la relación entre la suma de las longitudes de todos los cursos de agua que drenan por la cuenca con respecto al área de la misma. La densidad de drenaje caracteriza cuantitativamente la red hidrográfica de la cuenca, por medio del grado de relación entre el tipo de red y la clase de material predominante. Cabe mencionar que se denomina red hidrográfica a la totalidad drenaje natural, permanente o temporal, por el que fluye el escurrimiento superficial (2).

La densidad de drenaje fue establecida por Horton según el cociente entre la sumatoria de las longitudes de todos los cursos de agua que drenan por la cuenca y el área total de la cuenca (2).

Cuanto mayor sea la densidad del drenaje, más rápida será la respuesta de la cuenca frente a una tormenta, evacuando el agua en menos tiempo. En efecto, al ser la densidad de drenaje alta, una gota deberá recorrer una menor longitud de ladera, con una mayor velocidad de escurrimiento (2).

Pendiente media del cauce (J): Se deduce a partir del desnivel topográfico sobre

el cauce principal y la longitud del mismo, el cual se expresa en porcentaje. (2).

2.2.3. TIEMPO DE RETORNO

Es el tiempo promedio, en años, en que el valor del caudal pico de una creciente determinada es igual por lo menos una vez. A continuación, se describe los criterios de fijaciones del período de retorno:

2.2.3.1. Criterios económicos

La fijación del periodo de retorno puede ser llevada a cabo por medio de criterios económicos, tales como la comparación de los costos anuales de las obras con los daños producidos por crecientes. En la Figura 9 se muestra el análisis de costos para determinar el periodo de diseño

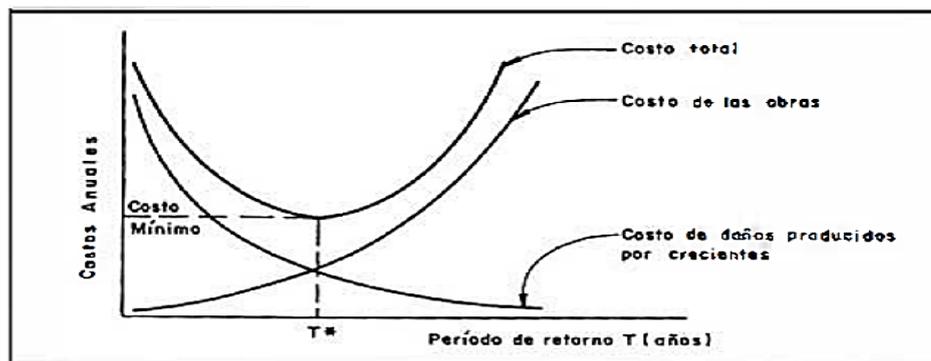


Figura 9. Costos anuales vs periodos de retorno.

2.2.3.2. Criterios usuales

En caso de que no se apliquen criterios económicos, la fijación del periodo de retorno se basa en criterios tales como: vida útil de la obra, tipo de estructura, facilidades de reparación y ampliación, y peligro de pérdidas humanas. Como criterios usuales se tienen los que aparecen en la tabla 2:

Tabla 2. Periodos de retorno usuales

Tipo de proyecto	Periodo de retorno (años)
Puentes y defensas ribereñas	100 a 140
Colectores de aguas de lluvias en ciudades, dependiendo del tipo de zona dentro de la ciudad	2 a 10
Alcantarillas para carreteras	1.1 a 5

2.2.4. TIEMPO DE CONCENTRACIÓN

Es el tiempo requerido por una gota para recorrer desde el punto hidráulicamente más lejano hasta la salida de la cuenca. Transcurrido el tiempo de concentración se considera que toda la cuenca contribuye a la salida. Como existe una relación inversa entre la duración de una tormenta y su intensidad (a mayor duración disminuye la intensidad), entonces se asume que la duración crítica es igual al tiempo de concentración t_c . Las fórmulas más comunes solo incluyen la pendiente, la longitud del cauce mayor desde la divisoria y el área.

Formula de Témez

$$T_c = 0.3 \left(\frac{L}{S^{0.25}} \right)^{0.75} \quad (4)$$

Donde:

T_c = tiempo de concentración (horas)

L = máxima longitud del recorrido (km)

S = pendiente media del cauce

2.2.5. ANÁLISIS DE FRECUENCIAS

El análisis de frecuencias tiene la finalidad de estimar precipitaciones, intensidades o caudales máximos, según sea el caso, para diferentes períodos de retorno, mediante la aplicación de modelos probabilísticos, los cuales pueden ser discretos o continuos. Este análisis se basa en las diferentes distribuciones de frecuencia usadas en análisis de eventos hidrológicos máximos. Las distribuciones de frecuencia más usuales, en el caso de eventos máximos son:

- Distribución Log-Normal (3 Parámetros)
- Distribución Gumbel
- Distribución Log Pearson III
- Distribución Gumbel Máximo y Mínimo
- Distribución Gamma (2 parámetros)
- Distribución Gamma (3 Parámetros)
- Distribución de Valor Extremo general (GEV)

Prueba de bondad de ajuste

Las pruebas de bondad de ajuste son pruebas de hipótesis que se usan para evaluar si un conjunto de datos es una muestra independiente de la distribución elegida.

- **Prueba Kolmogorov – Smirnov**

Método por el cual se comprueba la bondad de ajuste de las distribuciones, asimismo permite elegir la más representativa, es decir la de mejor ajuste. Esta prueba consiste en comparar el máximo valor absoluto de la diferencia D entre la función de distribución de probabilidad observada $F_0(x_m)$ y la estimada $F(x_m)$:

$$D = \max |F_0(x_m) - F(x_m)|$$

Con un valor crítico α que depende del número de datos y el nivel de significancia seleccionado (Tabla 3). Si $D < \alpha$, se acepta la hipótesis nula. La función de distribución de probabilidad observada se calcula como:

$$F_0(x_m) = 1 - \frac{m}{n+1} \quad (5)$$

Donde:

m = número de orden de dato x_m en una lista de mayor a menor

n = número total de datos

Tabla 3. Valores críticos d para la prueba Kolmogorov – Smirnov

Tamaño de la muestra	$\alpha = 0.10$	$\alpha = 0.05$	$\alpha = 0.01$
5	0.51	0.56	0.67
10	0.37	0.41	0.49
15	0.30	0.34	0.40
20	0.26	0.29	0.35
25	0.24	0.26	0.32
30	0.19	0.22	0.24
34	0.18	0.20	0.23
40	0.17	0.19	0.21
45	0.16	0.18	0.20

2.2.6. TRÁNSITO DE AVENIDAS

El tránsito de avenidas se define como el proceso de determinación progresiva en función del tiempo de la forma de una onda de creciente en los sucesivos puntos de un río o a través de un embalse. Para comprender esta definición, se tiene la , n donde se tiene un canal seco que recibe el hidrograma de entrada en A, que se caracteriza por tener un caudal pico muy alto y una duración corta, posteriormente, este volumen de agua pasará por los puntos B y C, cada vez con un hidrograma más laminado debido al recorrido del agua en el canal. Para canales naturales canal que se caracterizan por ser irregulares y tener resistencia alta, la configuración de la onda se modificará de manera significativa a medida que se mueve a lo largo del tramo.

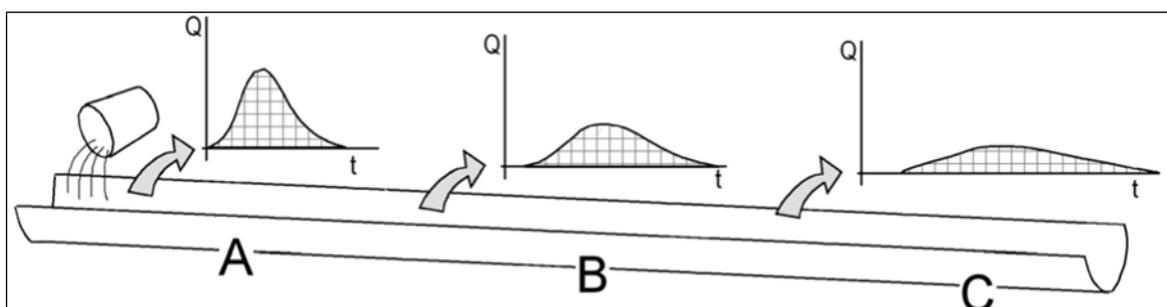


Figura 10. Efecto del tránsito de crecientes a lo largo de un río o canal.

2.2.6.1. Método de Muskingum

Es un método para calcular el hidrograma de una avenida en su tránsito por el cauce, teniendo en cuenta el efecto de laminación. Su nombre alude al río donde se utilizó por primera vez, en 1930. Este método tiene en cuenta dos parámetros, uno relacionado con la capacidad de almacenamiento (laminación) del cauce en cada tramo, de carácter adimensional, (X), y otro relacionado con el tiempo que tarda la onda de avenida en desplazarse por el tramo considerado, con unidades de "tiempo", (K). Parte de la consideración inicial de que el agua almacenada en un tramo, S, es proporcional al agua que entra I y al agua que sale O, de la forma (3):

$$S = K[XI + (1 - X) O] \quad (6)$$

Donde:

S = almacenamiento en el tramo considerado de un cauce

I = caudal de entrada en ese tramo

O = caudal de salida en ese tramo

K = parámetro que depende del almacenamiento en cuña, de manera que un valor de X=0 está asociado con un almacenamiento tipo embalse, mientras que un valor de X=0.5, corresponde a una cuña totalmente desarrollada.

Valores prácticos de X pueden tomarse entre: 0,2-0.35, 0.2 para tramos situados en la parte baja de la cuenca y valores mayores, para tramos situados en las cuencas altas.

Valor de K:

$$K = 0.18 * \left(\frac{\Delta x}{S^{0.25}} \right)^{0.76} \quad (7)$$

Donde:

Δx = distancia máxima, en km

S = pendiente máxima de la subcuenca

O = caudal de salida en ese tramo

Otra relación alternativa, es:

$$K=0.6 t_c \quad (8)$$

Donde:

t_c = tiempo de concentración, en hr

Según, los parámetros asumidos deben cumplir la siguiente relación (4):

$$\Delta t > \frac{2Kx}{n} \quad (9)$$

Donde:

Δt = es el incremento de tiempo que se utiliza para representar los resultados.

n = número de tramos ("subreaches") a utilizarse en el método de Muskingum

2.2.7. CAUDALES MÁXIMOS

El valor del caudal de avenidas extraordinario es necesario conocerlos a fin de diseñar defensas ribereñas, profundidad de socavación, etc. En muchos casos es suficiente el caudal máximo asociado a diferentes periodos de retorno y en otros casos se requiere disponer del hidrograma completo (flujo no permanente).

Los periodos de retorno usados son de 100 y 140 años para determinar el NAME y 500 años para estimar la profundidad de socavación.

2.2.8. MODELAMIENTO HIDRÁULICO

El Modelo hidráulico bidimensional HEC RAS v6.3 ha sido desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos (USACE), en la actualidad se ha convertido en una herramienta para protección contra movimiento de masas e inundaciones.

2.2.8.1. Modulo hidrodinámico

- **Hidrodinámica de flujo no estacionario 2D**

Las ecuaciones de Navier-Stokes describen el movimiento de fluidos en tres

dimensiones. En el contexto del modelado de canales e inundaciones, se imponen más simplificaciones. Un conjunto simplificado de ecuaciones son las ecuaciones de aguas poco profundas (SW). Se supone flujo incompresible, densidad uniforme y presión hidrostática y las ecuaciones se promedian según Reynolds para que el movimiento turbulento se aproxime usando la viscosidad de remolino. También se supone que la escala de longitud vertical es mucho más pequeña que las escalas de longitud horizontal. Como consecuencia, la velocidad vertical es pequeña y la presión es hidrostática, lo que lleva a la forma diferencial de las ecuaciones de SW derivadas en secciones posteriores.

En algunos flujos poco profundos, el término de gradiente de presión barotrópica (gravedad) y los términos de fricción del fondo son los términos dominantes en las ecuaciones de cantidad de movimiento y los términos inestables, de advección y viscoso pueden descartarse. La ecuación de cantidad de movimiento se convierte entonces en la forma bidimensional de la aproximación de onda de difusión. La combinación de esta ecuación con la conservación de la masa produce un modelo de una ecuación, conocido como la aproximación de onda difusiva de las ecuaciones de aguas poco profundas (DSW)

- **Transporte de sedimentos/cálculos de límites móviles.** Este componente del sistema de modelado está destinado a la simulación de cálculos de límites móviles/transporte de sedimentos unidimensionales y bidimensionales resultantes de la socavación y la deposición durante períodos de tiempo moderados a largos.

El potencial de transporte de sedimentos se calcula por fracción de tamaño de grano, lo que permite la simulación de clasificación y blindaje hidráulico. Las características principales incluyen la capacidad de modelar una red completa de arroyos, dragado de canales, varias alternativas de invasión y diques, y el uso de varias ecuaciones diferentes para el cálculo del transporte de sedimentos.

El modelo está diseñado para simular tendencias a largo plazo de socavación y deposición en un cauce fluvial que podrían resultar de la modificación de la

frecuencia y duración de la descarga y el nivel del agua, o de la modificación de la geometría del cauce. Este sistema se puede utilizar para evaluar la deposición en embalses, diseñar las contracciones de canales requeridas para mantener las profundidades de navegación, predecir la influencia del dragado en la tasa de deposición, estimar la máxima socavación posible durante grandes inundaciones y evaluar la sedimentación en canales fijos.

- **Ecuaciones**

El modelamiento se puede realizar con flujo permanente y flujo no permanente gradualmente variado. El primero está basado en la ecuación de energía unidimensional, mientras que el segundo se fundamenta en la ecuación de continuidad y la ecuación de conservación de momento.

- **Ecuación de la Energía.** Los perfiles de flujo son calculados mediante la ecuación de la energía entre dos secciones contiguas con un procedimiento iterativo llamado método del paso estándar.

$$Z_2 + Y_2 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} = Z_1 + Y_1 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} + h_e \quad (10)$$

Donde:

Z_1 y Z_2 = Son la elevación del cauce en la sección.

Y_1 y Y_2 = La elevación del agua en la sección.

V_1 y V_2 = Las velocidades promedias.

α_1 y α_2 = Coeficientes de velocidad.

g = Aceleración de la gravedad.

h_e = la pérdida de energía.

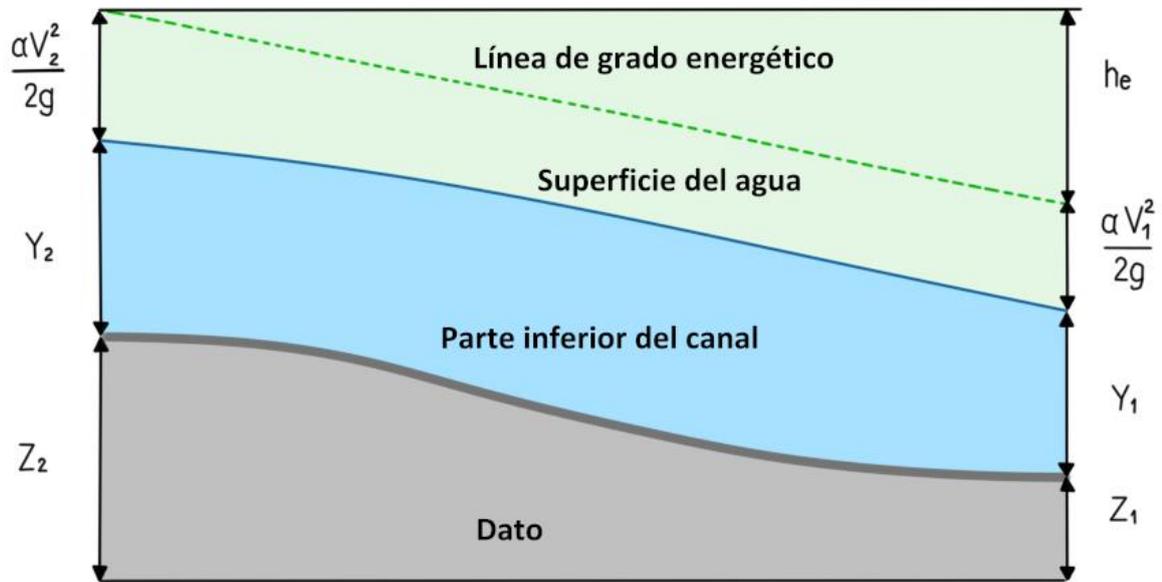


Figura 11. Representación de los términos en la Ecuación de Energía

- **Ecuación de Continuidad.** La ecuación de continuidad describe la conservación de masa para un sistema unidimensional.

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} - q_1 = 0 \quad (11)$$

Donde:

X = Distancia a lo largo del canal.

t = Tiempo.

Q = Caudal del flujo.

A = Área de la sección transversal.

S = Almacenamiento de porciones de sección transversal no transportadas.

q_1 = Flujo de entrada lateral por unidad de distancia.

- **Ecuación de Momento.** La ecuación de momento sostiene que la tasa de cambio en el momento es igual a las fuerzas externas que actúan sobre el sistema.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(VQ)}{\partial x} + gA \left(\frac{\partial z}{\partial x} + S_f \right) = 0 \quad (12)$$

Donde:

g = Aceleración de la gravedad.

S_f = Pendiente de fricción.

V = Velocidad.

2.2.8.2. Metodología de trabajo de HEC RAS

Para poder realizar un cálculo con Hec Ras, se deben realizar los siguientes pasos:

- Crear o importar una geometría.
- Crear o importar los usos de suelos

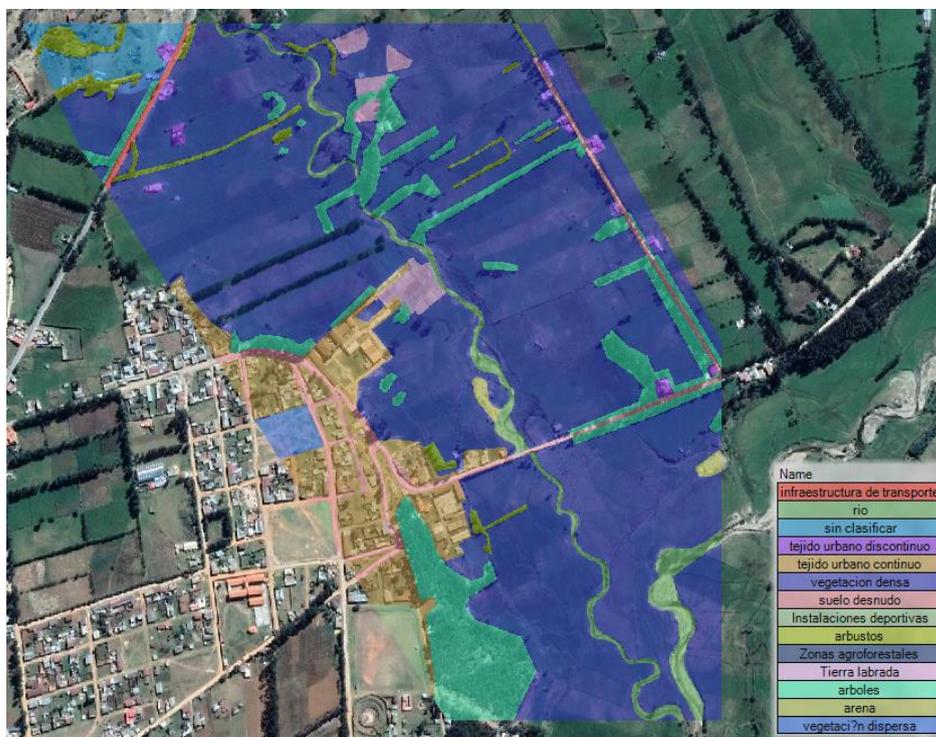


Figura 12. Asignación del coeficiente de rugosidad el Manning.

- Crear la malla y definir las entradas y salidas del flujo.
- Introducir los datos hidráulicos (flujo inestable).
- Definir las condiciones de contorno.
-

Storage/2D Flow Areas			Boundary Condition
1	Malla 2D	BCLine: ENTRADA	Flow Hydrograph
2	Malla 2D	BCLine: SALIDA	Normal Depth

Figura 13. Ventana de las condiciones de contorno en HEC RAS.

- Definir parámetros del flujo no newtoniano.

Non-Newtonian Methods and Parameters

Non-Newtonian Method:

Concentration and Bulking

Volumetric Concentration (Cv) (%):

Select Bulking Method:

Shear Components

Yield Strength: τ Pa

Mixture Dynamic Viscosity: μ Pa-s

Representative Grain Size - ds (mm): Max Cv (%) (Opt):

Generalized Herschel-Bulkley Parameters: K n

Clastic Methods: ϕ

Figura 14. Metodología de flujos no newtonianos en HEC RAS

- Crear un plan y ejecutar una simulación.

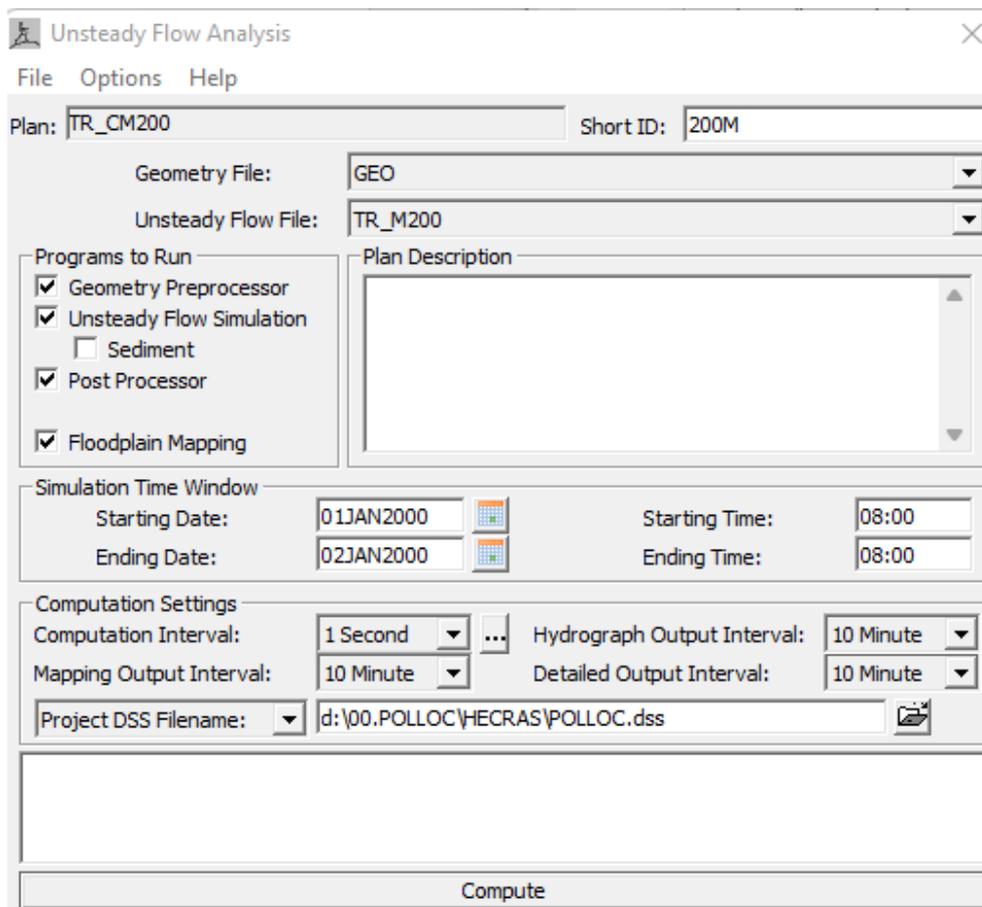


Figura 15. Ventana de configuración de parámetros de simulación.

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 UBICACIÓN

3.1.1. Ubicación Política

La zona de estudio de la presente investigación se encuentra ubicada en el centro poblado de Polloc, del distrito de La Encañada, provincia de Cajamarca.

Departamento : Cajamarca

Provincia : Cajamarca

Distrito : La Encañada

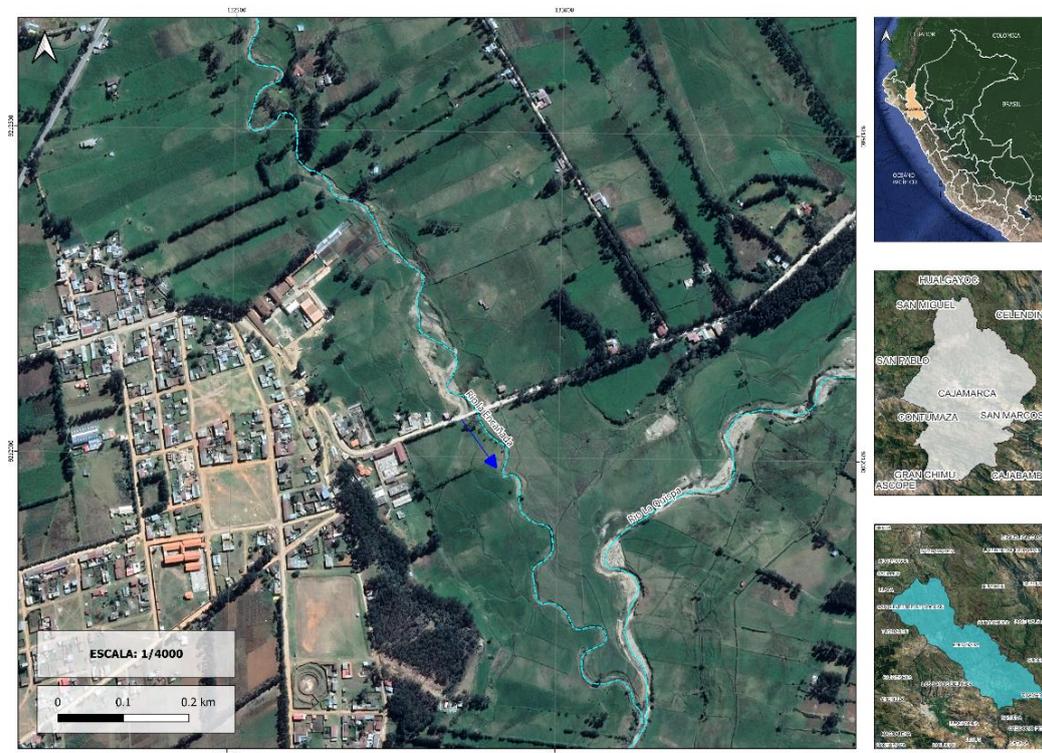


Figura 16. Ubicación política del tramo en estudio.

3.1.2. Ubicación Hidrográfica

Unidad hidrográfica : Alto Maraón
Cuenca : Río Crisnejas
Vertiente : Atlántico.

Tabla 4. Ubicación hidrográfica del tramo y del punto emisor.

Punto	Coordenadas UTM WGS84 (zona 17S)		Altitud media de la cuenca (msnm)
	E	N	
Inicio del tramo	795206.50	9213301.44	
Fin del tramo	795739.90	9212496.57	3572.36
Punto emisor	795275.26	9213305.02	

3.2 TIEMPO EN LA QUE SE REALIZÓ LA INVESTIGACIÓN.

El tiempo en la cual se realizó la investigación comprende desde la segunda semana del mes de octubre del 2020, se realizó el levantamiento topográfico del río La Encañada y la zonificación de áreas inundables dicho procedimiento duro hasta la noviembre del 2021.



Figura 17. Río La Encañada

3.3 INFORMACIÓN BÁSICA

3.3.1. MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN

El Modelo Digital de Elevación (DEM) es imprescindible para conocer desde los parámetros geomorfológicos de la cuenca, hasta la determinación de los parámetros requeridos para realizar el modelo hidrológico en HEC-HMS. Para la delimitación de la cuenca del Río La Encañada se usó modelos digitales de elevación (DEM), con una resolución espacial de 5 m, obtenidos de la plataforma Land Viewer tal como se muestra en la imagen:

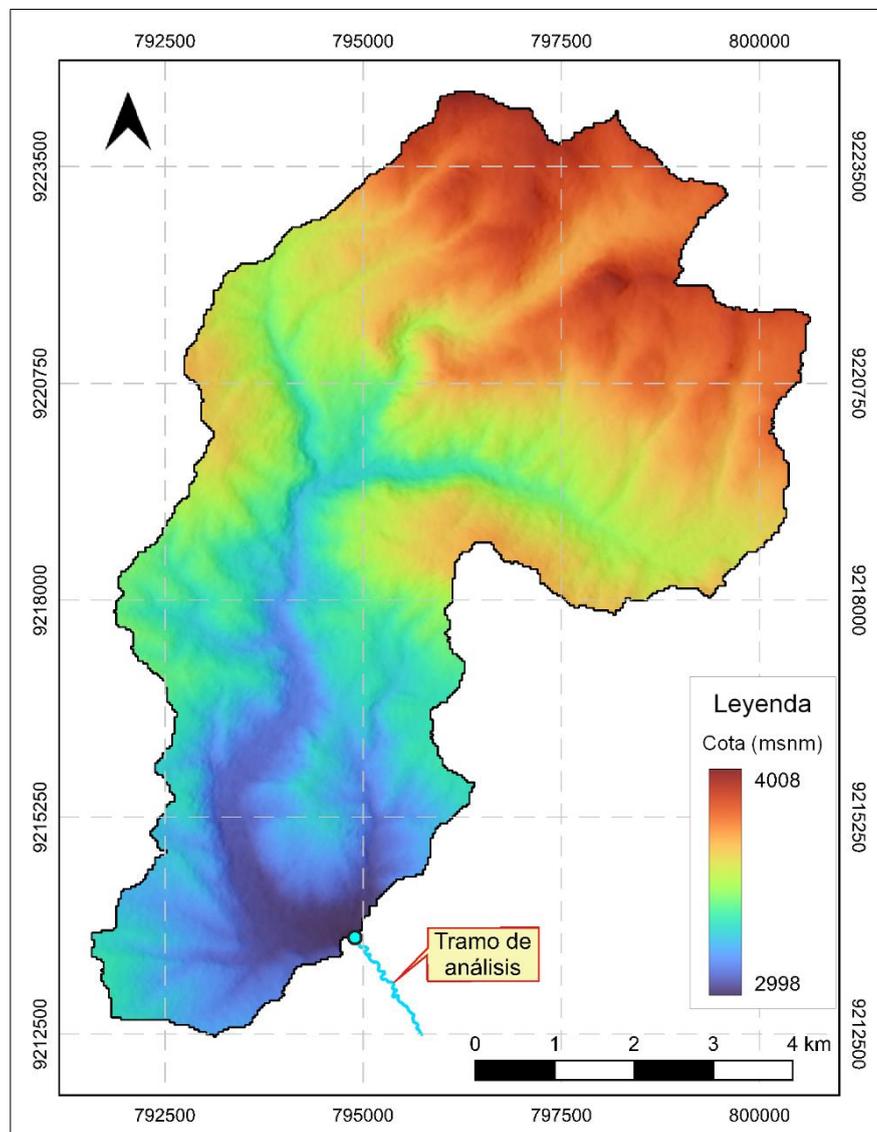


Figura 18. Modelo de elevación digital de la cuenca

3.3.2. DEFINICIÓN DE SUBCUENCAS

Debido a que la cuenca del río La Encañada presenta un área total de drenaje de 56.43 km², no era necesario realizar la subdivisión de la cuenca. Sin embargo, con el objetivo de desarrollar el tránsito de avenidas y no sobredimensionar los resultados hidráulicos en la modelización hidráulica, es que se realiza esta subdivisión en dos áreas: cuenca alta y cuenca baja, en donde se simula el tránsito de avenidas (mediante la asignación de “reach” en HEC-HMS) en la cuenca baja. Asimismo, para la subdivisión de la cuenca se tomó el criterio de la pendiente media del cauce principal. En la Figura 19 se muestra la subdivisión de las cuencas y el tramo donde se analizará el tránsito de las crecientes.

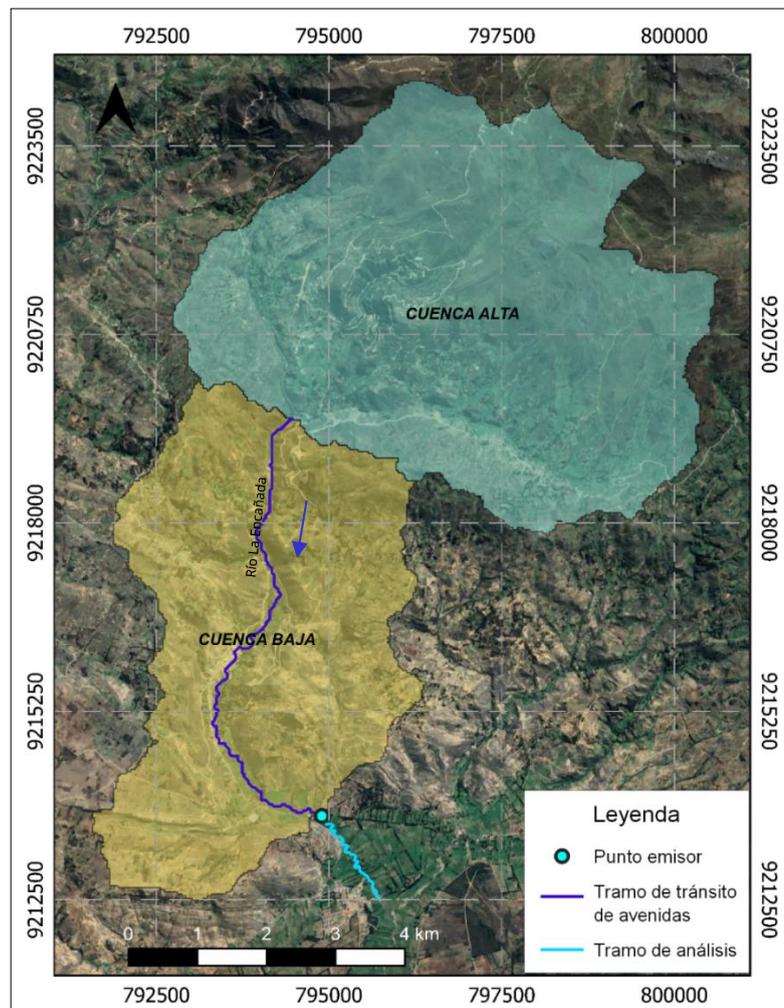


Figura 19. Subdivisión de cuenca del río La Encañada

3.3.3. INFORMACIÓN PLUVIOMÉTRICA

Para el análisis hidrológico, se utilizó la información pluviométrica de la estación meteorológica convencional La Encañada que se ubica a 1.4 km, las coordenadas se presenta en la Tabla 5.

Tabla 5. Datos de la estación meteorologica La Encañada

Estación: La Encañada (Código: 107093)					
Departamento	Provincia	Distrito	Coordenadas UTM		Altitud msnm
			E	N	
Cajamarca	Cajamarca	Encañada	794583.4	9211773	2980

Los datos de precipitación diaria que se obtuvieron de la estación La Encañada, corresponden a los años comprendidos entre 1998 y 2021, de donde se obtuvieron los valores de la P_{máx} 24 horas de este rango de 24 años. Estos datos se visualizan en la Tabla 6.

Tabla 6. Precipitación máxima en 24 horas Estación La Encañada (1998-2021)

P_{máx} 24 Horas (1998 - 2021)			
Año	P_{máx} 24hrs (mm)	Año	P_{máx} 24hrs (mm)
1998	37.3	2010	42.3
1999	39.6	2011	28.9
2000	30.6	2012	37.2
2001	30.2	2013	36.6
2002	36.0	2014	41.1
2003	30.5	2015	37.7
2004	42.6	2016	31.9
2005	38.0	2017	30.1
2006	47.5	2018	28.7
2007	44.6	2019	30.6
2008	41.3	2020	36.1
2009	42.3	2021	50.9

Y la respectiva distribución de estos valores y su variación durante el periodo de años mencionado se muestra en la Figura 20.

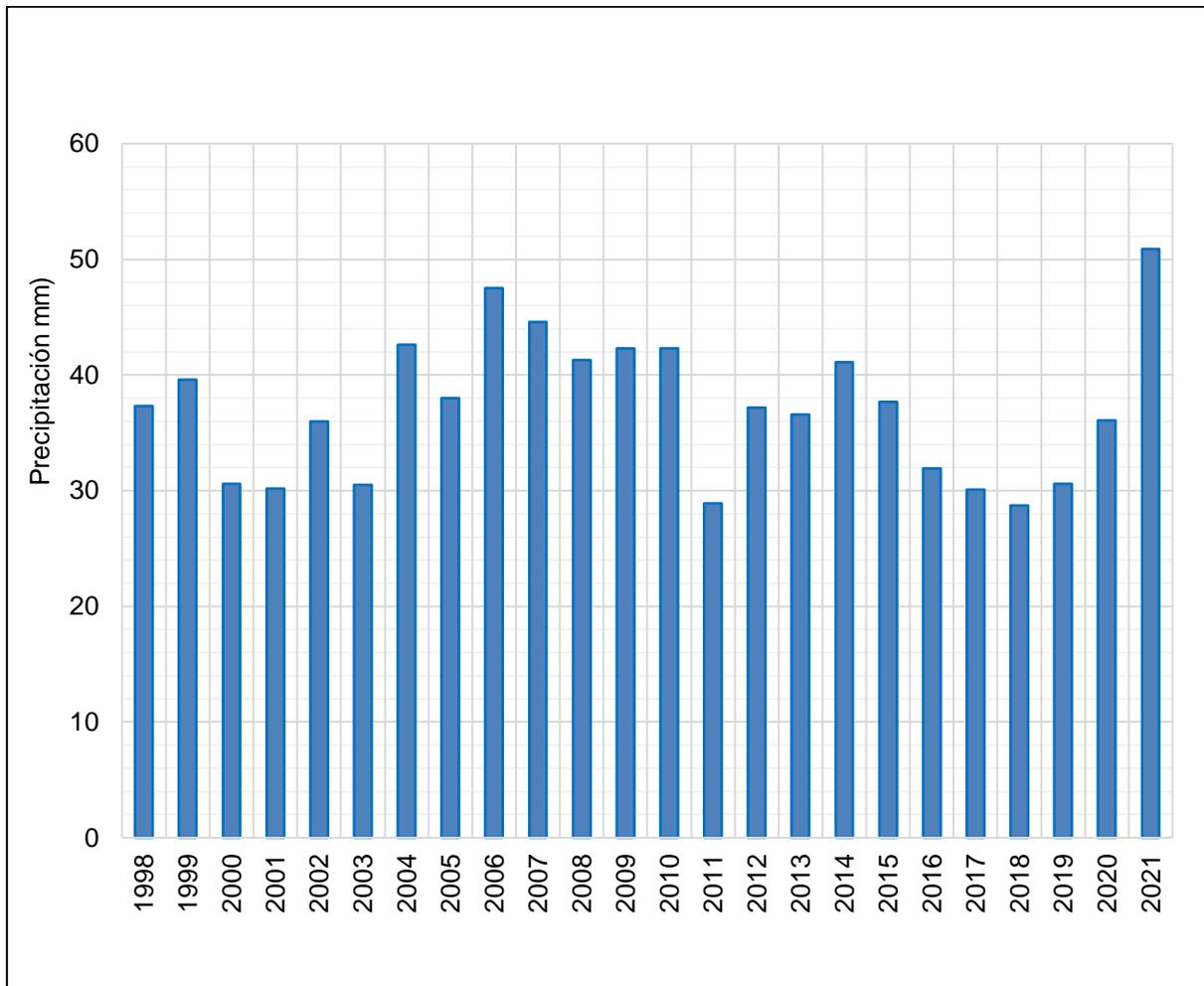


Figura 20. Pmáx 24 horas (1998-2021) en la estación La Encañada

3.3.4. TOPO-BATIMETRÍA

El área donde se realizó el presente estudio se encuentra ubicado en el noreste del centro poblado de Polloc del distrito de La Encañada. Para delimitar el área del levantamiento topo-batimétrico (ver Figura 23), se realizó una inspección visual para identificar las zonas aledañas que presentan evidencia histórica con inminente peligro de inundación, el levantamiento topográfico se realizó con un Drone Phantom 4 Pro (ver Figura 21 y Figura 22).



Figura 21. Drone Phantom 4 Pro.



Figura 22. Drone Phantom 4 Pro

Posteriormente, obtenida la nube de puntos proporcionado por el Drone, se realizó el trabajo de gabinete, para así obtener el plano topo-batimétrico de la zona de estudio.

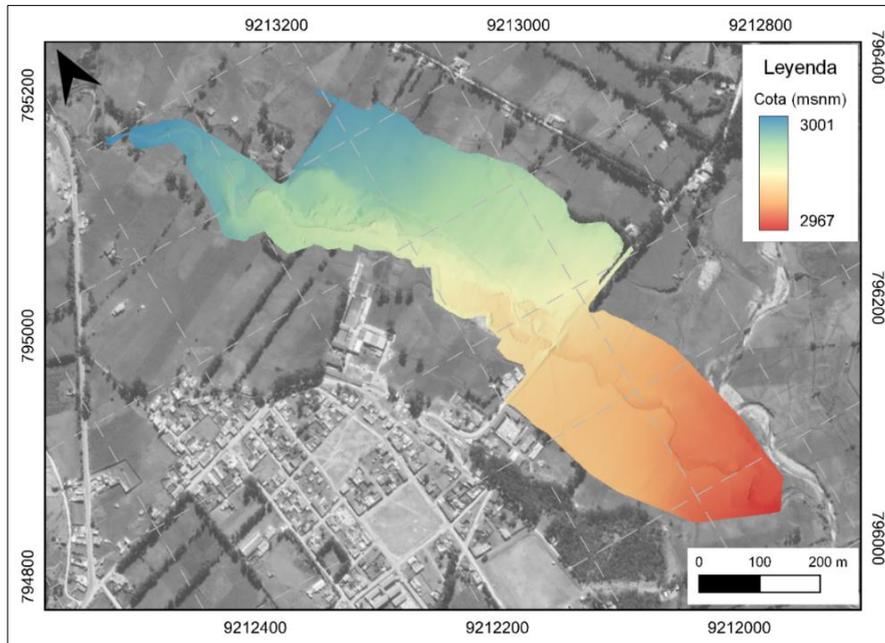


Figura 23. Modelo Digital de Terreno

3.3.5. AFORO Y HUELLAS HÍDRICAS

Debido a que la cuenca del río La Encañada no presenta mediciones hidrométricas, es decir es una cuenca no aforada, se realizaron estudios de campo con la finalidad de obtener características físicas del cauce y parámetros necesarios (K y x) para realizar el tránsito de avenidas mediante el Modelo de Muskingum.

Se realizaron una campaña de aforo en la época de seca tal como se presenta en la Figura 24.

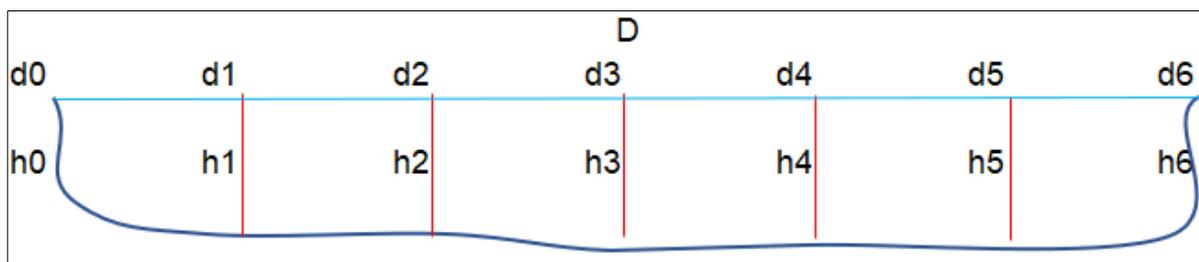


Figura 24. Sección del cauce, aguas arriba del punto de aforo.

En la Tabla 7, se presenta los valores de las mediciones realizadas en campo.

Tabla 7. Mediciones realizadas en la campaña de aforo.

Sección 1				Sección 2			
Distancia (cm)		Tirante (cm)		Distancia (cm)		Tirante (cm)	
d0	0.0	h0	2.0	d0	0.0	h0	14.0
d1	10.0	h1	2.5	d1	10.0	h1	10.5
d2	10.0	h2	3.7	d2	10.0	h2	10.1
d3	10.0	h3	5.0	d3	10.0	h3	11.8
d4	10.0	h4	7.0	d4	10.0	h4	10.4
d5	10.0	h5	7.0	d5	10.0	h5	12.4
d6	10.0	h6	5.0	d6	10.0	h6	13.8
d7	10.0	h7	2.0	d7	10.0	h7	11.6
d8	10.0	h8	2.0	d8	-	h8	-
d9	3.0	h9	2.0	d9	-	h9	-
D	83.0	h máx	7.0	D	70.0	h máx	14.0

En la Tabla 8 se presenta el resumen de la medición del tiempo

Tabla 8. Tiempo de recorrido del flujo

Tiempo de recorrido (s)			
Ítem	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3
T1	23.81	25.91	26.65
T2	31.57	26.34	22.74
T3	22.45	28.13	20.52
T4	21.29	-	22.93
T5	21.34	-	25.69
T6	-	-	22.69
T7	-	-	22.9
T8	-	-	21.85
Promedio	22.22	26.79	22.76
Promedio		23.93	
Distancia entre S1 y S2			10 m

También se realizó una inspección visual para determinar las huellas hídricas del cauce. En caudal medio genera un perímetro mojado de 3.00 m y un área hidráulica de 1.22 m².

En la Figura 25, se muestra la sección analizada para determinar estos parámetros mencionados. La línea azul es la huella corresponde al flujo promedio y la línea roja corresponde al evento máximo



Figura 25. Evidencias de las huellas hídricas

3.4 ANÁLISIS HIDROLÓGICO

El análisis hidrológico se basa en caracterizar la cuenca del río La Encañada, y realizar el análisis estadístico de los datos de precipitación para, posteriormente, corregirlos y obtener valores de precipitación de diseño, hietogramas de diseño, curvas IDF, y los parámetros requeridos por HEC-HMS para realizar el análisis del tránsito de avenidas por Muskingum.

3.4.1. Parámetros geomorfológicos de la cuenca

- **Parámetros de forma**

Se determinaron los parámetros de forma de las subcuencas del río La Encañada, estos valores se detallan en la Tabla 9.

Tabla 9. Parámetros de forma de las subcuencas

Parámetro	Cuenca del río Encañada	Subcuenca Baja	Subcuenca Alta
Perímetro (m)	53670	30186	33874
Área (km ²)	56.43	23.62	32.81
Longitud axial (m)	17347	9747	9076
Ancho promedio (m)	3253	2423	3615
Longitud cauce principal (m)	17347	8271	9076
Factor de forma (IF)	0.19	0.25	0.40
Coefficiente de compacidad (Kc)	2.00	1.74	1.66

Para la cuenca del río La Encañada, se obtuvo los valores de $IF=0.19$, que la clasifica como muy alargada y un $Kc = 2.00$.

Para la subcuenca baja, se obtuvo los valores de $IF=0.25$, que la clasifica como alargada y un $Kc = 1.74$, que la clasifica con una cuenca rectangular-oblonga.

Para la subcuenca alta, se obtuvo los valores de $IF=0.40$, que la clasifica como ni alargada ni ensanchada y un $Kc = 1.66$, que la clasifica con una cuenca oval-oblonga.

- **Parámetros de relieve**

Pendientes de la cuenca

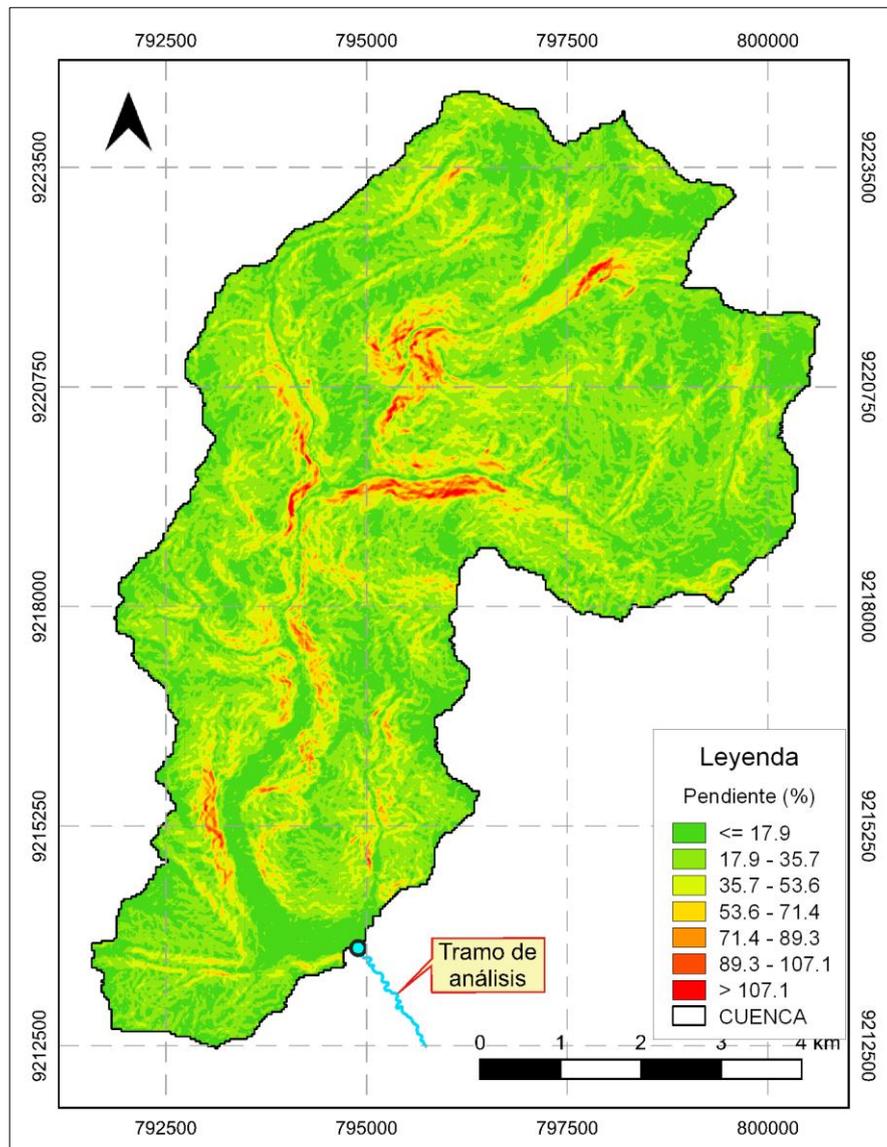


Figura 26. Mapa de pendientes de la cuenca del río La Encañada

Del mapa de pendientes (ver Figura 26), se reconoce la presencia de pendientes mayores al 80 % en la subcuenca alta, específicamente en áreas contiguas al cauce principal y en zonas de las redes de drenaje que confluyen en el río La Encañada. Asimismo, en la cuenca baja hay menor presencia de pendientes muy altas, las cuales se sitúan únicamente cerca al curso del río principal. Estas zonas con pendientes pronunciadas indican que están sujetas a grados de

erosión muy altos antes eventos climatológicos; por ende, son áreas importantes de aporte de sedimentos en la red de drenaje de la cuenca. Se evidencia la predominancia de pendientes menores al 50 % en la subcuenca baja y alta y se tiene que la pendiente media de la cuenca es del 27.1 %.

Curva hipsométrica y frecuencia de altitudes

En la Figura 27, se tiene la curva hipsométrica de la cuenca del río La Encañada, y en la Figura 28 la frecuencia de altitudes, ambas gráficas permiten analizar la variación altitudinal de la cuenca, la edad, y su relación con el potencial de erosivo.

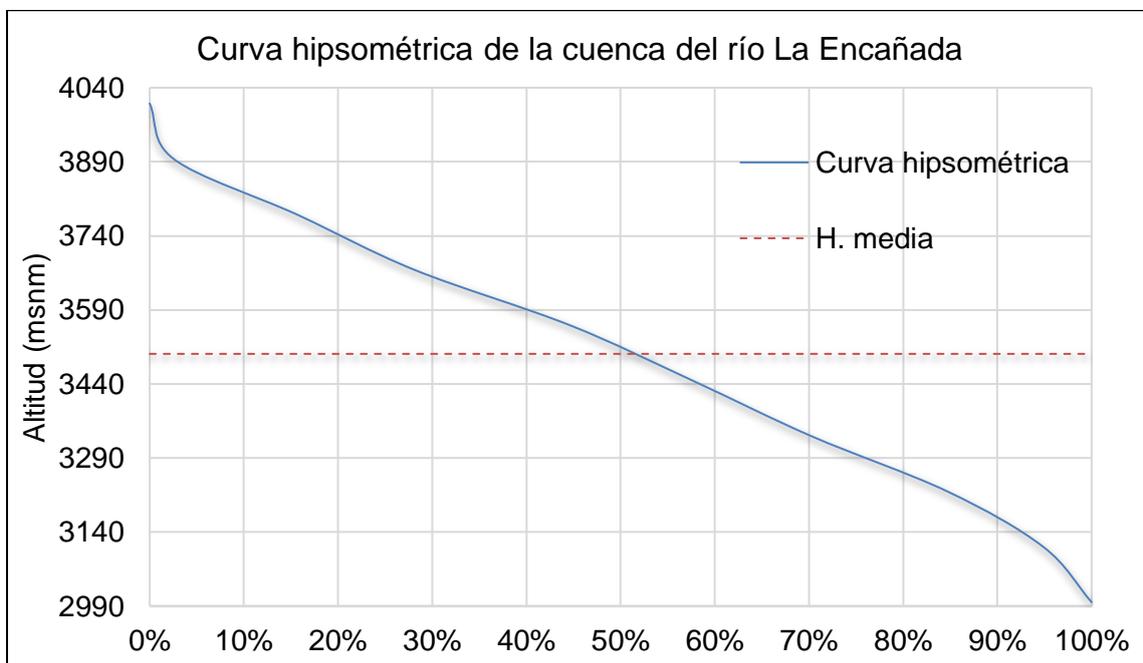


Figura 27. Curva hipsométrica de la cuenca del río La Encañada

Es posible señalar que, a partir de la curva hipsométrica, la cuenca en estudio se encuentra en una etapa de equilibrio relativo o madurez, obviamente que ya se encuentra en el comienzo de la transición a una cuenca en la etapa de vejez. Ello implicaría aún un potencial erosivo que no debe despreciarse, y cuya evidencia de campo son los bolones observados en el tramo de estudio. Asimismo, se tiene una altitud media de 3500.92 msnm que, como es un patrón característico en todas las cuencas, se encuentra muy cerca de la altitud mediana; en este caso, por debajo de esta.

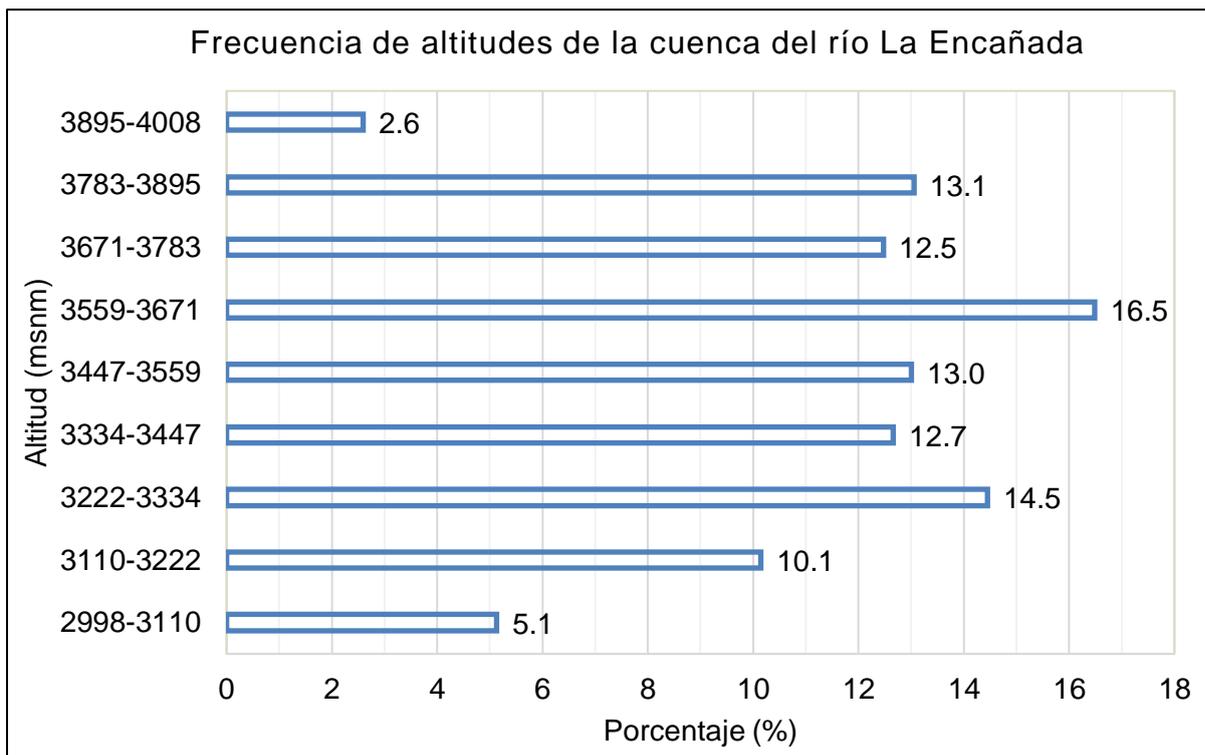


Figura 28. Frecuencia de altitudes de la cuenca del río La Encañada.

Del análisis de frecuencias, se reconoce que existe una distribución constante de las áreas comprendidas entre los 3222 y 3825 msnm, y una mayor incidencia del área de la cuenca entre las cotas 3559 y 3671 msnm.

- **Parámetros de drenaje**

Longitud máxima de recorrido

La cuenca del río La Encañada, así como cada una de las subcuencas delimitadas, poseen una longitud de drenaje máxima de recorrido (“long flow path”), es decir, se tiene 3 longitudes, cuya ubicación se ve en la Figura 29, las cuales serán datos imprescindibles para obtener el tiempo de concentración las subcuencas. Estos valores son: Cuenca del río La Encañada (17347.05 m), cuenca Baja (9747.34 m) y cuenca Alta (9075.98 m).

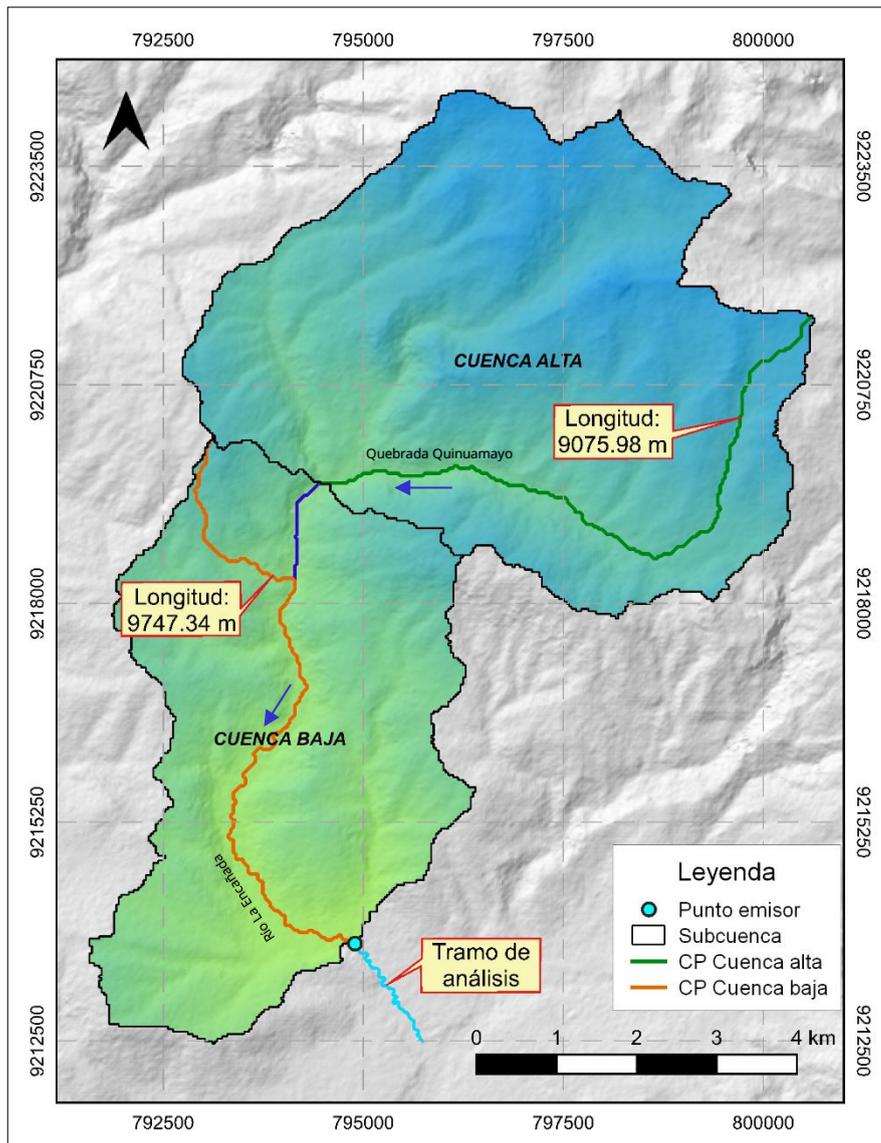


Figura 29. Cauces principales de la cuenca del río La Encañada.

Longitud y pendiente del cauce principal

En la figura 30 se tiene el perfil longitudinal del río La Encañada, y la respectiva línea divisoria entre la cuenca baja y alta.

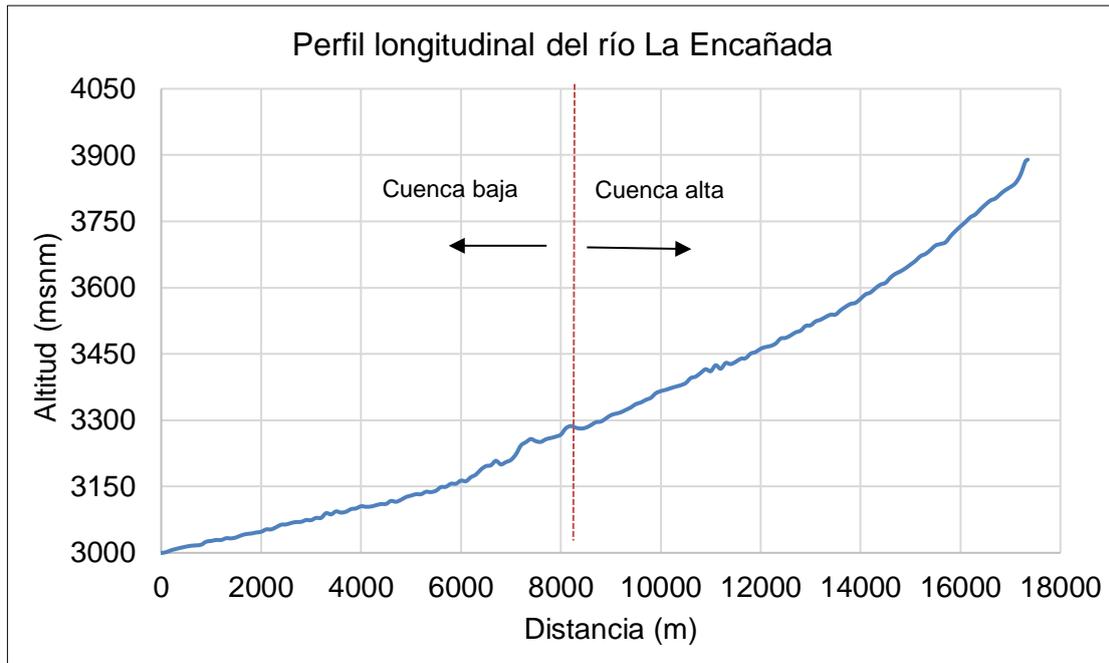


Figura 30. Perfil longitudinal del río La Encañada.

3.4.2. Análisis estadísticos de datos pluviométricos

Con información meteorológica de la estación La Encañada, obtenidas de SENAMHI – Cajamarca comprendida entre los años 1998-2021, se realizó el análisis estadístico de los datos obtenidos los cuales se procesaron con los programas Hidroesta 2 y Ms Excel.

Estadísticas de la muestra de datos

La Tabla 10 se muestra los parámetros estadísticos de los datos de precipitación máxima 24 horas de la estación La Encañada.

Tabla 10. Estadísticos de muestra

Número de registros	24
Precipitación media	37.1
Precipitación máx	50.9
Precipitación mínima	28.7
Desviación estándar de la muestra	6.1576
Coficiente de variación	0.1656

De la Tabla 10 podemos inferir que debido al coeficiente de variación de las precipitaciones máximas presenta poca dispersión y la mayor concentración de datos se encuentra alrededor de la media, lo que implica una baja probabilidad de encontrar algún valor atípico o “outlier”.

Análisis de datos atípicos (outliers)

En la Tabla 11 se obtuvo los valores de los logaritmos de cada uno de los valores de P_{máx} 24 horas, los cuales permiten analizar la remoción de datos atípicos.

Tabla 11. Estadísticos de logaritmos y límites permisibles de muestra.

Número de registros	24
Media de logaritmos de registros	1.5648
Desviación estándar de logaritmos de registros	0.0716
Coeficiente al nivel de significación de 5% (Kn)	2.4673
Logaritmo del límite superior	1.7414
Logaritmo de límite inferior	1.3882
Límite superior	55.1
Límite inferior	24.4

Se reconoce que la información meteorológica obtenida no presenta datos atípicos y por ello no se realiza ninguna remoción de datos. Lo mencionado se observa con mayor detalle en la Figura 31.

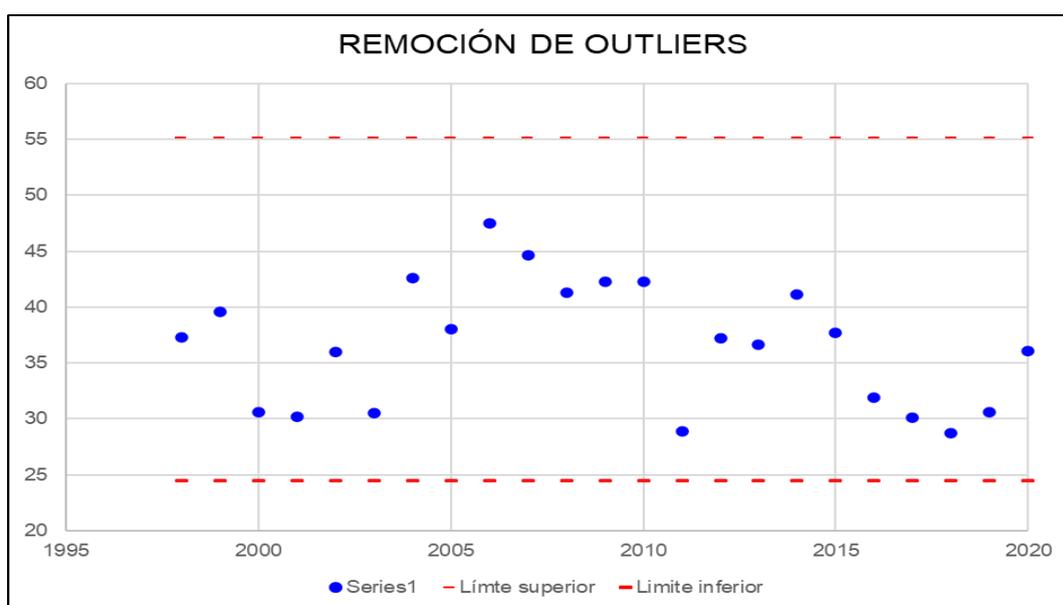


Figura 31. Análisis de datos atípicos de los datos de precipitación.

Corrección de Pmáx 24 horas

Debido a que los datos meteorológicos obtenidos son mediciones diarias y no continuas, la Organización Meteorológica Mundial recomienda amplificar por el factor 1.13 a cada uno de las Pmáx 24 horas de la Tabla 6, para obtener los valores de Pmáx 24 horas corregida, datos que serán usados para continuar con el procedimiento. Los valores históricos y los corregidos se muestran en la Tabla 12.

Tabla 12. Precipitación máxima 24 horas histórica y corregida

Factor de corrección		1.13
Año	Pmáx 24 horas histórico	Pmáx 24 horas corregido
1998	37.3	42.1
1999	39.6	44.7
2000	30.6	34.6
2001	30.2	34.1
2002	36	40.7
2003	30.5	34.5
2004	42.6	48.1
2005	38.0	42.9
2006	47.5	53.7
2007	44.6	50.4
2008	41.3	46.7
2009	42.3	47.8
2010	42.3	47.8
2011	28.9	32.7
2012	37.2	42.0
2013	36.6	41.4
2014	41.1	46.4
2015	37.7	42.6

Factor de corrección		1.13
2016	31.9	36.0
2017	30.1	34.0
2018	28.7	32.4
2019	30.6	34.6
2020	36.1	40.8
2021	50.9	57.5

3.4.3. Análisis de frecuencia y ajuste a un modelo de distribución

Se realiza, mediante el uso del software Hidroesta 2, el análisis de frecuencias con los 8 modelos de distribución planteados y requeridos por el MTC en el manual de Hidrología, Hidráulica y Drenaje; y se selecciona el modelo en función de la prueba de bondad de ajuste Kolmorov - Smirnov mediante los métodos de máxima verosimilitud y de los momentos lineales. En la Tabla 13, se muestran los resultados del análisis.

Tabla 13. Prueba de Kolmogórov-Smirnov a un nivel de significancia de 5%

Distribución teórica de probabilidades	Estimación de parámetros					
	Método de máxima verosimilitud			Método de momentos lineales		
	Δ teórico	Δ tabular	Se ajustan los datos?	Δ teórico	Δ tabular	Se ajustan los datos?
Normal	0.1370	0.2776	SÍ	0.1324	0.2776	SÍ
Log-Normal de 2 parámetros	0.1445	0.2776	SÍ	0.1384	0.2776	SÍ
Log-Normal de 3 parámetros	0.1521	0.2776	SÍ	-	-	No
Gamma (2 parámetros)	0.1475	0.2776	SÍ	0.1232	0.2776	SÍ
Gamma generalizada (3 parámetros)	0.1405	0.2776	SÍ	0.1354	0.2776	SÍ
Log-Pearson tipo III						
Gumbel	0.1699	0.2776	SÍ	0.1489	0.2776	SÍ
Log-Gumbel	-	-	No	-	-	No

De la prueba de bondad de ajuste se reconoce que la distribución Gamma 2 parámetros es la que presenta el mejor ajuste con el menor Δ teórico de 0.1232 comparado con el Δ tabular. Con el modelo de distribución escogido, se obtiene la Tabla 14, que muestra la predicción de los valores de $P_{\text{máx}}$ 24 horas de diseño para los tiempos de retorno 2.2, 10, 50, 100 y 200 años.

Tabla 14. Predicción de $P_{\text{máx}}$ 24 horas para la distribución Gamma 2

Periodo de retorno T (años)	Probabilidad de excedencia q	Precipitación correspondiente: $P_{\text{máx}}$ 24 horas (mm)
2.2	0.455	42.38
10	0.100	55.05
50	0.020	64.66
100	0.010	68.28
200	0.005	71.70

Mediante Microsoft Excel, se determinó las Intensidades Máximas (mm/hr), utilizando el modelo Gamma 2 parámetros. Estas intensidades se obtuvieron para distintos periodos de retorno considerando la probabilidad de falla en la predicción como el periodo valido de predicción.

3.4.4. Hietograma de diseño

El método de los bloques alternos permite conocer la evolución de la precipitación a lo largo de un periodo de duración de 24 horas para los diferentes periodos de retorno. Esta metodología asegura una distribución temporal de la precipitación muy severa desde el punto de vista de generación de caudales pico. Se obtuvieron y, posteriormente, se usaron los hietogramas de diseño para los periodos de retorno de 2.2, 10, 50, 100 y 200 años, a partir de las precipitaciones máximas obtenidas por la metodología de Dick y Peschke. Los hietogramas de diseño se muestran en las siguientes figuras.

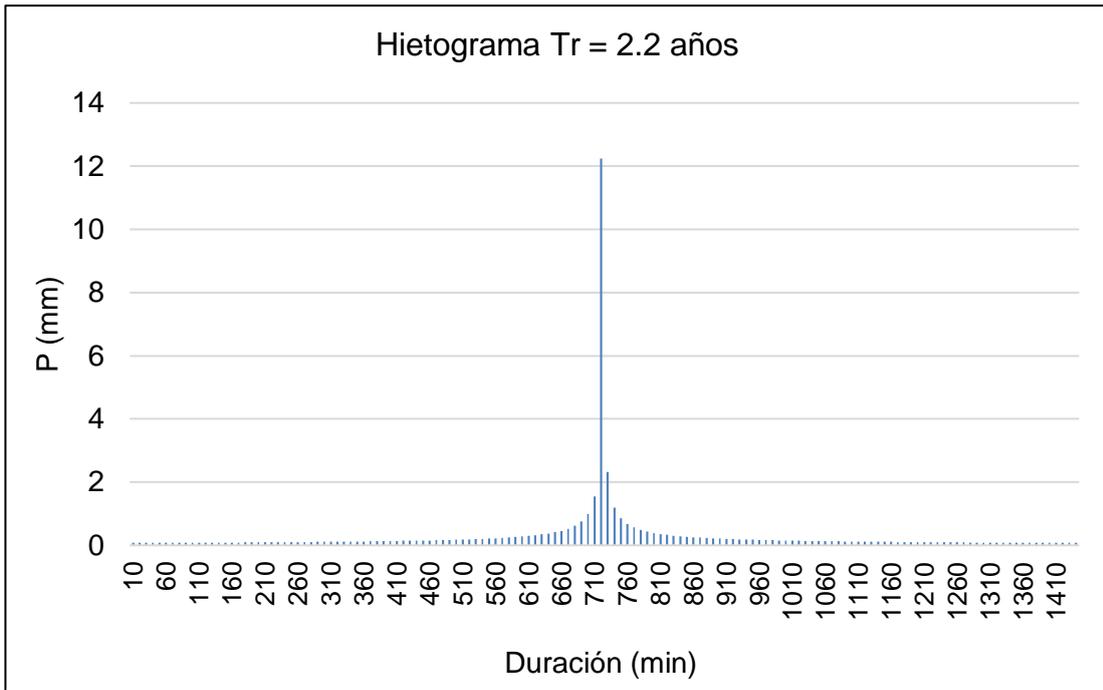


Figura 32. Hietograma de tormenta de diseño para $Tr=2.2$ años.

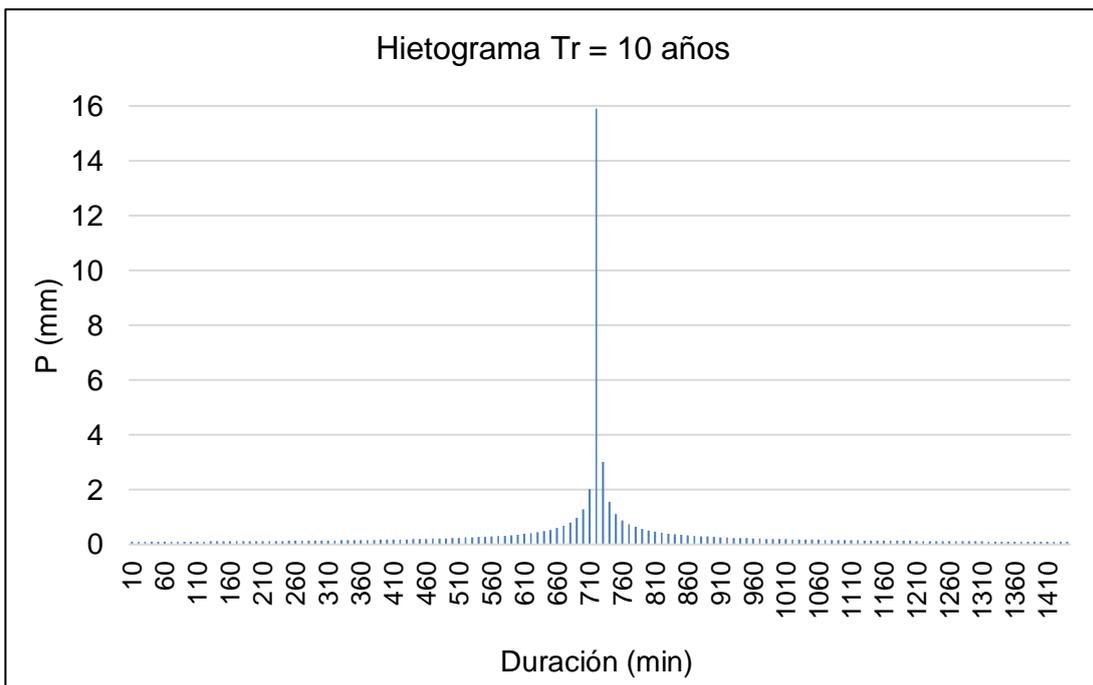


Figura 33. Hietograma de tormenta de diseño para $Tr=10$ años

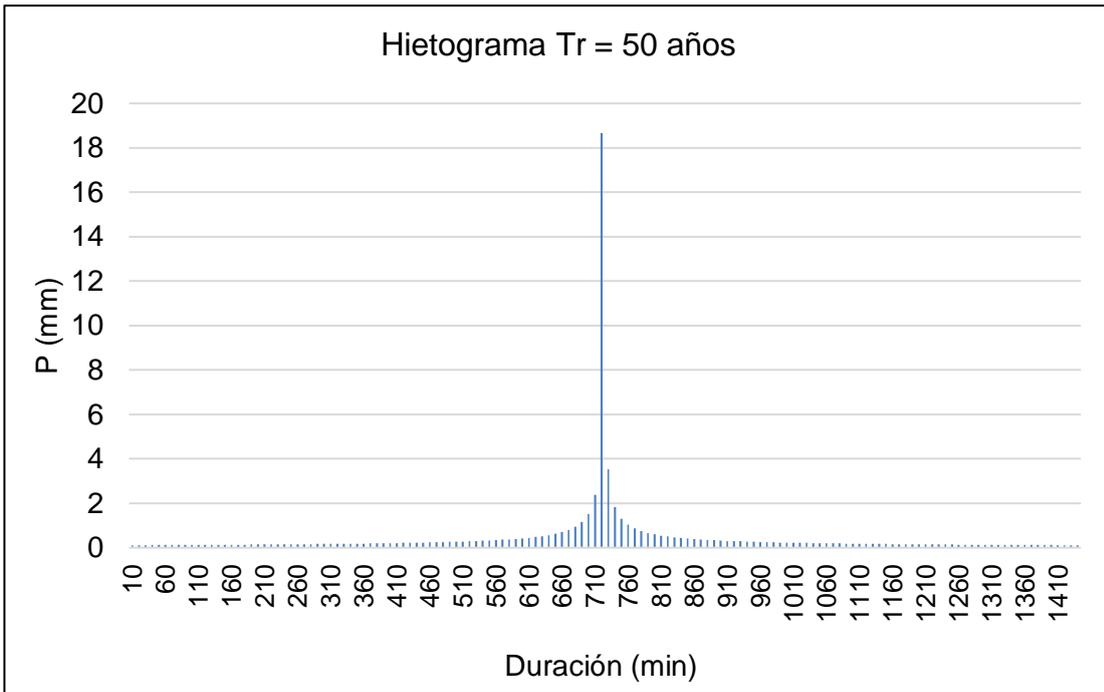


Figura 34. Hietograma de tormenta de diseño para Tr=50 años.

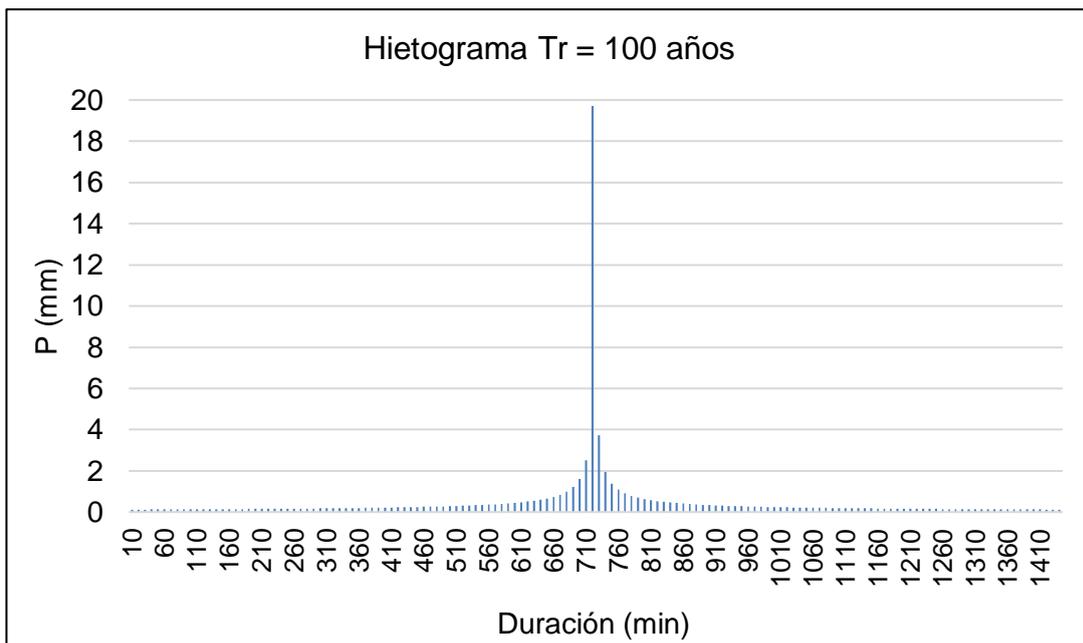


Figura 35. Hietograma de tormenta de diseño para Tr=100 años

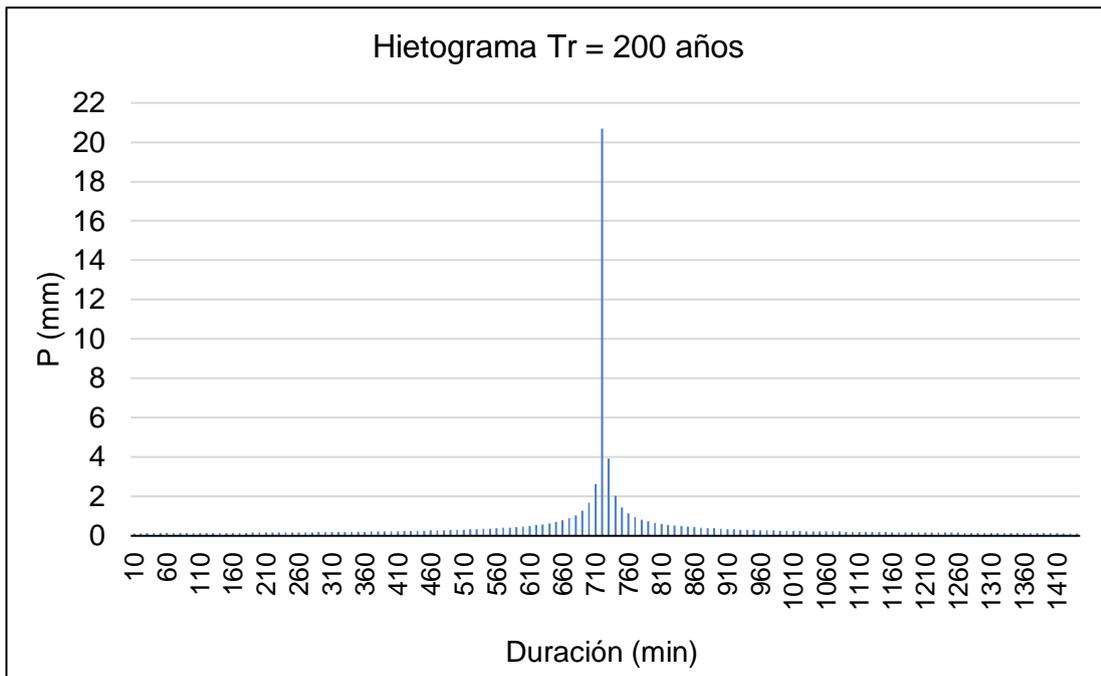


Figura 36. Hietograma de tormenta de diseño para $Tr=200$ años

3.4.5. Curva número

El número de curva o de escurrimiento ha sido tomado en base al Mapa temático tipo ráster de tal valor adimensional desarrollado por la Autoridad Nacional del Agua (ANA) el año 2015 y publicado en el portal "GeoHidro" y en el informe de Generación del Mapa Temático de Curva Número del Perú. A mayor valor de CN, mayor es el potencial de producir escorrentía, y menor el umbral de la escorrentía la (Por debajo de este valor no ocurre escorrentía. Los números de curva han sido tabulados por el Soil Conservation Service (SCS) de los Estados Unidos en base al tipo de suelo y su respectivo uso.

En la Figura 37 se muestra la distribución de la curva número para la condición húmeda dentro de los límites de la cuenca del río La Encañada.

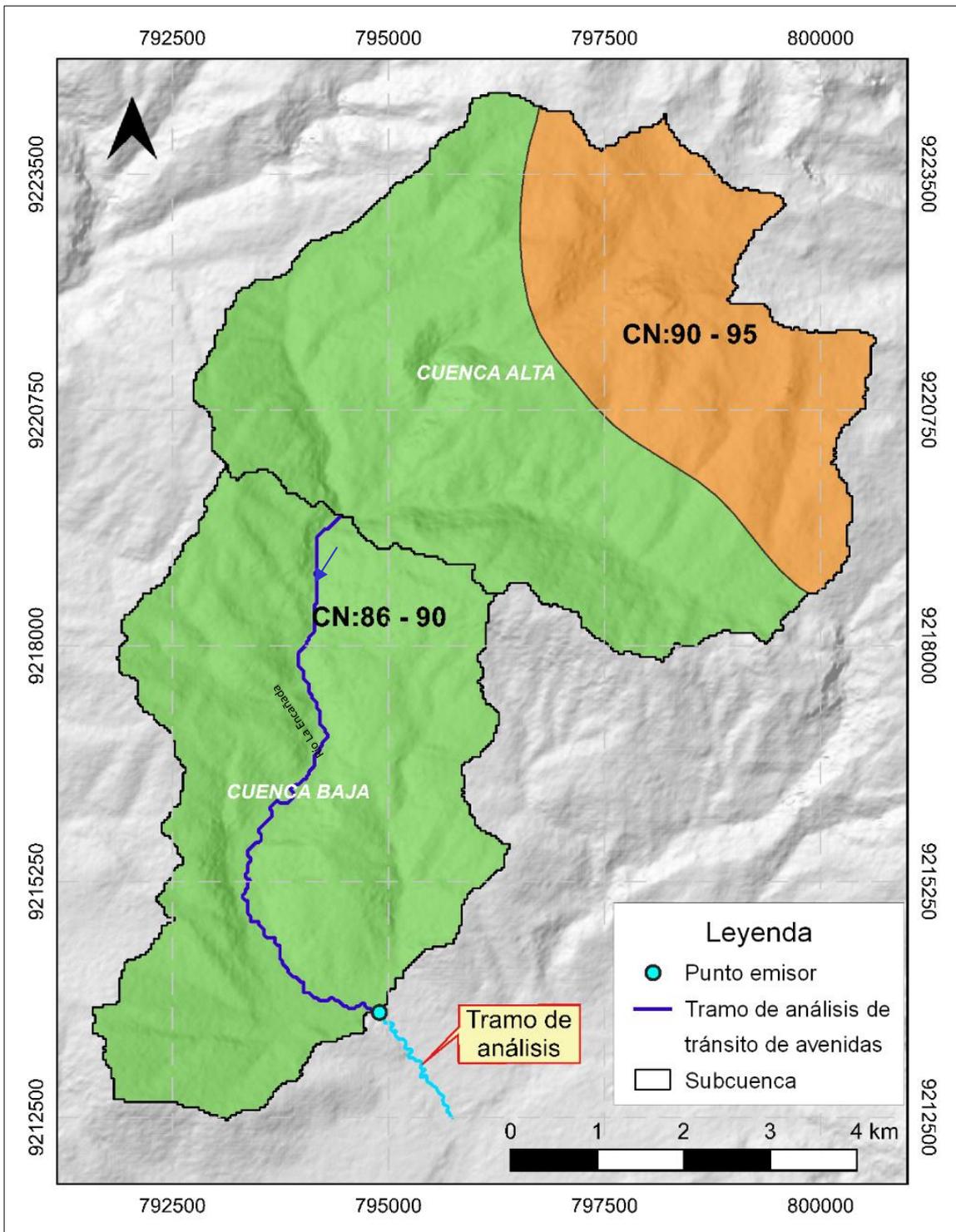


Figura 37. Número de curva para la cuenca en condiciones húmedas.

Con los valores que se tiene de CN para cada una de las tres condiciones del suelo, se generan valores ponderados en función de las áreas que ocupan dentro de las subcuencas (ver Tabla 15).

Tabla 15. Número de curva ponderado

Subcuenca	Curva Número		
	Condición		
	Húmeda	Normal	Seca
Alta	90.49	80.66	63.98
Baja	88.57	77.11	58.59

Para la realización del modelo mediante el software HEC-HMS, se consideró los valores ponderados de CN obtenidos para la condición normal.



Figura 38. Cobertura vegetal de la cuenca del río La Encañada.



Figura 39. Presencia de árboles y casas en la cuenca del río La Encañada.

3.4.6. Tránsito de avenidas

Método de Muskingum

Para el cálculo de los parámetros K y X de Muskingum existen diversas metodologías u optimización de técnicas, que, en su mayoría, son datos empíricos sin embargo para el presente caso de estudio se han determinado en función de las características físicas del tramo de río La Encañada.

Características físicas del cauce

En la Tabla 16 y Tabla 17 se detalla el procedimiento y los resultados de obtener las áreas de las Secciones 1 y 2, respectivamente, que corresponden a la época de estiaje estudiada en campo.

Tabla 16. Estimación del área en la Sección 1

Sección 1					
Distancia (cm)	Tirante (cm)		Tirante prom		T prom x D
d0	0.0	h0	2.0	-	-
d1	10.0	h1	2.5	2.25	22.50
d2	10.0	h2	3.7	3.10	31.00
d3	10.0	h3	5.0	4.35	43.50
d4	10.0	h4	7.0	6.00	60.00
d5	10.0	h5	7.0	7.00	70.00
d6	10.0	h6	5.0	6.00	60.00
d7	10.0	h7	2.0	3.50	35.00
d8	10.0	h8	2.0	2.00	20.00
d9	3.0	h9	2.0	2.00	6.00
D	83.0	h máx	7.0	Área (cm ²)	348.00
				Área (m ²)	0.035

Tabla 17. Estimación del área en la Sección 2

Sección 2					
Distancia (cm)	Tirante (cm)		Tirante prom		T prom x D
d0	0	h0	14.03	-	-
d1	10	h1	10.5	12.27	122.65
d2	10	h2	10.1	10.30	103.00
d3	10	h3	11.8	10.95	109.50
d4	10	h4	10.4	11.10	111.00
d5	10	h5	12.4	11.40	114.00
d6	10	h6	13.8	13.10	131.00
d7	10	h7	11.6	12.70	127.00
D	70	h máx	14.03	Área (cm ²)	818.15
				Área (m ²)	0.082

Asimismo, con el tiempo promedio (23.93 s) de recorrido del flujo en la distancia (10 m) entre las Secciones 1 y 2, se obtiene la velocidad promedio del flujo en eventos de estiaje ($V_{\text{mínima}} = 0.418$ m/s). Con este valor y con el área de la Sección 2, se obtiene un caudal mínimo conservador ($Q_{\text{mín}}$), cuyo procedimiento se detalla a continuación.

$$Q_{\text{mín}} = A * V = 0.082 \text{ m}^2 * 0.418 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 0.03 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 34.27 \frac{\text{l}}{\text{s}} \quad (13)$$

En adición, se estimó en los estudios de campo, una velocidad de 2 m/s correspondiente al caudal máximo que se genera en el cauce. Este valor, con área máxima determinada en campo para el evento extremo (1.22 m²), se determina el Q_{máx} de la siguiente manera:

$$Q_{\text{máx}} = A * V = 1.22 \text{ m}^2 * 2 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 2.44 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \quad (14)$$

Determinación de los parámetros K y X

Los valores de los parámetros de K y X se determinan, en función de las características físicas del cauce, de la siguiente manera.

$$X = \frac{1}{2} - \frac{Q_0}{2 * S * P * V * L} \quad (15)$$

$$K = \frac{0.6 * n^{0.6} * L^{0.4}}{Q_0^{0.2} * S^{0.3}} \quad (16)$$

Donde:

L = longitud de tramo en análisis en m

Q₀ = Descarga de referencia en m³/s

S = pendiente longitudinal del tramo en m/m

P = perímetro mojado promedio en m

n = coeficiente de rugosidad de Manning

V = velocidad promedio en m/s

Primero, se determina el valor de la descarga de referencia Q₀ mediante la expresión a seguir:

$$Q_0 = Q_{\text{mín}} + 0.5 * (Q_{\text{máx}} - Q_{\text{mín}}) = 0.03 + 0.5 * (2.44 - 0.03)$$

$$= 1.24 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \quad (17)$$

Luego, con un valor del coeficiente de rugosidad de Manning de 0.03; con una velocidad promedio V estimada en campo de 1.2 m/s (equivalente a 3 veces la velocidad de estiaje); con una pendiente longitudinal S del tramo de 0.025 m/m; y con la longitud del tramo analizado de 40 m, se determina los valores de los parámetros de K y X . En la Tabla 18, se presenta los parámetros usados para la determinación de K y X , y los resultados obtenidos.

Tabla 18. Valores de los parámetros K y X

$Q_{\text{mín}}$ (m³/s)	0.03
$Q_{\text{máx}}$ (m³/s)	2.44
Q_0 (m³/s)	1.24
V media (m/s)	1.20
P medio (m)	3.0
L (m)	40.0
S (m/m)	0.03
X	0.33
K	0.93

Estimación de caudales máximos

Entre los métodos más usados se encuentra el de Muskingum, por su sencillez, este método modela el almacenamiento en un cauce. Para el cálculo del caudal máximo en el río La Encañada se usó el método de Muskingum (ecuación 8), el cual fue modelado en el programa de simulación hidrológica Hec-Hms, obteniendo los siguientes resultados:

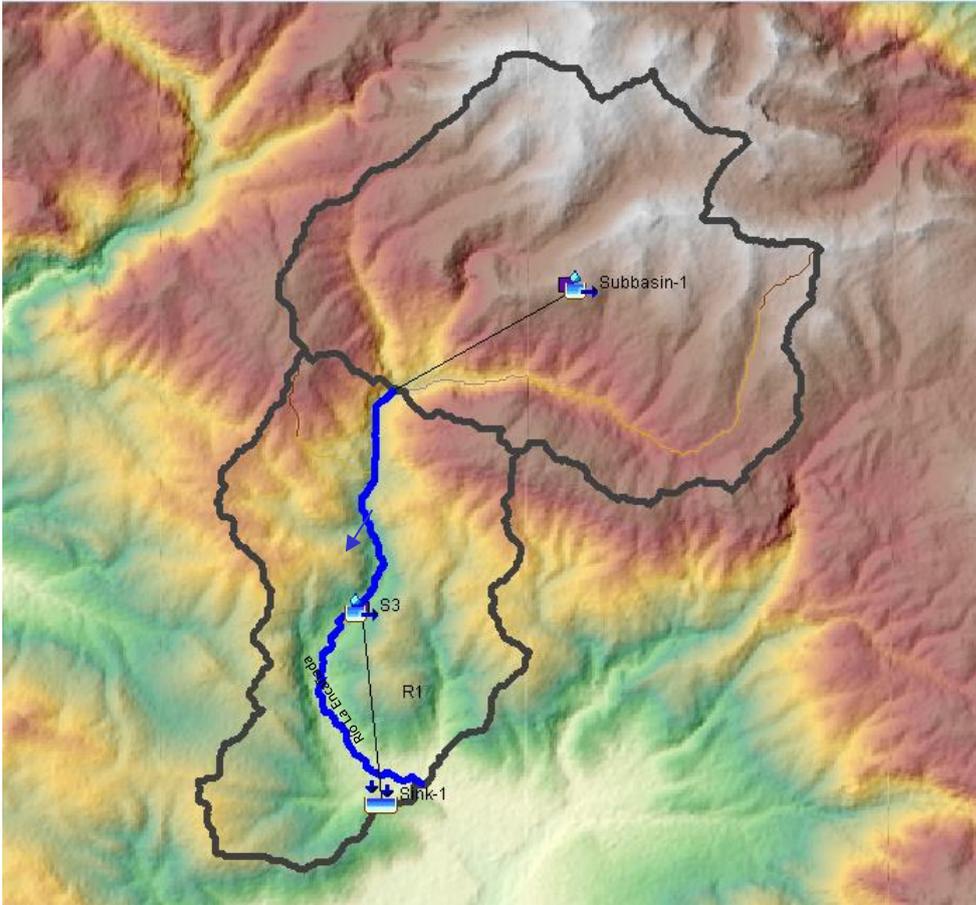


Figura 40. Esquema hidrológico del río La Encañada

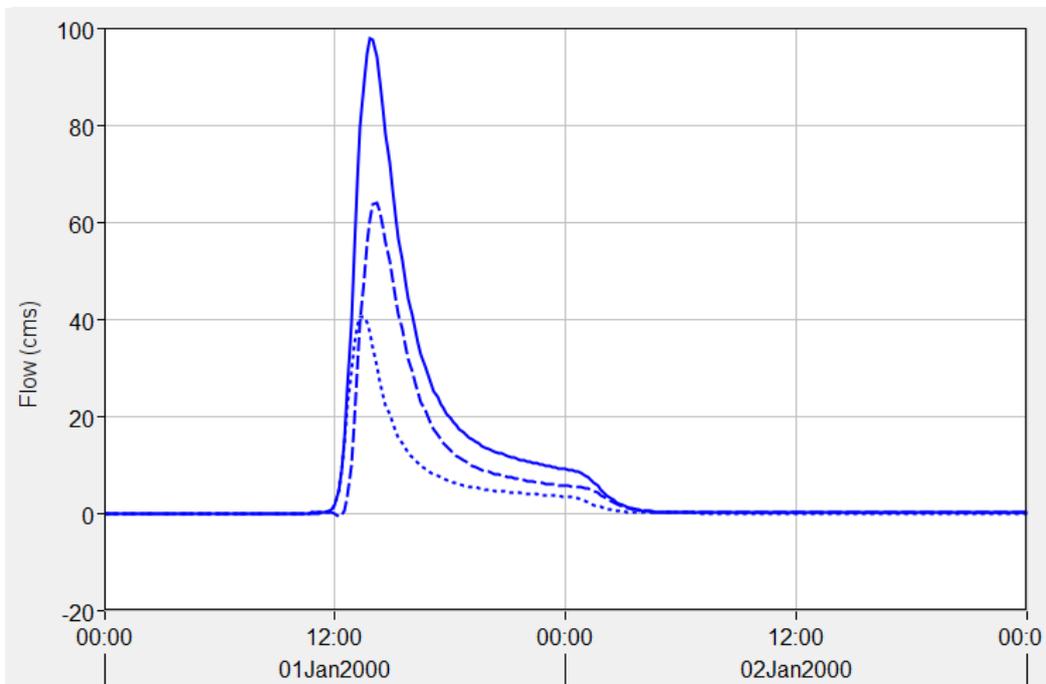


Figura 41. Hidrograma asociado al periodo de retorno de 100 años.

3.5 SIMULACIÓN HIDRÁULICA

En el presente trabajo de investigación se identificaron zonas de inundación en centro poblado de Polloc, frente a tormentas extraordinarias en la cuenca del río “La Encañada”, realizando un modelamiento hidráulico para diferentes períodos de retorno.

Modelo Digital de Elevación

El modelo digital de elevación que se usó para la realización del modelamiento hidráulico en el centro poblado de Polloc del distrito de La Encañada, se realizó con Drone Phantom 4 Pro, visualizando las zonas aledañas con inminente peligro de inundación.

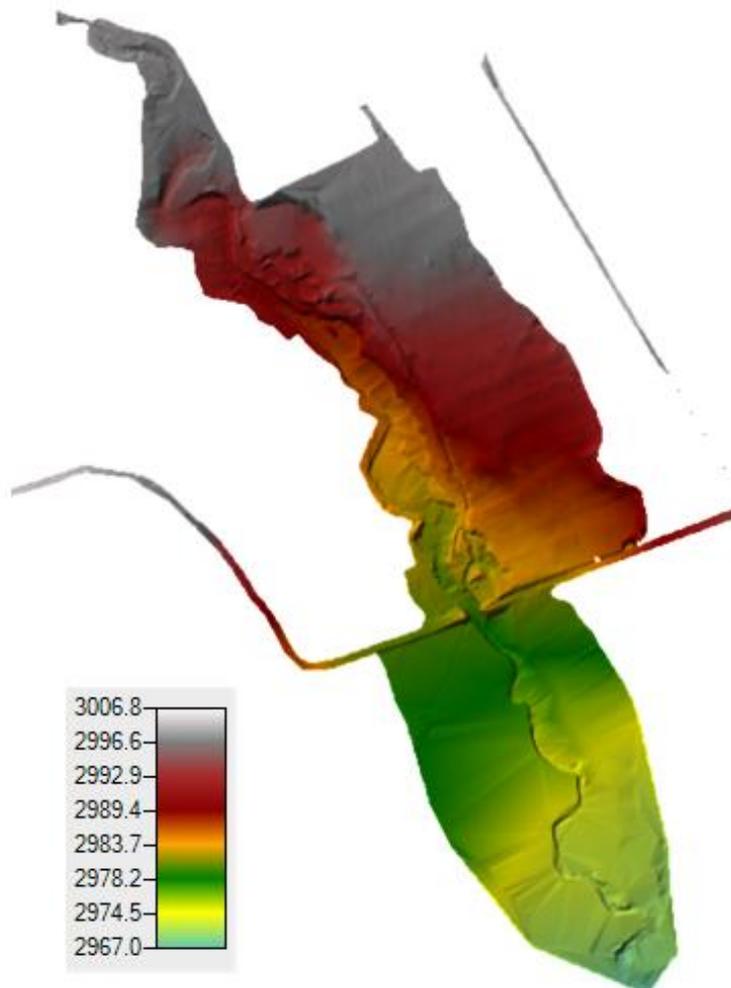


Figura 42. Modelo Digital de Terreno del río La Encañada

Uso de suelo

El uso de suelo de la zona en estudio sirvió para establecer un coeficiente de Manning apropiado en el modelamiento hidráulico. Se han identificado 14 zonas.

Tabla 19. Uso de suelo para el río La Encañada.

Uso suelo	Valor rugosidad
Infraestructura de transporte	0.1
Río	0.025
Sin clasificar	0.032
Tejido urbano discontinuo	0.09
Tejido urbano continuo	0.1
Vegetación densa	0.18
Suelo desnudo	0.023
Instalaciones deportivas	0.09
Arbustos	0.05
Zonas agroforestales	0.06
Tierra labrada	0.04
Árboles	0.12
Arena	0.023
Vegetación dispersa	0.025

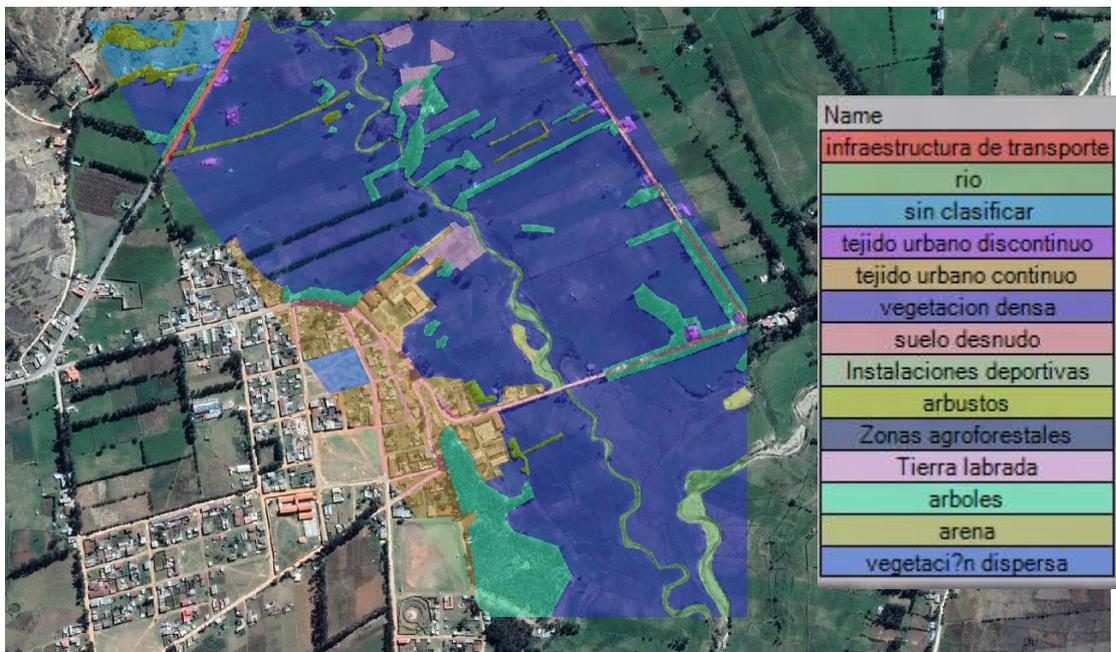


Figura 43. Uso de suelo para el río La Encañada

Condiciones de contorno

Se procede a ingresar las condiciones de contorno del tipo condición de salida (pendiente energía) y entrada (hidrograma), tal como se observa en la Figura 44.

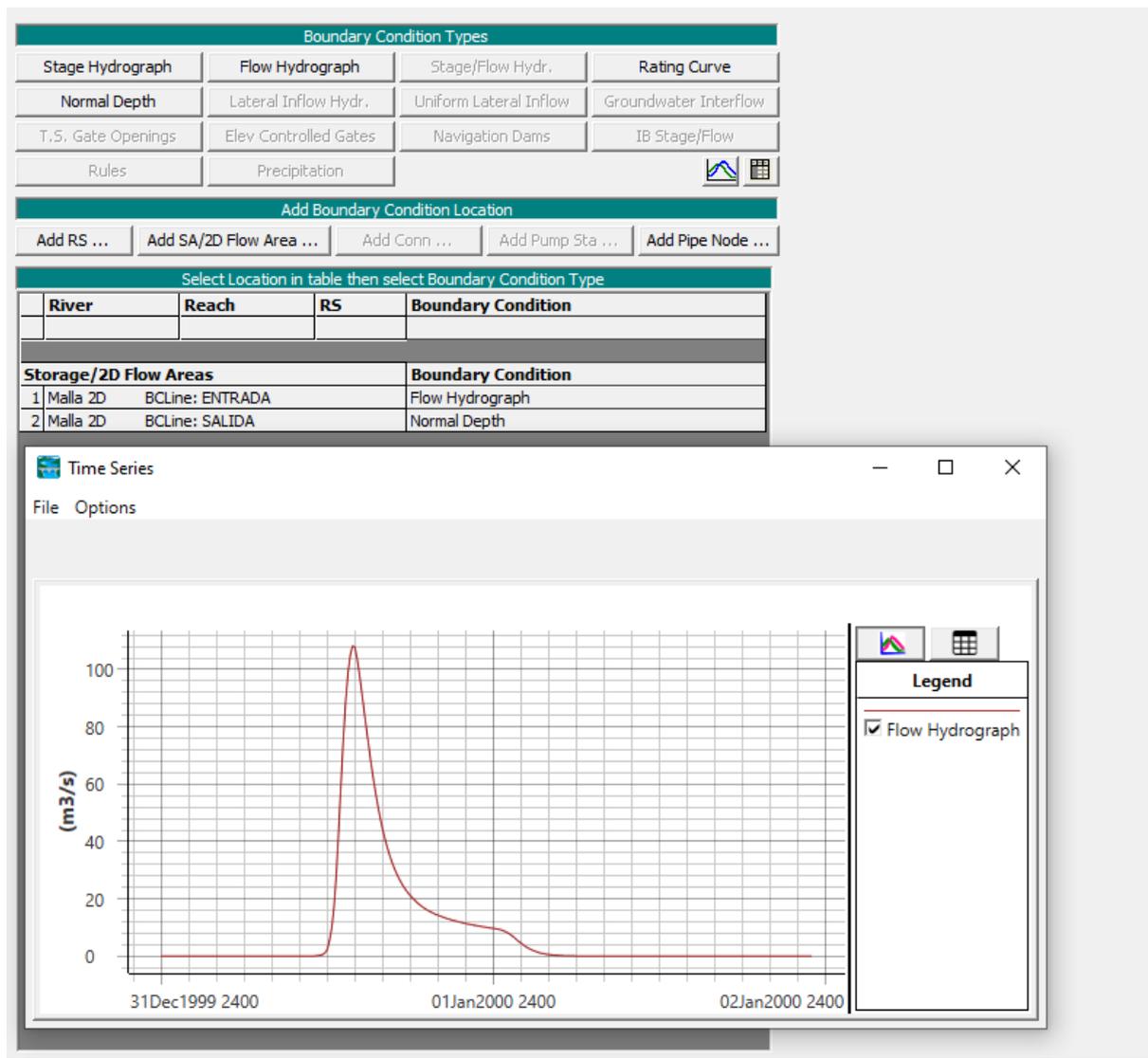


Figura 44. Condiciones de entrada y salida

Tipo y tamaño de malla

Una vez creada la geometría, pasamos a crear la malla que definirá nuestro modelo, para ello seleccionamos el botón "2D Flow Area" de la barra "Editors". A continuación, apretamos el botón "Generate Computation Point" para definir las

dimensiones vertical y horizontal de la malla, que en este caso es del tamaño de 5x5 (Ver Figura 45), como es lógico, cuanto menor sea la celda, mayor la precisión y el tiempo de cálculo.

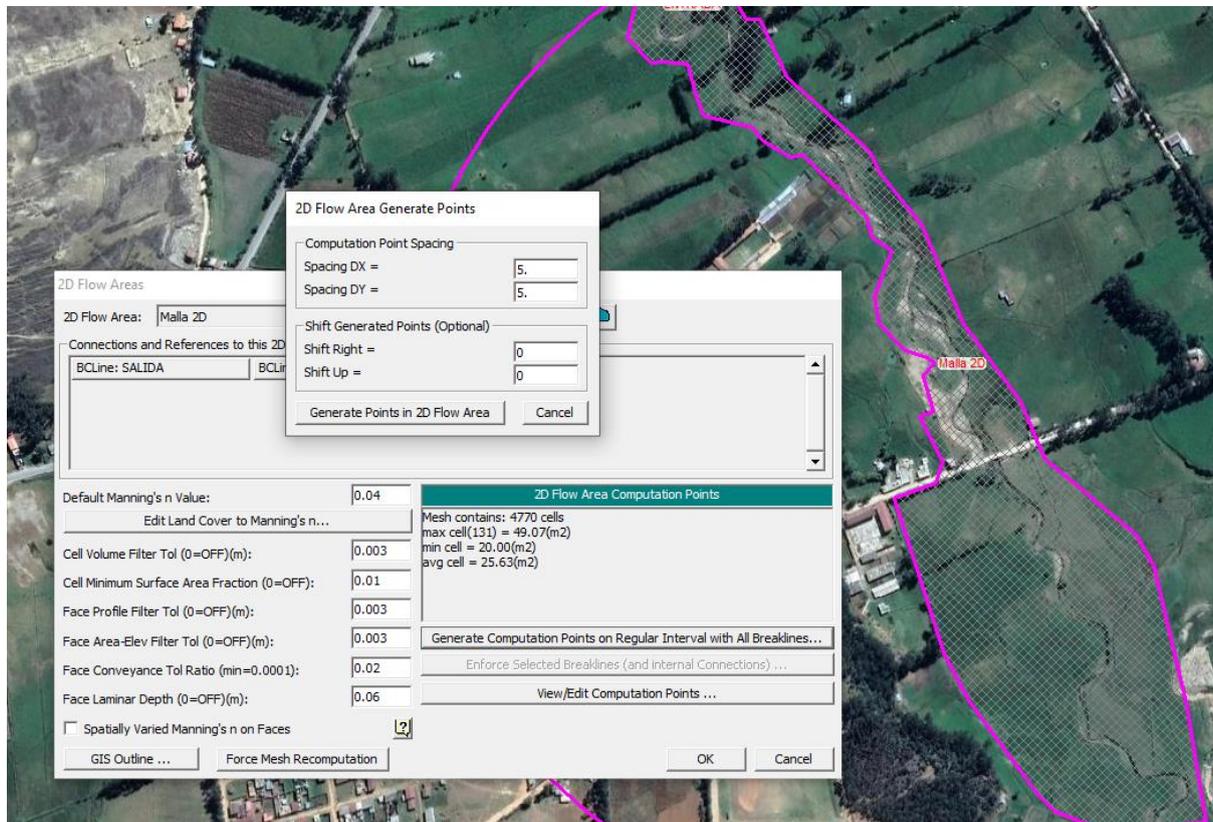


Figura 45. Generación de la malla computacional

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 MODELAMIENTO HIDROLÓGICO

4.1.1 Caracterización del tramo de río estudiado

La zona en estudio de la presente investigación se encuentra ubicada en el Centro poblado de Polloc, del distrito de La Encañada, provincia de Cajamarca. El tramo del río La Encañada estudiado, presenta una longitud de estudio de 1200 m.

4.1.2 Caracterización de las áreas inundables

Las áreas potencialmente inundables por el río estudiado están ubicadas en una zona cubierta mayormente de pastizales, con presencia de árboles y algunas áreas dedicadas a la agricultura. La zona estudiada tuvo un área de 86.62 ha.

Dentro de la zona en estudio se visualizó la presencia de viviendas potencialmente inundables por máximas avenidas del río

La Encañada, una vía asfaltada que va hacia La Encañada, las viviendas encontradas en dicha zona están hechas de material rustico, tal y como se aprecia en la Figura 46.



Figura 46. Viviendas expuestas a inundaciones del río La Encañada.



Figura 47. Casas y pastizales.

4.1.3 Parámetros geomorfológicos

Para la cuenca del río La Encañada, se obtuvo un área de 56.43 km², un perímetro de 42.06 km, una longitud de cauce principal igual a 17.34 km, un coeficiente de Gravelius de 1.56 según la tabla 2 tiene una forma oblonga.

Parámetros de forma

Tabla 20. Parámetros de forma de la cuenca

Parámetro	Cuenca del río La Encañada	Subcuenca Baja	Subcuenca Alta
Perímetro (m)	53670	30186	33874
Área (km ²)	56.43	23.62	32.81
Longitud axial (m)	17347	9747	9076
Ancho promedio (m)	3253	2423	3615
Longitud cauce principal (m)	17347	8271	9076
Factor de forma (IF)	0.19	0.25	0.40
Coefficiente de compacidad (Kc)	2.00	1.74	1.66

4.1.4 Distribución de frecuencias

En la Tabla 21, se presenta el análisis de frecuencia:

Tabla 21. Prueba de Kolmogórov-Smirnov a un nivel de significancia de 5%

Distribución teórica de probabilidades	Estimación de parámetros					
	Método de máxima verosimilitud			Método de momentos lineales		
	Δ teórico	Δ tabular	Se ajustan los datos?	Δ teórico	Δ tabular	Se ajustan los datos?
Normal	0.1370	0.2776	SÍ	0.1324	0.2776	SÍ
Log-Normal de 2 parámetros	0.1445	0.2776	SÍ	0.1384	0.2776	SÍ
Log-Normal de 3 parámetros	0.1521	0.2776	SÍ	-	-	No
Gamma (2 parámetros)	0.1475	0.2776	SÍ	0.1232	0.2776	SÍ
Gamma generalizada (3 parámetros)	0.14058	0.2776	SÍ	0.1354	0.2776	SÍ
Log-Pearson tipo III						
Gumbel	0.1699	0.2776	SÍ	0.1489	0.2776	SÍ
Log-Gumbel	-	-	No	-	-	No

4.1.5 Curva número

Se ha evaluado el escenario con los valores ponderados de la condición normal.

Tabla 22. Número de curva ponderado

Subcuenca	Curva Número		
	Condición		
	Húmeda	Normal	Seca
Alta	90.49	80.66	63.98
Baja	88.57	77.11	58.59

4.1.6 Caudales máximos

Los caudales para cada periodo de retorno se presentan en la siguiente tabla

Tabla 23. Caudales máximos

Periodo retorno	Q _{máx} (m ³ /s)
10	60.5
50	87.0
100	97.8
200	108.2

A continuación, se presenta los hidrogramas de las diferentes subcuencas.

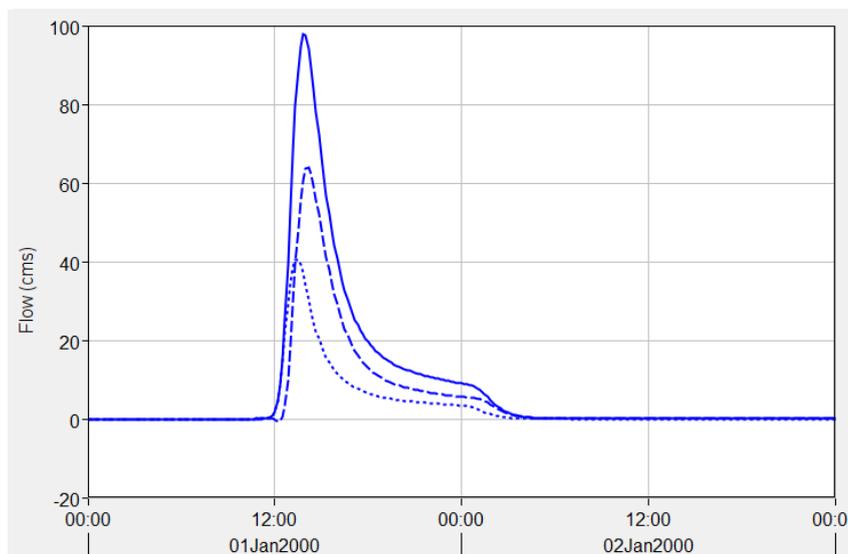


Figura 48. Hidrograma asociado al periodo de retorno de 100 años.

Fuente Elaboración Propia (2021)

4.2 MODELAMIENTO HIDRÁULICO Y EVALUACIÓN DE ÁREAS INUNDABLES.

La velocidad y el calado son los factores básicos para determinar el grado de peligrosidad en inundaciones, como resultado encontramos niveles desde baja, media y alta y muy alta peligrosidad. El (5) ha establecido la Tabla 24 donde se

presenta los niveles de intensidad y la profundidad de flujo.

Tabla 24. Rango de los niveles de peligrosidad

Niveles de Peligrosidad	Rangos
Muy alto	$H^*V > 1.5\text{m}$
Alto	$0.5\text{ m} < H^*V < 1.5\text{m}$
Medio	$0.25\text{ m} < H^*V < 0.5\text{m}$
Bajo	$H^*V < 0.25\text{m}$

Fuente: INDECI (2011)

4.2.1 Resultados – aguas claras

Los resultados obtenidos corresponden a un tiempo de retorno de 100 años, observando los tirantes y velocidades en condiciones normales se visualizan en las Figura 49 y 50 respectivamente.



Figura 49. Tirantes máximos, TR de 100 años – Aguas claras

Se puede observar que se logra alcanzar tirantes máximos de 2.60 m. cerca de la carretera hacia La Encañada.

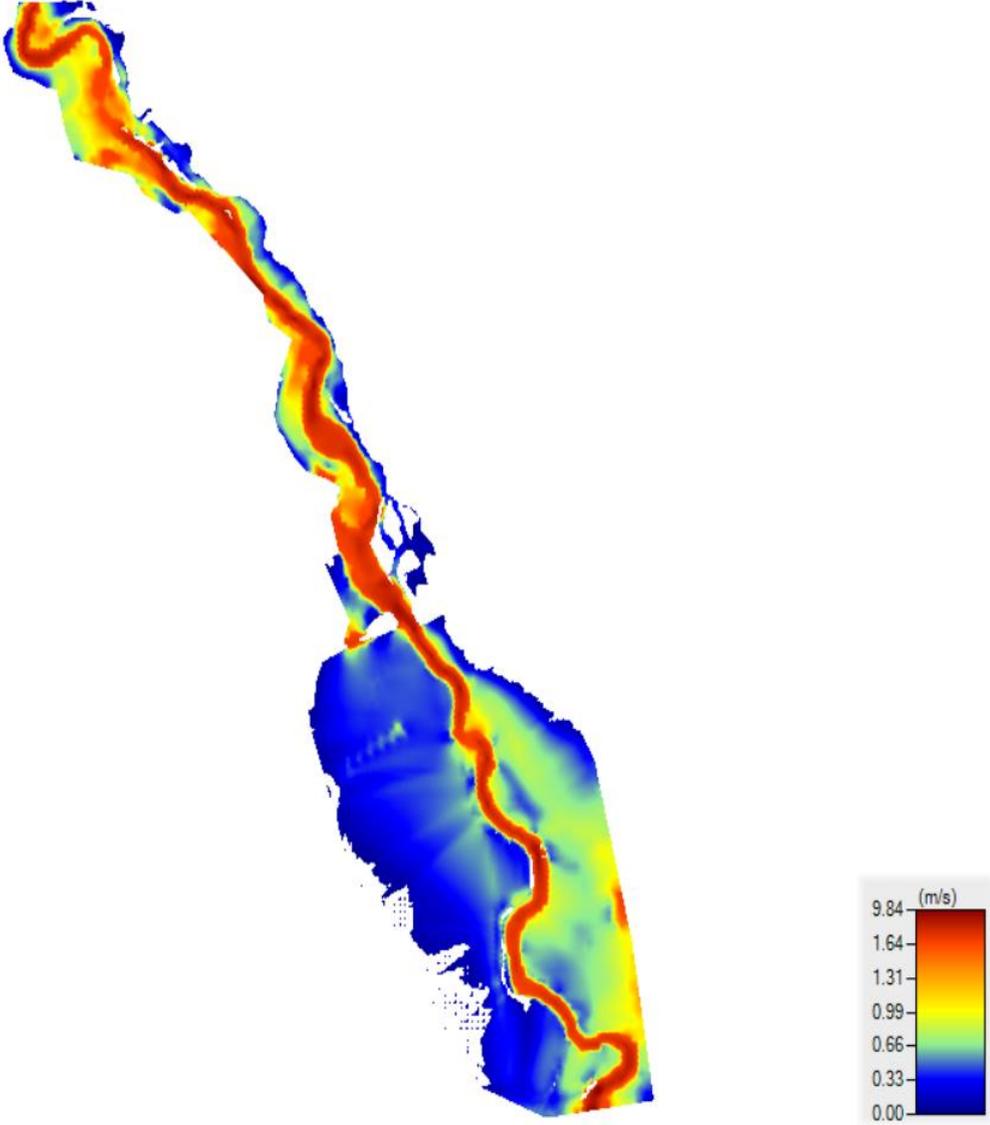


Figura 50. Velocidades máximas, TR de 100 años – Aguas claras

Se puede observar que, para un tiempo de retorno de 100 años, se alcanza velocidades máximas de 6.8 m/s en el lecho del río.

4.2.2 Resultados - flujos hiperconcentrados

4.2.2.1 Áreas de Inundación y velocidades

Se presentan a continuación, los tirantes y velocidades máximas alcanzadas para periodos de retorno de 10, 50, 100 y 200 años



Figura 51. Tirantes máximos del flujo hiperconcentrado, TR 10 años

Fuente Elaboración Propia (2022)

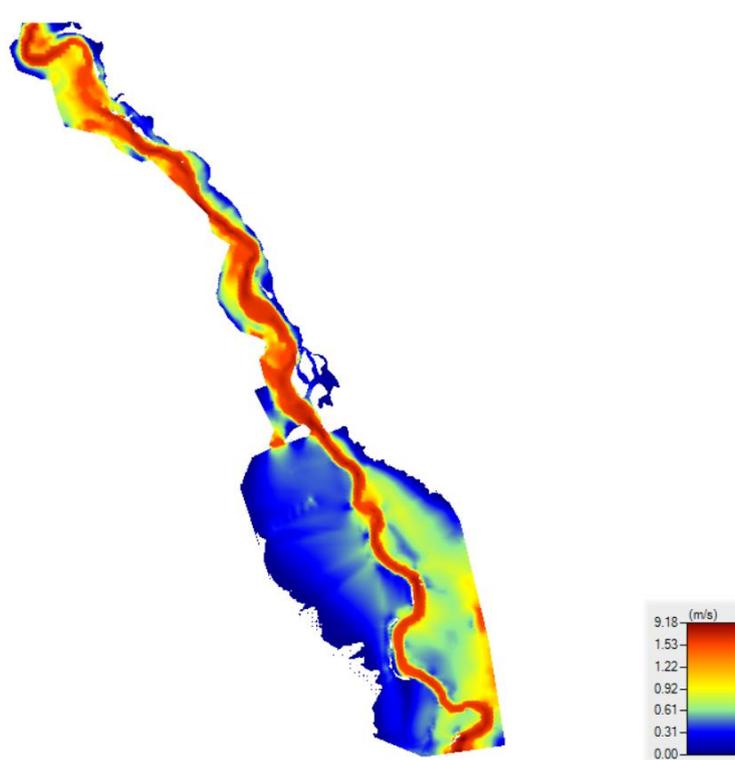


Figura 52. Velocidades máximas del flujo hiperconcentrado, TR 10 años



Figura 53. Tirantes máximos del flujo hiperconcentrado, TR 50 años

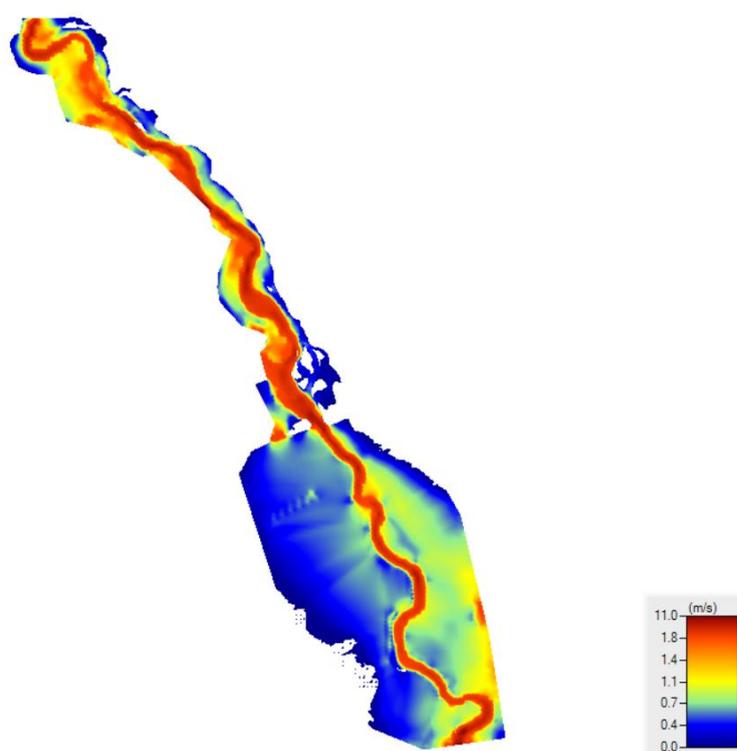


Figura 54. Velocidades máximas del flujo hiperconcentrado, TR 50 años



Figura 55. Tirantes máximos del flujo hiperconcentrado, TR 100 años

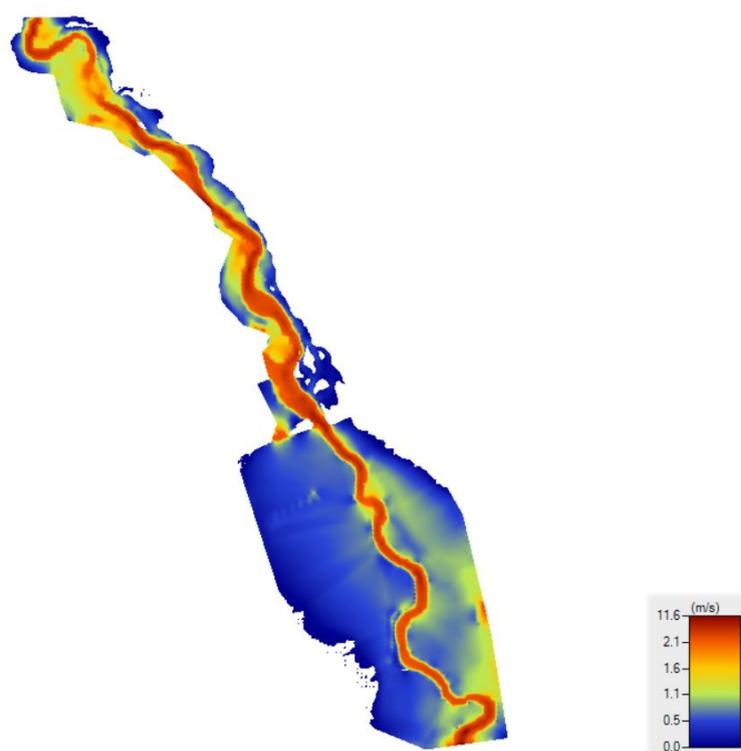


Figura 56. Velocidades máximas del flujo hiperconcentrado, TR 100 años.



Figura 57. Tirantes máximos del flujo hiperconcentrado, TR 200 años

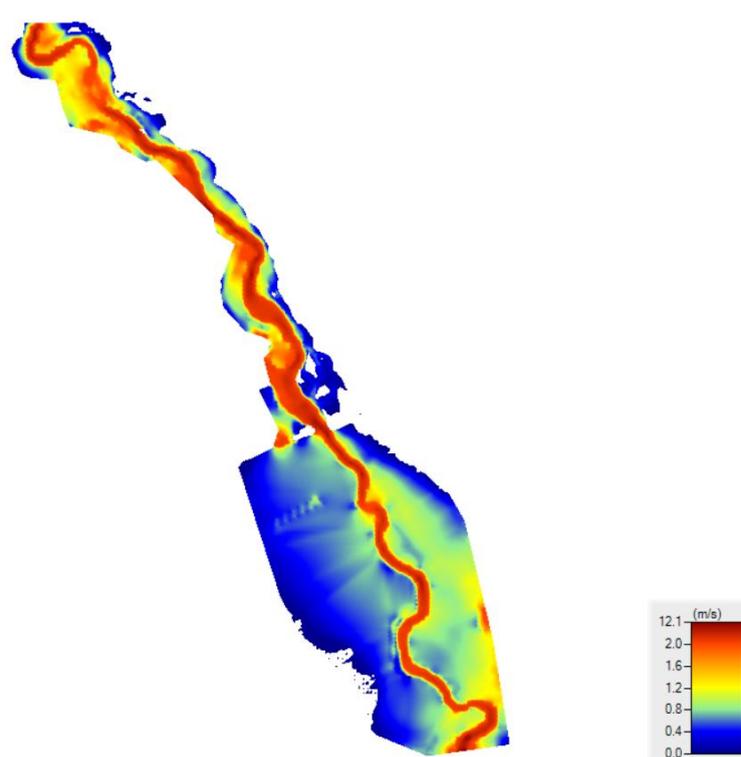


Figura 58. Velocidades máximas del flujo hiperconcentrado, TR 100 años.

4.2.2.2 Perfil Longitudinal

Se ha trazado el eje del río (1.2 Km) para obtener el perfil longitudinal, con los escenarios de flujo hiperconcentrado para los periodos de retorno de 10, 50, 100 y 200, tal y como se aprecia en la Figura 59.

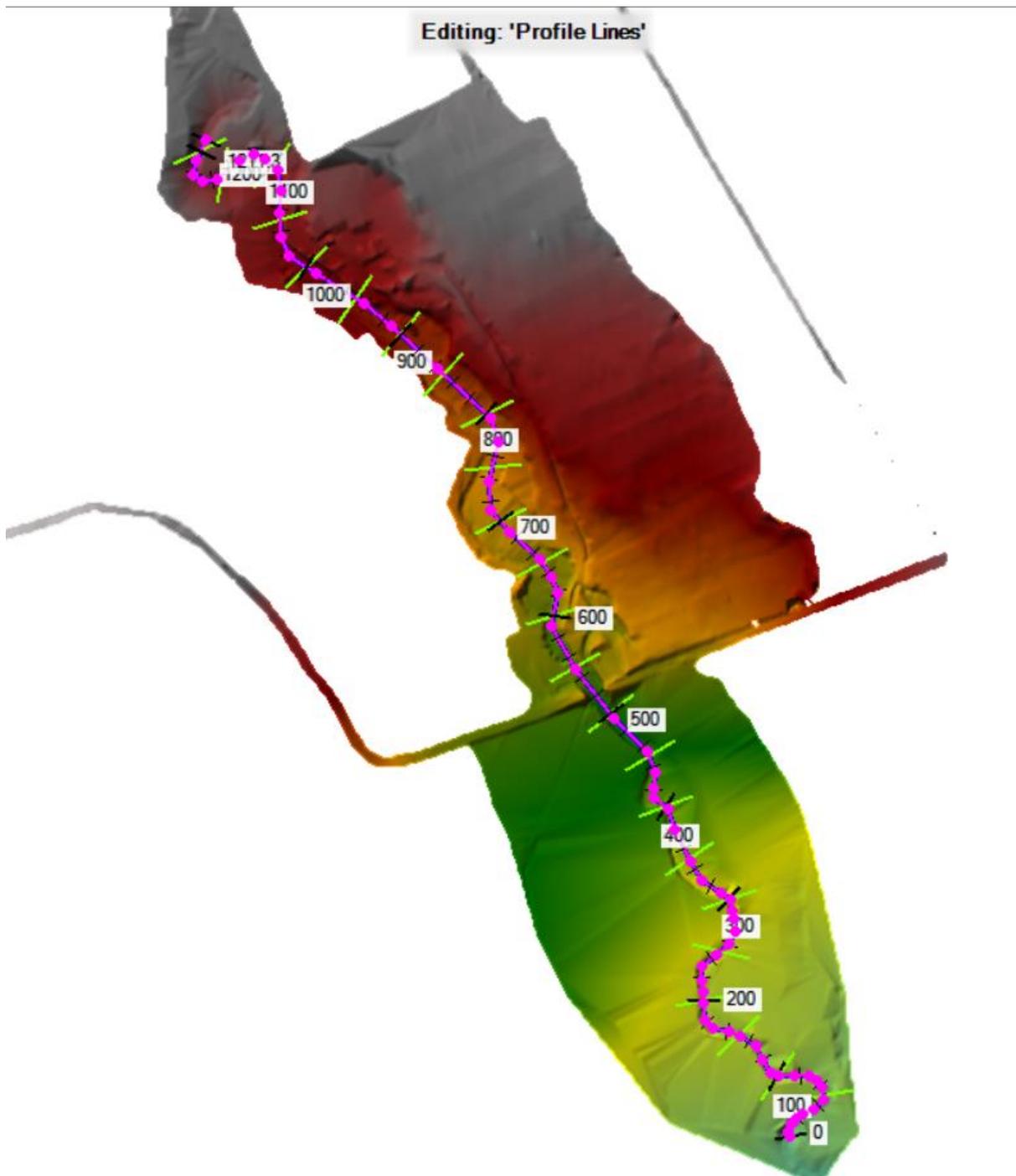


Figura 59. Eje del río y secciones

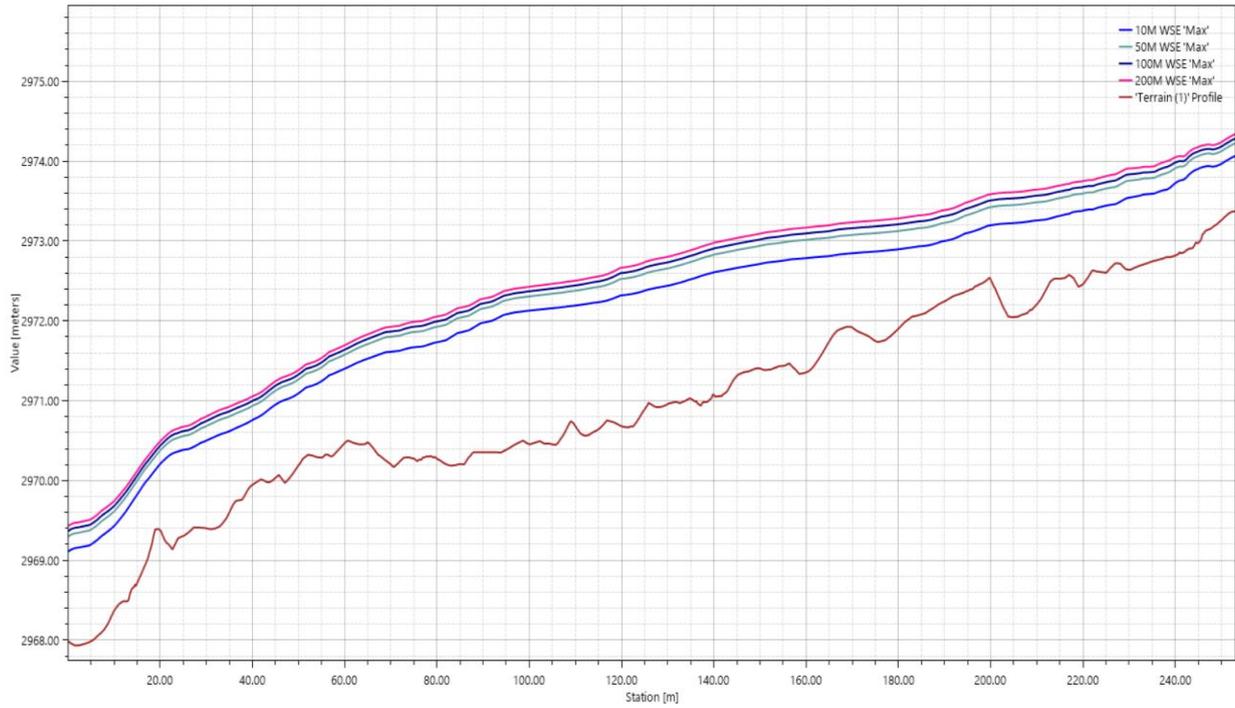


Figura 60. Perfil de flujo hiperconcentrado 0+000 – 0+250m.

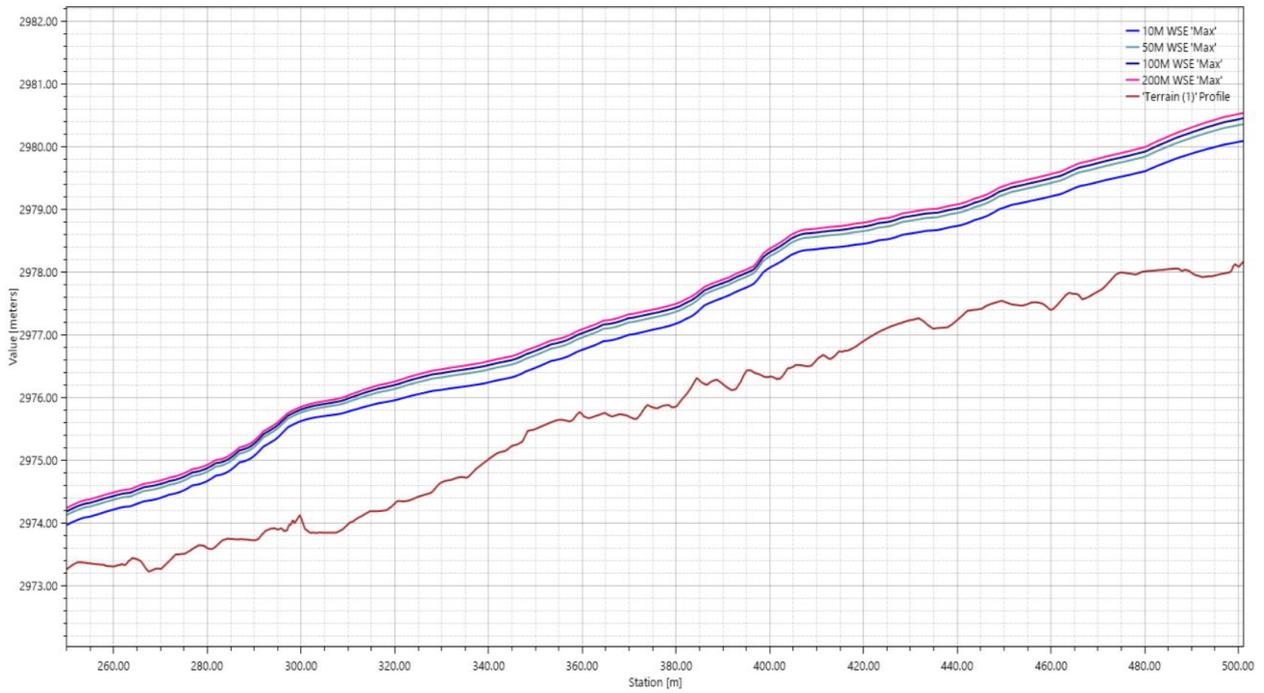


Figura 61. Perfil de flujo hiperconcentrado 0+250 – 0+500m

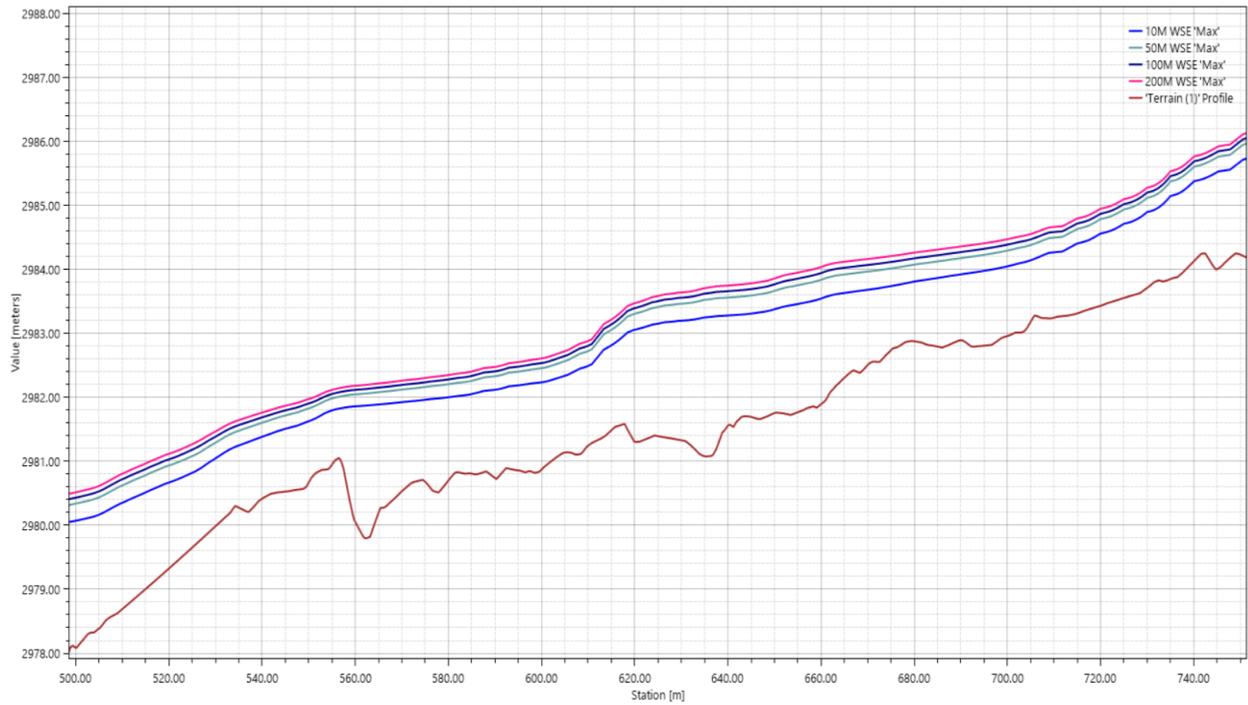


Figura 62. Perfil de flujo hiperconcentrado 0+500 – 0+750m.

Fuente Elaboración Propia (2022)

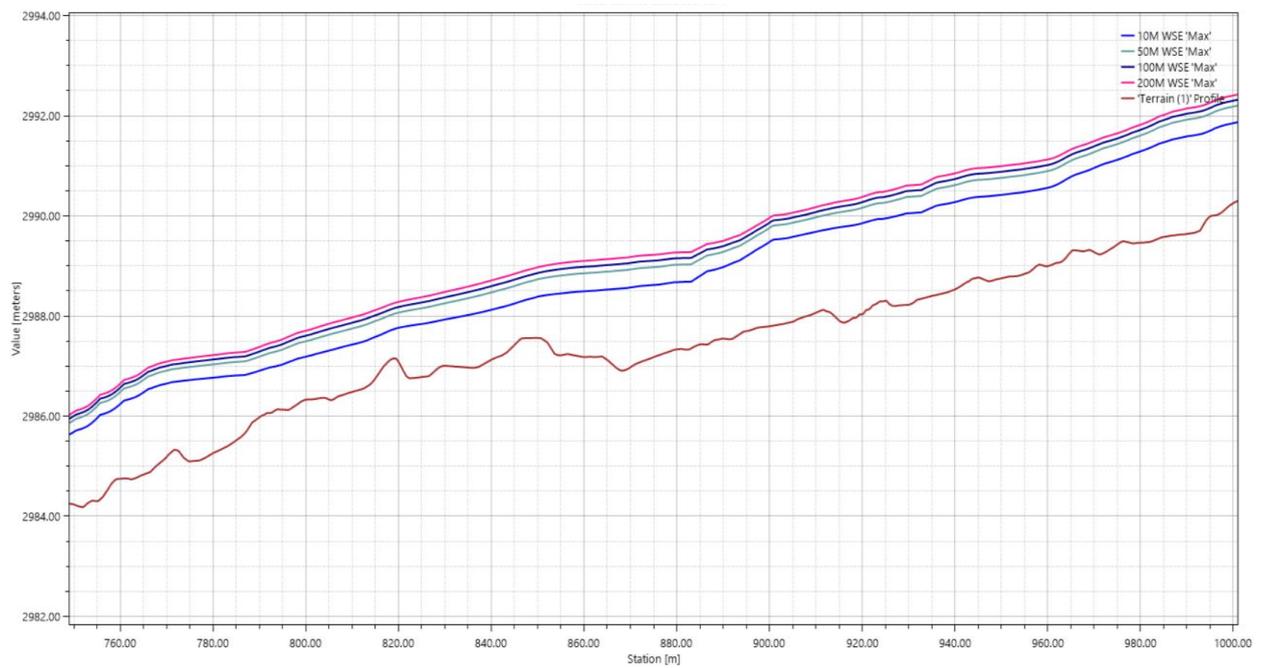


Figura 63. Perfil de flujo hiperconcentrado 0+750 – 1+000m

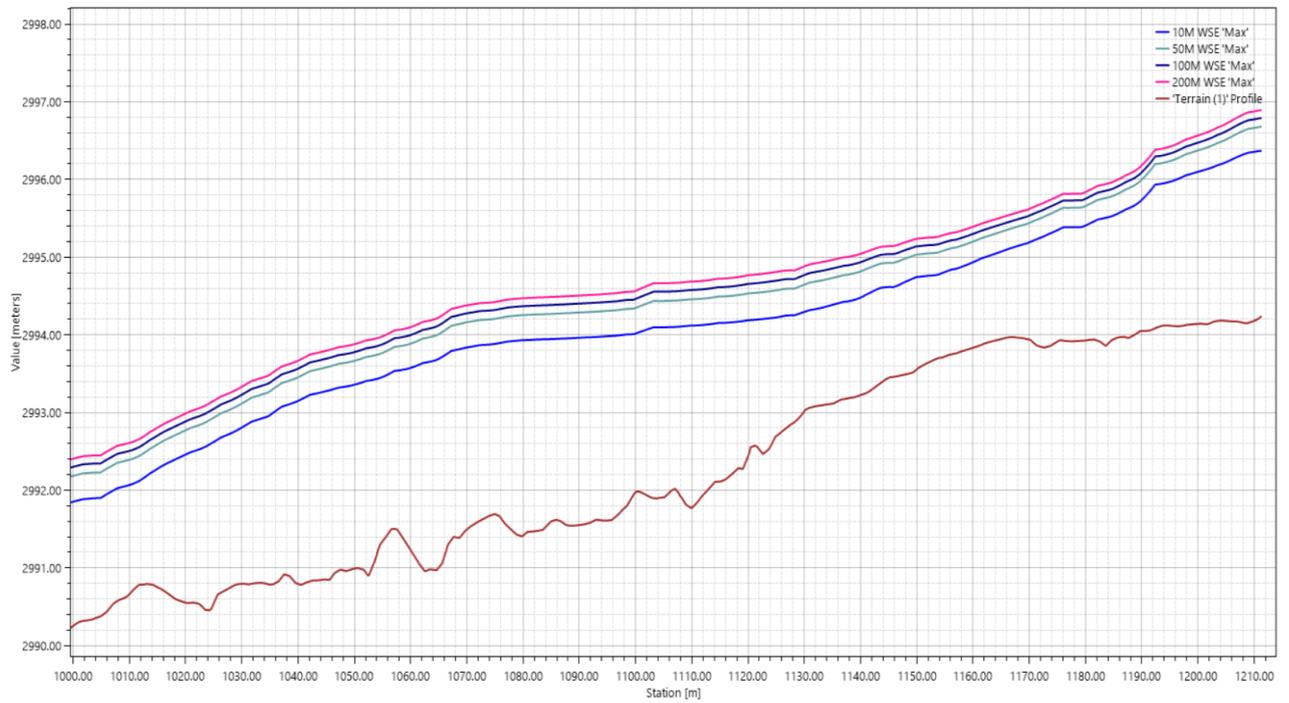


Figura 64. Perfil de flujo hiperconcentrado 1+000 – 1+200m

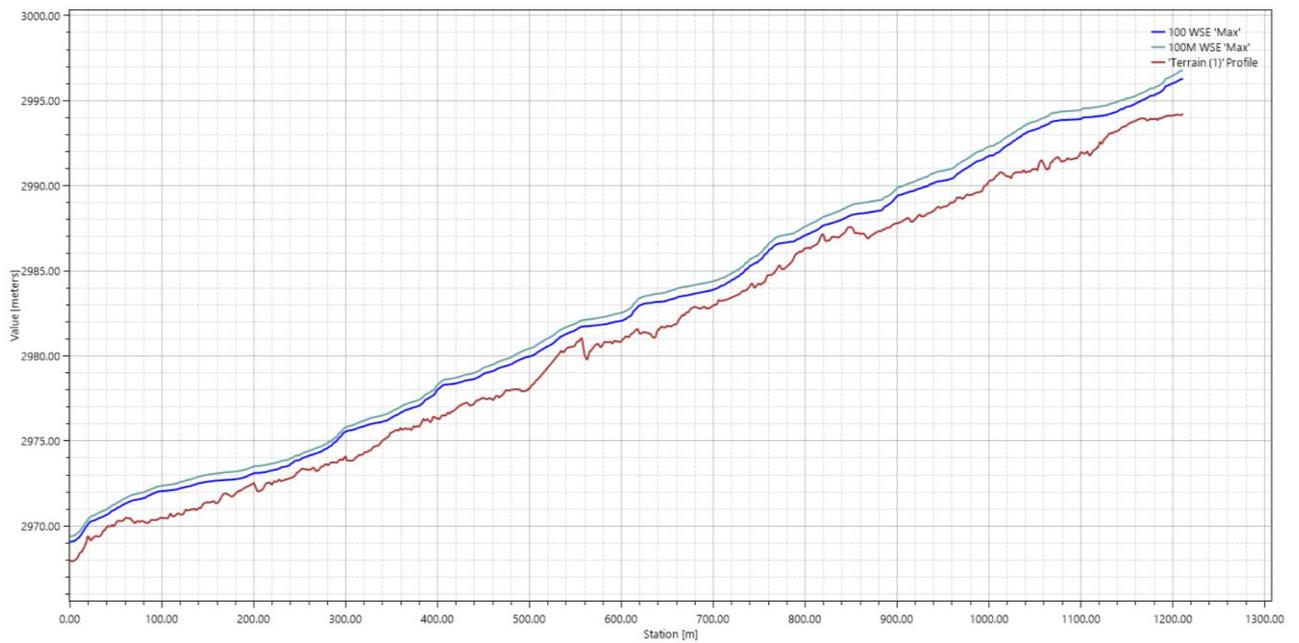


Figura 65. Perfil de flujo hiperconcentrado para TR 100 años.

4.2.2.3 Secciones Transversales

A continuación, se visualiza el nivel de aguas claras y del flujo hiperconcentrado para un periodo de retorno de 100 años, cada 100 m.

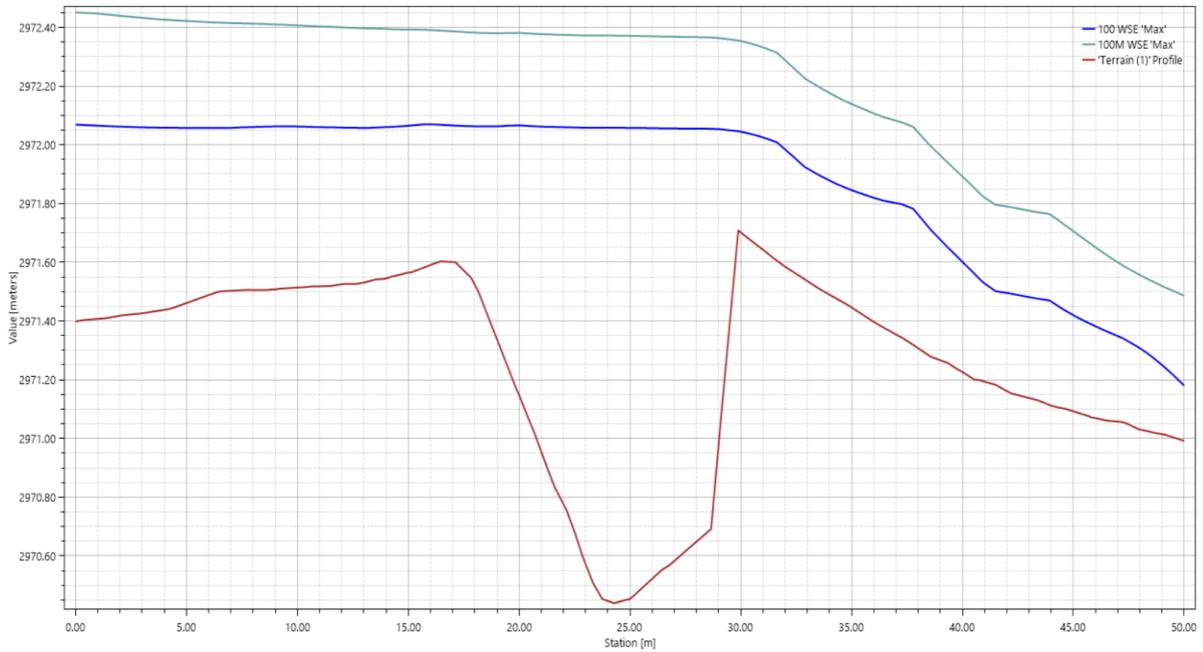


Figura 66. Sección Transversal 0+100m

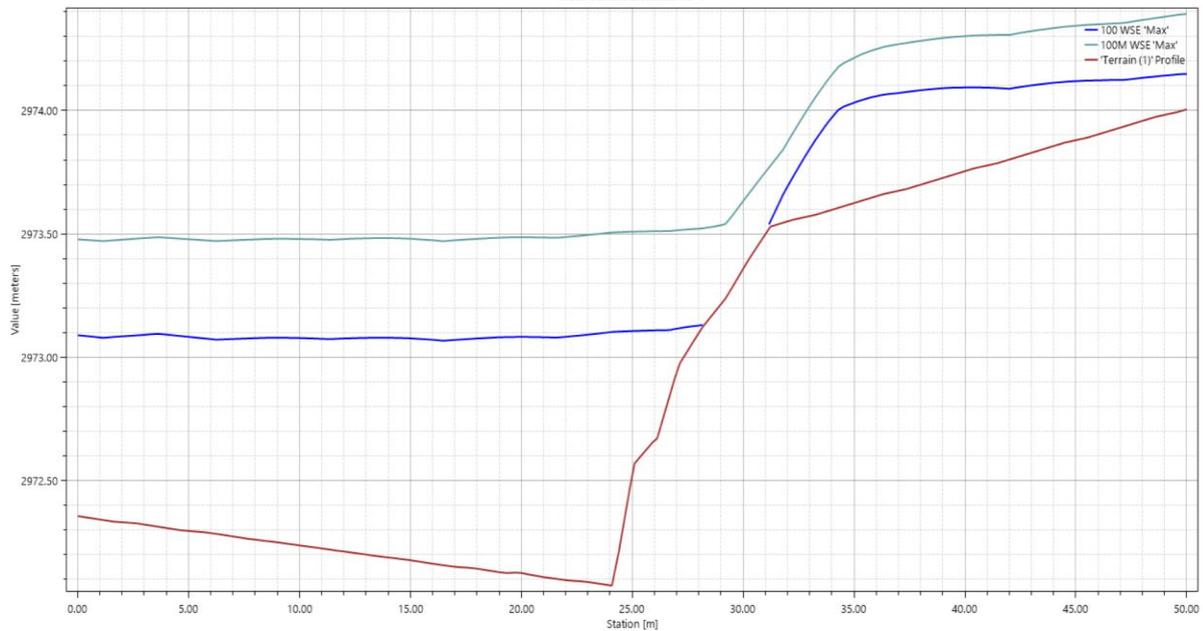


Figura 67. Sección Transversal 0+200m

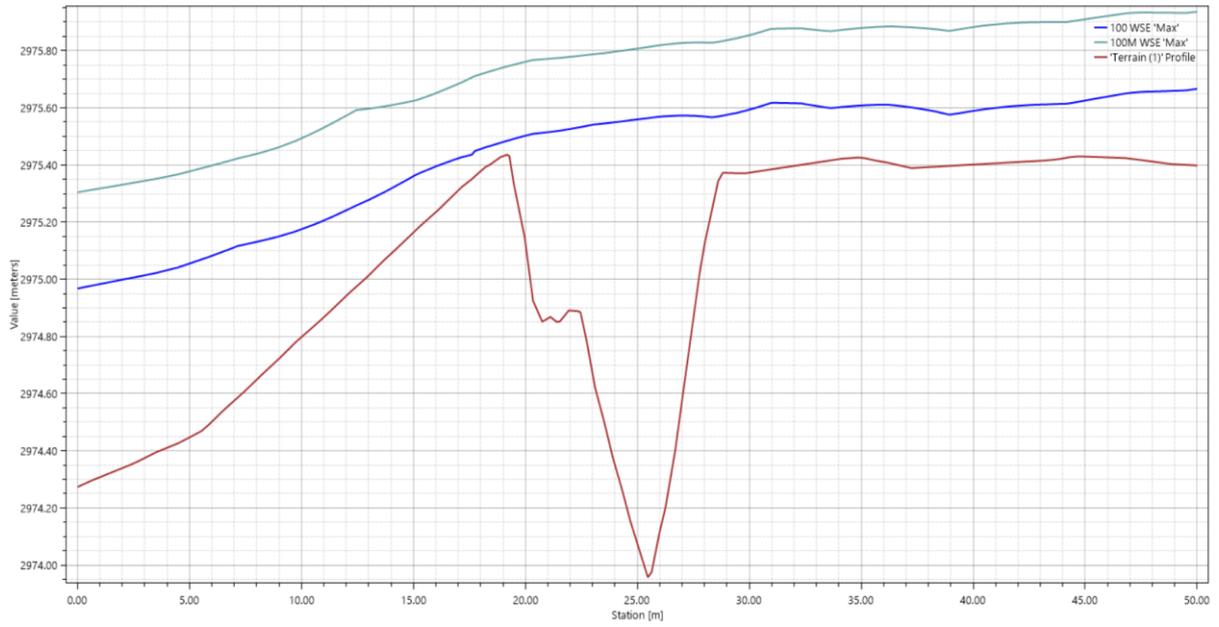


Figura 68. Sección Transversal 0+300m.

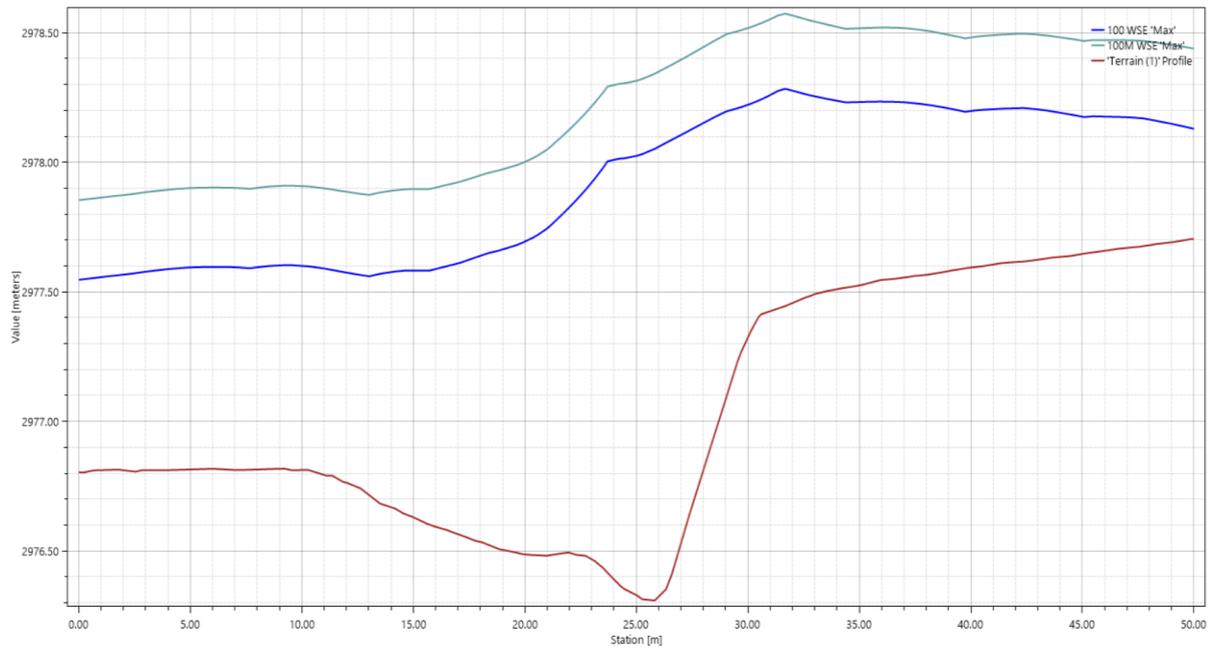


Figura 69. Sección Transversal 0+400m

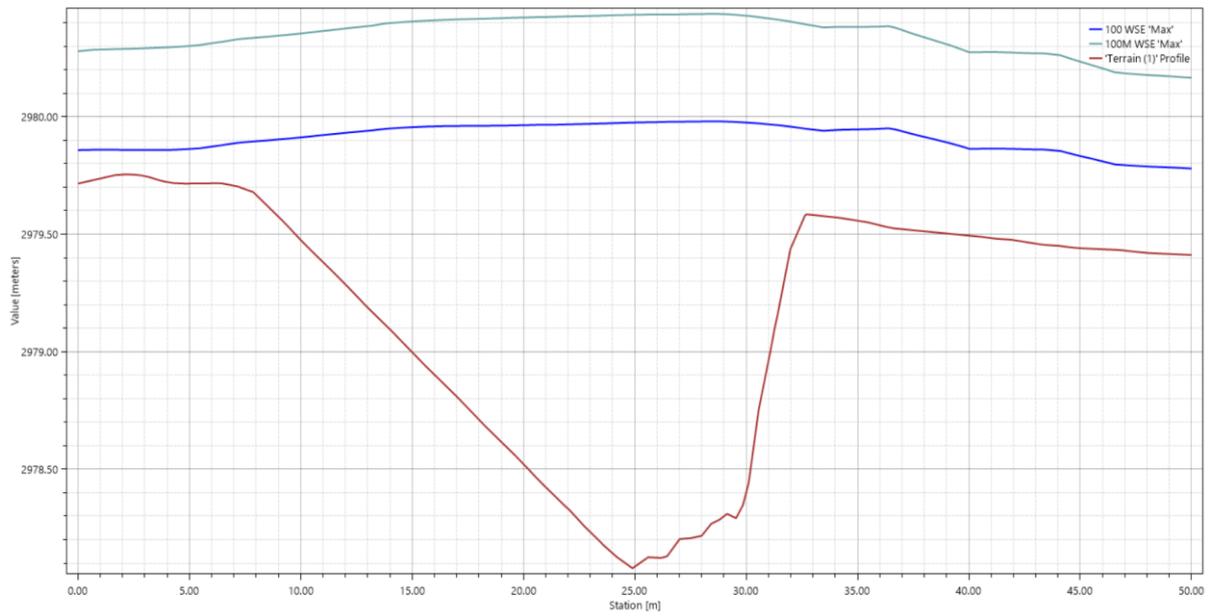


Figura 70. Sección Transversal 0+500m.

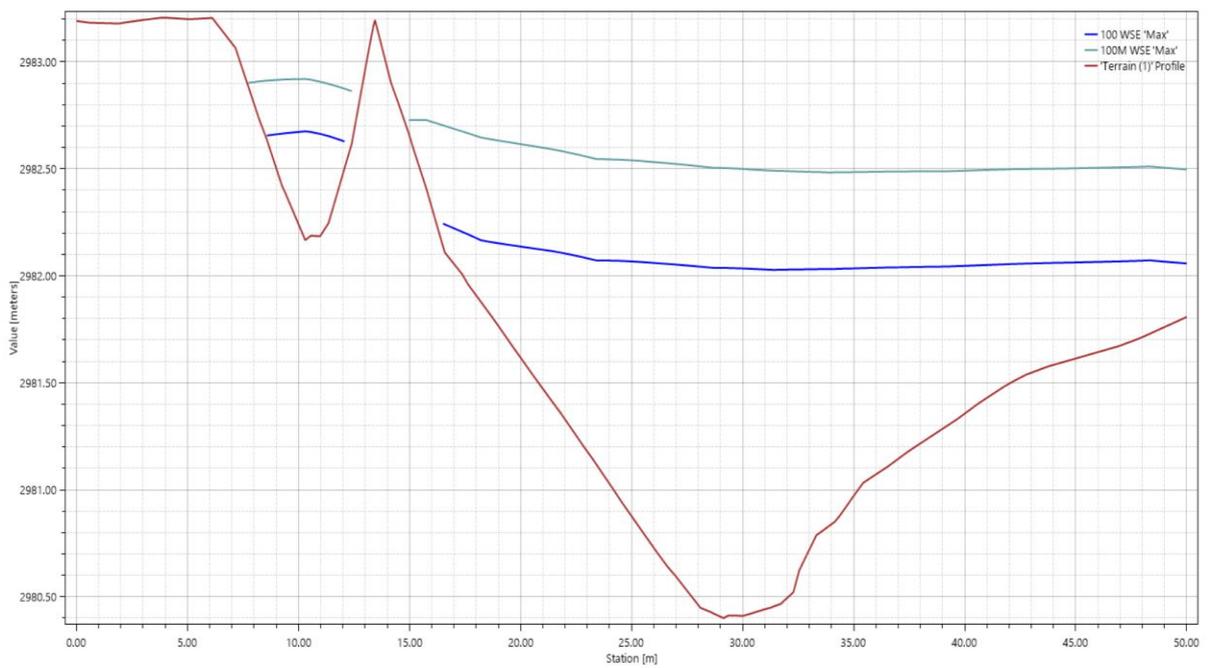


Figura 71. Sección Transversal 0+600m.

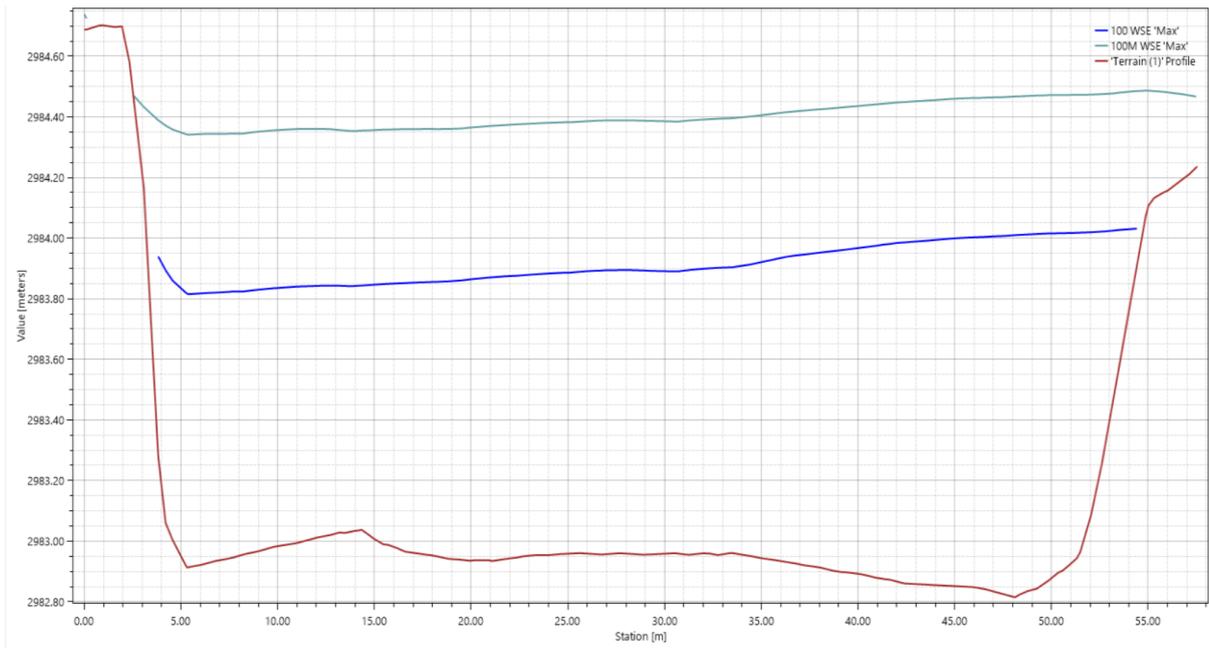


Figura 72. Sección Transversal 0+700m.

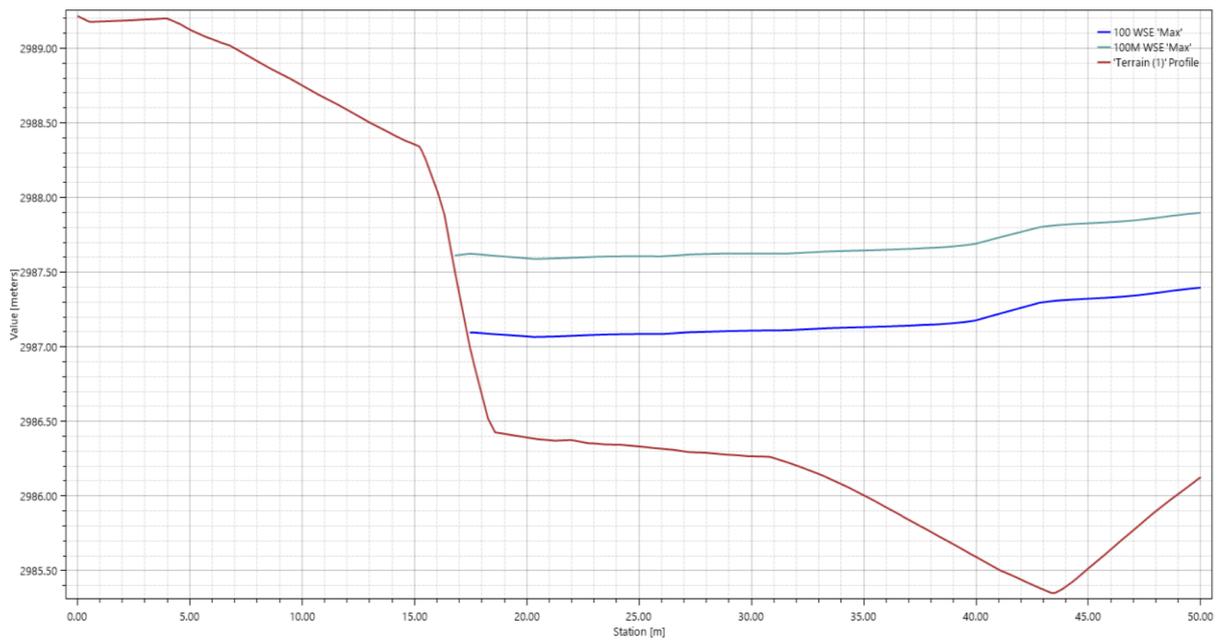


Figura 73. Sección Transversal 0+800m.

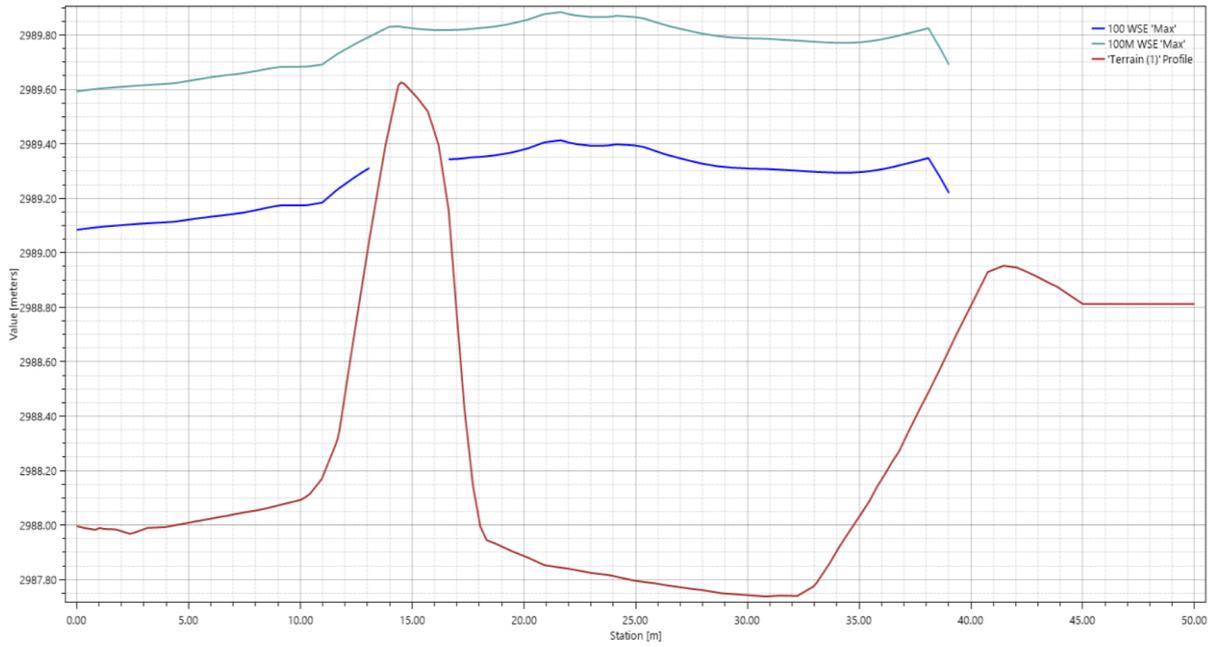


Figura 74. Sección Transversal 0+900m.

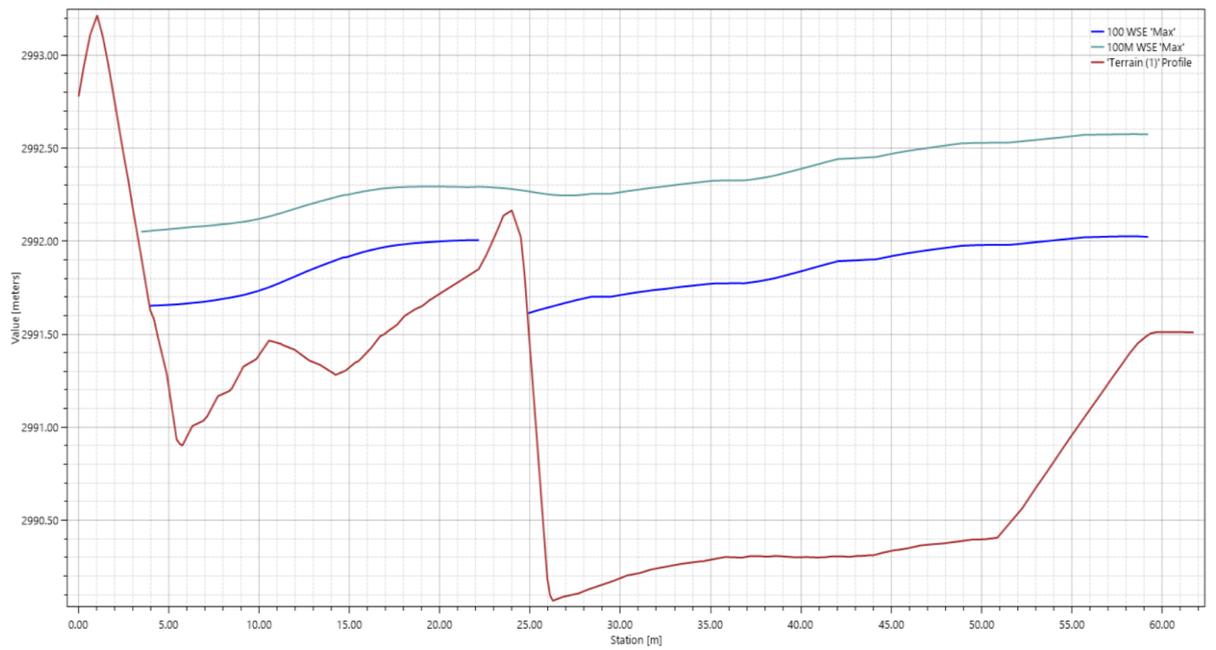


Figura 75. Sección Transversal 1+000m

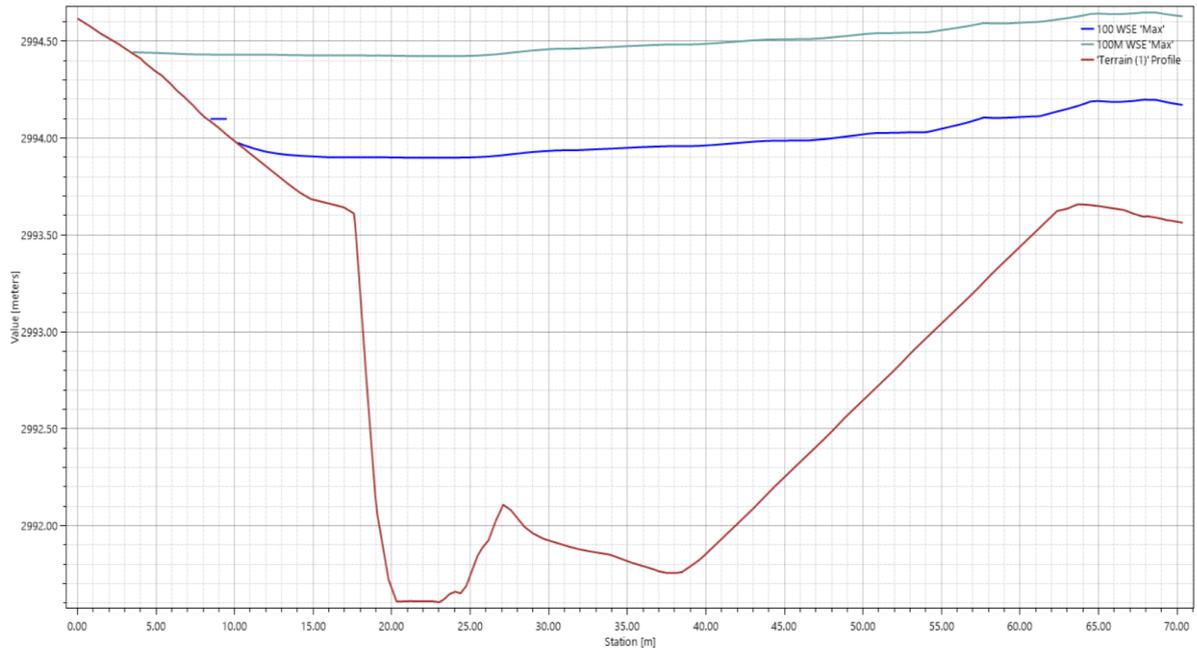


Figura 76. Sección Transversal 1+100m

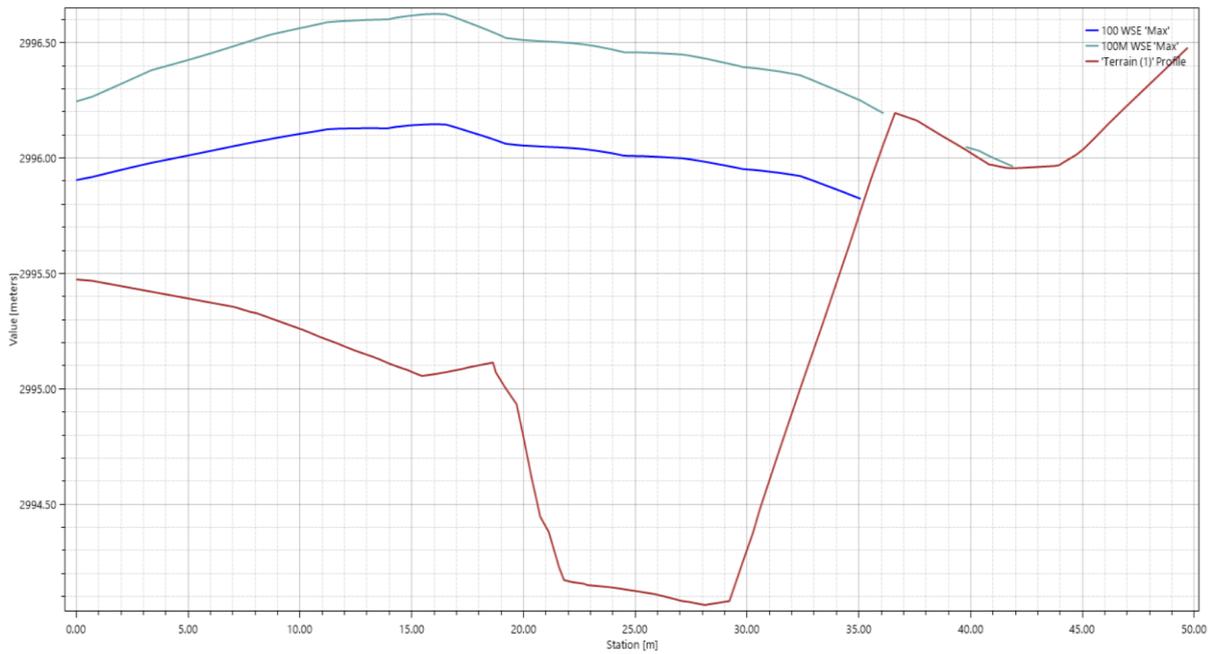


Figura 77. Sección Transversal 1+200

4.2.3 Identificación de zonas críticas

En la Figura 78 se presenta los polígonos de peligrosidad para el periodo de retorno de 10 años. El área total de la inundación fue de 10.10 Ha.

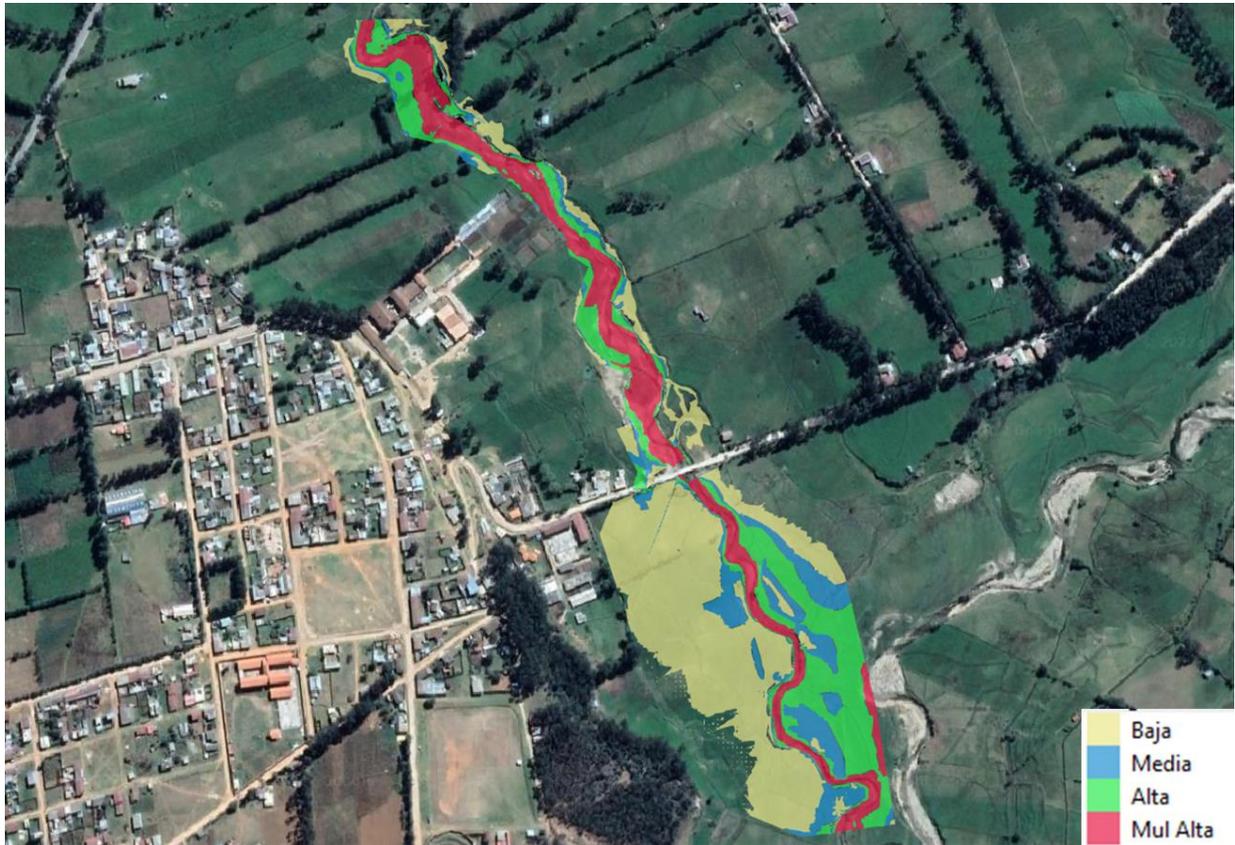


Figura 78. Áreas inundables por peligrosidad, TR de 10 años.

En la Tabla 25 y 26 se presenta la zonificación de área inundables por criterio de peligrosidad y usos de suelo, respectivamente.

Tabla 25. Zonificación de áreas inundables por peligrosidad, TR 10 años

Peligrosidad	Área (Ha)
Muy Alta	2.11
Alta	2.25
Media	1.37
Baja	4.37

Tabla 26. Zonificación de áreas inundables por uso de suelo, TR 10 años

Peligrosidad	Área (Ha)
Río	1.09
Tejido urbano continuo	0.03
Vegetación densa	8.59
Suelo desnudo	0.01
Arbustos	0.06
Zonas agroforestales	0.04
Tierra labrada	0.03
Árboles	0.2
Arena	0.05

En la figura 79 se presenta los polígonos de peligrosidad para el periodo de retorno de 50 años. El área total de la inundación fue de 10.65 Ha.

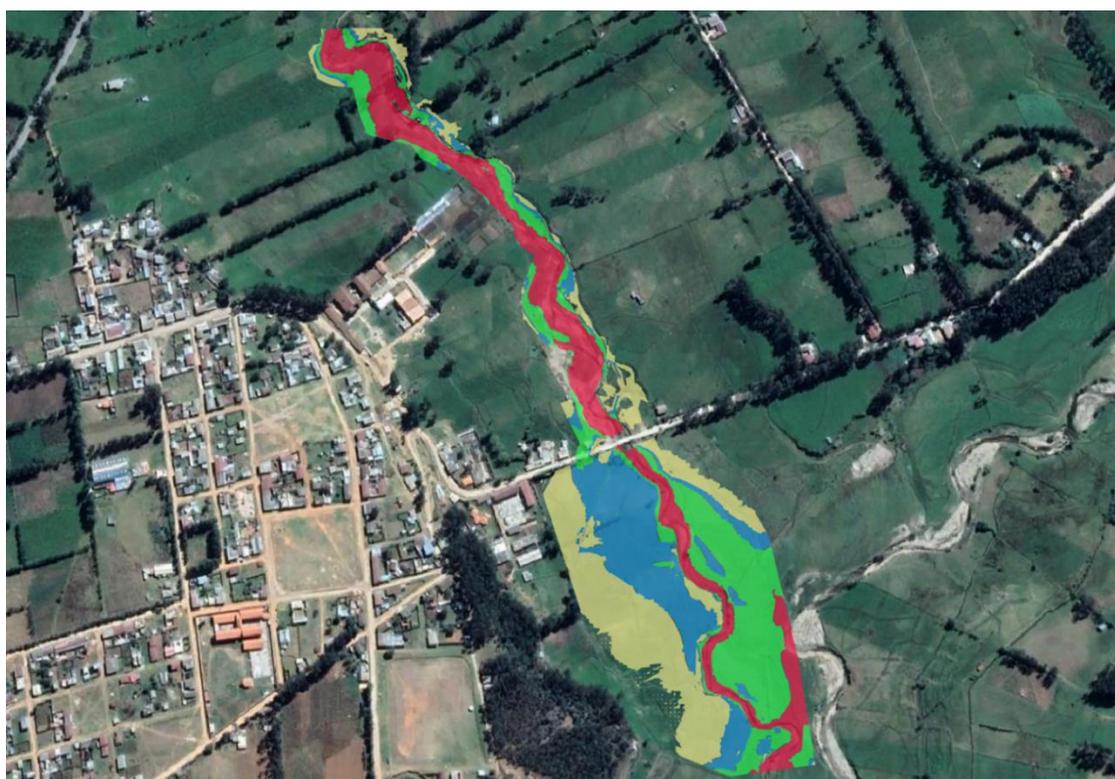


Figura 79. Áreas inundables por peligrosidad, TR de 50 años.

En la Tabla 27 y 28 se presenta la zonificación de área inundables por criterio de peligrosidad y usos de suelo, respectivamente.

Tabla 27. Zonificación de áreas inundables por peligrosidad, TR 50 años

Peligrosidad	Área (Ha)
Muy Alta	2.76
Alta	2.77
Media	2.27
Baja	2.85

Tabla 28. Zonificación de áreas inundables por uso de suelo, TR 50 años

Peligrosidad	Área (Ha)
Río	1.1
Tejido urbano continuo	0.03
Vegetación densa	9.07
Suelo desnudo	0.02
Arbustos	0.07
Zonas agroforestales	0.04
Tierra labrada	0.03
Árboles	0.24
Arena	0.05

En la Figura 80 se presenta los polígonos de peligrosidad para el periodo de retorno de 100 años. El área total de la inundación fue de 10.83 Ha.



Figura 80. Áreas inundables por peligrosidad, TR de 100 años.

En la Tabla 29 y Tabla 30 se presenta la zonificación de área inundables por criterio de peligrosidad y usos de suelo, respectivamente.

Tabla 29. Zonificación de áreas inundables por peligrosidad, TR 100 años

Peligrosidad	Área (Ha)
Muy Alta	2.99
Alta	3.03
Media	2.27
Baja	2.54

Tabla 30. Zonificación de áreas inundables por uso de suelo, TR 100 años

Peligrosidad	Área (Ha)
Río	1.1
Tejido urbano continuo	0.03
Vegetación densa	9.24
Suelo desnudo	0.02
Arbustos	0.07
Zonas agroforestales	0.04
Tierra labrada	0.03
Árboles	0.25
Arena	0.05

En la Figura 81 se presenta los polígonos de peligrosidad para el periodo de retorno de 200 años. El área total de la inundación fue de 10.97 Ha.



Figura 81. Áreas inundables por peligrosidad, TR de 200 años.

En la Tabla 31 y Tabla 32 se presenta la zonificación de área inundables por criterio de peligrosidad y usos de suelo, respectivamente.

Tabla 31. Zonificación de áreas inundables por peligrosidad, TR 200 años

Peligrosidad	Área (Ha)
Muy Alta	3.23
Alta	3.47
Media	1.93
Baja	2.34

Tabla 32. Zonificación de áreas inundables por uso de suelo, TR 200 años

Peligrosidad	Área (Ha)
Río	1.1
Tejido urbano continuo	0.03
Vegetación densa	9.37
Suelo desnudo	0.02
Arbustos	0.07
Zonas agroforestales	0.04
Tierra labrada	0.03
Árboles	0.26
Arena	0.05

4.3 MEDIDAS DE PREVENCIÓN

Las condiciones actuales del río La Encañada, nos dirigen a plantear las siguientes alternativas de solución:

- Limpieza del cauce del río, lo cual nos permitirá contar con mayor sección transversal de río, aumentando así la capacidad hidráulica, ya que se observó presencia de plantas en el cauce, escombros y desmonte.
- Se recomienda ensanchar el lecho del río La Encañada, y así obtener menos área inundable y menor altura de obras de defensa ribereña, ya que, en las zonas más angostas, el lecho del río mide entre 4 a 6 metros de ancho.
- Construcción de obras de defensa ribereña, a fin de evitar daños ocasionados por inundaciones.
- Contar con planeamiento urbano, evitando la construcción de viviendas en zonas aledañas al cauce natural.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

- La cuenca del río La Encañada posee un área 56.43 km², el cauce principal tiene una longitud de 17.34 km, según el factor de forma tenemos una cuenca de forma oblonga, con un número de orden del río de 3; los tiempos de concentración de las subcuencas alta, media y baja según Kirpich son 63.7, 62.1 y 28 min, respectivamente.
- Para estimar los caudales máximos el método de Muskingum con parámetros $X=0.33$ y $K=0.93$ implementado en HEC HMS. Los caudales máximos son de 60.5, 87, 97.8, 108.2 m³/s, para períodos de retorno de 10, 50, 100 y 200 años respectivamente.
- La modelación hidráulica se ha realizado en un tramo de 1.2km, usando el software HEC RAS que tiene implementado el módulo de flujo no newtoniano (flujo hiperconcentrado).
- De acuerdo a los resultados de la modelización hidráulica bidimensional se observa desbordamiento por la margen izquierda y afectación de 6 viviendas con una peligrosidad baja a media, alcanzando tirantes máximos de 2.7, 3.03, 3.1, 3.2, para períodos de retorno de 10, 50, 100 y 200 años respectivamente.
- En todo el tramo de estudio las áreas afectadas por desbordamiento del río La Encañada son de 10.10, 10.65, 10.83 y 10.97 ha, para períodos de retorno de 10, 50, 100 y 200 años respectivamente.

5.2 RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar gestiones con las autoridades locales para la implementación de estaciones hidrométricas en distintos sectores de la cuenca, de modo que se tenga un mejor registro de caudales.
- Se recomienda realizar estudios de investigación de tesis de post grado teniendo en cuenta los datos obtenidos en la presente investigación.
- Se recomienda el estudio de investigación sobre el coeficiente de rugosidad en el río la encañada.
- Realizar estudios de erosión y sedimentación en el río La Encañada, ya que se observó colmatación de material, en el recorrido del tramo estudiado, esto puede aumentar los efectos de eventos extraordinarios.
- Se recomienda gestionar una carta de presentación de parte de la universidad hacia el lugar donde se va a realizar los trabajos de investigación ya que esto permitirá realizar los trabajos de campo de manera pacífica y coordinada con los pobladores de dicha localidad.

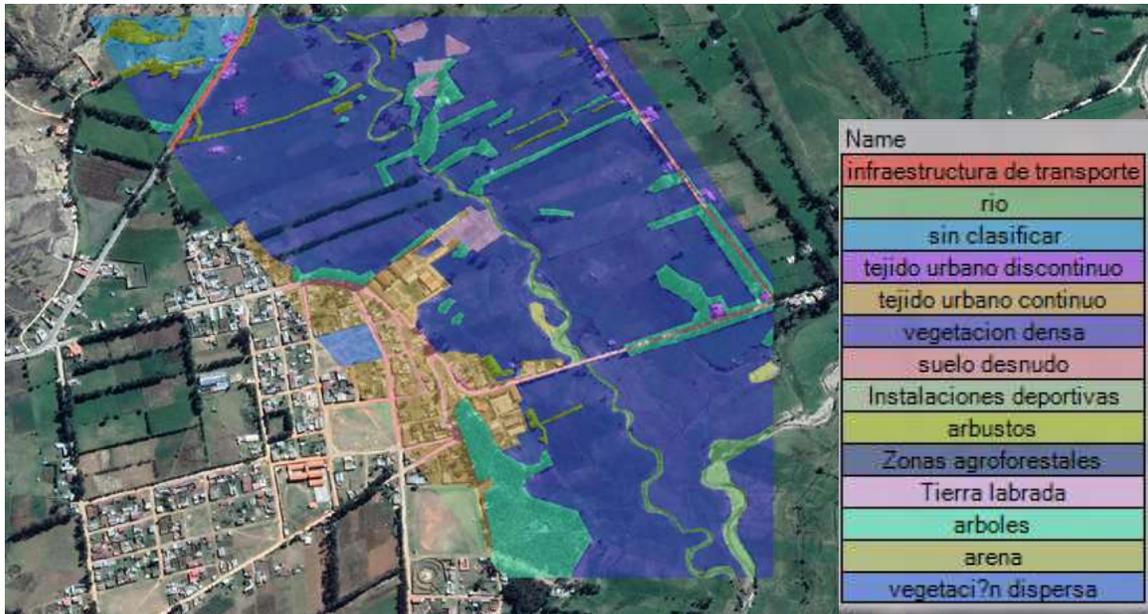
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 **Villón, Máximo.** *Hidrología*. Lima : Editorial Villón 2a ed., p. 21, 34, 41, 60, 2011.
- 2 **Gaspari, Fernanda, y otros.** Elementos metodológicos para el manejo de cuencas hidrográficas. s.l., Buenos Aires, Argentina : Universidad Nacional de La Plata; 1a ed; p. 52 , 2013.
- 3 **Enríquez , Muguera Maira Pilar y Enríquez , Muguera María Lorena .** Aplicación del método de muskingum (modelo hidrológico) en el pronóstico de crecientes e inundaciones en la zona Quevedo –Mocache. [Tesis para optar el título de Ing. Gestión Ambiental]. Quevedo, Ecuador, UNIVERSIDAD TÉCNICA ESTATAL DE QUEVEDO . 44 p. : s.n., 2011.
- 4 **Villon, Bejar Máximo.** HEC-HMS Ejemplos. Lima, Perú : MaxSoft, 2016.
- 5 **INDECI.** Manual de estimación del riesgo ante inundaciones fluviales. Lima, Perú : s.n., 2011.
- 6 **Chow, Ven Te.** *Hidrología aplicada*. Colombia : Editorial Nomos S. A., 2000.
- 7 **Modelización bidimensional del flujo en lámina libre en aguas poco profundas.** 2012.
- 8 **Ministerio de Transporte y Comunicaciones.** Manual de hidrología, hidráulica y drenaje. Lima : Empresa editirial Macro E.I.R.L., 2011.
- 9 **Cruz, Bartolo, y otros.** Análisis morfométrico de la cuenca hidrográfica del río Cuale, Jalisco, México. s.l., México., p. 27-28 : Recuperado de: <http://www.redalyc.org/pdf/674/67441039004.pdf>, 2015.

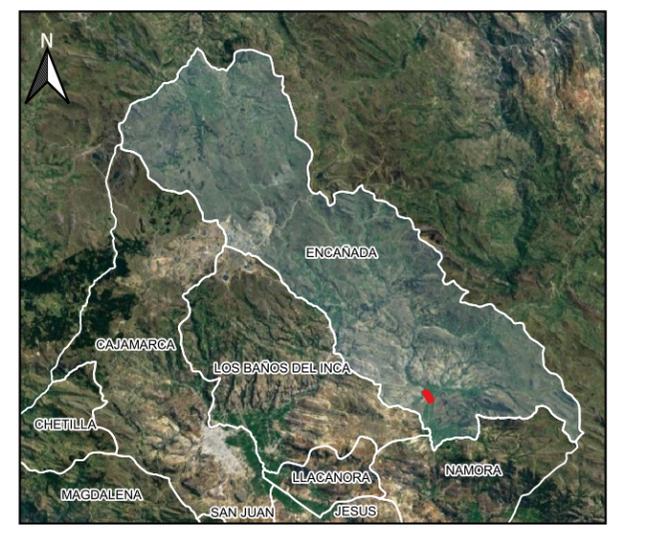
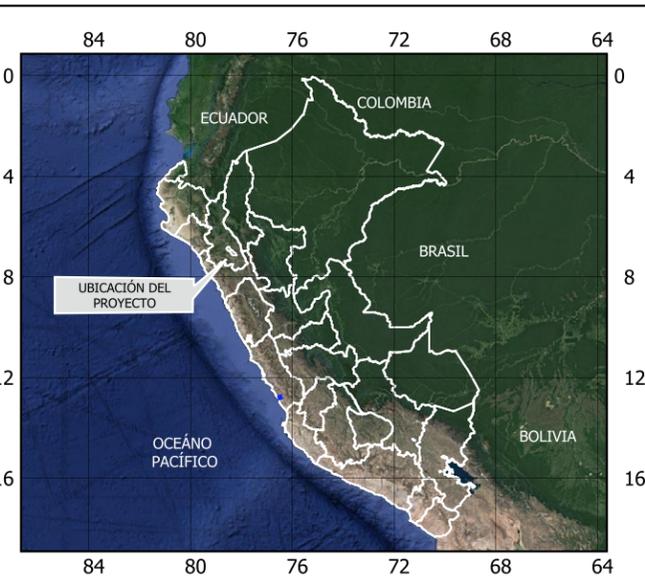
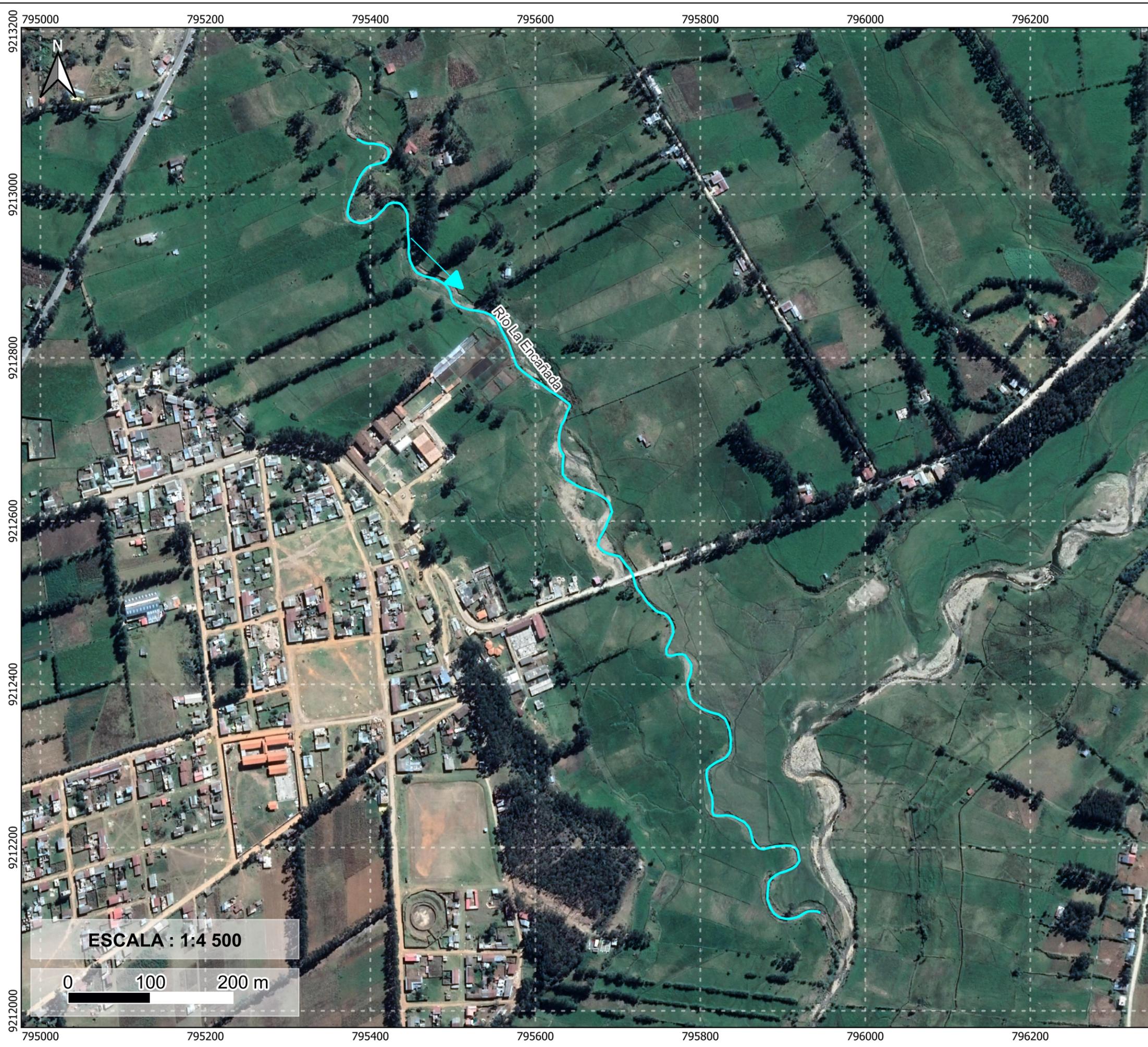
- 10 Guarniz , Carlos.** Comparación de los modelos Hidráulicos Unidimensional (HEC-RAS) y Bidimensional (IBER) en el Análisis de Rotura en Presas de Materiales Suelos; y Aplicación a la Presa Palo Redondo. [Tesis para obtener el título de: Ingeniero Civil]. s.l., Perú : Universidad Privada Antenor Orrego, 2014.
- 11 INETER/COSUDE. Inundaciones Fluviales. 2005.**
- 12 CHOW, VEN TE.** *Hidráulica de canales abiertos.* Colombia : McGRAW-HILL INTERAMERICANA S.A., 1994.
- 13 Gaspari, Fernanda Julia .** Plan de ordenamiento territorial en cuencas serranas degradadas utilizando Sistemas de Información Geográfica (S.I.G.) . Tesis de maestría. 2007.
- 14 Instituto Nacional de Defensa Civil.** Manual de estimación del riesgo ante inundaciones fluviales. Lima, Perú : s.n., 2011.
- 15 Modelización bidimensional del flujo en lámina libre en aguas poco profundas.** s.l. : De: Manual básico de usuario. 26 p., 2015.
- 16 Martínez , de Azagra Paredes Andrés.** Criterios relativos a la zonificación de áreas inundables y usos admisibles. *Virtualpro.* [En línea] 11 de 12 de 2021. <https://bucketvirtualpro-private.s3.amazonaws.com>

ANEXOS

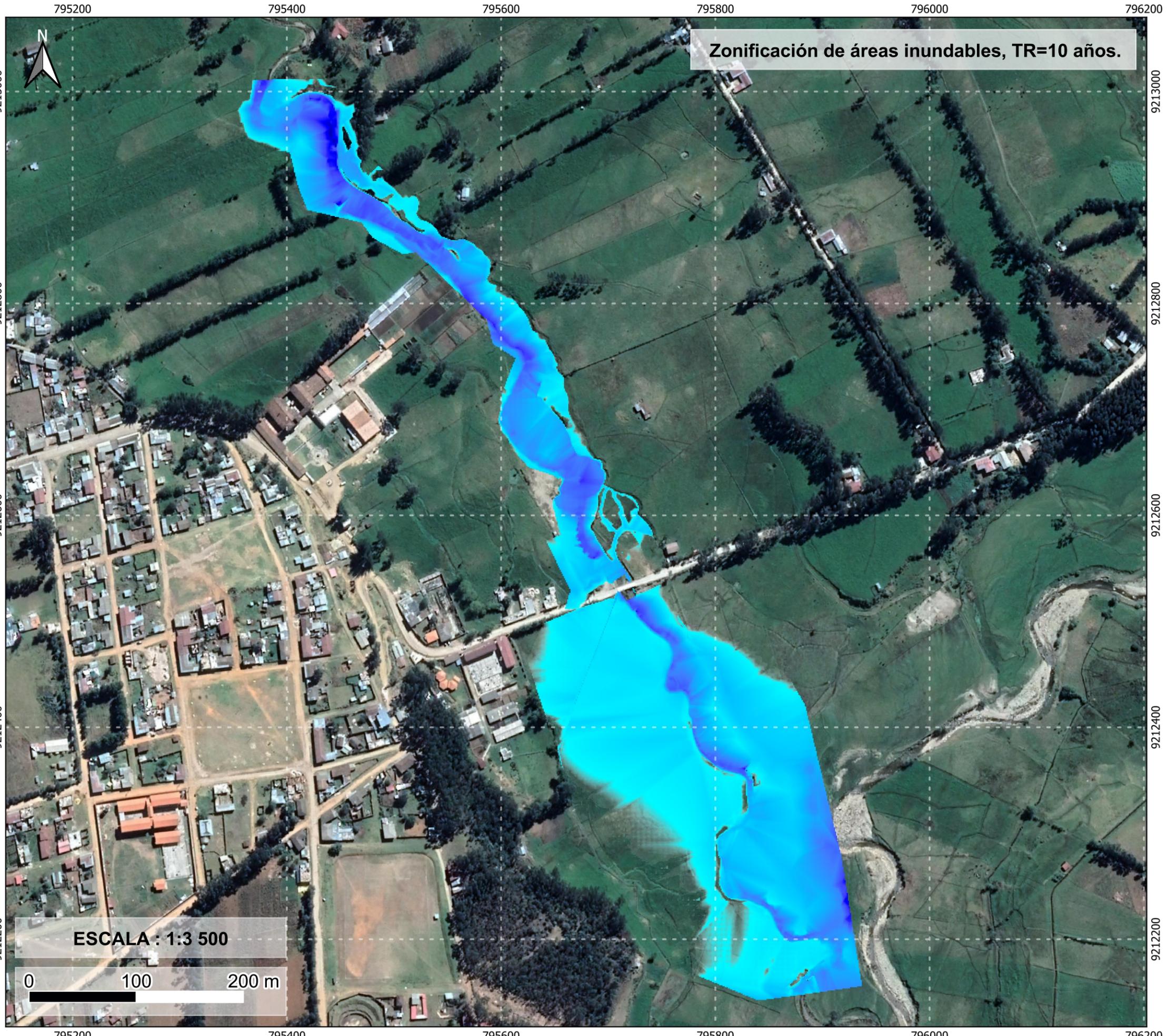
VALOR DEL COEFICIENTE DE MANNING



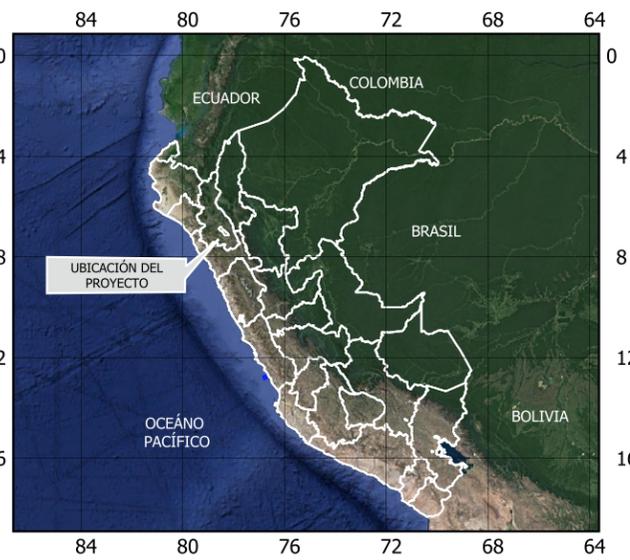
Uso suelo	Valor rugosidad
infraestructura de transporte	0.1
rio	0.025
sin clasificar	0.032
tejido urbano discontinuo	0.09
tejido urbano continuo	0.1
vegetacion densa	0.18
suelo desnudo	0.023
Instalaciones deportivas	0.09
arbustos	0.05
Zonas agroforestales	0.06
Tierra labrada	0.04
arboles	0.12
arena	0.023
vegetaci?n dispersa	0.025



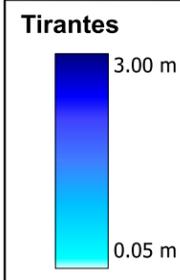
	UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA HIDRÁULICA	
	Tesis: "ZONIFICACIÓN DE ÁREAS INUNDABLES EN EL CENTRO POBLADO DE POLLOC OCASIONADO POR AVENIDAS EXTRAORDINARIAS DEL RÍO LA ENCAÑADA - CAJAMARCA"	
Tesista: Bach. Caruanambo Rudas Edwar Paúl	Escala: 1:3,500	Fecha: NOV 2022
Asesor: Dr. Ing. Gaspar Méndez Cruz	Plano: Mapa de ubicación.	N°: A1-01



Zonificación de áreas inundables, TR=10 años.



LEYENDA TEMÁTICA



CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

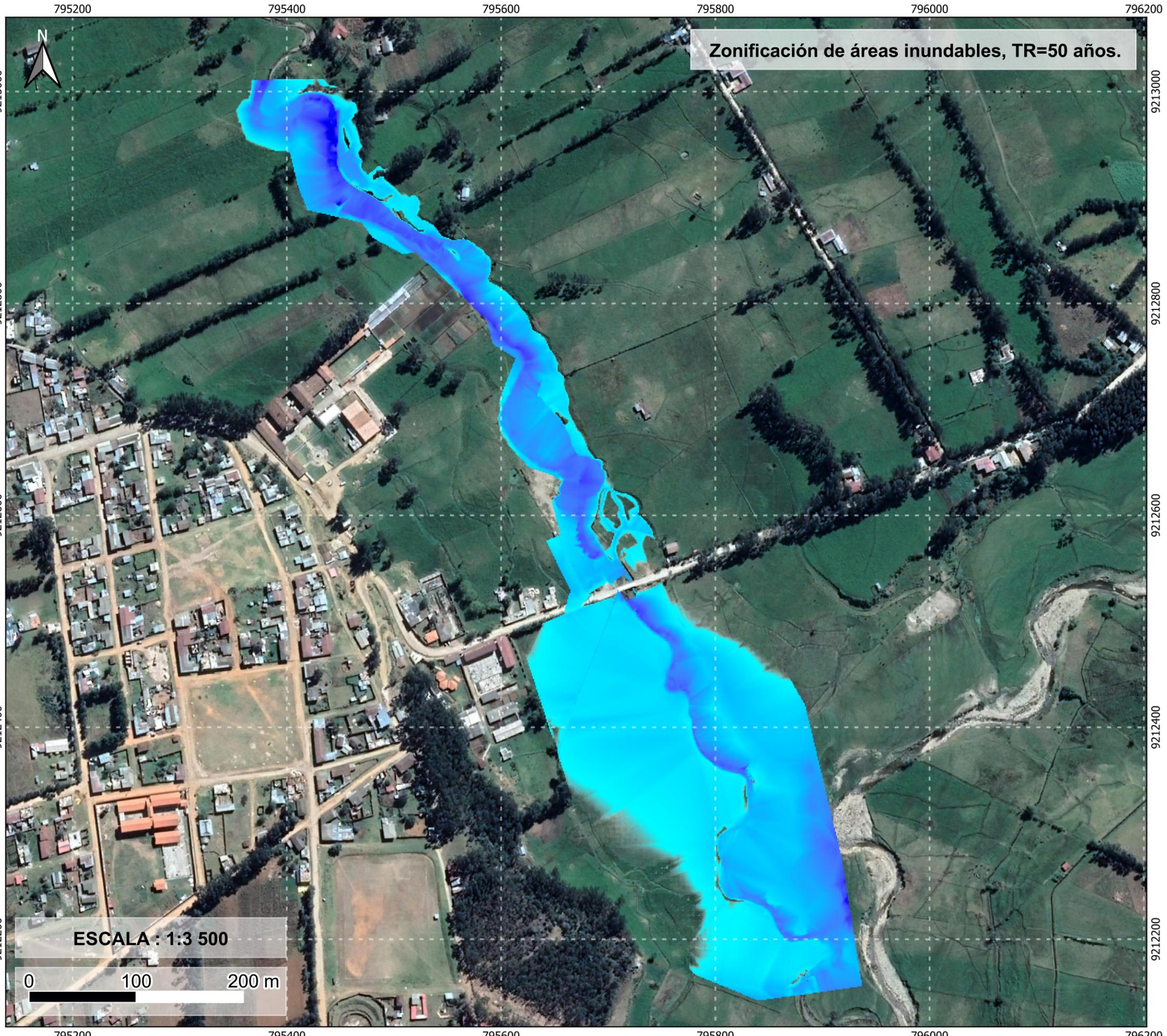
Projected Coordinate Systems: WGS 1984 UTM Zone 17S
 Projection Transverse Mercator
 Central Meridian -81.0
 Latitude of Origin 0.0



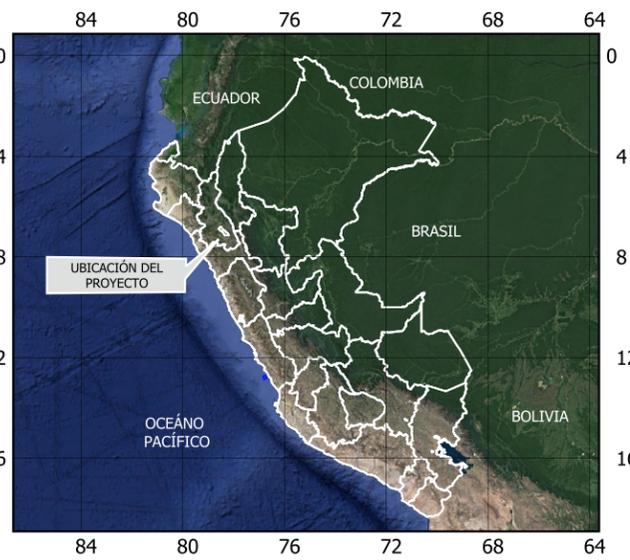
UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA
 FACULTAD DE INGENIERÍA
 ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

Tesis:
"ZONIFICACIÓN DE ÁREAS INUNDABLES EN EL CENTRO POBLADO DE POLLOC OCASIONADO POR AVENIDAS EXTRAORDINARIAS DEL RÍO LA ENCAÑADA - CAJAMARCA"

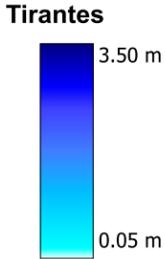
Tesista: Bach. Caruanambo Rudas Edwar Paúl	Escala: 1:3,500
Asesor: Dr. Ing. Gaspar Méndez Cruz	Fecha: NOV 2022
Plano: Mapa de peligrosidad para un tiempo de retorno de 10 años.	N°: A1-01



Zonificación de áreas inundables, TR=50 años.



LEYENDA TEMÁTICA



CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

Projected Coordinate Systems: WGS 1984 UTM Zone 17S
 Projection Transverse Mercator
 Central Meridian -81.0
 Latitude of Origin 0.0

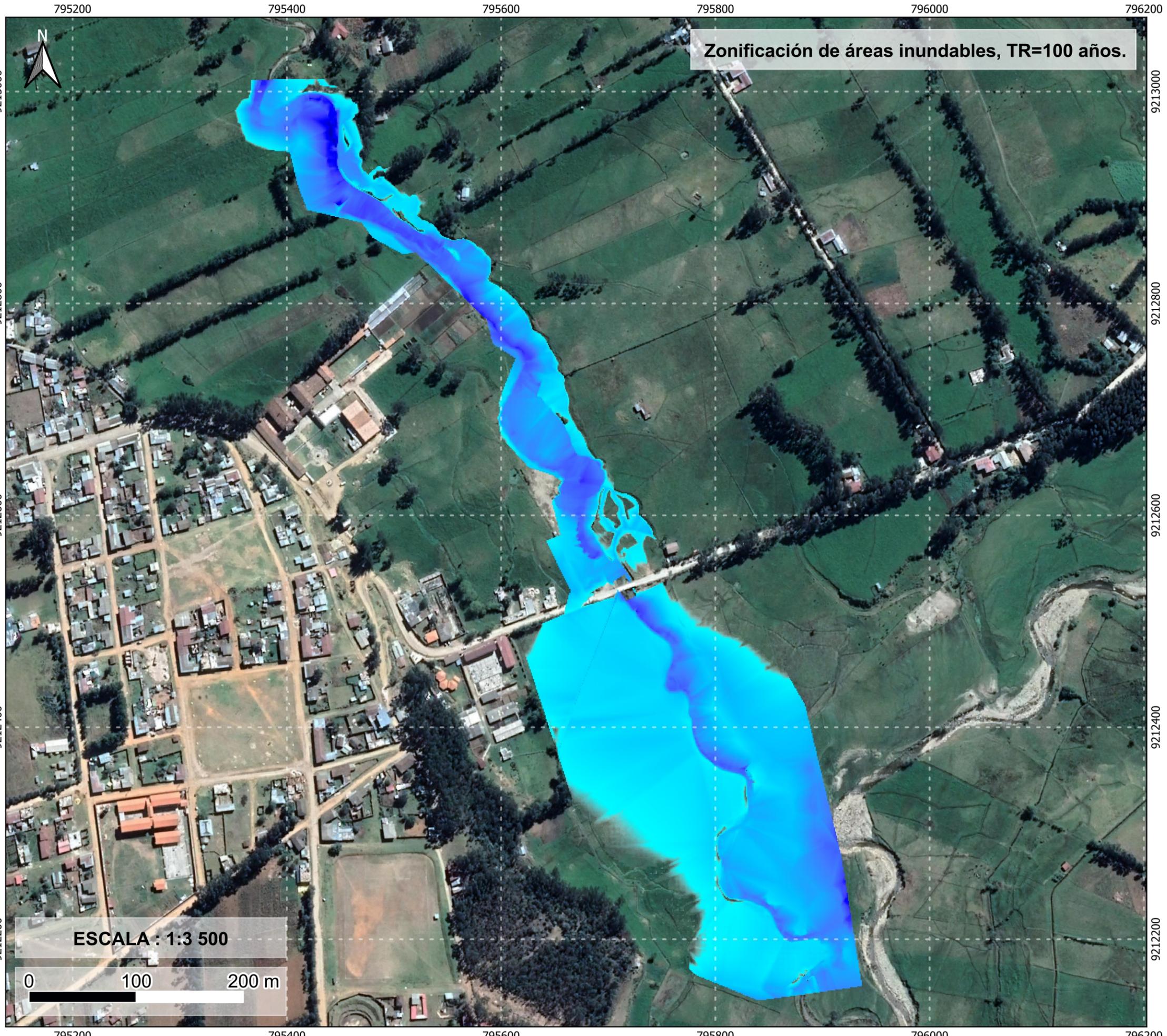


UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA
 FACULTAD DE INGENIERÍA
 ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

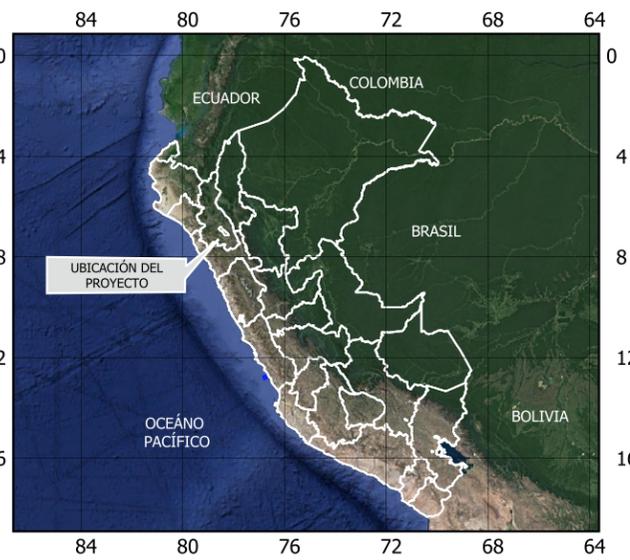
Tesis: **"ZONIFICACIÓN DE ÁREAS INUNDABLES EN EL CENTRO POBLADO DE POLLOC OCASIONADO POR AVENIDAS EXTRAORDINARIAS DEL RÍO LA ENCAÑADA - CAJAMARCA"**

Tesista: Bach. Caruanambo Rudas Edwar Paúl	Escala: 1:3,500
Asesor: Dr. Ing. Gaspar Méndez Cruz	Fecha: NOV 2022
Plano: Mapa de peligrosidad para un tiempo de retorno de 50 años.	N°: A1-02

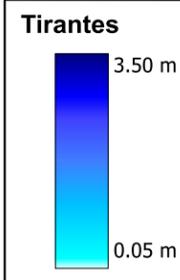




Zonificación de áreas inundables, TR=100 años.



LEYENDA TEMÁTICA



CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

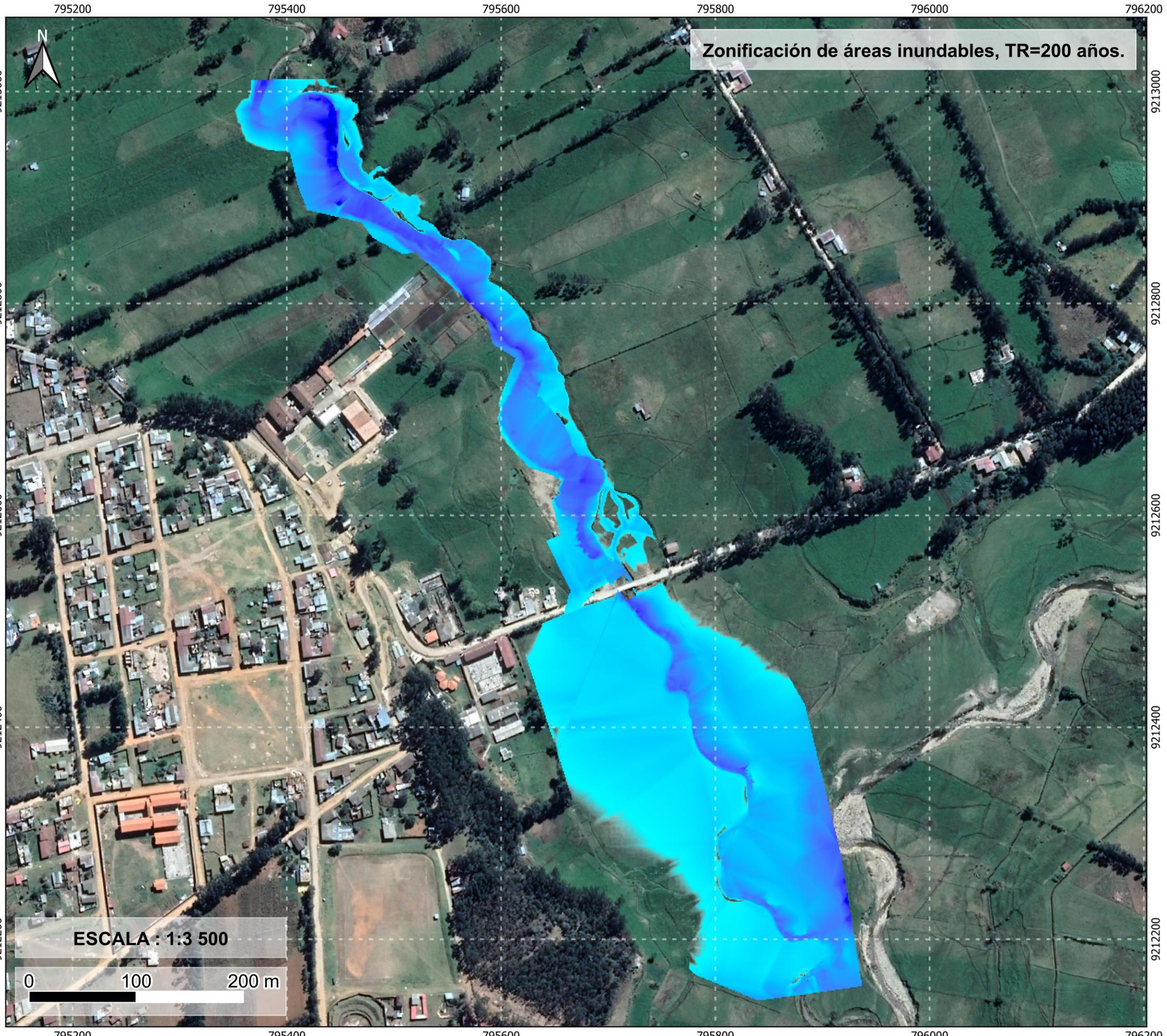
Projected Coordinate Systems: WGS 1984 UTM Zone 17S
 Projection Transverse Mercator
 Central Meridian -81.0
 Latitude of Origin 0.0



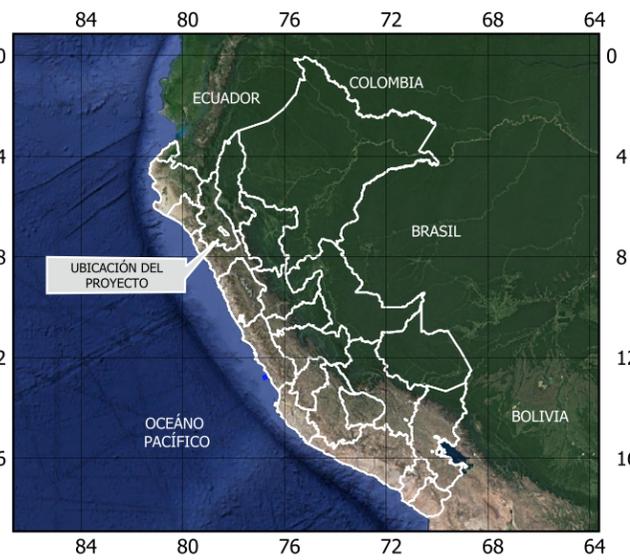
UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA
 FACULTAD DE INGENIERÍA
 ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

Tesis:
"ZONIFICACIÓN DE ÁREAS INUNDABLES EN EL CENTRO POBLADO DE POLLOC OCASIONADO POR AVENIDAS EXTRAORDINARIAS DEL RÍO LA ENCAÑADA - CAJAMARCA"

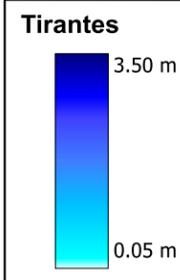
Tesista: Bach. Caruanambo Rudas Edwar Paúl	Escala: 1:3,500
Asesor: Dr. Ing. Gaspar Méndez Cruz	Fecha: NOV 2022
Plano: Mapa de peligrosidad para un tiempo de retorno de 100 años.	N°: A1-03



Zonificación de áreas inundables, TR=200 años.



LEYENDA TEMÁTICA



CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

Projected Coordinate Systems: WGS 1984 UTM Zone 17S
 Projection Transverse Mercator
 Central Meridian -81.0
 Latitude of Origin 0.0



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA
 FACULTAD DE INGENIERÍA
 ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

Tesis: **"ZONIFICACIÓN DE ÁREAS INUNDABLES EN EL CENTRO POBLADO DE POLLOC OCASIONADO POR AVENIDAS EXTRAORDINARIAS DEL RÍO LA ENCAÑADA - CAJAMARCA"**

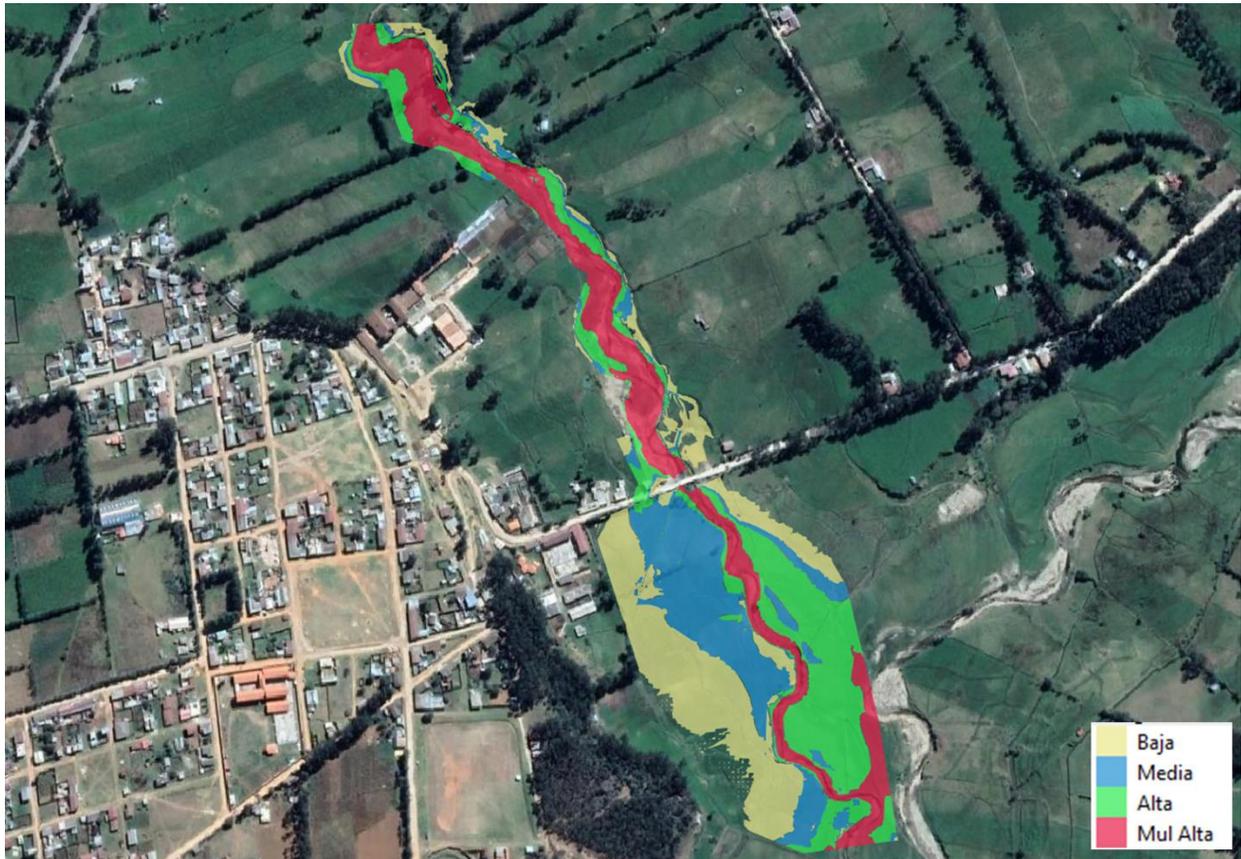
Tesista: Bach. Caruanambo Rudas Edwar Paúl	Escala: 1:3,500
Asesor: Dr. Ing. Gaspar Méndez Cruz	Fecha: NOV 2022
Plano: Mapa de peligrosidad para un tiempo de retorno de 200 años.	N°: A1-04

CÁLCULO DE LA PELIGROSIDAD

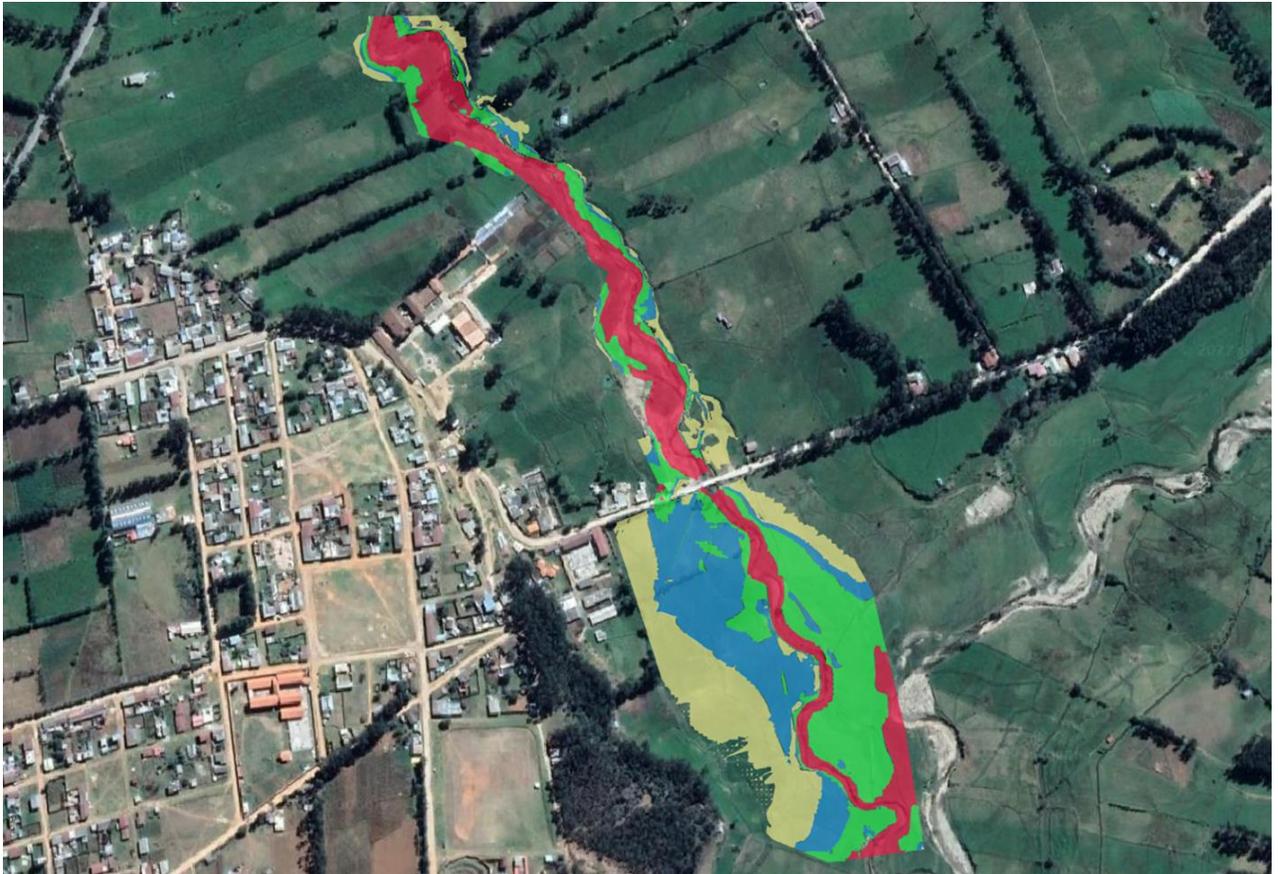
TR10	
Nivel	Area(Ha)
Muy Alta	2.11
Alta	2.25
Media	1.37
Baja	4.37
Suma	10.10



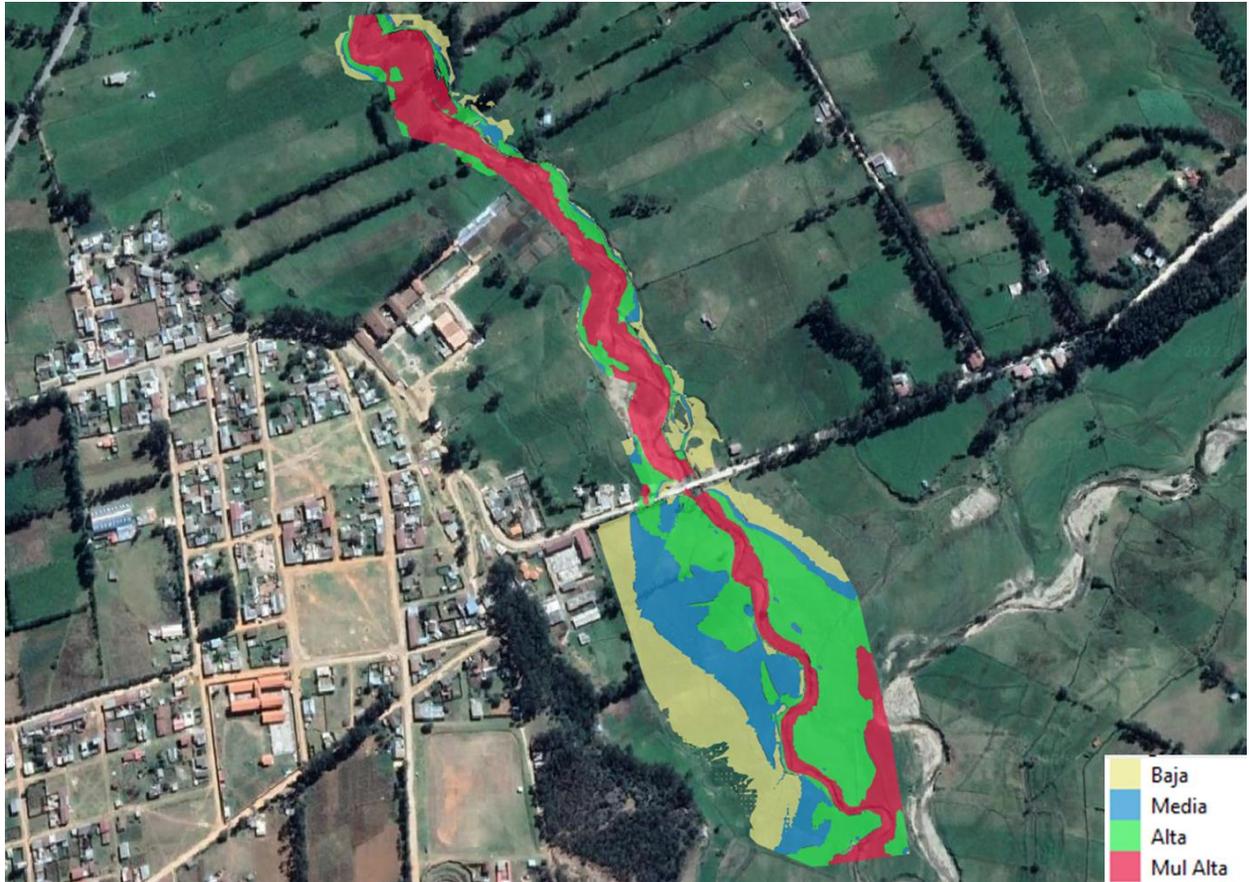
TR50	
Nivel	Area(Ha)
Muy Alta	2.76
Alta	2.77
Media	2.27
Baja	2.85
Suma	10.65



TR100	
Nivel	Area(Ha)
Muy Alta	2.99
Alta	3.03
Media	2.27
Baja	2.54
Suma	10.83



TR200	
Nivel	Area(Ha)
Muy Alta	3.23
Alta	3.47
Media	1.93
Baja	2.34
Suma	10.97



CÁLCULO DE LAS ÁREAS AFECTADAS

TR200		
Tipo	Área (Km2)	Área (Has)
Río	0.0110	1.1
Tejido urbano continuo	0.0003	0.03
Vegetación densa	0.0937	9.37
Suelo desnudo	0.0002	0.02
Arbustos	0.0007	0.07
Zonas agroforestales	0.0004	0.04
Tierra labrada	0.0003	0.03
Árboles	0.0026	0.26
Arena	0.0005	0.05
TOTAL	0.1097	10.97