

# FACULTAD DE INGENIERÍA

Carrera de Ingeniería Civil



“APLICACIÓN DE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA Y HEC-RAS PARA CALCULAR EL PELIGRO POR INUNDACIONES EN LA CUENCA BAJA DEL RÍO HUARMEY”

Trabajo de investigación para optar al grado de:

**Bachiller en Ingeniería Civil**

Autor:

Kevin Paul Vásquez Lozada

Asesor:

Ing. Arturo Dávila

Lima - Perú

2019

## **DEDICATORIA**

A mis padres y mi hermana por todo el amor y apoyo incondicional que me brindan.

## **AGRADECIMIENTO**

A todas las personas que me apoyaron en este importante reto académico. Su participación en el presente trabajo me permitió cumplir con los objetivos propuestos.

## TABLA DE CONTENIDO

DEDICATORIA .....	2
ÍNDICE DE TABLAS.....	5
ÍNDICE DE FIGURAS .....	6
RESUMEN.....	8
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN .....	9
1.1. REALIDAD PROBLEMÁTICA .....	9
1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA .....	11
1.3. OBJETIVOS .....	11
CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA.....	12
2.1. POBLACIÓN Y MUESTRA.....	12
2.2. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN Y ANÁLISIS DE DATOS .....	12
2.3. PROCEDIMIENTO.....	14
CAPÍTULO 3. RESULTADOS .....	48
3.1. RESULTADOS DEL ANÁLISIS HIDRÁULICO .....	48
3.2. RESULTADOS DEL MODELO DE INUNDACIÓN .....	55
CAPÍTULO 4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES .....	58
4.1. DISCUSIÓN .....	58
4.2. CONCLUSIONES .....	61
REFERENCIAS.....	63

## ÍNDICE DE TABLAS

Cuadro 1: Ubicación geográfica de la cuenca del río Huarmey .....	14
Cuadro 2: Centros poblados afectados por los efectos de El Niño Costero 2017 .....	21
Cuadro 3: Obras de Infraestructura afectadas por los efectos de El Niño Costero 2017 .....	22
Cuadro 4: Áreas de cultivo afectadas por los efectos de El Niño Costero 2017.....	22
Cuadro 5: Estaciones hidrológicas ubicadas en el área de estudio .....	23
Cuadro 6: Descargas máximas diarias de la estación Puente Huamba .....	24
Cuadro 7: Caudales medios anuales en la estación Puente Huamba .....	25
Cuadro 8: Valores ingresados y Predicciones del software SMADA.....	34
Cuadro 9: Periodos de retorno y caudal máximo obtenido .....	34
Cuadro 10: Caudales máximos para cada periodo de retorno.....	35
Cuadro 11: Valores de rugosidad “n” de Manning.....	45
Cuadro 12: Superficie inundable en m2 para cada periodo de retorno en la zona de estudio.....	57

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Ubicación Geográfica de la Cuenca del río Huarmey .....	14
Figura 2: Interfaz del software ArcGIS 10.4 con la cuenca Huarmey y las curvas de nivel de las cartas nacionales que traslapan la cuenca.....	15
Figura 3: Curvas de nivel cada 50 metros en la cuenca Huarmey .....	16
Figura 4: Geología de la cuenca Huarmey en formato shapefile.....	17
Figura 5: Geomorfología de la cuenca Huarmey en formato shapefile .....	17
Figura 6: Cobertura vegetal de la cuenca Huarmey en formato shapefile .....	18
Figura 7: Sectores inundados en el casco urbano del río Huarmey en marzo del 2017.....	21
Figura 8: Distribución temporal de temperaturas y precipitación de la estación Huarmey (1997-2010) .....	27
Figura 9: Hidrograma de caudales máximos diarios en la estación Puente Huamba.....	31
Figura 10: Datos estadísticos y método de distribución del software SMADA .....	33
Figura 11: Delimitación del área de trabajo en la interfaz del Software ArcGIS. ....	36
Figura 12: Curvas de nivel ajustadas a la zona de trabajo en sistema de coordenadas UTM WGS84 Zona 17S..	36
Figura 13: Zona de trabajo sobre las imágenes satelitales DEM en la interfaz QGIS. ....	38
Figura 14: Vista de las curvas de nivel cada 5 metros y su tabla de atributos, obtenidas de los modelos de elevación digital (DEM)	39
Figura 15: Red hidrográfica y modelo en formato TIN del área de trabajo en la cuenca baja del río Huarmey. ..	40
Figura 16: Menú de pre-proceso de la extensión HEC-GeoRAS. Las herramientas empleadas en el modelamiento hidráulico se encuentran en el cuadro rojo .....	41
Figura 17: Delimitación del cauce del río Huarmey en Google Earth.....	41
Figura 18: TIN del área de trabajo con las capas de geometría creadas y digitalizadas con la extensión HEC-GeoRAS para el río Huarmey.....	42
Figura 19: Ventana de confirmación de correcta exportación del modelamiento del río al software HEC-RAS..	43
Figura 20: Interfaz del software HEC-RAS con la geometría del cauce del río Huarmey en su cuenca baja .....	44
Figura 21: Interfaz del HEC-RAS con los datos de ingreso del caudal máximo para cada periodo de retorno ....	46
Figura 22: Menú del post-proceso de la extensión HEC-GeoRAS para la creación de zonas de inundación .....	47
Figura 23: Proceso de intercambio de datos de la metodología SIG .....	47

Figura 24: Sección transversal de un tramo del río Huarmey para una simulación de periodo de retorno de 25 años	48
Figura 25: Sección transversal de un tramo del río Huarmey para una simulación de periodo de retorno de 50 años	49
Figura 26: Sección transversal de un tramo del río Huarmey para una simulación de periodo de retorno de 100 años	49
Figura 27: Sección transversal de un tramo del río Huarmey para una simulación de periodo de retorno de 500 años	50
Figura 28: Sección transversal de un tramo del río Huarmey para una simulación de periodo de retorno de 500 años	51
Figura 29: Vista 3D de un tramo del río Huarmey para una simulación de periodo de retorno de 25 años .....	51
Figura 30: Vista 3D de un tramo del río Huarmey para una simulación de periodo de retorno de 50 años .....	52
Figura 31: Vista 3D de un tramo del río Huarmey para una simulación de periodo de retorno de 100 años .....	52
Figura 32: Vista 3D de un tramo del río Huarmey para una simulación de periodo de retorno de 500 años .....	53
Figura 33: Resultados tabulares de la simulación hidráulica para un periodo de retorno de 500 años.....	54
Figura 34: Resultado gráfico de las zonas inundables en la cuenca baja del Río Huarmey para un periodo de retorno de 500 años	55
Figura 35: Resultado gráfico de las zonas inundables en la cuenca baja del Río Huarmey para un periodo de retorno de 25 años (Google Earth).....	56
Figura 36: Resultado gráfico de las zonas inundables en la cuenca baja del Río Huarmey para un periodo de retorno de 500 años (Google Earth).....	56

## RESUMEN

Dadas las características de la cuenca baja del río Huarmey, que alberga sectores críticos donde se observa una peligrosidad significativa por desborde del río principal, en condiciones de máxima precipitación; urge la necesidad de contar debidamente con estudios que faciliten la gestión y manejo de recursos en la atención pronta de estos eventos adversos. El presente trabajo aplica los Sistemas de Información Geográfica y HEC-RAS para el cálculo del peligro por inundaciones en la cuenca baja del río Huarmey, utilizando herramientas de análisis espacial, información cartográfica, imágenes satelitales y datos de precipitaciones y caudales que nos permiten poder realizar un modelamiento y obtener como producto una vista general y un mapa de las posibles áreas inundadas en la cuenca baja del río Huarmey, bajo una determinada serie de parámetros meteorológicos asignados.

Los resultados obtenidos nos muestran que el desborde del río se da casi en su totalidad por la margen derecha en la cuenca baja con un área de 611 hectáreas aproximadamente para el escenario más crítico (periodo de retorno de 500 años), abarcando áreas urbanas y zonas agrícolas de importante valor para las actividades socio-económicas de la zona. Para periodos de retorno menores, la diferencia no es grande, obteniendo superficies inundadas de 483 hectáreas en el mejor escenario.



## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1. REALIDAD PROBLEMÁTICA

El Perú es un país vulnerable y con alta probabilidad de sufrir desastres asociados a la ocurrencia de variados fenómenos naturales, viéndose expuesto a diversos peligros y variaciones climáticas, los cuales generan, a lo largo de la historia, pérdidas incalculables, tanto materiales como humanas y que han contribuido a un retraso en el progreso social y económico del país. (INDECI 2006)

Las inundaciones forman parte de estos desastres, las cuales han sido uno de los fenómenos naturales más destructivos que al Perú le ha tocado vivir, y las cuales tienen una manifestación importante en las cuencas bajas de la costa, y la cuales se ven acrecentadas con la presencia del Fenómeno del Niño.

La cuenca baja del río Huarmey se ve expuesta a este tipo de amenazas, propias de su ubicación dentro del territorio peruano. La población asentada y la infraestructura dentro de la cuenca ofrecen poca resiliencia y alto nivel de fragilidad que se evidencia en niveles altos de vulnerabilidad, lo cual se vio reflejado en el reciente fenómeno de El Niño Costero, ocurrido en el año 2017. Este fenómeno se manifestó con fuertes lluvias, afectando a la población de la ciudad de Huarmey y causando daños a las viviendas, carreteras y diferentes obras de infraestructura.

Según el *Programa de apoyo a la gestión integral del Riesgo de desastres naturales para la ciudad de Huarmey*, del Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, los principales fenómenos naturales que han causado desastres en la ciudad de Huarmey son:

**Fenómeno El Niño 1983.** En el verano de 1983, la abundante precipitación generó aumento excesivo del caudal de las aguas del río Huarmey y la falta de defensa para la ciudad, esto generó la inundación parcial en el sector ubicado en las márgenes del río, viviendas ubicadas en las calles Pativilca – Paramonga, 2 de Mayo – Ramón Castilla se inundaron y produjeron serios daños.

La zona de Buenos Aires fue la más afectada, que determino, reubicación de familias, lamentablemente no hubo un programa de ayuda, lo que determino posteriormente que vuelvan a sus antiguos lugares para construir sus viviendas.

**Fenómeno El Niño 1998.** Nuevamente la zona de Buenos Aires sufrió severas inundaciones y las zonas de Calles Pativilca – Paramonga – 2 de Mayo – Ramón Castilla, sufrieron elevación del nivel freático, superior al nivel de piso, que pusieron en peligros las edificaciones, especialmente las cimentaciones.

Asimismo, la región Ancash posee un alto índice de ocurrencia de desastres detonados por lluvias. La mayor cantidad de “aluviones” ocurridos en el país, se han registrado en esta región. En el contexto hidro-climático, respecto a los eventos de El Niño, procesos de inundaciones y movimientos en masa, se presentaron en gran número durante los años 1997 y 1998 principalmente y del 2015 en menor magnitud. Sin embargo, en años normales, estos procesos son frecuentes en la región en la época de lluvias estacionales. (*INGEMMET 2017*)

Como se puede deducir, la cuenca baja del río Huarmey ha configurado escenarios de riesgo, por lo que es necesario aplicar una metodología adecuada para el cálculo de la peligrosidad por inundaciones.

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) son una herramienta muy útil para diagnosticar sitios de posibles inundaciones, integrando modelos hidráulicos e hidrológicos, así como imágenes satelitales, por lo que el presente trabajo pretende determinar la peligrosidad por inundaciones en la cuenca baja del río Huarmey, mediante la utilización de un software SIG (ArcGIS 10.4) y su integración con el software de análisis hidráulico HEC-RAS. Esto permitirá obtener resultados que servirán de base para la gestión de riesgos y el planteamiento de propuestas de mitigación y toma de decisiones de las entidades competentes.

## 1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

### PROBLEMA GENERAL:

¿Cómo aplicar los sistemas de información geográfica y HEC-RAS para calcular el peligro por inundaciones en la cuenca baja del Río Huarmey?

### PROBLEMAS ESPECÍFICOS:

¿Cuál es el estado actual de la cuenca Huarmey respecto al peligro por inundaciones?

¿Qué factores influyen en el peligro por inundaciones en la cuenca del río Huarmey?

¿Qué características debe tener la alternativa de solución para calcular el peligro por inundaciones en la cuenca Huarmey?

¿Qué resultados generará la aplicación de SIG y HEC-RAS al modelamiento de peligros por inundaciones en la cuenca del río Huarmey?

## 1.3. OBJETIVOS

### 1.3.1. Objetivo General

- Aplicar los Sistemas de Información Geográfica y HEC-RAS para calcular el peligro por inundaciones en la cuenca del río Huarmey.

### 1.3.2. Objetivos Específicos

- Efectuar un diagnóstico inicial sobre las inundaciones que han sucedido en la cuenca baja del río Huarmey.
- Identificar los factores que influyen en las inundaciones de la cuenca baja del río Huarmey y en su modelamiento hidráulico.
- Modelar y analizar utilizando SIG y HEC-RAS, para calcular el peligro por inundaciones en la cuenca baja del río Huarmey.
- Estimar e interpretar los resultados del modelamiento y análisis de la aplicación de los Sistemas de Información Geográfica y HEC-RAS

## CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA

### 2.1. POBLACIÓN Y MUESTRA

La población considerada para la presente investigación es la cuenca del río Huarmey, su conjunto de habitantes y sus actividades socioeconómicas y entorno ambiental.

La muestra de la presente investigación considera un tramo de análisis de la cuenca baja del río Huarmey donde se plantea realizar un cálculo del peligro por inundaciones considerando las variables que influyan en la ocurrencia de este desastre.

### 2.2. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN Y ANÁLISIS DE DATOS

Para la presente investigación se utilizará un método cuantitativo mediante el análisis multivariable de los datos obtenidos mediante el uso de un software que nos dará como resultado valores numéricos que permitirán obtener el nivel de peligro de determinadas zonas en la cuenca baja del río Huarmey.

#### **Revisión de información cartográfica y temática de la cuenca**

Instrumentos:

- Cartas Nacionales del IGN, hojas 20-g, 20-h, 20-i, 21-g y 21-h
- Cartas Geológicas de INGEMMET, hojas 20-g, 20-h, 20-i, 21-g y 21-h
- Información temática en formato vectorial de cuencas hidrográficas, geomorfología y uso actual del suelo del MINAM.
- Imágenes satelitales del área de estudio de la U.S. Geological Survey. (URL: <https://earthexplorer.usgs.gov>)

#### **Revisión de base de datos estadística de parámetros meteorológicos**

Instrumento:

- Serie de datos de precipitaciones y caudales del río proporcionados por SENAMHI.

### **Observación directa y recolección de datos en campo**

Instrumentos:

- GPS navegador
- Cámara fotográfica.
- Fichas de recolección de datos y parámetros de campo

### **Preparación y pre procesamiento de la información recopilada**

Instrumentos:

- PC Intel Core i5-3230M CPU 2.60 GHz.
- Softwares de Ingeniería, (ArcGIS 10.4, QGIS 2.0.1, AutoCAD 2017, HEC-RAS 5.0)

## 2.3. PROCEDIMIENTO

### 2.3.1. Primera Etapa: Diagnóstico actual

#### Ubicación Geográfica

La cuenca del río Huarmey se encuentra ubicada geográficamente entre los meridianos 78°10'43'' y 77°27'19'' de longitud oeste y los paralelos 10°06'12'' y 9°56'22'' de latitud sur; la ubicación de la cuenca según coordenadas geográficas y UTM se indica en el cuadro 1.

Sistemas	Datum	Componentes	Valor	
			Mínimo	Máximo
Coordenadas Geográficas	Horizontal WGS 1984	Longitud Oeste	78° 10' 49"	77° 27' 12"
		Latitud Sur	10° 11' 10"	9° 37' 46"
Coordenadas UTM Zona 17	Horizontal WGS 1984	Metros Este	809030	888944
		Metros Norte	8934641	8872176
Coordenadas UTM Zona 18	Horizontal WGS 1984	Metros Este	151524	230848
		Metros Norte	8935449	8871712
Altitud	Vertical Nivel Medio del Mar	m.s.n.m	0	4950 m.s.n.m. Cerro Pashcurshirca

Cuadro 1: Ubicación geográfica de la cuenca del río Huarmey

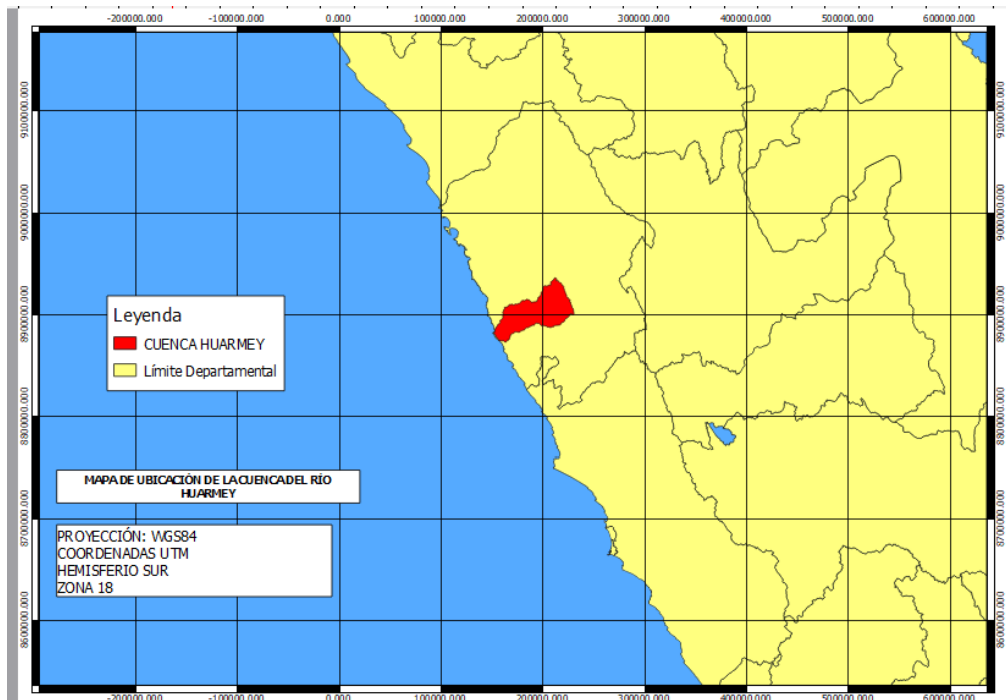


Figura 1: Ubicación Geográfica de la Cuenca del río Huarmey

## Información Cartográfica

Se recopiló y seleccionó información cartográfica de cartas nacionales en formato vectorial del Instituto Geográfico Nacional, cartas geológicas del INGEMMET, e información temática (geología, geomorfología y cobertura vegetal) que permitan obtener las diferentes variables que conforman el medio físico del área de estudio. Asimismo, se realizó un reconocimiento en campo del área de estudio, identificando el área de ocurrencia de peligros por inundaciones y las áreas con infraestructura más expuesta.

La información básica necesaria para la generación del modelo de dato TIN que dará lugar al pre-procesamiento, son las curvas de nivel en formato vectorial. Estas se pueden obtener de un modelo digital de elevación de terreno (DEM o MDT) ó a partir de la digitalización de la topografía del terreno visible en las cartas nacionales del IGN. Se pudo obtener la información de las cartas nacionales en formato shapefile (hojas 20-g, 20-h, 20-i, 21-g y 21-h) así como los datos de información de las cuencas hidrográficas del Perú a través de la Autoridad Nacional del Agua (ANA).

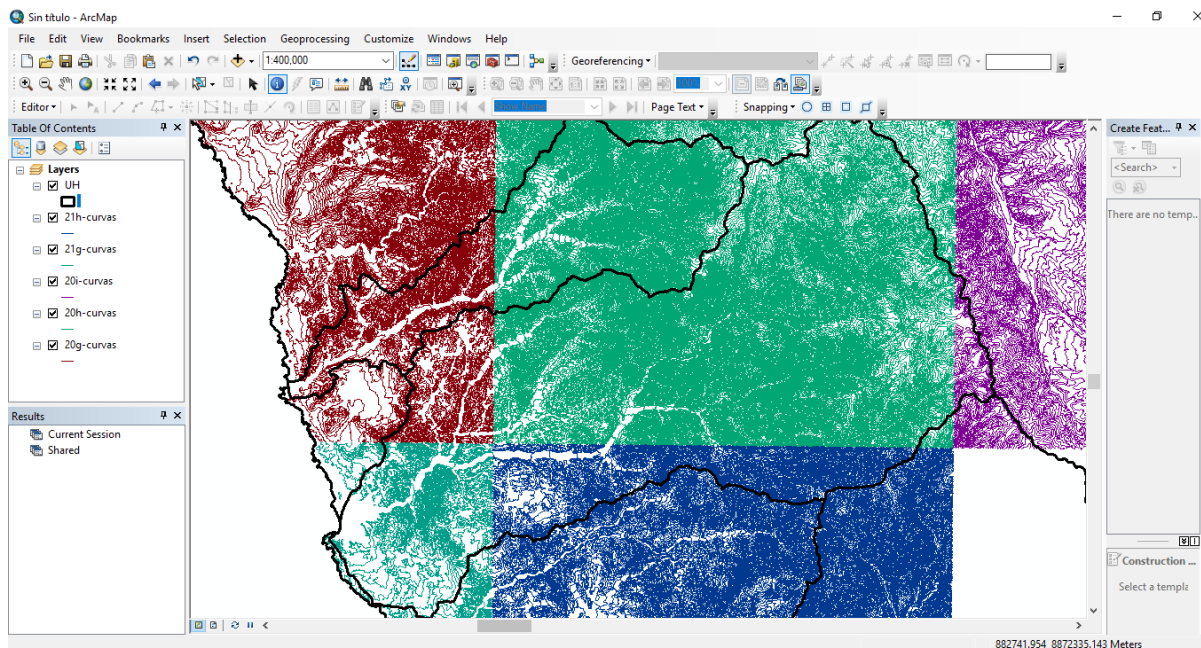


Figura 2: Interfaz del software ArcGIS 10.4 con la cuenca Huarmey y las curvas de nivel de las cartas nacionales que traslapan la cuenca

En ArcGIS 10.4 se realizó la unión de estas capas para obtener un solo archivo de curvas de nivel, mediante la herramienta de geoprocésamiento denominada Merge. Asimismo, se cortó esta información con ayuda de la cuenca mediante la herramienta Clip. De esta manera se uniformizó la información vectorial de curvas de nivel para proceder a delimitar la zona de trabajo.

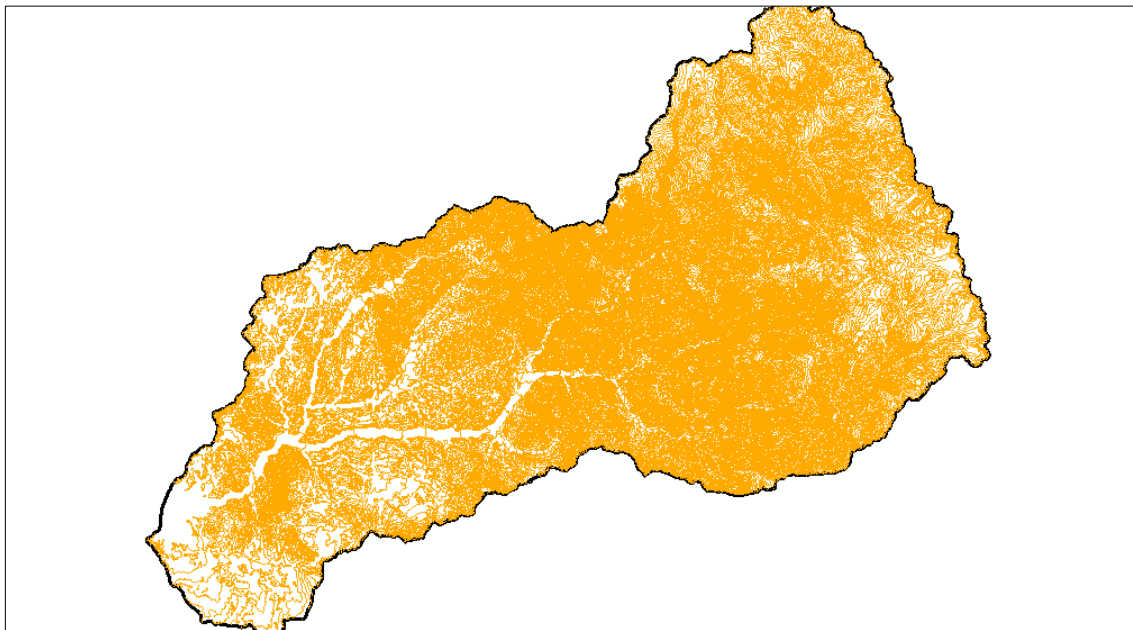


Figura 3: Curvas de nivel cada 50 metros en la cuenca Huarmey

El aspecto físico es otra de las variables necesarias para la evaluación del peligro por inundaciones. En base a la información obtenida se elaboraron las capas que permitirán identificar la susceptibilidad al peligro con ArcGIS 10.4:

- Capa de geología
- Capa de geomorfología
- Capa de cobertura vegetal

Se recopiló información vectorial de las cartas geológicas de INGEMMET, realizando el mismo procedimiento que con las curvas de nivel para uniformizar los datos dentro de la cuenca y poder obtener el mapa geológico de la cuenca.



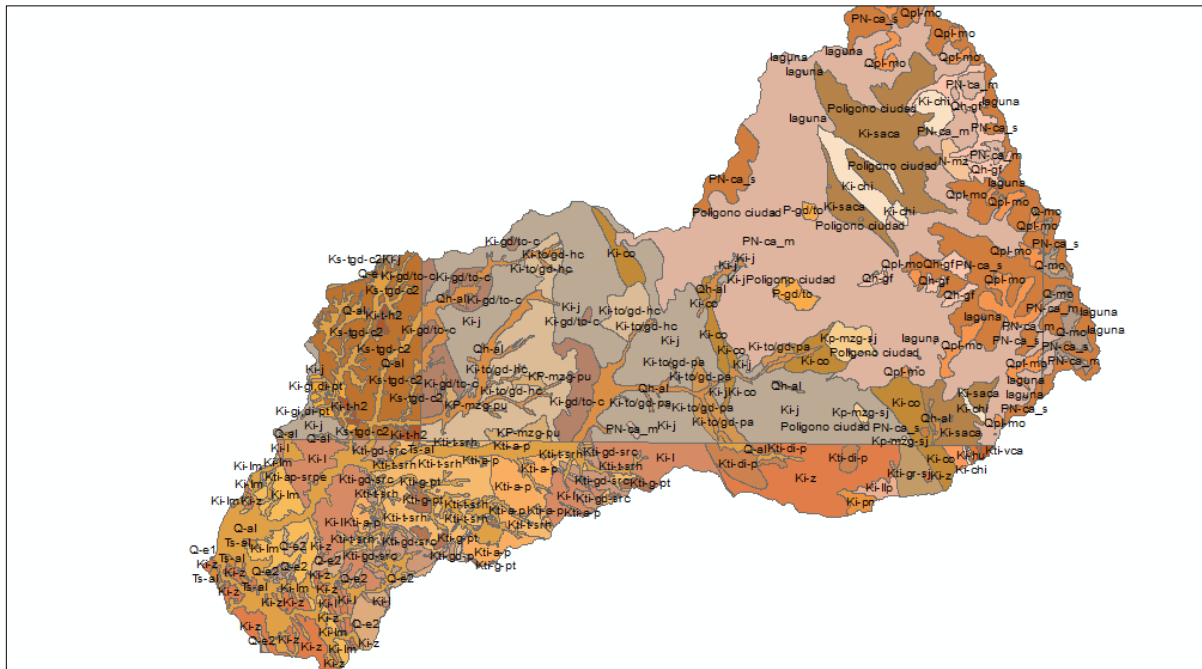


Figura 4: Geología de la cuenca Huarmey en formato shapefile

Otra información temática que se consideró importante recopilar para observar el impacto de la inundación sobre el medio físico, es la cobertura vegetal y la geomorfología. Los datos vectoriales (formato shapefile) de estos componentes se consiguieron a través del Ministerio del Ambiente (MINAM).

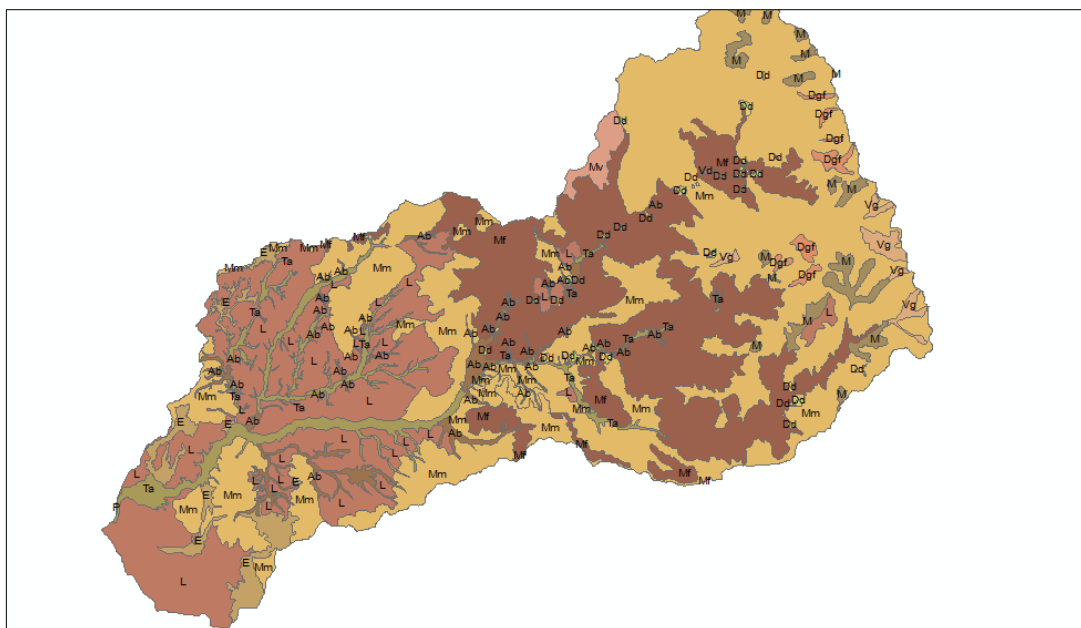


Figura 5: Geomorfología de la cuenca Huarmey en formato shapefile



Además, se encuentra expuesto a inundaciones por desborde del Río Huarmey en época de lluvias.

Sector B: Buenos Aires.

Se encuentra localizado en la margen izquierda del Río Huarmey. Tiene una superficie de 15.9 há y alberga a una población de aproximadamente 580 habitantes, con una densidad bruta de 36 hab/há. Comprende los asentamientos humanos de Buenos Aires y Los Arabes. En este sector existe una mediana probabilidad de asentamientos y/o hundimientos ante la ocurrencia de un sismo, además de la amplificación de ondas sísmicas. La napa freática se encuentra entre 1.6 a 2.5 m de profundidad y la capacidad portante del suelo varía entre 1.5 a 2.5 kg/cm<sup>2</sup>. Además, es una zona que se encuentra expuesta a inundaciones por desborde de canales de regadío y del Río Huarmey. Ya desde los estudios hechos en la década del 70, después del sismo, se declaró dicha zona como no apta para uso urbano.

Sector C: Puerto Huarmey. Este sector tiene una extensión de 21 há ocupadas, con una población de 935 hab aproximadamente y una densidad bruta de 45 hab/há. Comprende la totalidad del área ocupada en Puerto Huarmey.

Ante la ocurrencia de un sismo existe una mediana probabilidad de asentamientos y/o hundimientos en las edificaciones existentes. La napa freática se encuentra a 2 m de profundidad existiendo zonas donde hay afloramientos. Se encuentra expuesta también a las inundaciones por desborde del Río Huarmey, que en el Fenómeno El Niño de 1998, recuperó su antiguo cauce e inundó toda la zona norte del puerto. Los tsunamis también constituyen un peligro que amenaza este sector dada la cercanía al mar y la topografía plana que presenta.

Los sectores críticos en la ciudad de Huarmey comprenden en la actualidad el 30.6% del área urbana; en éstos se encuentra comprendida aproximadamente el 26.2% de la población (4,465 hab.) y el 30.8% de las viviendas (975).

## **Inundaciones en la cuenca baja del río Huarmey**

Según el Informe Técnico Ambiental denominado: “Zonas críticas por peligros geológicos y geo hidrológicos en la región Ancash”, elaborado por el INGEMMET en enero del 2007, los procesos de inundaciones y movimientos en masa (huaycos y deslizamientos), se presentaron en gran número, durante el evento excepcional El Niño 1997-98, sin embargo, en años normales debido a sus características geomorfológicas y climáticas, en la región son frecuentes estos procesos en la época de lluvias estacionales. Se consideran los años 1891, 1925, 1972, 1982-83 y 1997-98, los que más afectaron la región.

El último antecedente ocurrido en la zona estudio, y el único registrado en el Sistema de Información Nacional para la Respuesta y Rehabilitación (SINPAD), administrado por el INDECI es el de marzo del 2017, donde el distrito de Huarmey se vio inundado ante la crecida del caudal del río debido al fenómeno de El Niño Costero. La inundación se produjo debido al colapso del muro de contención existente, ubicado sobre zonas de cultivo, a una distancia aproximada de 200 metros con respecto a las manzanas E2 y F del Programa de Vivienda Habitación Urbana Zona Este (PVHU-ZONA ESTE), el cual forma parte del casco urbano del distrito. *(Fuente: Informe de Evaluación de Riesgo por desborde el río Huarmey e Inundación pluvial en el centro poblado de Huarmey - CENEPRED).*

El día 14 de marzo del 2017 se inició el desastre, cuando extensas áreas de cultivo en la margen izquierda del río Huarmey fueron destruidas, así como viviendas del sector Buenos Aires. En relación a los daños estructurales, el día 15 de marzo del 2017, colapsó la protección riberena de la margen derecha del río Huarmey, inundando gran parte de la ciudad. Este desastre natural tuvo un efecto aún más destructivo cuando el flujo del agua llegó hasta la carretera Panamericana Norte, donde el impacto en las viviendas fue mayor y se propagó lateralmente, inundando otros sectores de Huarmey. *(Fuente: Evaluación Geológica de las zonas afectadas por El Niño Costero 2017 en la región Ancash - INGEMMET).*



Figura 7: Sectores inundados en el casco urbano del río Huarney en marzo del 2017

*Fuente: larepublica.pe*

Esta inundación modificó parcialmente el cauce del río Huarney, configurando un nuevo lecho y planicies adyacentes sobre ambas márgenes. Del mismo modo, ha propiciado en algunos tramos la ruptura del muro de contención existente sobre la margen derecha del dicho río.

Según el *Informe de Evaluación de Riesgo por desborde el río Huarney e Inundación pluvial en el centro poblado de Huarney – CENEPRED*, el área inundada abarcó una extensión aproximada de 2.30 km<sup>2</sup>, representando el 75% del casco urbano del distrito de Huarney. La marca de agua verificada in situ, supera el 1.5 metro de altura.

Asimismo, el efecto del Fenómeno del Niño Costero, ocurrido en el 2017, trajo consigo peligros asociados que incluyen movimientos en masa (caídas de rocas, derrumbes, flujos, deslizamientos), erosión (fluvial, de laderas), entre otros. En los siguientes cuadros podemos observar resúmenes donde se describe una síntesis de los peligros que afectaron a la población, a la infraestructura y a las áreas de cultivo en el área de estudio.

TIPO DE PELIGRO	CENTRO POBLADO	ACCIÓN RECOMENDADA	OBSERVACIONES
INUNDACIÓN FLUVIAL	Las Zorras	Rehabilitación	Casas inundadas
INUNDACIÓN FLUVIAL	Huarney	Rehabilitación	Numerosas viviendas inundadas, abundante arena y lodo

Cuadro 2: Centros poblados afectados por los efectos de El Niño Costero 2017

*Fuente: Evaluación Geológica de las zonas afectadas por El Niño Costero 2017 en la Región Ancash - INGEMMET*

TIPO DE PELIGRO	INFRAESTRUCTURA	LUGAR	ACCIÓN RECOMENDADA	OBSERVACIONES
INUNDACIÓN FLUVIAL	Defensa Ribereña	Huarmey	Reconstrucción	Numerosas viviendas inundadas, abundante arena y lodo
INUNDACIÓN FLUVIAL	Canal	Cochán	Reconstrucción	Área inundable con daños en canal, tierras de cultivo y río culebras que ha socavado terrazas y ha generado flujo de lodo y detritos lo que han aportado a la inundación.
FLUJOS	Canal	NO de Quillapampa	Reconstrucción	Flujos de detritos hicieron daños severos al canal.
FLUJOS	Canal	NO de Quillapampa	Reconstrucción	Flujos de detritos hicieron daños severos al canal.
FLUJOS	Canal	Sur de Huanchay	Reconstrucción	Flujos de detritos hicieron daños severos al canal.
FLUJOS	Bocatoma de canal	SO de Huanchay	Reconstrucción	Flujos de detritos hicieron daños severos al canal.
EROSIÓN FLUVIAL	Pozo	Alguay	Reconstrucción	La inundación ha socavado las paredes del río a gran profundidad, con lo cual la infraestructura de pozos de agua ha quedado en el aire.
DESLIZAMIENTOS	Canal	Sur de Huanchay	Reconstrucción	Daños leves.

Cuadro 3: Obras de Infraestructura afectadas por los efectos de El Niño Costero 2017

Fuente: Evaluación Geológica de las zonas afectadas por El Niño Costero 2017 en la Región Ancash - INGEMMET

TIPO DE PELIGRO	CENTRO POBLADO	ACCIÓN RECOMENDADA	OBSERVACIONES
INUNDACIÓN FLUVIAL	Tayca	Rehabilitación	Límite del cauce actual que se encuentra a 10m de un pozo de bombeo y zona de inundación con presencia de pequeños canales
INUNDACIÓN FLUVIAL	Barbacay	Rehabilitación	Zona de inundación con presencia de un pequeño cauce de 15m; hacia la margen derecha se encuentra el límite de terraza
INUNDACIÓN FLUVIAL	Malpaso	Rehabilitación	Extensas áreas de cultivo inundadas
INUNDACIÓN FLUVIAL	Mandinga	Rehabilitación	Extensas áreas de cultivo inundadas
INUNDACIÓN FLUVIAL	Alguay	Rehabilitación	Extensas áreas de cultivo inundadas
FLUJOS	Tres Cruces	Rehabilitación	Las viviendas y los cultivos fueron afectados por precipitaciones los días 15, 16 y 19 de marzo de 2017. Testigos indican que en dicho sector el agua fue dividida en dos ramales quedando la iglesia del sector en una pequeña isla.
FLUJOS	Tres Cruces	Rehabilitación	Este punto limita la zona de peligro alto y muy alto con presencia de bloques arrastrados probablemente en el Niño del año 1998.
FLUJOS	Monsalve	Rehabilitación	Flujo de detritos (huayco) en la quebrada Monsalve con bloques de gravas que van desde los 30 cm hasta los tres metros de diámetro con litología volcánica y el cauce posee un caudal entre 50 y 80 l/s.
FLUJOS	Huayup	Rehabilitación	Depósito aluviónico con gran cantidad de bloques y grava en la quebrada.
EROSIÓN FLUVIAL	Alguay	Rehabilitación	Punto de control cerca al puente Cucus, donde el río profundiza el cauce y deja el cauce original abandonado.

Cuadro 4: Áreas de cultivo afectadas por los efectos de El Niño Costero 2017

Fuente: Evaluación Geológica de las zonas afectadas por El Niño Costero 2017 en la Región Ancash – INGEMMET

## Datos Hidrometeorológicos

Se recogió y revisó series de datos estadísticos de información hidrometeorológica y caudales del río Huarmey disponibles en los archivos del SENAMHI.

En el área de estudio se encuentra la estación convencional Huarmey, la cual registra datos de temperatura y precipitación. La temperatura mensual promedio estimada en la cuenca baja del río Huarmey varía de 14°C a 23°C. Las temperaturas mensuales máximas promedio se presentan durante el verano, en los meses de febrero y marzo. Las temperaturas mensuales mínimas promedio se presentan durante el invierno, en el mes de agosto. Respecto a la precipitación pluvial anual, se estima que está entre los 5 mm y 8 mm.

La estación convencional Huarmey se ubica a 8 m.s.n.m por lo que los datos que se puedan obtener de sus registros son irrelevantes para el objeto de estudio de la presente investigación. No existe otra estación a mayor altitud que pueda brindar datos de precipitación para incorporar al modelamiento, por lo que el trabajo se orientó a sólo la incorporación de datos de caudales para el análisis.

Existen 2 estaciones hidrológicas en la cuenca del río Huarmey, las cuales se indican en el siguiente cuadro:

Nombre	Área Captación (km <sup>2</sup> )	Dpto	Prov.	Dist.	Alt. (msnm)	Año Inicio	Long.	Lat.
Puente Carretera	2103	Ancash	Huarmey	Huarmey	171	1931	78.17	10.07
Puente Huamba	1194	Ancash	Huarmey	Huarmey	550	1973	77.87	9.97

Cuadro 5: Estaciones hidrológicas ubicadas en el área de estudio

Fuente: SENAMHI

Se seleccionó la estación Puente Huamba, ya que esta se ubica por encima de los canales de derivación presentes en Huarmey. En el cuadro 6 se observan los datos de descargas máximas diarias. En el cuadro 7 se presentan los datos de caudales medios anuales de la estación.

Existen años donde no se obtuvo registro de información. Todos los datos contenidos en el cuadro 7 se obtuvieron de los registros de SENAMHI, por lo que se utilizará sólo el periodo entre 1960 y 1997 para el análisis estadístico y la determinación de caudales a ingresar en el modelo y los periodos de retorno.

Año	Descarga máxima diaria (m <sup>3</sup> /s)
1960	34.3
1961	42
1962	80
1963	50
1964	40
1965	90
1966	10
1967	45
1968	4.3
1969	
1970	
1971	100
1972	150
1973	
1974	80
1975	72
1976	85
1977	40
1978	6
1979	14.5
1980	6
1981	45
1982	40
1983	70
1984	100
1985	20
1986	
1987	40
1988	33
1989	12.3
1990	32.5
1991	3.5
1992	16
1993	45
1994	9.5
1995	60
1996	119
1997	270

Cuadro 6: Descargas máximas diarias de la estación Puente Huamba

Fuente: SENAMHI



<b>Año</b>	<b>Caudal medio anual (m3/s)</b>
1960	2.882
1961	6.336
1962	8.5
1963	5.632
1964	3.492
1965	4.137
1966	0.654
1967	4.468
1968	0.168
1969	0.001
1970	5.561
1971	7.249
1972	7.565
1973	13.62
1974	5.801
1975	9.329
1976	5.381
1977	5.588
1978	0.918
1979	1.698
1980	0.179
1981	5.07
1982	1.601
1983	5.197
1984	8.392
1985	1.147
1986	1.997
1987	2.258
1988	1.733
1989	7.697
1990	1.668
1991	1.199
1992	0.094
1993	2.875
1994	9.937
1995	1.237
1996	6.432
1997	5.228
1998	41.59
1999	22.66
2000	10.32
2001	10.79
2002	3.761
2003	7.466
2004	2.118

Cuadro 7: Caudales medios anuales en la estación Puente Huamba

Fuente: SENAMHI

### **2.3.2. Segunda Etapa: Identificación de factores que intervienen en el peligro por inundaciones y en el modelamiento hidráulico de la zona de estudio**

#### **De los factores que intervienen en el peligro hidráulico:**

##### **a) Precipitación**

La precipitación es un factor detonante en todo análisis de peligros por inundación o deslizamiento. Su influencia en estos desastres naturales es evidente cuando se habla de periodos con fenómeno de El Niño por ejemplo. Como se mencionó anteriormente, los datos de precipitación en la cuenca baja del río Huarmey, no representan información relevante para los cálculos de la presente investigación, ya que la estación convencional Huarmey, presente en el área de estudio, registra la precipitación de esta zona costera, la cual no tiene impacto significativo en el peligro por inundaciones en este sector. Por este motivo, se debe realizar un análisis de precipitaciones en la cuenca alta, para visualizar el impacto de este factor en las inundaciones de la cuenca baja.

En el área de estudio, los acumulados de las lluvias promedio no son significativos en gran parte del año, sin embargo, suele presentarse entre los meses de diciembre y marzo. Para el primer trimestre del año, las lluvias totalizan aproximadamente 3,9 mm.

Si tomamos como ejemplo el evento extraordinario más reciente: “El Niño Costero 2017”, como ya se ha venido analizando, nos remontamos al verano del año 2017, donde se presentaron condiciones océano-atmosféricas anómalas, que propiciaron un comportamiento anormal de las lluvias, afectando gran parte de la franja costera del país. En la parte media de la cuenca de, se presentaron lluvias intensas, catalogadas como “Extremadamente Lluvioso”, según la caracterización de extremos de precipitación del SENAMHI, superando en frecuencia e intensidad las lluvias registradas en los años 1982-83 y 1997-98, donde ocurrió el Fenómeno de El Niño. Estas inusuales precipitaciones desencadenaron una serie de inundaciones en la cuenca baja del río Huarmey, afectando de gran manera al distrito del mismo nombre y sus zonas urbanas y rurales.

En la siguiente figura se puede observar la distribución de la precipitación en la estación Huarmey a lo largo del año, así como su distribución de temperaturas.

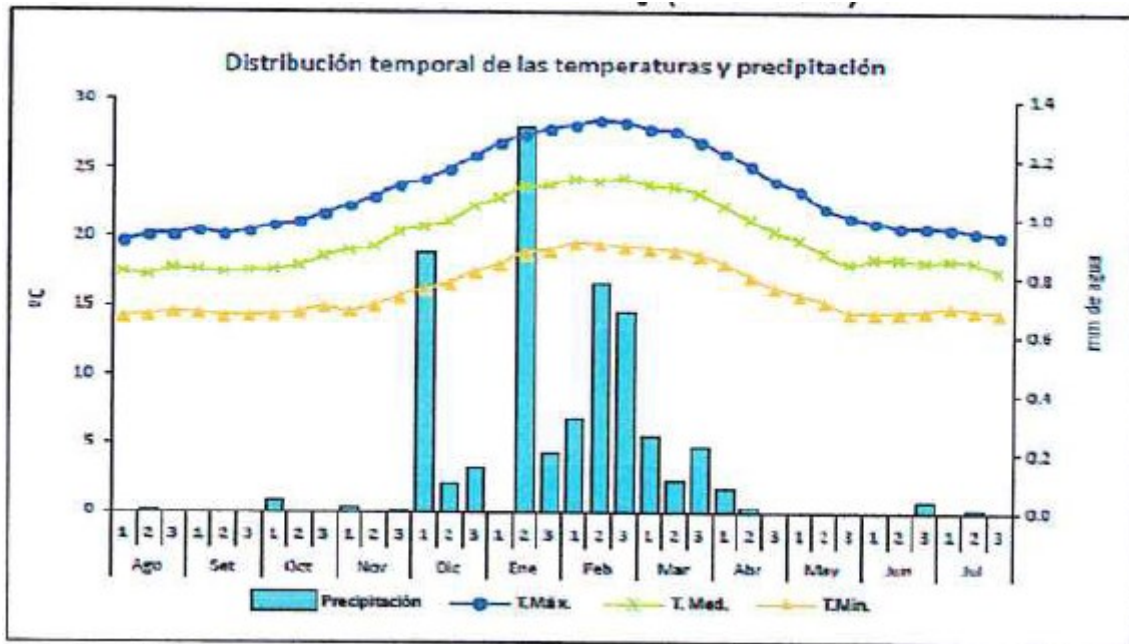


Figura 8: Distribución temporal de temperaturas y precipitación de la estación Huarmey (1997-2010)

Fuente: Informe de evaluación de riesgo por desborde del río Huarmey e Inundación pluvial en el Centro Poblado Huarmey - CENEPRED

## b) Topografía

La topografía del terreno es otro factor importante al realizar un análisis de inundaciones, ya que las condiciones que presente la superficie, así como las pendientes encontradas en el área de estudio, pueden desencadenar la materialización del peligro.

De acuerdo al estudio de Zonificación Sísmica-Geotécnica del área urbana de la ciudad de Huarmey, elaborado por el Instituto Geofísico del Perú (IGP) el 2016, el área de estudio presenta pendientes que oscilan entre los 5° y los 25°. Al ser una zona costera, se caracteriza por un relieve poco accidentado y con planos de inundación moderadamente anchos a bastante anchos. En el lado oeste de la carretera Panamericana Norte, las superficies son ondulosas.

El plano de flujo del Río Huarmey se va ampliando gradualmente a más de 2 km en el Puerto Huarmey. Desde San Miguel, que se localiza en la confluencia de dos quebradas en el norte y por el río Malvas por el este, hasta cerca de Huarmey, el plano de inundación está rodeado por taludes de roca relativamente empinados con alturas de más de 500 m aproximadamente.

### c) Tipo de suelo

Otro factor importante en el análisis por inundaciones es el tipo de suelo presente en la cuenca baja. La capacidad de absorción del terreno, su porosidad, entre otras características, van a determinar si una zona es potencialmente inundable.

De acuerdo al estudio de Zonificación Sísmica-Geotécnica de la ciudad de Huarney, elaborado por el IGP en el año 2016, que usaremos como referencia para la cuenca baja, se pueden encontrar los siguientes tipos de suelos en el área de estudio:

- Suelos tipo SP:  
Arenas mal graduadas con grava y poco contenido de material fino. Ocupan el 37% del terreno de la ciudad. El contenido de humedad es de 1.31%, no presentan plasticidad y constituyen suelos compactos. Estos suelos están presentes en los A.H. La Victoria, Miramar, Santo Domingo y en menor proporción, en las inmediaciones de la zona urbana.
- Suelos tipo SM:  
Conformados por arenas limosas, mezcladas con arena y limo mal graduados. Ocupan el 32.56% del terreno de la ciudad. El contenido de humedad es de 10.73% a 14.67%. Son suelos semi compactos y no presenta plasticidad. Estos suelos han sido identificados en la parte central del casco urbano y en menor proporción en A.H. Miramar.
- Suelos tipo CL:  
Conformados por arcillas inorgánicas, arcillas limosas o arcillas arenosas y ocupan el 22.07% del área de la ciudad. El contenido de humedad es de 28.78% a 42.15%; por lo tanto, se considera que su capacidad de retención (permeabilidad) es moderada. Son suelos no consolidados o suelos que presentan plasticidad de ligera a baja (de 13.4% a 19.8%). Estos suelos han sido identificados en el extremo sur de la ciudad de Huarney, en las inmediaciones del río Huarney (A.H. Los Árabes) y en pequeñas capas en el extremo norte de la Av. Olivar.
- Suelos tipo SP-SM  
Corresponden a arenas limosas mal graduadas con presencia de gravas. El contenido de humedad es de 2.38% (suelos compactos) a 30-17% (suelos blandos), este último se debe a que el nivel freático en la zona se encuentra a 2.10 m de profundidad. No presentan plasticidad y han sido identificados en el extremo norte del A.H. La Victoria y en las inmediaciones del río Huarney. Estos suelos ocupan el 6.58% del terreno de la ciudad.

- Suelos tipo SC-SM:  
Corresponden a arenas arcillo-limosas mal graduadas y ocupan el 1.11% del área de la ciudad. El contenido de humedad es de 18.47% y presentan ligera plasticidad (4.81%). Estos suelos se encuentran en las inmediaciones del Hospital de Huarmey.
- Suelos tipo CL-ML:  
Constituidos por arcillas y limos inorgánicos con presencia de arena y ocupan menos del 1% del área de la ciudad. El contenido de humedad es de 20.57% y presentan plasticidad ligera (6.07%). Estos suelos se encuentran en el extremo este de la ciudad de Huarmey.

Además del medio físico, algunos de los factores que intervienen en la intensificación y peligro por inundaciones tienen que ver con el cambio climático que afecta a la región de Ancash, la cual alberga algunos de los nevados más imponentes del país. El calentamiento de la tierra continúa produciendo el derretimiento de los nevados que de manera directa incrementa el caudal de los ríos en las cabeceras de cuenca.

Asimismo, el impacto que ha generado sobre la provincia de Huarmey, el fenómeno de El Niño y el fenómeno del Niño Costero ha tenido consecuencias desastrosas para la región, en sus componentes urbano y rural, afectando de manera significativa a la población y sus actividades económicas, como se pudo observar en el año 2017.

#### **d) Mantenimiento de la cuenca**

El mantenimiento adecuado del río, es un factor clave en la gestión de riesgo por inundaciones que las entidades competentes deben realizar periódicamente. Actualmente la ciudad de Huarmey cuenta con un Programa de Apoyo a la Gestión Integral del Riesgo de Desastres Naturales a Nivel Urbano, elaborado por la Municipalidad Provincial de Huarmey en el año 2011.

Este estudio en su componente: “Evaluación de Riesgos en zonas urbanas”, formula proyectos de intervención, así como la priorización de los mismos, a fin de lograr acciones que contribuyan a la disminución de los niveles de riesgo en la ciudad. Con la formulación de estos proyectos de intervención se pretende reducir la vulnerabilidad ante la probabilidad de un desastre sea natural y antrópico. Para lo cual se tomaron como insumos los documentos de gestión existentes, así como reuniones de trabajo con los equipos técnicos del a municipalidad provincial de Huarmey.

De las iniciativas recogidas de este estudio, existen programas de infraestructura destinados a la prevención de desastres asociados a crecimiento del caudal del río Huarmey, entre los cuales podemos destacar los siguientes:

- Reforzamiento de la defensa ribereña del Río Huarmey
- Mantenimiento y limpieza de canales de regadío
- Evaluación y reforzamiento estructural de lugares de concentración pública
- Proyecto de fomento de prevención y defensa civil
- Estudio Integral del Sistema de Drenaje
- Fortalecimiento del Comité de Defensa Civil
- Implementación de faja marginal o de protección a ambos lados del río
- Construcción de un Hospital de Emergencias.
- Plan de prevención ante desbordes del Río Huarmey
- Programa de difusión del plan de uso de suelo y Mapa de Peligros

Sin lugar a dudas, este documento representa un intento de gestión muy importante por parte de la municipalidad provincial de Huarmey, sin embargo, no se tiene registro o información de la aplicación de estos programas, evidenciando una falta de medidas de prevención y mitigación durante el último evento extremo registrado en el año 2017 con el fenómeno de El Niño Costero.

### **De los factores que intervienen en el modelamiento hidráulico:**

Para el modelamiento hidráulico del presente trabajo, se utilizó la información obtenida respecto a los datos estadísticos de precipitaciones y caudales, identificando periodos de máximas avenidas, en un registro de años que incorpora algunos de los años con efectos más devastadores debido al fenómeno de El Niño. Aunque hubiese sido apropiado realizar un análisis independiente para estos años, sólo se consideró el registro mostrado en el ítem 2.4.1 para la proyección estadística. Esto permitió seleccionar los caudales a ingresar en el modelo, así como sus periodos de retorno.

Los factores que van a interactuar en la creación del modelo de inundaciones son:

- Caudales
- Periodo de retorno
- Método para la determinación de caudales

### a) Caudales

Como se mencionó anteriormente, los datos de caudales máximos registrados se tomaron de la estación Puente Huamba. Estos datos registran valores comprendidos entre los años 1960 y 1997. En la siguiente figura se puede observar el hidrograma de caudales máximos diarios de la estación Puente Huamba con los datos indicados en el cuadro 6.



Figura 9: Hidrograma de caudales máximos diarios en la estación Puente Huamba

### b) Periodos de retorno

Como periodo de retorno nos referimos al tiempo medio entre dos avenidas con caudales similares o superiores a uno determinado. Los periodos de retorno elegidos para el presente trabajo son de 25, 50, 100 y 500 años. Esto permite observar el comportamiento hidráulico del río en base al análisis de máximas avenidas.

Los caudales a ingresar al modelo correspondientes a cada periodo de retorno, se obtienen en base al registro de caudales máximos y aplicando un método estadístico para estimar los resultados.

### c) Método para la determinación de caudales

Para la determinación de los caudales máximos que se van a ingresar en el modelo para los diferentes periodos de retorno, se recurrió al software de cómputo SMADA, en su aplicación online.

SMADA (Stormwater Management and Design Aid) es un software que permite el análisis y diseño de sistemas de datos pluviales, que incluye herramientas para realizar cálculos hidráulicos, cálculos hidrológicos, cálculos estadísticos, cargas contaminantes, entre otros.

Para el cálculo de los caudales a ingresar en el modelo, el software utiliza una distribución de probabilidad GEV (valores extremos generalizados). En esta función, las distribuciones de valores extremos seleccionados de conjuntos de muestras de cualquier distribución de probabilidad, convergen en una de las tres formas de distribución de valor extremo, llamadas:

- Tipo I: Gumbel,  $\gamma = 1.14$
- Tipo II: Frechet  $\gamma \leq 1.14$
- Tipo III: Weibull  $\gamma > 1.14$

La distribución de probabilidad la para la GEV es:

$$F(x) = \exp \left[ - \left( 1 - \kappa \frac{x - \beta}{\alpha} \right)^{1/\kappa} \right]$$

Donde:

$\kappa$ ,  $\beta$  y  $\alpha$  son parámetros que deben ser determinados.

Los tres casos limitantes son:

1.  $\kappa = 0 \rightarrow$  Distribución de Valor Extremo Tipo I (Gumbel)

$$f(x) = \frac{1}{\alpha} \exp \left[ - \frac{x - \beta}{\alpha} - \exp \left( - \frac{x - \beta}{\alpha} \right) \right]$$

Rango:  $-\infty < X < \infty$



Estimación de parámetros:

$$\beta = \bar{x} - 0.5772\alpha \qquad \hat{\alpha} = \frac{\sqrt{6}}{\pi} \hat{\sigma}$$

2.  $\kappa < 0 \rightarrow$  Distribución de Valor Extremo Tipo II (Frechet)

$$f(x) = \exp \left[ - \left( 1 - \kappa \frac{x - \beta}{\alpha} \right)^{1/\kappa} \right]$$

Rango:  $(\beta + \alpha / \kappa) \leq x \leq \infty$

3.  $\kappa > 0 \rightarrow$  Distribución de Valor Extremo Tipo III (Weibull)

$$f(x) = \exp \left[ - \left( 1 - \kappa \frac{x - \beta}{\alpha} \right)^{1/\kappa} \right]$$

Rango:  $-\infty \leq x \leq (\beta + \alpha / \kappa)$

Los resultados que arrojó el software SMADA, en base a los datos de caudales máximos ingresados se pueden observar en las siguientes figuras y cuadros:

First Moment	54.850
Second Moment	2,740.955
Third Moment	306,077.712
Skew	2.1329
Distribution Method	GEV
Number of Points	34
Maximum	270.00
Minimum	3.50

Figura 10: Datos estadísticos y método de distribución del software SMADA

	Plot Position	Actual Data	Predicted Data
	0.0286	3.5	-1.4318
	0.0571	4.3	3.3326
	0.0857	6	6.8329
	0.1143	6	9.7783
	0.1429	9.5	12.4149
	0.1714	10	14.8612
	0.2	12.3	17.1854
	0.2286	14.5	19.4314
	0.2571	16	21.6303
	0.2857	20	23.8055
	0.3143	32.5	25.9763
	0.3429	33	28.159
	0.3714	34.3	30.3686
	0.4	40	32.6192
	0.4286	40	34.9253
	0.4571	40	37.3015
	0.4857	40	39.7637
	0.5143	42	42.3296
	0.5429	45	45.0193
	0.5714	45	47.856
	0.6	45	50.8675
	0.6286	50	54.0876
	0.6571	60	57.5582
	0.6857	70	61.3324
	0.7143	72	65.4794
	0.7429	80	70.0915
	0.7714	80	75.2962
	0.8	85	81.2761
	0.8286	90	88.3063
	0.8571	100	96.8263
	0.8857	100	107.602
	0.9143	119	122.1395
	0.9429	150	144.0428
	0.9714	270	185.9979

Values and Prediction

Cuadro 8: Valores ingresados y Predicciones del software SMADA

	Return Period	Probability	Prediction
	500	0.998	422.2467
	200	0.995	324.4876
	100	0.99	262.8885
	50	0.98	210.1485
	25	0.96	164.8633
	10	0.9	114.254

Return Periods

Cuadro 9: Periodos de retorno y caudal máximo obtenido

En base a los resultados obtenidos podemos elaborar un cuadro resumen con los caudales máximos a ser ingresados en el modelo, para cada periodo de retorno considerado en el presente trabajo.

<b>Periodo de retorno (años)</b>	<b>25</b>	<b>50</b>	<b>100</b>	<b>500</b>
<b>Caudal (m<sup>3</sup>/s)</b>	164.8633	210.1485	262.8885	422.2467

Cuadro 10: Caudales máximos para cada periodo de retorno.

### **2.3.3. Tercera Etapa: Aplicación del SIG y Modelamiento Hidráulico**

Esta etapa se desarrolla en su componente de modelamiento espacial con ArcGIS y su componente de simulación hidráulica con HEC-RAS.

La integración del SIG con el HEC-RAS se da a través de una extensión del ArcGIS llamada HEC-GeoRAS. Esta herramienta permita la preparación de datos espaciales de secciones transversales y la faja del río para la entrada al programa HEC-RAS y así obtener datos espaciales de la magnitud del área de inundación.

#### **Modelamiento del área de trabajo**

Como se mencionó anteriormente, el área de trabajo debe ser una muestra representativa de la cuenca baja del río Huarmey. Para delimitar esta área haremos uso de las herramientas propias del ArcGIS, así como de la información obtenida en el ítem 2.4.1 del presente capítulo.

En la figura 11 se puede observar la zona delimitada como el área de trabajo en la interfaz del software ArcGIS. Para el siguiente acápite y la generación del modelo de dato TIN, necesitaremos las curvas de nivel ajustadas al área de trabajo. Este resultado se puede apreciar en la figura 12.

Los archivos finales del área de trabajo utilizados, de acuerdo a su ubicación geográfica, se trabajarán en el sistema de coordenadas UTM WGS84 Zona 17S.

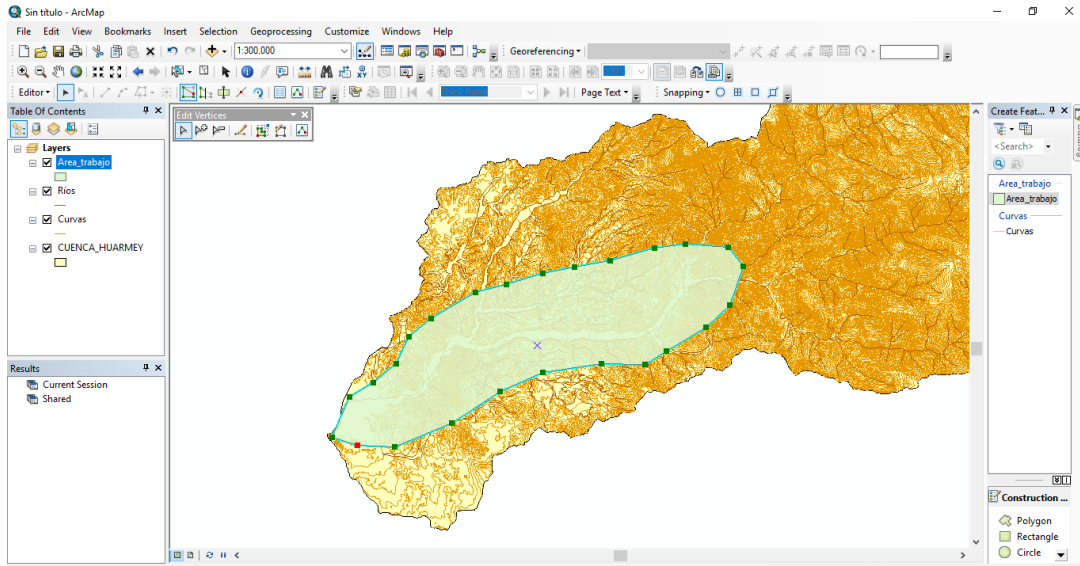


Figura 11: Delimitación del área de trabajo en la interfaz del Software ArcGIS.

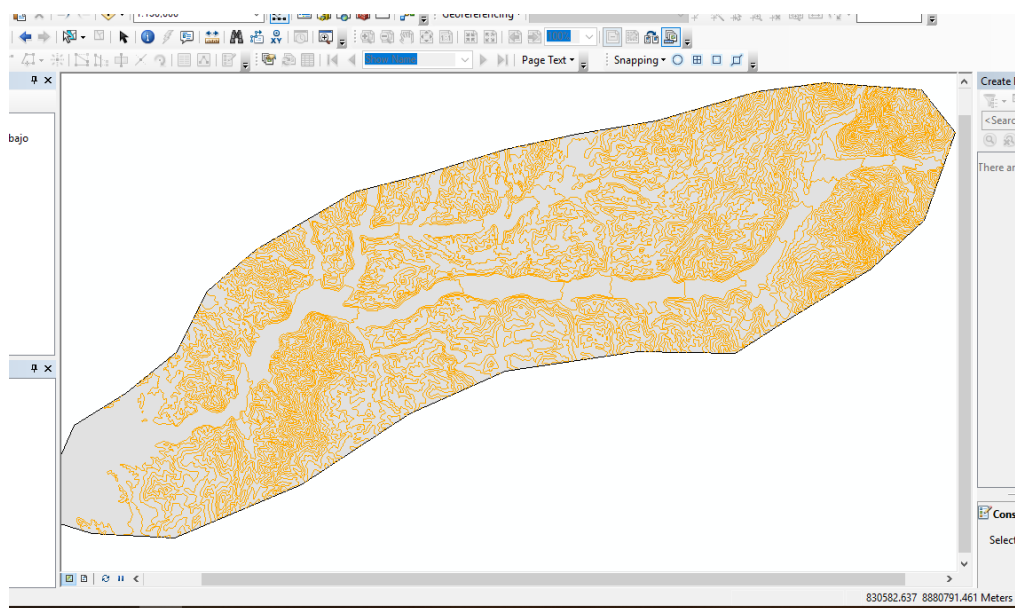


Figura 12: Curvas de nivel ajustadas a la zona de trabajo en sistema de coordenadas UTM WGS84 Zona 17S.

Una vez definida el área de trabajo y obtenidos los caudales máximos diarios a introducir en el modelo para cada periodo de retorno seleccionado, lo siguiente es conocer la forma de

circulación de la escorrentía superficial por la cuenca baja. Esto se consigue mediante el análisis hidráulico, el cual modela el flujo del agua sobre la topografía del terreno.

En el presente trabajo se realiza un análisis hidráulico unidimensional, utilizando el software HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center – River Analysis System). Este paquete informático está diseñado para simular unidimensionalmente el comportamiento del flujo de agua en ríos o canales naturales para averiguar si el caudal desborda el cauce. Es en este último punto donde radica su importancia en estudios de inundación y determinación de zonas inundables. Para flujo constante, el procedimiento de cálculo que usa HEC-RAS está basado en la resolución de la ecuación de energía unidimensional, es decir las pérdidas de energía se evalúan por fricción y contracción/expansión. Para flujo inestable, el programa trabaja con las ecuaciones de Saint Venant. (Fuente: HEC-RAS River Analysis System User's Manual)

El presente proyecto consta de 2 fases, una primera llamada pre-proceso, el cual contiene la geometría del río y la superficie del terreno, para lo cual es necesario instalar en ArcGIS una extensión llamada HEC-GeoRAS, y una segunda fase donde los resultados se introducen en el HEC-RAS. Luego, estas 2 etapas permitirán la exportación y visualización de resultados en ArcGIS y Google Earth.

Las curvas de nivel obtenidas de las cartas nacionales del IGN presentadas en el acápite 3.1 del presente capítulo, se encuentran a distancias de 50 metros, lo cual sirve como referencia y delimitación de la cuenca y el área de estudio, pero supone una escala de trabajo muy grande para un análisis hidráulico adecuado de un río. Para obtener curvas de nivel a distancias de 5 metros (escala adecuada para el análisis hidráulico) se recurrirá a los modelos de elevación digital (DEM) obtenidos de la U.S. Geological Survey.

Estas imágenes satelitales se procesarán con **QGIS 2.0.1**, el cual es un sistema de información geográfica de software libre, más versátil y amigable a la hora de trabajar con archivos en formato ráster.

Se obtuvieron 4 modelos DEM de acuerdo a la zona de estudio, los cuales van a permitir la generación de curvas de nivel luego de su correcta georreferenciación.

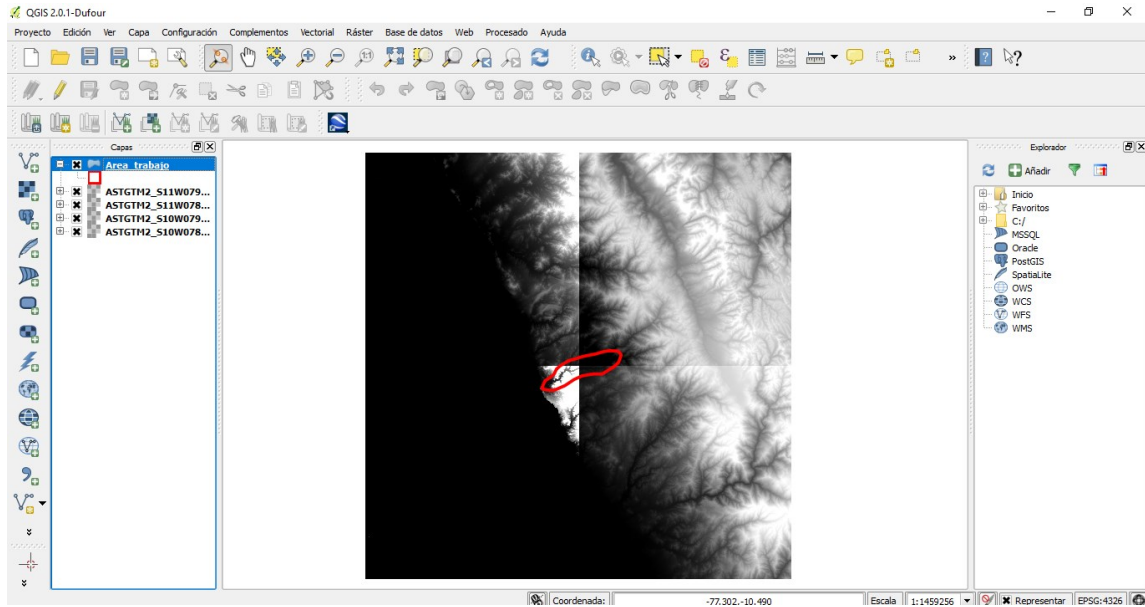


Figura 13: Zona de trabajo sobre las imágenes satelitales DEM en la interfaz QGIS.

Con la herramienta *Combinar* del menú *Ráster*, se puede unir las imágenes para luego cortarla en base al área de trabajo con la herramienta *Clipper* del mismo menú.

Realizado este proceso se reproyecta la imagen al sistema de coordenadas de trabajo (UTM WGS84 Zona 17S) para que se pueda obtener los datos de elevación de acuerdo al modelo, y finalmente se pueden extraer las curvas de nivel en formato shapefile con la herramienta *Ráster* > *Extracción* > *Curvas de nivel*.

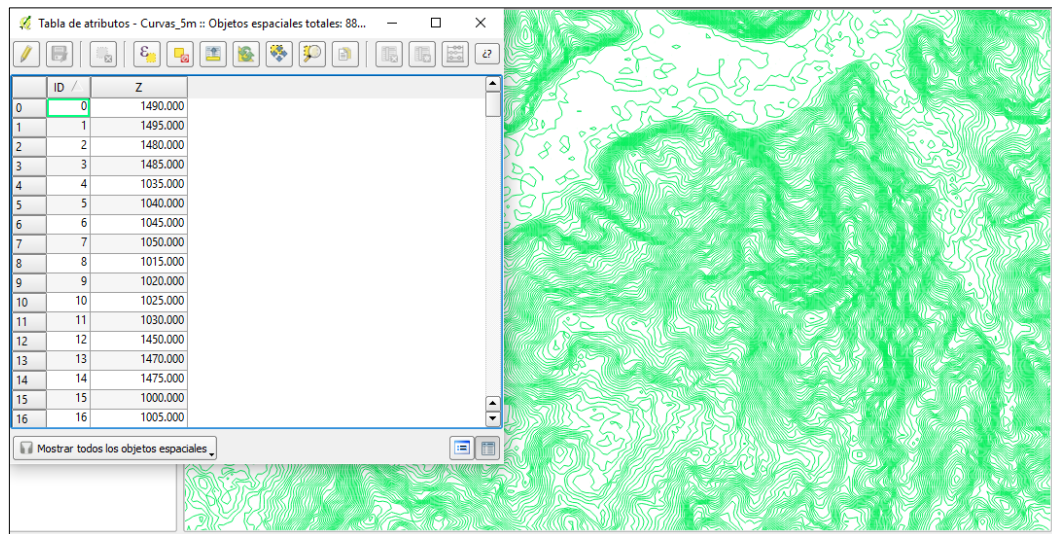


Figura 14: Vista de las curvas de nivel cada 5 metros y su tabla de atributos, obtenidas de los modelos de elevación digital (DEM)

### Pre-proceso en ArcGIS mediante la extensión HEC-GeoRAS

Este pre-proceso permite obtener un archivo de datos sobre la geometría del terreno, que incluye el cauce del río delimitado y secciones de análisis transversal. Para obtener este resultado se parte de un modelo de dato TIN (Triangulated Irregular Network), el cual es generado a partir de curvas de nivel en formato vectorial o a partir de un modelo digital de terreno (MDT), el cual es obtenido a través las imágenes satelitales recopiladas.

En esta etapa se procesan los datos georreferenciados obtenidos, en este caso las curvas de nivel del área de trabajo obtenidos con el Software QGIS, mediante un conjunto de herramientas que permiten complementar el trabajo en HEC-RAS. El resultado de este pre-proceso es un archivo de datos sobre la geometría de terreno estudiado, incluyendo el cauce del río delimitado y secciones de análisis transversal del mismo.

Tenemos como base las curvas de nivel del área de trabajo en formato shapefile. La extensión HEC-GeoRAS no trabaja con datos vectoriales, por lo tanto, se debe convertir el archivo en formato .shp a TIN. Para ello usamos la herramienta del menú **3d analyst > Create TIN**.

Esta herramienta del arctoolbox permite, a partir de las curvas de nivel del área de trabajo, crear un modelo 3D de la superficie del terreno en un archivo en formato TIN.

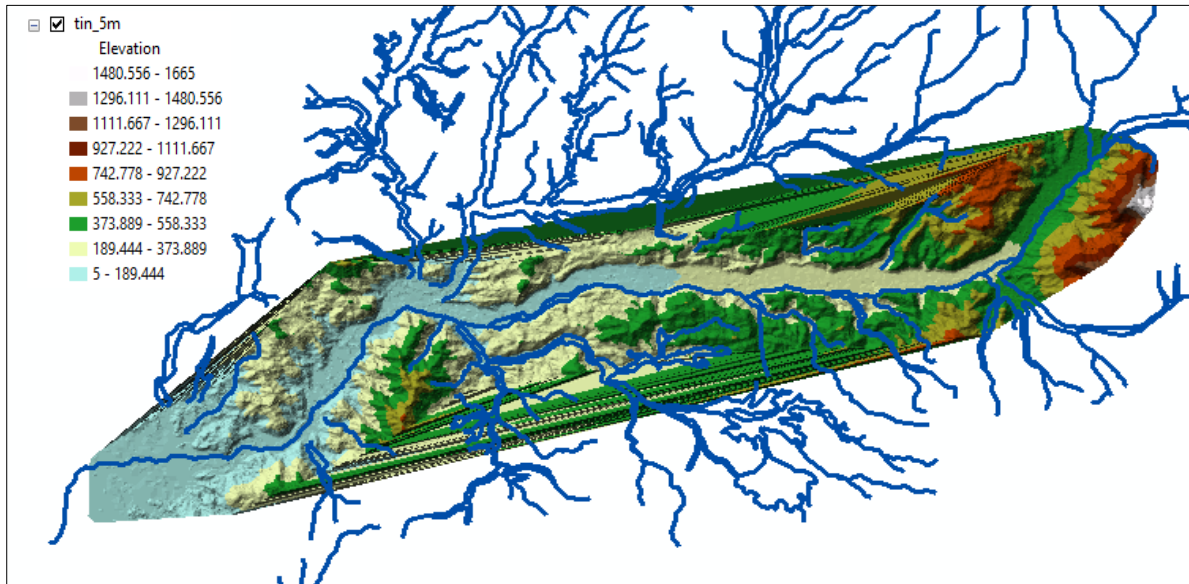


Figura 15: Red hidrográfica y modelo en formato TIN del área de trabajo en la cuenca baja del río Huarmey.

En la figura 15 se puede observar el área de trabajo en formato TIN, como producto del empleo de las curvas de nivel. Las unidades de las elevaciones que se visualizan en la leyenda son metros sobre el nivel del mar. Asimismo, se puede observar la red hidrográfica de la cuenca del río Huarmey, la cual permitirá tener una idea del curso del río para su delimitación mediante la extensión HEC-GeoRAS.

Una vez obtenido el TIN, ya se puede trabajar con la extensión HEC-GeoRAS. Su manejo se centra en aplicar las herramientas del menú RAS Geometry, para crear la geometría del cauce. Es importante mencionar que el procedimiento para este modelamiento hidráulico es de la siguiente manera:

- Trazado del eje del río
- Trazado del cauce del río
- Trazado de las márgenes del río donde se requiere evaluar las posibles áreas de inundación.
- Creación de secciones transversales



El trazado de estos elementos, sobre todo el cauce del río, se debe realizar en base a mediciones adecuadas in situ o mediante imágenes satelitales que permitan determinar la verdadera longitud del ancho del cauce. Para el presente trabajo nos apoyamos en Google Earth y la creación de un polígono del cauce del río que permitió exportarlo a ArcGIS y utilizarlo como plantilla o base para la delimitación del mismo en la extensión HEC-GeoRAS.

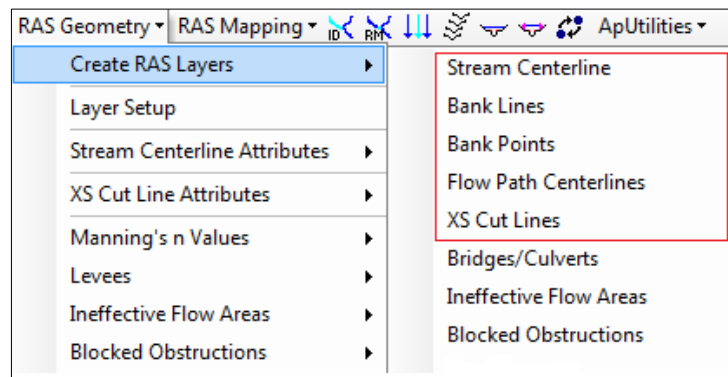


Figura 16: Menú de pre-proceso de la extensión HEC-GeoRAS. Las herramientas empleadas en el modelamiento hidráulico se encuentran en el cuadro rojo



Figura 17: Delimitación del cauce del río Huarmey en Google Earth.

Las herramientas mencionadas de la extensión HEC-GeoRAS nos permiten crear varias capas que manualmente hay que digitalizar con los elementos necesarios para el modelamiento hidráulico. Las cuatro capas principales son Stream Centerline, Bank lines, Flow Path Centerlines y XS cut lines, herramientas que van permitir digitalizar el eje del río, los límites del cauce del río, las márgenes del río donde se requiere evaluar las posibles áreas de inundación, y las secciones transversales al río que permitirán ver la geometría del fondo del canal.

Para la digitalización del eje del río y su cauce nos apoyamos en el archivo shapefile de la red hidrográfica del área de trabajo y en la delimitación realizada del cauce en el Google Earth exportado a formato .shp.

Respecto a las secciones transversales, para el presente análisis se consideró un ancho de sección de 800 m. y un intervalo de 800 m. En la figura 18 se puede observar el TIN con las capas de geometría creadas con la extensión HEC-Geo RAS.

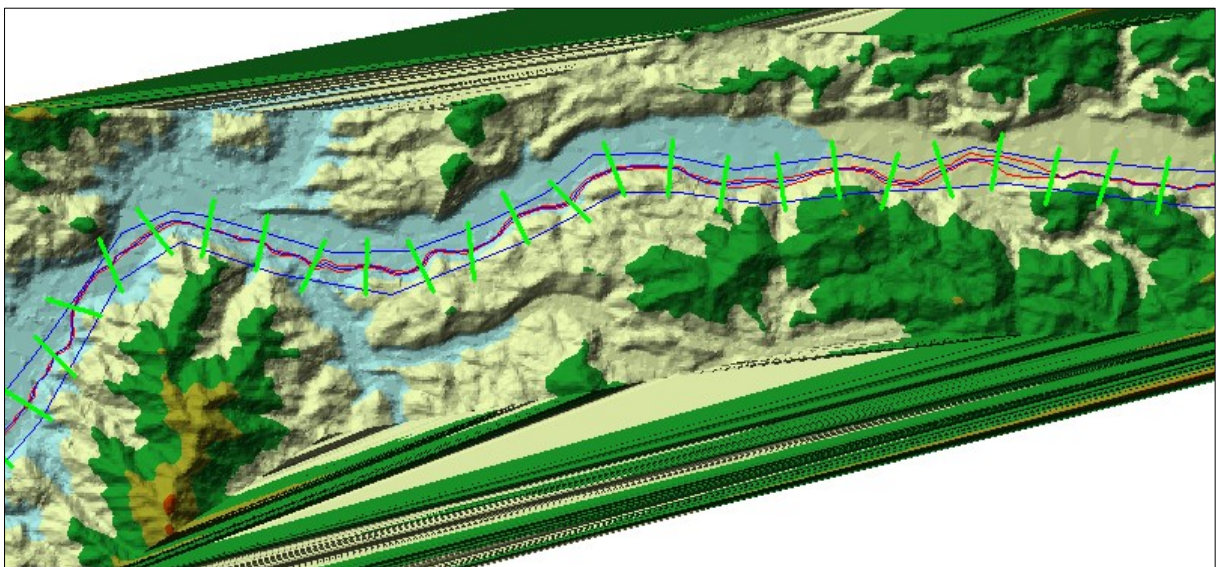


Figura 18: TIN del área de trabajo con las capas de geometría creadas y digitalizadas con la extensión HEC-GeoRAS para el río Huarmey.

De la figura 18 se puede indicar que las líneas rojas delimitan el ancho del cauce del río, las líneas azules a sus costados delimitan las márgenes del río donde se requiere evaluar las posibles áreas de inundación. Las secciones transversales se indican en líneas de color verde paralelas al eje del río.

Es importante mencionar que para poder exportar esta geometría al software HEC-RAS propiamente dicho, es necesario las líneas de secciones de transversales no deben sobreponerse unas con otras y deben estar cubriendo toda la zona de posible inundación (área de los flow path). Es por esta razón que se realizó una verificación y modificación de las secciones con el editor de líneas del software ArcGIS.

Teniendo la geometría final, se asigna los valores a cada elemento del río y el terreno, así como sus secciones respectivas. De esta manera se puede exportar finalmente al software HEC-RAS propiamente dicho.

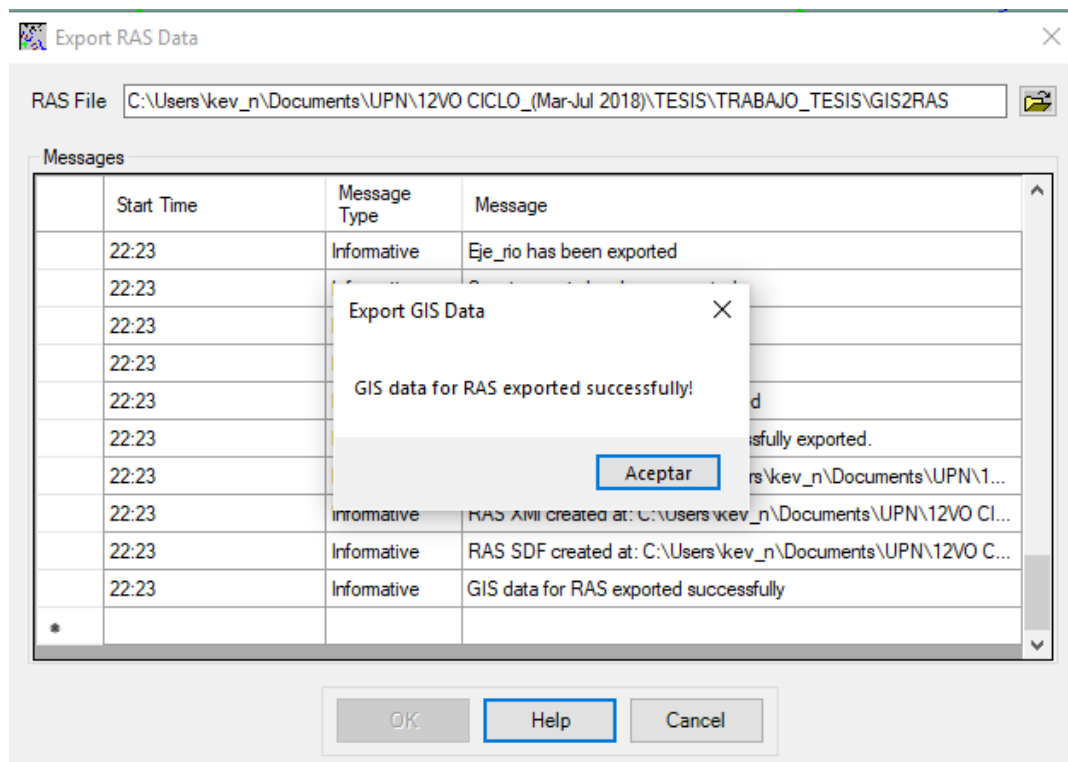


Figura 19: Ventana de confirmación de correcta exportación del modelamiento del río al software HEC-RAS

## Modelamiento Hidráulico con HEC-RAS

Una vez exportada la geometría del río, se pretende modelar el flujo de agua de la zona de trabajo mediante el paquete informático HEC-RAS y generar un archivo de resultados que posteriormente será exportado a ArcGIS para su visualización.

Mediante la opción *Import Geometric Data*, en el HEC-RAS podemos abrir el archivo exportado desde ArcGIS donde se puede observar el eje y la geometría del río con todas las secciones transversales definidas previamente.

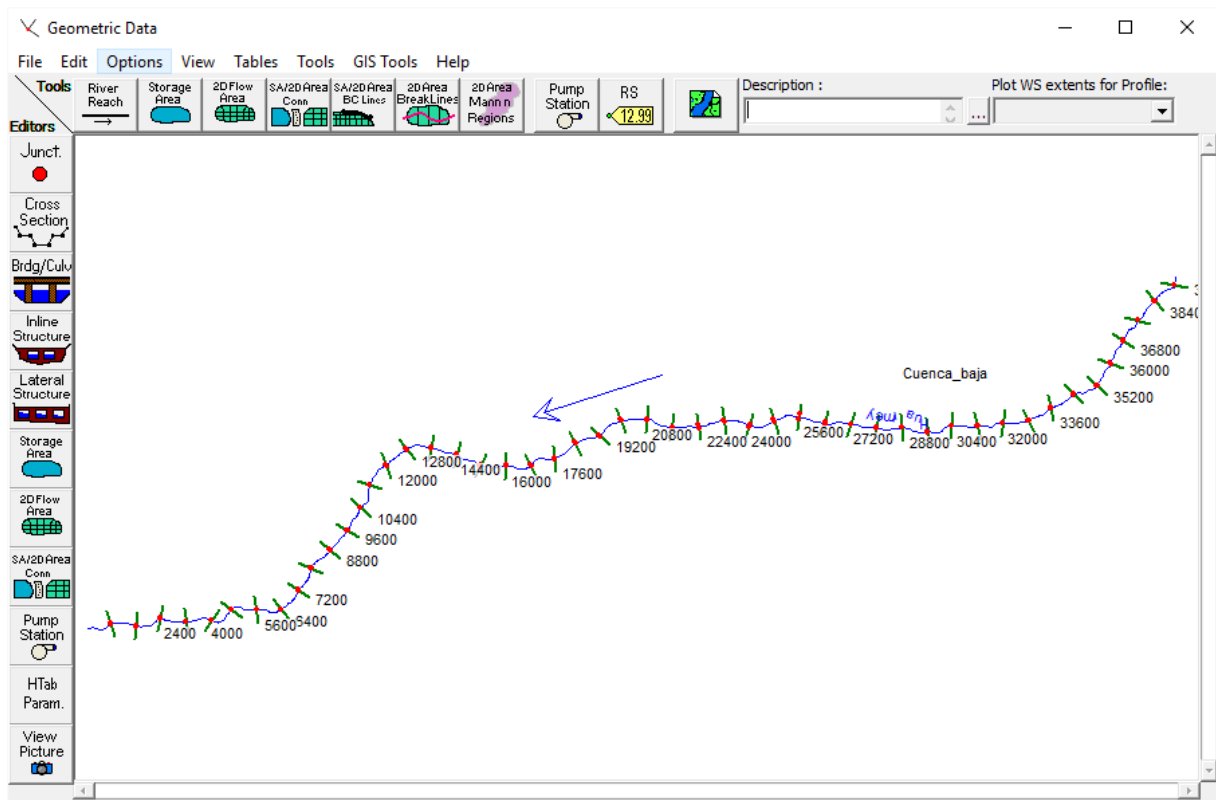


Figura 20: Interfaz del software HEC-RAS con la geometría del cauce del río Huarmey en su cuenca baja

Una vez tengamos la geometría de río debemos asignar a cada tramo o sección transversal el valor de la  $n$ -Manning para el cálculo de la fricción a la que está sometida el agua y poder saber así su velocidad.

En la cabecera de cuenca, el río Huarmey está formado por canales naturales encajados en torrentes o barrancos, pero en la parte baja de la cuenca, el río se forma canales naturales con poca vegetación, situación propia de su ubicación geográfica en la costa peruana. Por esta razón se utilizará un coeficiente de rugosidad de 0.025 para el análisis.

n	Superficie
0.010	Muy lisa, vidrio, plástico, cobre.
0.011	Concreto muy liso.
0.013	Madera suave, metal, concreto frotachado.
0.017	Canales de tierra en buenas condiciones.
0.020	Canales naturales de tierra, libres de vegetación.
0.025	Canales naturales con alguna vegetación y piedras esparcidas en el fondo
0.035	Canales naturales con abundante vegetación.
0.040	Arroyos de montaña con muchas piedras.

Cuadro 11: Valores de rugosidad “n” de Manning.

Fuente: MANUAL: CRITERIOS DE DISEÑOS DE OBRAS HIDRAULICAS PARA LA FORMULACION DE PROYECTOS HIDRAULICOS MULTISECTORIALES Y DE AFIANZAMIENTO HIDRICO – Autoridad Nacional del Agua

Se ingresan los valores n-Manning en el software HEC-RAS (Cuadro 11), así como los datos de caudales considerados para cada periodo de retorno (Cuadro 10). En la opción *Steady Flow Data* del menú principal de RAS debemos introducir los caudales punta que hemos obtenido en SMADA, esta operación debemos realizarla cuatro veces ya que introducimos los caudales para T25, T50, T100 y T500 años. También en este mismo menú, debemos completar las condiciones de contorno del canal (*Boundary Conditions*), que son aquellas que definen el comportamiento de un modelo en sus límites. HEC-RAS permite hacer modelizaciones en régimen de flujo permanente y define hasta cuatro tipos distintos de condiciones de contorno: nivel de agua, calado crítico, curva de caudal y calado normal.

En nuestro caso, consideraremos un régimen crítico (es el método más habitual para proyecto de inundaciones) para observar hasta dónde puede llegar el área de inundación del río. Una vez especificado el tipo de condición de contorno que vamos a usar ahora debemos definir si son para aguas arriba o aguas abajo. Esto depende del régimen de flujo previsto y tenemos tres

opciones: régimen supercrítico (para aguas arriba), régimen subcrítico (para aguas abajo) y régimen variable o mixto (para ambos).

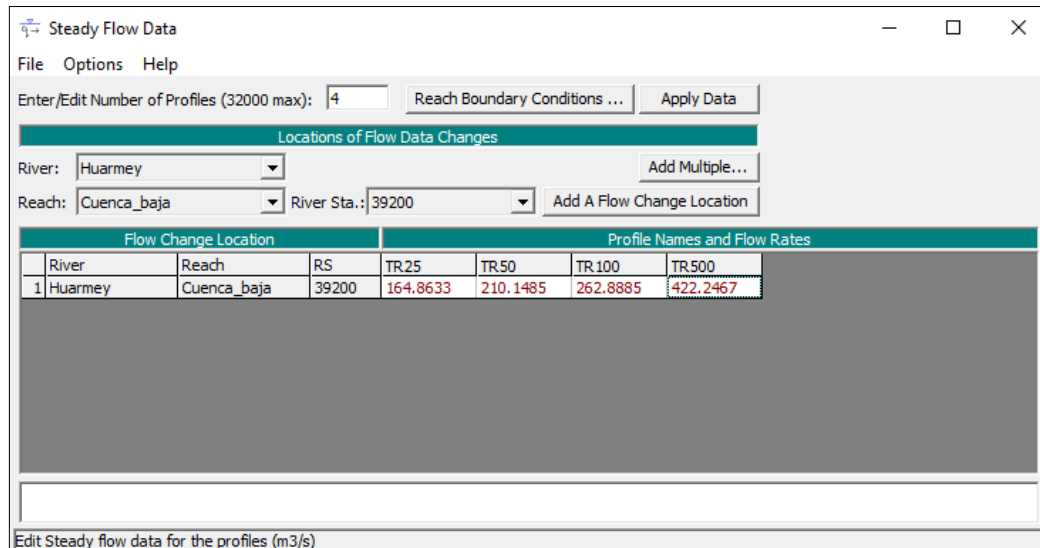


Figura 21: Interfaz del HEC-RAS con los datos de ingreso del caudal máximo para cada periodo de retorno

Finalmente, con la herramienta *Perform a steady Flow simulation* se corre el modelo. En este caso definimos régimen subcrítico para aguas abajo.

## Post-proceso en ArcGIS

Una vez generado el modelo hidráulico, los resultados se exportan en el mismo formato TIN y se emplea la extensión HEC-GeoRAS para generar los resultados finales del proceso. De esta manera se visualiza las superficies de inundación para cada periodo de retorno elegido.

Nuevamente en ArcGis, usamos la extensión HEC-GeoRas para generar los resultados finales del proceso. Algunos de los resultados que genera son, las superficies de inundación para cada periodo de retorno elegido, los grids de profundidad o calado alcanzado, visualizaciones 3D etc.

Una vez importado el archivo en el HEC-GeoRAS, debemos aplicar las opciones *Water Surface Generation* y *Floodplain Delineation*. En estos dos procesos se crearán las zonas de inundación para cada perfil, es decir, para cada caudal que se ha establecido previamente en HEC-RAS. Los polígonos de inundación se crean en 2 formatos: Ráster (.tiff) y vectorial (.shp)

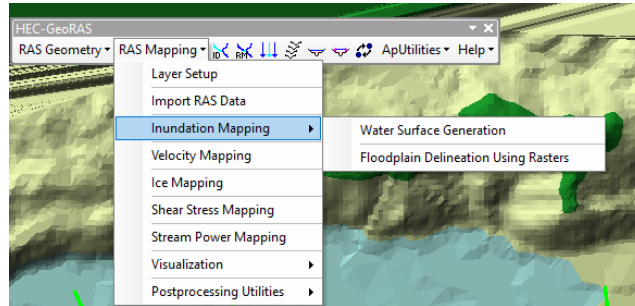


Figura 22: Menú del post-proceso de la extensión HEC-GeoRAS para la creación de zonas de inundación

A manera de resumen se incluye un gráfico que muestra todo el proceso de la metodología empleada. Los resultados se indican en el capítulo 3.

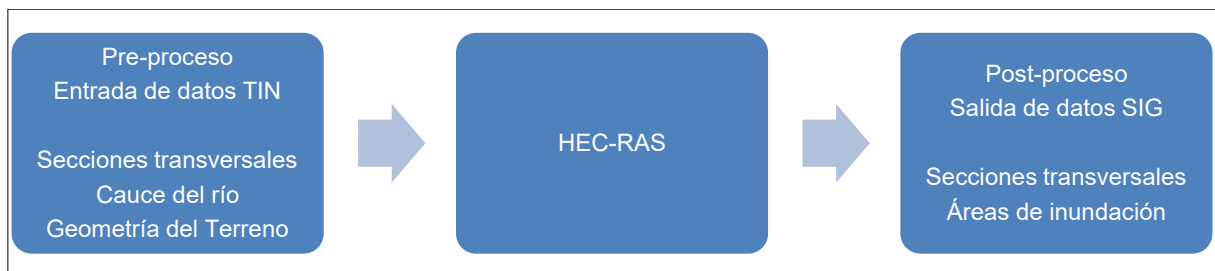


Figura 23: Proceso de intercambio de datos de la metodología SIG

### CAPÍTULO 3. RESULTADOS

Siguiendo los pasos definidos en la metodología, pasamos a mostrar los resultados obtenidos mediante el análisis hidráulico y el post proceso.

#### 3.1. RESULTADOS DEL ANÁLISIS HIDRÁULICO

Una vez obtenida la geometría del terreno e ingresado los datos de caudales y periodos de retorno podemos visualizar el flujo del río para cada sección de análisis.

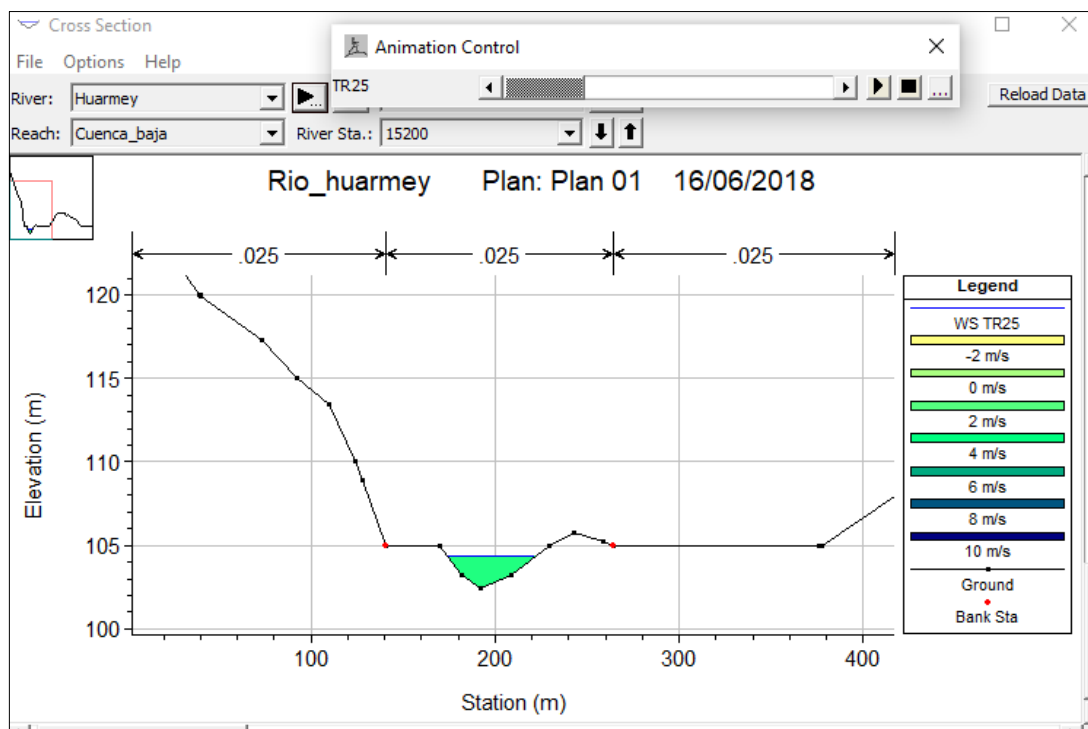


Figura 24: Sección transversal de un tramo del río Huarmey para una simulación de periodo de retorno de 25 años



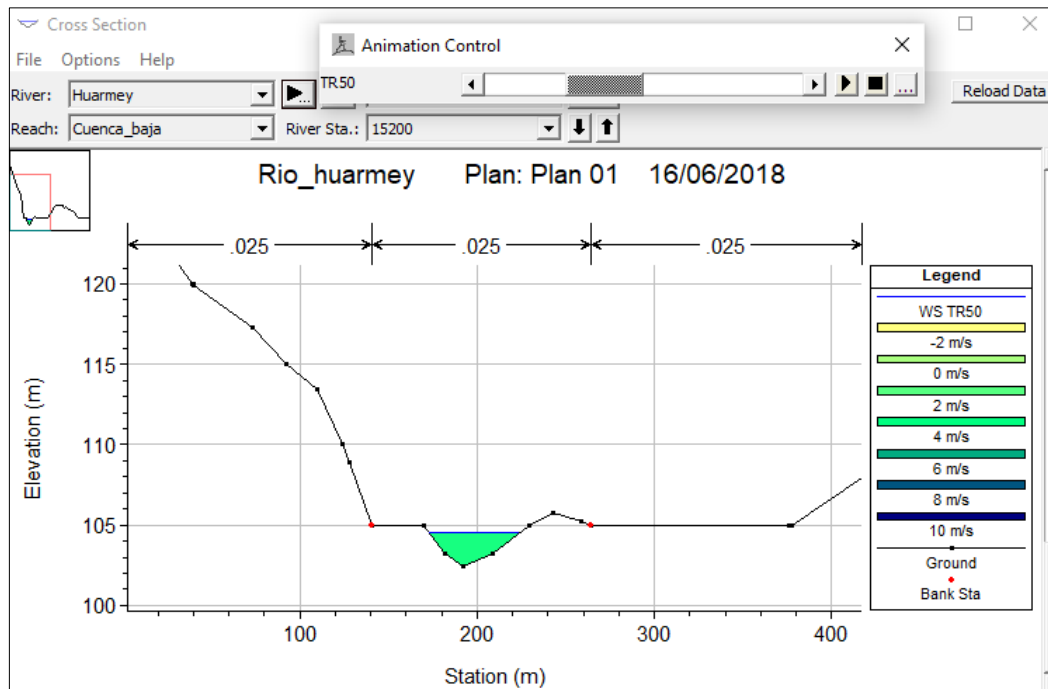


Figura 25: Sección transversal de un tramo del río Huarmey para una simulación de periodo de retorno de 50 años

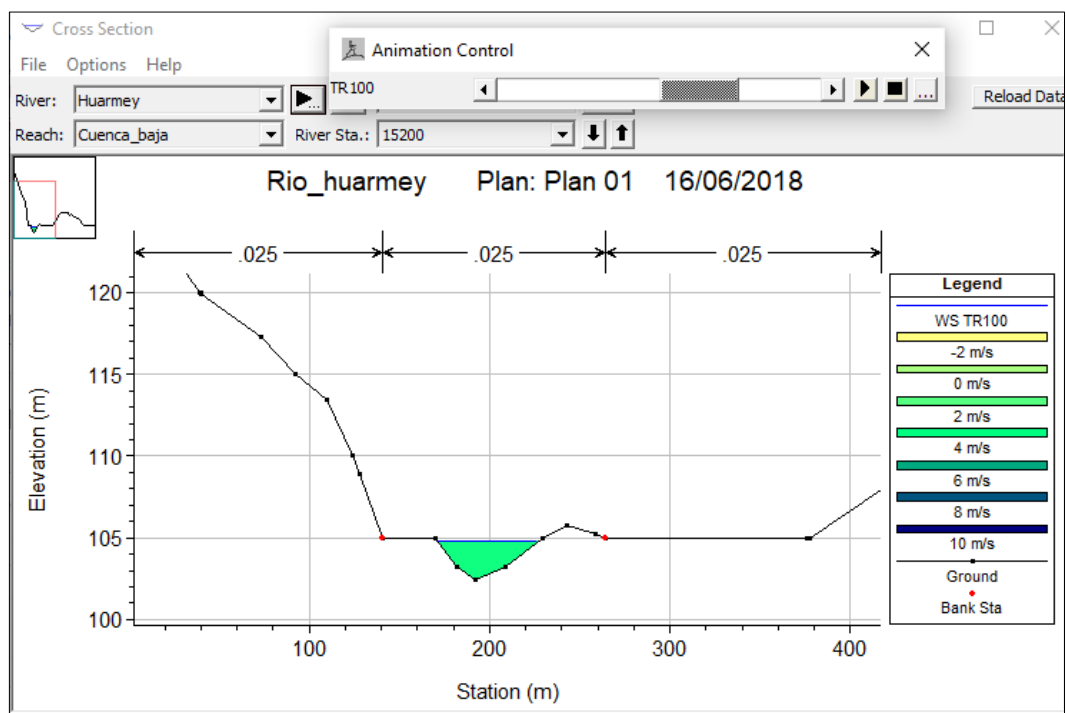


Figura 26: Sección transversal de un tramo del río Huarmey para una simulación de periodo de retorno de 100 años

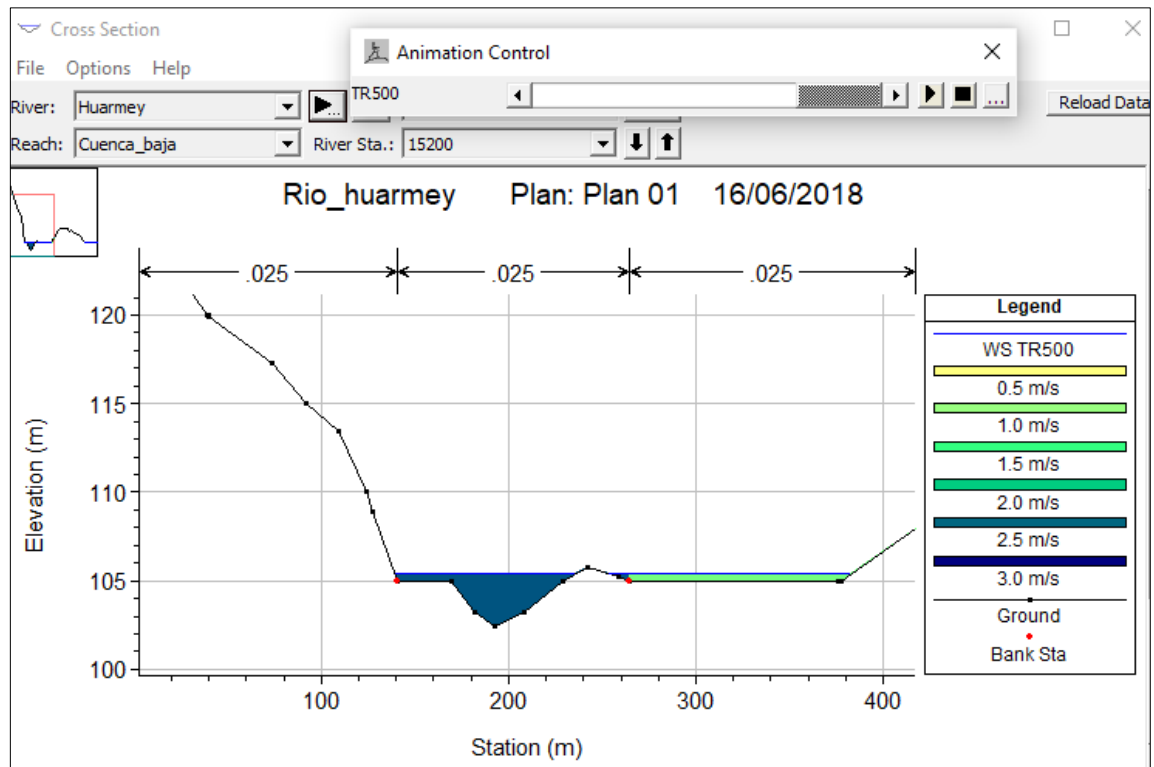


Figura 27: Sección transversal de un tramo del río Huarmey para una simulación de periodo de retorno de 500 años

El ejemplo de sección transversal que vemos pertenece a la parte alta del río, donde el canal aún es natural. Se aprecia la típica geometría en forma de “v” que da lugar al encajamiento del cauce. Los puntos rojos indican la situación de los “Banks”, que delimitan el cauce principal frente a lo que el programa ya considera llanura de inundación (HEC-RAS trata de forma diferente al cauce principal que a las llanuras en cuanto al cálculo de la rugosidad n-Manning se refiere). La zona coloreada de azul es la altura que alcanza la lámina de agua para esa simulación (puede ser TR25, TR50, TR100 o TR500 años).

En la figura 28 se puede apreciar el perfil del río en la cuenca baja. Debido a la longitud del río considerado para el estudio, la escala de trabajo no permite observar con claridad en la imagen la diferencia de caudal entre los periodos de retorno, por eso a manera de presentación sólo se mostrará el perfil del río para un periodo de retorno de 500 años.

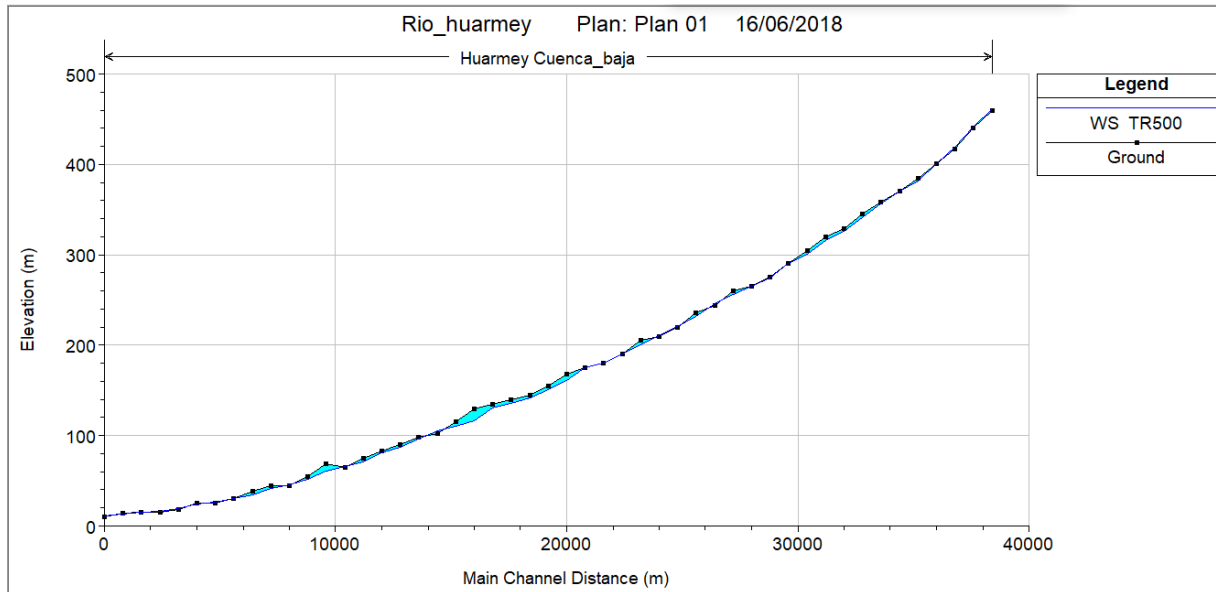


Figura 28: Sección transversal de un tramo del río Huarmey para una simulación de periodo de retorno de 500 años

Con la opción *View 3D multiple cross section plot*, se puede visualizar el perfil del río en 3D, con el objetivo de poder ver la crecida para cada periodo de retorno.

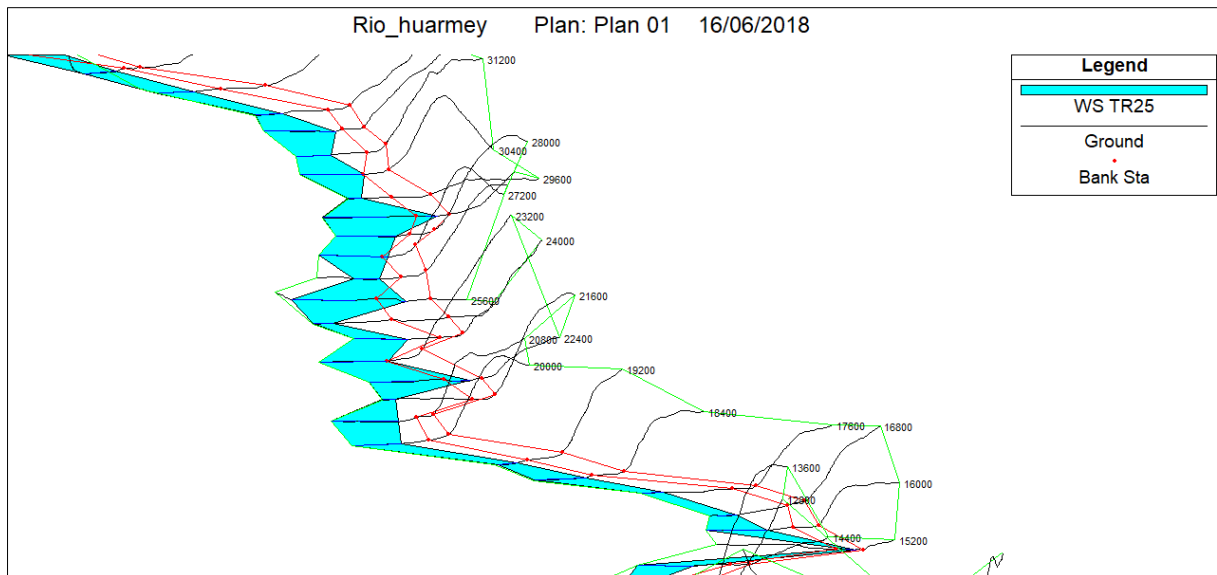


Figura 29: Vista 3D de un tramo del río Huarmey para una simulación de periodo de retorno de 25 años

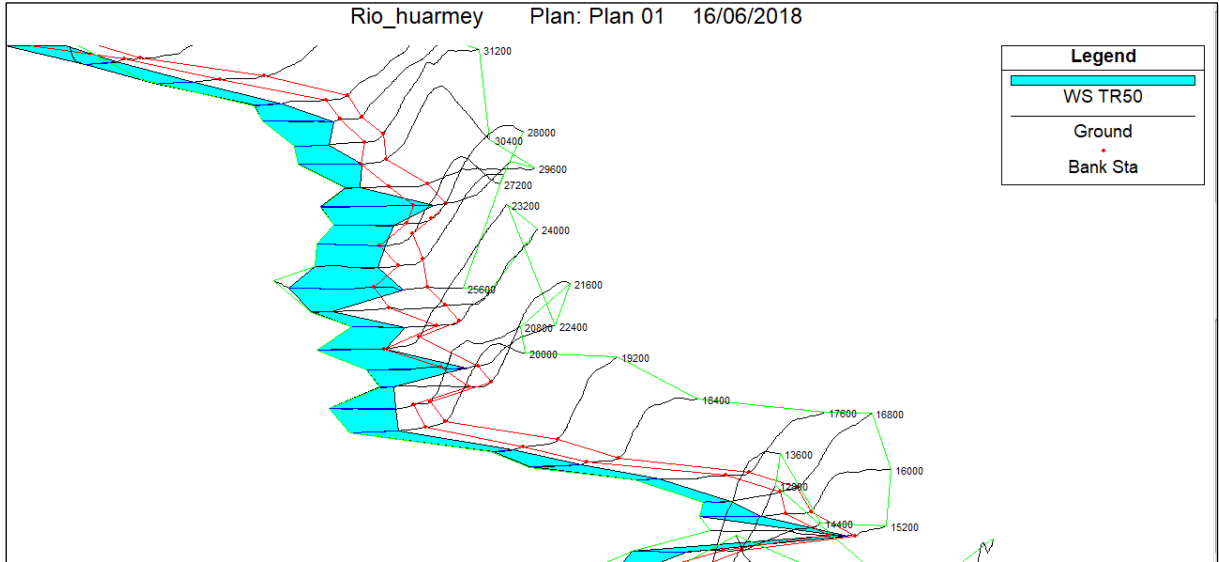


Figura 30: Vista 3D de un tramo del río Huarmey para una simulación de periodo de retorno de 50 años

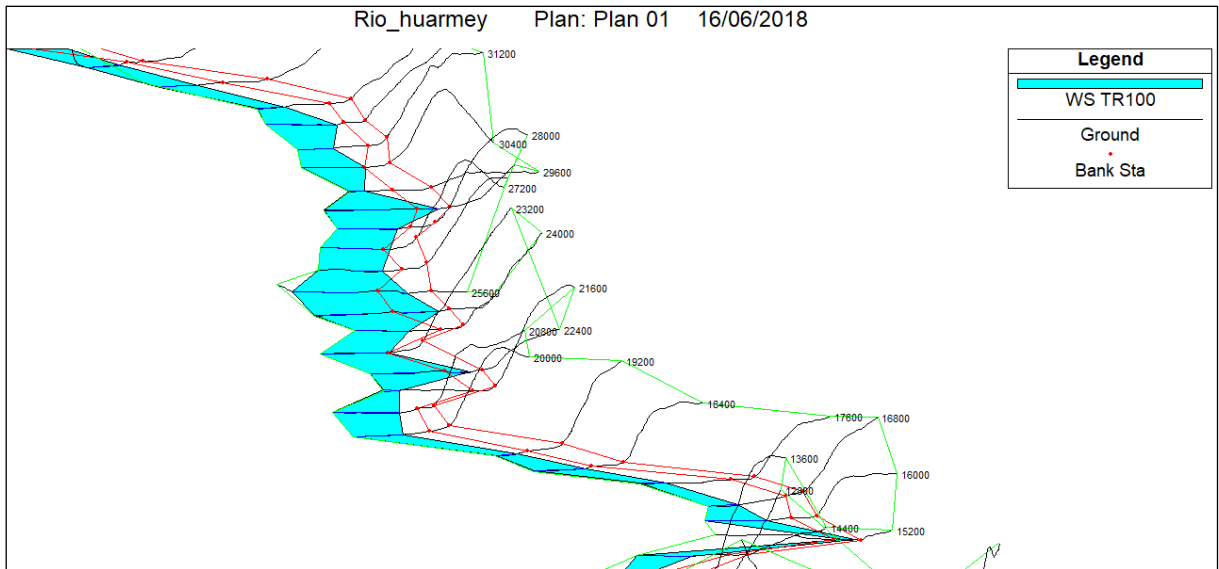


Figura 31: Vista 3D de un tramo del río Huarmey para una simulación de periodo de retorno de 100 años



HEC-RAS Plan: Plan 01 River: Huarmey Reach: Cuenca_baja Profile: TR500												
Reach	River Sta	Profile	Q Total (m3/s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	E.G. Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m2)	Top Width (m)	Froude # Chl
Cuenca_baja	36800	TR500	422.25	400.65	400.78	400.78	401.15	0.006778	0.53	157.69	221.45	0.67
Cuenca_baja	36000	TR500	422.25	385.00	381.56	381.56	382.22	0.005670		117.17	89.33	0.00
Cuenca_baja	35200	TR500	422.25	370.00	370.57	370.57	370.86	0.007316	2.33	177.31	305.21	0.99
Cuenca_baja	34400	TR500	422.25	357.83	355.81	355.81	356.20	0.006751		152.44	196.92	0.00
Cuenca_baja	33600	TR500	422.25	344.93	340.88	340.88	341.29	0.006663		149.40	185.44	0.00
Cuenca_baja	32800	TR500	422.25	328.58	326.01	326.01	326.50	0.006283		136.58	140.91	0.00
Cuenca_baja	32000	TR500	422.25	320.00	315.62	315.62	315.92	0.007429		175.13	298.75	0.00
Cuenca_baja	31200	TR500	422.25	305.00	300.95	300.95	301.41	0.006467		141.30	156.84	0.00
Cuenca_baja	30400	TR500	422.25	290.21	290.65	290.65	290.96	0.007089	1.30	169.63	270.10	0.85
Cuenca_baja	29600	TR500	422.25	275.00	274.77	274.77	275.57	0.006259		106.27	72.88	0.00
Cuenca_baja	28800	TR500	422.25	265.00	265.57	265.57	265.85	0.007587	2.20	182.10	335.12	0.99
Cuenca_baja	28000	TR500	422.25	260.00	255.69	255.69	256.02	0.007172		165.77	253.51	0.00
Cuenca_baja	27200	TR500	422.25	244.41	245.46	245.46	245.75	0.007396	2.31	176.85	305.39	0.99
Cuenca_baja	26400	TR500	422.25	236.26	232.02	232.02	232.49	0.005891		138.06	145.00	0.00
Cuenca_baja	25600	TR500	422.25	220.00	220.61	220.61	220.90	0.007353	1.99	175.95	302.12	0.95
Cuenca_baja	24800	TR500	422.25	210.00	210.26	210.26	210.50	0.006739	1.34	206.23	454.78	0.84
Cuenca_baja	24000	TR500	422.25	205.19	200.72	200.72	201.07	0.007012		161.44	233.20	0.00
Cuenca_baja	23200	TR500	422.25	190.00	190.45	190.45	190.75	0.007287	1.26	173.72	291.50	0.85
Cuenca_baja	22400	TR500	422.25	180.00	180.64	180.64	180.95	0.007285	2.41	171.66	280.03	1.00
Cuenca_baja	21600	TR500	422.25	175.00	174.71	174.71	175.21	0.004314		135.87	137.67	0.00
Cuenca_baja	20800	TR500	422.25	167.97	160.65	160.65	160.96	0.007353		172.00	283.34	0.00
Cuenca_baja	20000	TR500	422.25	155.00	150.73	150.73	151.08	0.006981		161.15	231.38	0.00
Cuenca_baja	19200	TR500	422.25	145.00	141.32	141.32	141.79	0.006427		139.45	151.91	0.00
Cuenca_baja	18400	TR500	422.25	140.00	135.67	135.67	136.01	0.007128		164.74	248.43	0.00
Cuenca_baja	17600	TR500	422.25	135.00	130.23	130.23	130.55	0.007516		166.53	264.33	0.00
Cuenca_baja	16800	TR500	422.25	129.66	116.57	116.57	117.05	0.005935		138.16	145.58	0.00
Cuenca_baja	16000	TR500	422.25	115.00	110.67	110.67	111.00	0.007228		167.76	262.73	0.00
Cuenca_baja	15200	TR500	422.25	102.44	105.37	105.37	105.65	0.003423	2.59	210.75	348.93	0.77
Cuenca_baja	14400	TR500	422.25	98.64	95.70	95.70	96.05	0.007054		161.89	235.91	0.00
Cuenca_baja	13600	TR500	422.25	90.00	86.64	86.63	87.23	0.005592		124.72	103.47	0.00
Cuenca_baja	12800	TR500	422.25	83.29	81.33	81.33	81.88	0.006017		128.07	116.83	0.00
Cuenca_baja	12000	TR500	422.25	75.00	71.06	71.06	71.56	0.006301		135.24	137.60	0.00
Cuenca_baja	11200	TR500	422.25	65.00	65.69	65.69	66.03	0.006776	2.55	164.29	238.24	0.99
Cuenca_baja	10400	TR500	422.25	68.84	60.74	60.74	61.09	0.007018		161.87	235.76	0.00

Figura 33: Resultados tabulares de la simulación hidráulica para un periodo de retorno de 500 años

### 3.2. RESULTADOS DEL MODELO DE INUNDACIÓN

Debido a la escala de trabajo, la diferencia entre los polígonos de inundación para cada periodo de retorno no es apreciable de manera significativa en la vista de la zona de estudio, por lo que a manera de ejemplo se muestra las figuras para un periodo de retorno de 500 años.

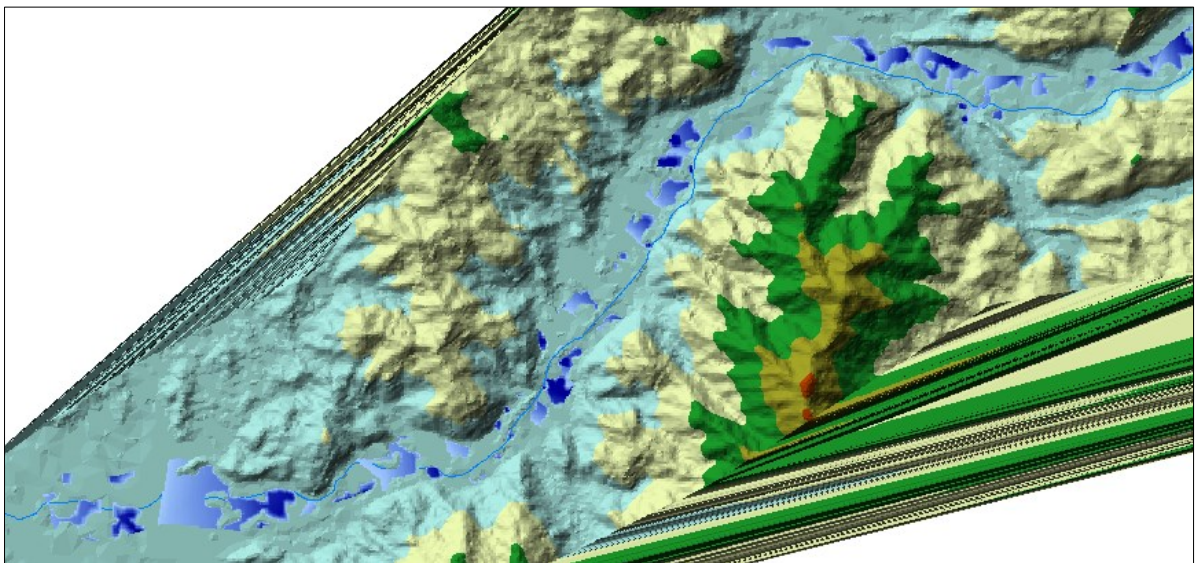


Figura 34: Resultado gráfico de las zonas inundables en la cuenca baja del Río Huarmey para un periodo de retorno de 500 años

En la figura 34 se puede apreciar el polígono de inundación generado con el HEC-GeoRAS sobre la capa en formato TIN que sirvió como base para el análisis. La figura 35 y 36 muestra la exportación del dicho polígono y su visualización en Google Earth que permitirá una mayor apreciación de las zonas inundables en áreas urbanas y rurales, así como los tipos de usos de suelo y actividades en riesgo por este peligro.



Figura 35: Resultado gráfico de las zonas inundables en la cuenca baja del Río Huarmey para un periodo de retorno de 25 años (Google Earth)

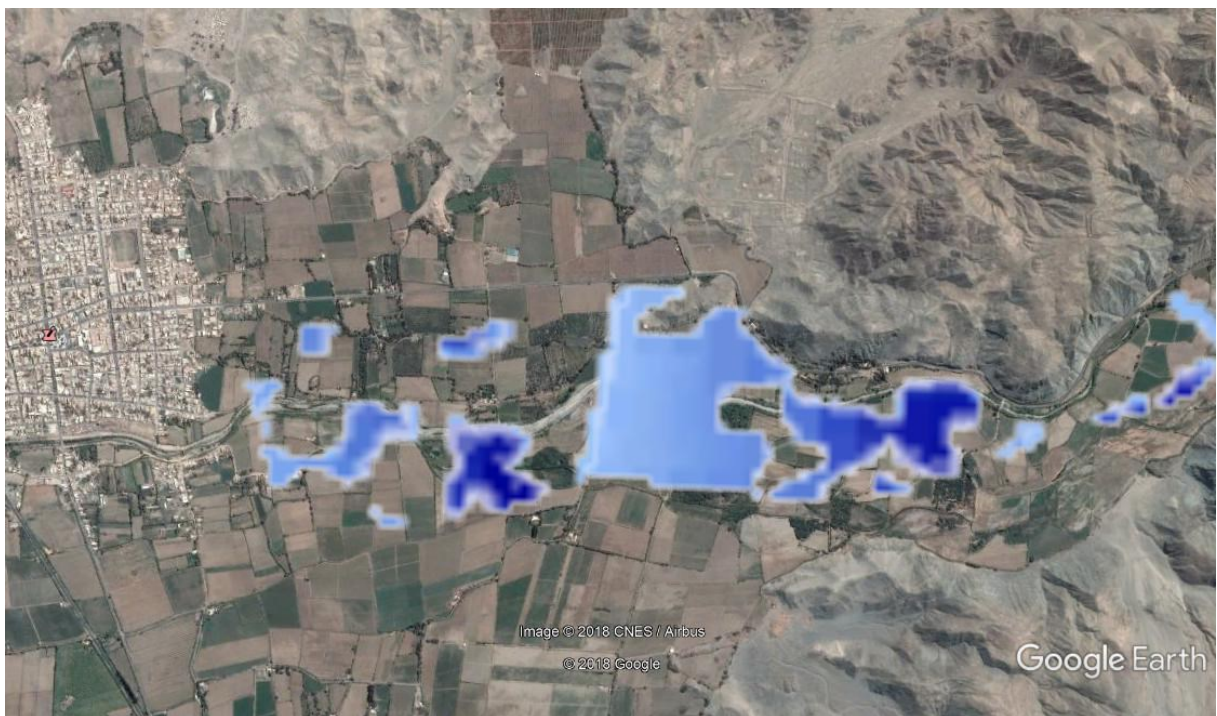


Figura 36: Resultado gráfico de las zonas inundables en la cuenca baja del Río Huarmey para un periodo de retorno de 500 años (Google Earth)



Utilizando las herramientas de geoprocésamiento propias del ArcGIS podemos obtener el área de la superficie inundable para cada periodo de retorno, exportando la tabla de atributos de cada archivo shapefile generado (por cada periodo de retorno).

	PERIODO DE RETORNO (años)			
	25	50	100	500
Área (m <sup>2</sup> )	<b>4'833,922.88</b>	<b>5'086,946.13</b>	<b>5'370,388.28</b>	<b>6'110,936.55</b>
Área (Has)	<b>483.39</b>	<b>508.69</b>	<b>537.04</b>	<b>611.09</b>

Cuadro 12: Superficie inundable en m<sup>2</sup> para cada periodo de retorno en la zona de estudio

Los mapas inundación elaborados muestran como producto final, los resultados obtenidos del modelamiento hidráulico, sobre las capas elegidas que muestran el impacto de las áreas de inundación y los elementos temáticos observando el peligro.

## CAPÍTULO 4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

### 4.1. DISCUSIÓN

Una vez expuestos los resultados obtenidos en las sucesivas fases de la metodología, se procede a su discusión para intentar valorar si han sido productivos o por el contrario se han obtenido malos resultados. Se tratará de justificar los métodos empleados y las posibles fuentes de error detectadas a lo largo de todo el trabajo.

#### Software

En la actualidad, el HEC-RAS es la mejor herramienta disponible para realizar análisis hidráulicos. Al ser un software libre permite el acceso a todas sus herramientas de manera gratuita y a través de la web. Asimismo, es un software que se complementa de forma muy efectiva con otros softwares de análisis hidrológicos como el HEC-HMS, y otros sistemas de información geográfica como el ArcGIS y QGIS, entre otros.

Al inicio del estudio se planificó utilizar el software QGIS para el pre proceso, el cual también es un software libre y posee como complemento una integración del HEC-RAS a sus funcionalidades, al igual que el ArcGIS. Se realizó algunas pruebas con ambos programas concluyendo que el ArcGIS se integra mejor con el HEC-RAS, siendo más intuitivo y amigable la interfaz de este complemento. Ambos sistemas son excelentes en el análisis hidráulico, sin embargo, debido a sus herramientas en 3D, el ArcGIS permite una mejor interacción con el HEC-RAS y una mejor visualización en el post-proceso, sin la necesidad de descargar complementos adicionales. Por lo tanto, se decidió utilizar el ArcGIS para el pre proceso y post proceso, mientras que se empleó el QGIS para realizar el trabajo de procesamiento de imágenes satelitales como se indicó en el apartado correspondiente.

## **Análisis Hidráulico**

Como se indicó en el apartado respectivo, el modelamiento hidráulico estuvo basado en el análisis unidimensional de la cuenca baja apoyándonos en un área de trabajo delimitada. Este análisis se llevó a cabo mediante el programa HEC-RAS, el cual es muy habitual en la mayoría de los estudios de inundación; sin embargo, las condiciones geográficas del valle, es decir una topografía muy plana, dificultaron en gran medida el proceso. Es en estos casos donde se requiere un análisis bidimensional hidráulico, el cual no forma parte de las herramientas con la que cuenta HEC-RAS. Un software recomendado para este tipo de análisis es el IBER 2D.

El software HEC-RAS no ha dado resultados precisos ni de muy buena calidad, observándose que las áreas indicadas en azul (las que indican las zonas inundables), aparecen dispersas y trianguladas, y no formando una lámina de agua homogénea. Asimismo, la diferencia superficial entre los periodos de retorno no ha sido significativa, aunque esto se puede deber principalmente a la fuente primaria de ingreso de los datos, es decir los datos de caudales obtenidos del SENAMHI, así como la función de probabilidad estadística aplicada.

El problema por el cual el HEC-RAS no ha dado resultados óptimos, es que no está diseñado para trabajar en zonas tan llanas como los valles de la costa, ya que al analizar las variables solo unidimensionalmente, la lámina de agua solo se representa en una dimensión, trabajando sólo con la altura  $Z$ . Asimismo, el software analiza la zona de trabajo con un ancho fijo de posible inundación (*Flow path centerlines*), y el programa no es capaz de analizar que pasa fuera de éste.

## Mapa de Inundación

A pesar de las limitaciones del software HEC-RAS, los resultados de las zonas inundables son bastante aceptables para tener en cuenta las zonas susceptibles ante crecidas del río Huarney.

El mapa de inundación se determinó para los perfiles de flujo de 25, 50, 100 y 500 años de periodo de retorno, siendo sus caudales de 165, 210, 263 y 422 m<sup>3</sup>/seg respectivamente.

Este mapa nos muestra que el desborde se da casi en su totalidad por la margen derecha en la cuenca baja con un área de 611 hectáreas aproximadamente para el escenario más crítico, abarcando áreas urbanas y zonas agrícolas de importante valor para las actividades socio-económicas de la zona.

El desborde que ocurre por la margen derecha se debe principalmente a la topografía del terreno ya que el HEC-RAS se basa en la geometría del río y los perfiles de flujo. La elevación del agua inundada es mayor que la superficie del terreno en gran parte de la cuenca baja. Esto nos muestra que para un evento de esta naturaleza la protección o encauzamiento del tramo del río en la zona de estudio debe hacerse en casi toda su magnitud, basándonos en el mapa de inundación.

Mediante las capas temáticas consideradas en el análisis, se puede observar con más detalle el impacto de la inundación sobre las características físicas de la zona y sus actividades socio-económicas, así como el peligro que puede ocasionar la crecida del río ante eventos críticos.

## 4.2. CONCLUSIONES

- La cuenca baja del río Huarney alberga sectores críticos donde se observa una peligrosidad significativa por desborde del río principal, en condiciones de máxima precipitación. Las inundaciones periódicas en esta zona son un problema latente para las condiciones de desarrollo de esta región en época de lluvias estacionales. Este problema se ve agravado en gran magnitud en eventos extremos como el fenómeno de El Niño y el más reciente Niño Costero del 2017, que causó cuantiosas pérdidas y daños estructurales inundando gran parte de la ciudad de Huarney.
- Uno de los factores más importantes que intervienen en el peligro por inundación en la cuenca baja es la precipitación pluvial en las partes más altas de la cuenca, la cual puede generar situaciones de riesgo en las zonas más bajas. En el área de estudio los acumulados de las lluvias promedio no son significativos en gran parte del año, sin embargo, lluvias intensas en la parte media de la cuenca producidas por eventos extremos, pueden causar daños irreparables en la zona de estudio, como ocurrió en el año 2017. Otros factores importantes a tomar en cuenta y que pueden desencadenar un peligro en la cuenca baja del río Huarney, es el tipo de suelo y la topografía del terreno, la cual presenta planos de inundación moderadamente anchos a bastante anchos, facilitando condiciones de vulnerabilidad en los sectores costeros.

Los factores que intervienen en la creación del modelo hidráulico por inundaciones en la cuenca baja del río Huarney, son los caudales, los periodos de retorno y el método de determinación de caudales. Este último consiste en una distribución de probabilidad GEV (valores extremos generalizados). En esta función, las distribuciones de valores extremos seleccionados de conjuntos de muestras de cualquier distribución de probabilidad, convergen en una de las tres formas de distribución de valor extremo.

Los perfiles de flujo o los caudales generados para 25, 50, 100 y 500 años de periodo de retorno fueron de 164.86, 210.15, 262.89 y 422.25 m<sup>3</sup>/seg respectivamente.

- La aplicación SIG y su interacción con HEC-RAS consiste en un pre-proceso con entrada de datos en formato TIN, delimitando las características físicas del río; un modelamiento hidráulico en el software HEC-RAS y un post proceso que permite obtener las áreas de inundación en el SIG. La aplicación de este proceso como herramienta de análisis hidráulico establecen una manera dinámica e interactiva de trabajar los parámetros hidrológicos e hidráulicos e incorporarlos en un análisis espacial, permitiendo generar mapas de inundación en un entorno debidamente georeferenciado. Asimismo, el SIG nos provee la capacidad de integrar los resultados de la inundación con otras capas de información vectorial o raster.
- El área total inundable obtenida del modelamiento hidráulico para un periodo de retorno de 25, 50, 100 y 500 años fue de 483.39, 508.69, 537.04 y 611.09 Has respectivamente. La mayor área inundada comprende terrenos de cultivo presentes a lo largo de todo el valle en la cuenca media-baja. En menor proporción existe un impacto en el área urbana con riesgos asociados a viviendas cercanas al lecho del río ubicadas en zonas inestables. Las áreas obtenidas para cada periodo de retorno no presentaron mayores diferencias debido a la escala de trabajo.

Se puede estimar que el método elegido para el presente trabajo ha sido adecuado y se ha conseguido los objetivos trazados. Los resultados sirven como una primera base en el análisis de peligrosidad, los cuales pueden ser integrados con una evaluación de vulnerabilidad para la generación de áreas de riesgo de inundación, que representen una herramienta de gestión de las entidades competentes.

## REFERENCIAS

- INGEMMET. (2017). Evaluación Geológica de las Zonas Afectadas por El Niño Costero 2017 en la Región Ancash. Lima-Perú.
- CENEPRED. (2017). Informe de Evaluación de Riesgo por Desborde del Río Huarmey e Inundación Pluvial en el Centro Poblado de Huarmey, Distrito y Provincia de Huarmey, Departamento de Ancash. Lima-Perú.
- Organización Mundial de la Salud. (2017). Lluvias e Inundaciones en Perú. Lima-Perú: PAHO.
- US Army Corps of Engineers. (2016). HEC-RAS River Analysis System. Estados Unidos: Institute for Water Resources.
- Municipalidad Provincial de Huarmey. (2011). Estudio Complementario de las Condiciones de Riesgo de Desastres en la Ciudad de Huarmey. Lima-Perú: Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento.
- Autoridad Nacional del Agua. (2010). Estudio de Máximas Avenidas en las Cuencas de la Zona Centro de la Vertiente del Pacífico. Lima-Perú: Ministerio de Agricultura.
- INGEMMET. (2007). Zonas Críticas por Peligros Geológicos y Geohidrológicos en la Región Ancash. Lima-Perú.
- Ministerio de Agricultura. (2007). Evaluación de los Recursos Hídricos en las Cuencas de los Ríos Casma, Culebras y Huarmey. Lima-Perú: INRENA.
- Instituto Nacional de Desarrollo Urbano - CEREN - PNUD. (2000). Mapa de Peligros y Plan de Usos del Suelo de la Ciudad de Huarmey. Lima-Perú.