

**UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN**

**Facultad de Ingeniería Civil, Arquitectura y Geotecnia**

**Escuela Profesional De Ingeniería Civil**

**MODELAMIENTO HIDRÁULICO PARA DETERMINAR  
EL PREDIMENSIONAMIENTO DE DIQUES DE  
ENCAUZAMIENTO EN LA QUEBRADA  
DEL DIABLO, REGIÓN TACNA**

**TESIS**

**Presentada por:**

**Bach. David Elvis Flores Cusi**

**Para optar por el Título Profesional de:**

**INGENIERO CIVIL**

**TACNA – PERU  
2023**


**UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN**


Facultad de Ingeniería Civil, Arquitectura y Geotecnia


Escuela Profesional de Ingeniería Civil

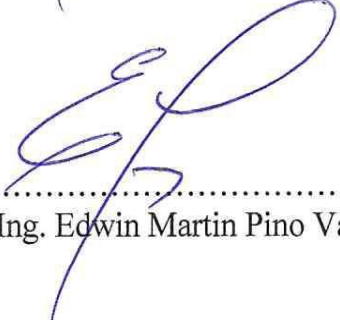
“MODELAMIENTO HIDRAULICO PARA DETERMINAR EL  
PREDIMENSIONAMIENTO DE DIQUES DE ENCAUZAMIENTO EN LA  
QUEBRADA DEL DIABLO, REGION TACNA”

Tesis sustentada y aprobada el día 23 de Diciembre de 2022 estando  
integrado el Jurado Calificador por:

**PRESIDENTE** :   
MSc. Ing. Edgar Chura Arocutipa

**SECRETARIO** :   
Ing. César José Avendaño Jihuallanga

**VOCAL** :   
Dr. Ing. Alexander Nicolas Vilcanqui Alarcón

**ASESOR DE TESIS** :   
Ph.D. Ing. Edwin Martin Pino Vargas

## CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo, **EDWIN MARTIN PINO VARGAS** en mi condición de asesor acreditado por la Resolución de Facultad N° 089-2022-FIAG/UNJBG de la Tesis Titulada: **MODELAMIENTO HIDRAULICO PARA DETERMINAR EL PREDIMENSIONAMIENTO DE DIQUES DE ENCAUZAMIENTO EN LA QUEBRADA DEL DIABLO, REGION TACNA**. Presentado por el Bachiller **DAVID ELVIS FLORES CUSI** para optar el Título de **INGENIERO CIVIL**.

Habiendo cumplido con lo establecido en el reglamento de originalidad y de similitud de trabajos de investigación y producción intelectual, considerando que según la revisión, evaluación y análisis realizado a través del software de similitud textual **TURNITIN** cuenta con el nivel de similitud permitido cuyo porcentaje es 3.0%. Por lo que **CERTIFICO LA SIMILARIDAD** de la tesis está de acuerdo al nivel **PERMITIDO**, para continuar con los trámites correspondientes y para su publicación en el repositorio Institucional.

Se emite el presente certificado con fines de continuar con los tramites respectivos para su obtención de título.



Edwin M. Pino Vargas  
Ph.D., M.Sc. Recursos Hídricos  
Ing. Agrícola, Ing. Civil  
CIP 41368



(poner huella digital)

Docente Asesor de Tesis  
EDWIN MARTIN PINO VARGAS  
DNI N° 00486621

## **DEDICATORIA**

*A Dios, por permitirme tener vida,  
salud y fortaleza para seguir adelante.*

*A mis padres y mis hermanos, por todo  
su amor y por motivarme a seguir  
hacia adelante.*

## **AGRADECIMIENTO**

*A Dios, por ser mi mayor inspiración, por darme vida y permitirme alcanzar mis metas.*

*A todos los docentes que han sido parte de mi formación profesional, por su apoyo incondicional, sus enseñanzas y sus conocimientos compartidos.*

*A mi asesor, el Ph.D. Edwin Martin Pino Vargas, por su apoyo, paciencia y colaboración para poder realizar este trabajo.*

## RESUMEN

El presente trabajo de Tesis titulado, "MODELAMIENTO HIDRAULICO PARA DETERMINAR EL PREDIMENSIONAMIENTO DE DIQUES DE ENCAUZAMIENTO EN LA QUEBRADA DEL DIABLO, REGION TACNA", permitirá dar inicio en un futuro al Proyecto que será de beneficio a fin de contrarrestar los efectos causados por los huaycos, protegiendo las zonas de vivienda que actualmente se encuentran ubicadas en la parte inferior de la quebrada, tomando en cuenta los estudios topográficos dentro de la trayectoria de la quebrada del diablo, conociendo los puntos críticos, sus pendientes. La Quebrada del Diablo presenta una superficie irregular debido a los asentamientos y caudales que trajo a su paso la acción erosiva entre sus sedimentos y el material de arrastre, asimismo las áreas expuestas fueron focalizadas a causa de las grandes avenidas que causaron destrozos e inundaciones, generando grandes pérdidas entre los pobladores de las zonas afectadas, para ello de manera preventiva se desarrolló el presente trabajo donde se realizaron los análisis hidrológicos para determinar caudales en periodos de retorno de 5, 10, 20, 25, 50, 100, 140, 200, 500 y 1000 años, con estos resultados se manejaron caudales pico de 17.97 m<sup>3</sup>/s a 121.98 m<sup>3</sup>/s con volúmenes de agua desde 87,901.08 m<sup>3</sup> a 653,215.80 m<sup>3</sup>. En el cual nos muestran dos sitios de intervención que nos sirvan para ubicar los probables diques, después de efectuar la modelación de los esquemas hidráulicos para el control de huaicos, estableciendo dos propuestas de protección planteadas a lo largo de la quebrada del diablo. Lo que permitió plantear la presa de retención de concreto-gravedad de 25 m de altura y la presa de retención de tierra y enrocado de 24 m de altura.

**Palabras clave:** máxima avenida, encauzamiento, prevención.

## ABSTRACT

The present Thesis work titled, "HYDRAULIC MODELING TO DETERMINE THE PRE-SIZE OF CHANNELING BEAMS IN THE DEVIL'S GROUND, REGION TACNA", will allow to start in the future the Project that will be beneficial in order to counteract the effects caused by mudslides, protecting the housing areas that are currently located in the lower part of the ravine, taking into account the topographic studies within the trajectory of the devil ravine, knowing the critical points, its slopes. The devil's ravine presents an irregular surface due to the settlements and flows brought by the erosive action between its sediments and drag material, likewise the exposed areas were focused due to the large avenues that caused destruction and floods, generating large losses among the inhabitants of the affected areas, for this purpose, the present work was carried out in a preventive manner, where hydrological analyzes were carried out to determine flows in return periods of 5, 10, 20, 25, 50, 100, 140, 200, 500 and 1000 years, with these results peak flows of 17.97 m<sup>3</sup>/s to 121.98 m<sup>3</sup>/s were managed with water volumes from 87,901.08 m<sup>3</sup> to 653,215.80 m<sup>3</sup>. In which they show us two intervention sites that help us to locate the probable dikes, after modeling the hydraulic schemes for the control of mudslides, establishing two protection proposals raised along the Devil's ravine. This allowed the construction of the 25 m high concrete-gravity retention dam and the 24 m high earth and rock retention dam.

**Keywords:** maximum avenue, channeling, prevention.

## INTRODUCCION

El presente Trabajo consiste en determinar el riesgo por el cambio climático y las medidas de protección frente a los fenómenos naturales por huaicos, enfocándose en el estudio de control de avenidas, medidas de mitigación, y propuestas de protección para contar con medidas estructurales y no estructurales en el control de flujos y ondas de huaicos en la Quebrada El Diablo, a fin de proteger a la población de alto riesgo. Considerando que los últimos reportes del comportamiento climático en la región del desierto, Sur de Perú y Norte de Chile, las precipitaciones pluviales han evolucionado favorablemente, y se tienen registros de acumulaciones de agua en forma de lagunas pequeñas, lo que significa un cambio en la disponibilidad hídrica de esta árida región (Pino-Vargas et al.,2019). Según los autores y la recopilación de datos de la estación meteorológica Jorge Basadre, en el año 2017 se registraron precipitaciones de 5.1 mm en 24 horas, siendo el registro más alto en los últimos 10 años. Según SENAMHI los registros de la estación FIAG-UNJBG, en el verano del 2020 se registraron valores de precipitación de 21.8 mm y 18.4 mm, provocando la activación en la ocurrencia de flujos de huaicos en las Quebradas Caramolle y El Diablo. Produciendo un huaico de proporciones que sepulto casas y arrastro los cadáveres enterrados en el cementerio general, afectando principalmente el mirador de Intiorko, la Asociación la Florida, el Mercado Grau, hasta el terminal terrestre de Tacna. Jara y Ramos (2021).

El 27 de febrero de 1927 se produjo un desastre natural producido por la ocurrencia de la "llocella", que actualmente denominamos huaico. Según describe Zora (1987), a las 10:00 A.M. de aquel día se produjo un evento hidrológico extremo en forma de lluvia torrencial sobre la ciudad de Tacna, acompañada de truenos y relámpagos. La lluvia ceso al mediodía, y aproximadamente a las 4:00 P.M. se escuchó un "ruido sordo, como de

tempestad lejana”, y de repente se observa el frente de onda de un enorme huaico de 4m a 5m de altura que bajaba hacia el pueblo por la “Quebrada Seca”, arrastrando rocas, troncos y materiales de granulometría extensa, que destruían todo a su paso. Esta avalancha u onda de huaico se bifurca en dos brazos a la altura de Piedra Blanca, el brazo de mayor volumen se desplaza hacia el cerro Arunta, y el otro brazo desciende por el Rio Seco en Caramolle, arrasando los basurales localizados en el rio. Según Jara y Ramos (2021), hace 94 años se activó la Quebrada El Diablo sepultando viviendas y arrastrando cuerpos enterrados, conforme describe Fortunato Zora en su libro “Tacna: Historia y Folclore”.

Debido a lo descrito, con los resultados de los modelos hidrológicos e hidráulicos, se obtuvieron los siguientes resultados para los caudales pico a diferentes periodos de retorno, y en la simulación hidráulica nos da resultados en dos escenarios. La primera simulación trata el escenario sin terraplén y la segunda aborda la inundación que ocurrió el 21 de febrero del 2020. Para ello se planteó dos presas o diques de retención, con una capacidad de almacenamiento que varía de acuerdo a su tipo, disponibilidad y demanda hídrica. Por otra parte, la colmatación producida por el arrastre de sedimentos de flujos influye en la reducción de vida útil. Sabiendo que no se puede establecer una solución definitiva a la colmatación, pero si dar alternativas que permitan ser minimizada.

## INDICE

<b>LISTADO DE FIGURAS .....</b>	<b>x</b>
---------------------------------	----------

<b>LISTADO DE TABLAS .....</b>	<b>xiv</b>
--------------------------------	------------

<b>CAPITULO I: PROBLEMA DE LA INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>1</b>
---	----------

1.1. PLANTEAMIENTO Y FUNDAMENTACIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	1
1.2. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN .....	3
1.2.1. Antecedentes Internacionales.....	3
1.2.2. Antecedentes Nacionales .....	5
1.2.3. Antecedentes Regionales .....	7
1.3. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN .....	8
1.4. DELIMITACIÓN DEL ESTUDIO .....	9
1.5. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA DE LA INVESTIGACIÓN.....	10
1.6. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	11
1.6.1. Objetivo general.....	11
1.6.2. Objetivos específicos .....	11
1.7. LIMITACIONES .....	11

<b>CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>12</b>
--	-----------

2.1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LA INVESTIGACIÓN .....	12
2.1.1. El desierto de Atacama .....	12
2.1.2. El cambio climático .....	13
2.1.3. Flujo de detritos .....	15
2.1.4. Uso de teledetección .....	16
2.1.5. Modelamiento hidrológico.....	17
2.1.6. Modelamiento hidráulico .....	17
2.2. MARCO CONCEPTUAL .....	18
2.2.1. Definiciones conceptuales.....	18
2.2.2. Definición de términos.....	19

<b>CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO.....</b>	<b>23</b>
--	-----------

3.1. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN .....	23
3.2. VARIABLES, DEFINICIÓN CONCEPTUAL Y OPERACIONALIZACIÓN.....	23
3.3. METODOLOGÍA EMPLEADA .....	24
3.4. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN .....	24
3.5. POBLACIÓN Y MUESTRA .....	24
3.6. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS.....	25
3.7. PROCEDIMIENTO DE LA RECOLECCIÓN DE DATOS .....	26
3.8. TÉCNICAS DE PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS .....	27

<b>CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>32</b>
4.1. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN HIDRÁULICA DEL EVENTO CRÍTICO .....	32
4.1.1. Evento sin el terraplén del paso de Camiara .....	32
4.1.2. Evento con el terraplén del paso de Camiara .....	34
4.2. ENFOQUE CONCEPTUAL DE LA PROPUESTA .....	36
4.2.1. Caso de una cuenca desértica .....	36
4.2.2. El control de huaicos en cuencas desérticas .....	38
4.2.3. Factores condicionantes .....	39
4.3. PROPUESTA DE INTERVENCIÓN .....	39
4.3.1. Determinación de caudal pico .....	39
4.3.2. Cálculo de flujos hiperconcentrados en la quebrada .....	40
4.3.3. Estimación de la producción de sedimentos y su transporte al punto de interés .....	42
4.3.4. Mecanismos de producción y deposición de sedimentos .....	57
4.3.5. Mecanismo del tránsito de las ondas de flujos de huaicos .....	58
4.3.6. Mecanismo del proceso de deposición de los flujos de huaicos .....	60
4.3.7. Propuesta estructural .....	61
4.4. PLANTEAMIENTOS DE LAS ALTERNATIVAS DEL ESQUEMA DE CONTROL DE HUAICOS .....	64
4.4.1. Esquema de control de huaicos .....	64
4.4.2. Planteamiento de los esquemas de control .....	65
4.5. PREDIMENSIONAMIENTO DE LOS DIQUES .....	68
4.5.1. Presa de retención de huaycos PRH-D1 .....	69
4.5.2. Presa de retención de huaycos PRH-D2 .....	70
<b>Conclusiones y recomendaciones .....</b>	<b>72</b>
CONCLUSIONES .....	72
RECOMENDACIONES .....	73
Referencias bibliográficas .....	74
Anexos .....	84

## LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de ubicación de la Quebrada Del Diablo, región Tacna, al sur de Perú, emplazada en la cabecera del desierto de Atacama .....	9
Figura 2. Vista de la Quebrada del Diablo. Región Tacna, provincia Tacna, distrito Alto de la Alianza (Luque-Poma, 2016). .....	10
Figura 3. (a) Ubicación del desierto de Atacama. (b) Núcleo hiperárido del desierto de Atacama. (c) Zona hiperárida del desierto. (d) Zona húmeda del desierto ....	13
Figura 4. Imágenes del huaycos en Tacna dejan tres fallecidos (Pino & Chávarri, 2022). .....	15
Figura 5. Esquema de flujo para el procesamiento de imágenes staelitales GEE-MOPTM (Gong et al., 2020). .....	27
Figura 6. Hidrograma generado para la condición con terraplén y rotura de presa .....	29
Figura 7. Salida de profundidad de flujo superpuesta con imagen satelital del área afectada para la condición sin terraplén .....	32
Figura 8. Velocidades de flujo para el escenario "Sin terraplén" .....	33
Figura 9. Profundidades máximas de flujo de la recreación del evento del 21 de febrero de 2020.....	34
Figura 10. Velocidades máximas de flujo de la recreación del evento del 21 de febrero de 2020.....	35
Figura 11. Casas destruidas por la inundación del 21 de febrero de 2020 .....	35
Figura 12. Ubicación de las cuencas colectoras de las presas Kullku y Yarascay, y la cuenca de la quebrada del Diablo .....	37
Figura 13. Discretización de la red de drenaje hidrológica de la quebrada del Diablo ..	43

Figura 14. Ubicación de los sitios de emplazamiento de las presas de retención de flujos de huaicos.....	43
Figura 15. Imagen satelital Landsat 8 – quebrada del Diablo .....	47
Figura 16. Modelo espacial para calcular el volumen promedio anual erosionado .....	50
Figura 17. Coberturas (a) Distribución espacial del coeficiente de temperatura. (b) Distribución espacial de la precipitación media anual (mm/año). (c) Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) (d) Variación espacial del coeficiente de uso de suelo “X”.....	52
Figura 18. Coberturas (a) Variación espacial del coeficiente del suelo a la erosión “Y”. (b) Variación espacial del coeficiente que evalúa los procesos observados “φ”. (c) Variación espacial de la pendiente superficial I (%). (d) Distribución espacial del coeficiente de erosión “Z”.....	53
Figura 19. Producción específica media anual de sedimentos–W (m <sup>3</sup> /año/km <sup>2</sup> ) sin cambio climático.....	54
Figura 20. Producción específica media anual de sedimentos–W (m <sup>3</sup> /año/km <sup>2</sup> ) con cambio climático .....	54
Figura 21. Subcuencas de aporte aguas arriba del punto de interés .....	55
Figura 22. Coeficientes de retención de sedimentos .....	56
Figura 23. Vista de la parte alta de la cuenca de la quebrada del Diablo, que se constituye como cuenca colectora .....	58
Figura 24. Vista de la zona media y baja de la quebrada del Diablo.....	59

Figura 25. Vista desde aguas abajo de la boca de salida que la quebrada del Diablo, donde se observa una caída rocosa que funciona como un control geológico de erosión de la quebrada. ....	60
Figura 26. Clasificación de barreras torrenciales, adaptado a lo reportado por Schwindt (2017). ....	62
Figura 27. (m y n) tipos de presas de tierra y enrocado de almacenamiento de agua que podrían ser utilizados con reajustes en el control de huaicos en cuencas con alta disponibilidad de sedimentos. (o y p) Tipos de presas de concreto-gravedad de almacenamiento de agua que podrían ser utilizados con reajustes en el control de huaicos en cuencas con alta disponibilidad de sedimentos .....	63
Figura 28. Tipos de presas de concreto-gravedad o de concreto ciclópeo, que ha sido propuesto para el control de huaicos en cuencas con alta disponibilidad de sedimentos .....	63
Figura 29. Esquema de una presa de retención de sedimentos con aliviadero y canal o túnel de derivación .....	65
Figura 30. Planteamiento de alternativas de medidas estructurales para el control integral de huaicos que afectan la ciudad de Tacna .....	67
Figura 31. Vista del eje de la presa QD-1 de control de huaicos y el vaso de almacenamiento de sólidos, donde se observan la red de drenaje que llega a la misma .....	67
Figura 32. Vista del eje de la presa QD-2 de control de huaicos y el vaso de almacenamiento de sólidos .....	68

Figura 33. Vista en planta del esquema de obras propuesto para la presa de retención de huaicos PRH-D1 en la quebrada del diablo. Se muestra el vaso de almacenamiento de huaicos y el trasvase de los flujos de huaicos se realizará por un aliviadero y canal abierto .....	69
Figura 34. Sección predimensionada de la presa de retención de huaicos PRH-D1 en la quebrada del diablo .....	70
Figura 35. Vista en planta del esquema de obras propuesto para la presa de retención de huaicos PRH-D2 en la quebrada del diablo .....	71
Figura 36. Sección predimensionada de la presa de retención de huaicos PRH-D2 en la quebrada del diablo .....	71

## LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Variables, definición conceptual y operacionalización .....	23
Tabla 2. El hidrograma del 21 de febrero de 2020 sin el terraplén del Paso Camiara. ..	28
Tabla 3. Caudal pico y volumen de agua en los puntos de interés, en el escenario sin cambio climático. ....	40
Tabla 4. Caudal pico y volumen de agua en los puntos de interés, en el escenario con cambio climático .....	40
Tabla 5. Flujo a diferentes periodos de retorno sin cambio climático.....	40
Tabla 6. Flujo a diferentes periodos de retorno con cambio climático.....	41
Tabla 7. Volumen de sedimentos quebrada del Diablo sin cambio climático.....	42
Tabla 8. Volumen de sedimentos quebrada del Diablo con cambio climático.....	42
Tabla 9. Valores del parámetro X por categoría de uso de suelo .....	48
Tabla 10. Valores del parámetro Y por categoría del suelo .....	49
Tabla 11. Valores del parámetro $\phi$ .....	49
Tabla 12. Producción de sedimento en los puntos de interés de la Quebrada del Diablo, sin cambio climático .....	56
Tabla 13. Producción de sedimento en los puntos de interés de la Quebrada del Diablo, con cambio climático .....	57
Tabla 14. Tipos de obras de control de huaicos (flujos de escombros o flujos de detritos) .....	61

## **CAPITULO I: PROBLEMA DE LA INVESTIGACIÓN**

### **1.1. Planteamiento y fundamentación del problema de investigación**

La región Tacna, se encuentra en una zona árida en el extremo sur del Perú, la costa, y toda la vertiente occidental, se ubican directamente en lo que identifican como las unidades 7, 8 y 9 en su regionalización de lluvias de la vertiente del Pacífico, zonas con precipitación acumulada anual por debajo de los 400mm (Narvaez-Montoya et al., 2022; E. Pino-Vargas et al., 2022; Pino, 2019; Pino & Chávarri, 2022; Vera et al., 2021). La zona costera de Tacna esta está ubicada en el desierto de Atacama, el más árido del mundo, que recibe menos de 2 mm / año de precipitación asimismo (Ritter et al., 2019), según varios investigadores, se concluye que esta región se encuentra en uno de los principales desiertos del mundo con un clima hiperárido, esta característica es marcada por su ubicación subtropical (Kong et al., 2013; Narvaez-Montoya et al., 2022). En los últimos años, se han evidenciado cambios significativos en la hidrología de la región, pues según Pino y Chávarri (2022), el efecto del cambio climático en esta región considerada como una de las más secas del mundo, según las evidencias encontradas y registradas, puede ser favorable o desfavorable para la disponibilidad de agua.

Los grandes eventos hidrológicos que se producen en el Perú, siendo principalmente el fenómeno del niño desencadenan problemas en las estructuras hidráulicas como en la quebrada del diablo, debido a su alta susceptibilidad a generar caídas de rocas en caso de sismos y flujos en caso de lluvias cuando se presente grandes avenidas. En esta zona hay viviendas ubicadas en el cauce de la quebrada del diablo (Luque-Poma & Gomez-Velásquez, 2016).

En el informe técnico "Zonas críticas por Peligros Geológicos en la Región de Tacna", la entidad determinó que esa región cuenta con 45 zonas críticas, en las provincias

de Candarave (14), Jorge Basadre (7), Tarata (15) y Tacna (9), en el año 2016, el INGEMMET indicó que la quebrada del Diablo es una zona vulnerable y mediante el informe técnico "Evaluación Geológica - Geodinámica en la Quebrada del Diablo" recomendó su reubicación ([Luque-Poma & Gomez-Velásquez, 2016](#)).

El control de flujo de detritos en el país aún representa un problema no controlado, en la actualidad no se dispone de infraestructura eficiente para dicha acción, las instituciones gubernamentales actúan en el momento de ocurrencia de los hechos, es decir cuando el evento ya causó los daños a la población, agricultura y otras actividades económicas en las diferentes regiones del país.

En este sentido, nos encontramos frente a un problema no resuelto, es eminente que se requiere un programa de gestión de riesgo de desastres, que incluya acciones de diferente índole, como medidas educativas de prevención, estructurales de protección, legislativas de ordenamiento de asentamientos urbanos, rurales y hasta la misma agricultura desarrollada en zonas de alto riesgo.

En la costa peruana se presentan cauces efímeros que escurren agua solo en época de lluvias, el suelo extremadamente seco y los guijarros combinados con la precipitación producen un flujo de escombros en una geodinámica estacional ([Savio et al., 2019](#); [Villacorta et al., 2020](#)). Según [Villacorta et al. \(2020\)](#), grandes flujos de escombros en barrancos de fuerte pendiente que desembocan en el río Rímac. Las pérdidas económicas y humanas recurrentes ocurren en áreas pobladas causadas por el flujo de escombros, conocido en Perú como "huayco" y del cual hay poca información ([Pareja-Dominguez et al., 2022](#)).

## **1.2. Antecedentes de la investigación**

### **1.2.1. Antecedentes Internacionales**

Zhang et al. (2022) en su trabajo de investigación cuantificaron y evaluaron con precisión los riesgos de inundación mediante el acoplamiento del modelo hidrológico HEC-HMS, los modelos hidráulicos HEC-RAS 1D y 2D, y un análisis de vulnerabilidad de amenazas de abajo hacia arriba. Sus resultados indican que los niveles de riesgo evaluados son más o menos consistentes con la distribución general de la propiedad y el potencial de riesgo de inundación en el área de estudio.

Malou et al. (2021) en su trabajo de investigación usaron una óptima de datos heterogéneos de múltiples fuentes con un modelo de red fluvial se logra a través de la asimilación de datos variacionales realizada utilizando el modelo hidráulico DassFlow-HiVDI afluente del modelo hidrológico regional MGB. Se aplica recientemente a la red grande y compleja del río Negro-Branco en la cuenca del Amazonas. Además, el método permite aprovechar al máximo, a través del modelo hidrodinámico, las observaciones de máscaras de agua variables y las segmentaciones físicas de las redes fluviales. El método se implementa en la plataforma de asimilación de datos hidrodinámicos de código abierto DassFlow.

Li et al. (2021) en su trabajo de investigación estudiaron los impactos de los extremos hidrológicos, existe una creciente necesidad de marcos integrados para el mapeo de inundaciones. Utiliza un modelo hidrológico-hidráulico altamente paralelizado y totalmente integrado y tiene como objetivo mejorar la predicción de inundaciones. Los resultados indican que CREST-iMAP logra buenos resultados tanto en la simulación hidrológica como en el mapeo de inundaciones de llanuras aluviales; además, la humedad del suelo antecedente es el parámetro más sensible a la precisión del modelo, seguido de

las características de la superficie terrestre; el proceso de infiltración a un modelo de pronóstico de inundaciones es significativo.

[da Cruz e Sousa & Miranda \(2018\)](#) en su trabajo de investigación sobre eventos hidrometeorológicos extremos como huracanes, tormentas e intensas precipitaciones ya se están sintiendo en muchas ciudades costeras debido al cambio climático que causa grandes pérdidas por inundaciones, utilizando la ciudad de Durán, Ecuador, como estudio de caso, esta investigación desarrolla un enfoque sobre cómo incorporar humedales en el modelado hidrológico e hidráulico para cuantificar la reducción de los caudales máximos y delinear diferentes escenarios de zona de inundación para la ciudad; los resultados de este estudio subrayan la importancia de realizar investigaciones adicionales para cuantificar los beneficios de los humedales y otras soluciones basadas en ecosistemas, utilizando modelos hidrológicos e hidráulicos, ya que pueden resultar estrategias eficientes y sostenibles para mitigar las inundaciones.

[Pérez et al. \(2018\)](#) en su trabajo de investigación plantearon una estrategia metodológica que solventa la escasez de datos para la modelación 2D de inundaciones en un delta, digitalizando la elevación disponible en Google EarthTM e integrada con secciones levantadas en el río y datos topográficos, se obtuvo una nube de puntos topográfica; esta fue posteriormente interpolada a una red de triángulos irregular, y finalmente, la generación de un Modelo Digital del Terreno. Se simuló bidimensionalmente (IBER v2.3.2) un evento de inundación y una medida estructural (dique) para proteger una comunidad vulnerable de esta forma, el desbordamiento se presentó solamente en el tramo final del cauce, por tanto, no influyó sobre el área urbana de la ciudad de Riohacha. El dique lograría evitar artificialmente las inundaciones en la zona protegida, pero aumentando el riesgo por inundación ante posibles fallas debido a crecidas de mayor magnitud. De acuerdo a los resultados, la metodología planteada es

útil para el cálculo de áreas inundables en zonas deltaicas y apoyo a la toma decisiones en regiones con escasos de datos ([Pérez et al., 2018](#)).

### **1.2.2. Antecedentes Nacionales**

Un modelamiento hidráulico numérico de inundaciones fluviales se desarrolla tomando como base la topografía, hidrología e hidráulica, por lo tanto, se concluye que los parámetros más comunes en un modelamiento hidráulico de inundaciones fluviales son: emplear información topográfica brindada por entidades, emplear un modelo digital de terreno (MDT), utilizar parámetros geomorfológicos ya dados por otras investigaciones o de otra fuente, calcular los caudales máximos con el apoyo de un software, utilizar HEC – RAS para el modelamiento hidráulico, realizar un modelo unidimensional, emplear el esquema de volúmenes finitos, plantear el modelo con ecuaciones de Saint Venant, emplear la malla que por defecto usa el software, estimar el coeficiente de Manning mediante tablas y no calibrar el modelo ([Alaya-García & Riquero-Miranda, 2021](#)).

Se determinaron zonas de inundación mediante modelamiento hidráulico del río Chonta, en el caserío Tartar Chico, Distrito de Baños del Inca, Provincia y Departamento de Cajamarca, considerando la estimación del riesgo de inundación en función del peligro y el análisis del grado de vulnerabilidad. Se realizó el modelamiento hidrológico, donde se transfiere información de intensidades máximas de precipitación de la estación meteorológica Augusto Weberbauer a la cuenca del río Chonta en estudio, con la finalidad de convertir estas intensidades en caudales máximos. Se eligieron tres caudales máximos para el modelamiento hidráulico con el software Iber, considerando un riesgo de predicción de un evento de 10% con períodos válidos de 5, 20 y 50 años de validez para la predicción, con lo que resultó en períodos de retorno de 50, 200 y 500 años, obteniendo finalmente 260.59, 324.92 y 365.77 m<sup>3</sup>/s ([Fidel-Smoll et al., 2010](#)).

El modelamiento hidráulico bidimensional del río Crucero, Distrito de Asillo, Provincia de Azángaro y Departamento de Puno, se determinó los parámetros hidráulicos mediante el modelamiento hidráulico bidimensional, a fin de evitar el colapso durante fuertes precipitaciones pluviales, modelar el comportamiento hidráulico de la bocatoma Jila San Jerónimo con HEC-RAS (Sacachipana-Berrios, 2019). Para el diseño de la bocatoma se adoptó un periodo de retorno de 100 años a fin que la estructura no presente riesgos de falla durante las máximas avenidas, este caudal representa los máximos instantáneos y adecuados para el diseño de la bocatoma. Al realizar el modelo HEC-RAS nos dio la elevación o cota máxima de 3928.59 m.s.n.m., el tirante máximo de agua en el punto de interés es de 2.21 m., la velocidad en el punto de interés es de 3.02 m/s (Sacachipana-Berrios, 2019).

Se desarrollo un modelamiento hidráulico desarrollado con y sin el programa PIPE del AutoCAD civil en la red de alcantarillado de la localidad de cascas distrito de chimú provincia gran chimú departamento la libertad. Llegando a la conclusión principal, la creación de diseño normal de un modelamiento hidráulico y el diseño para un sistema de alcantarillado con el AutoCAD civil del programa Pipe NETWORK nos permite un alto nivel de productividad, comparación y tiempo de acuerdo a las normas OS-070 (Ramos-Solórzano, 2021).

Velásquez-Chávez (2015) en su trabajo de modelamiento hidráulico de la cuenca de aporte de descarga al estudio, dentro de esta acción, se discretizo la cuenca en 13 sub cuenca tipo, para estas se hallaron sus parámetros geomorfológicos, luego por medio del método servicio de conservación de suelos de los estados unidos de América (SCS) se determinaron las abstracciones iniciales y la curva número (CN) de las sub cuencas antes mencionadas, finalizando esta acción el software HEC-HMS mediante del hidrograma sintético de la SCS se transformó la precipitación neta en escorrentía superficial, resultado

de esta acción se obtuvo el caudal pico de 674 m<sup>3</sup>/s que producirá la inundación del tramo en estudio.

### **1.2.3. Antecedentes Regionales**

[Irma et al. \(2021\)](#) en su trabajo de modelamiento hidráulico para determinar la delimitación de la faja marginal del río Caplina sector Río Seco, para salvaguardar la vida humana y la protección de zonas intangibles de propiedad marginal para nuestro análisis se consideró la cuenca Caplina y la cuenca Uchusuma que confluyen los ríos para continuar con su recorrido el río Caplina sector Río Seco distrito G. Albarracín L.; en el procesamiento de datos se usó los programas: Hidroesta 2, ArcGis, HEC HMS, y finalmente HEC RAS para la obtención caudales máximos, obteniendo un resultado satisfactorio para la población ya que el río seguirá su cauce con normalidad.

[Choque-Huanca et al. \(2020\)](#) en su trabajo de modelamiento hidráulico para en el departamento de Tacna específicamente los Distritos de Pachía y Calana presentan vulnerabilidad a inundación por máximas avenidas en los años del 2001 y 2019 según el registro de datos hidrométricos de la Estación Calientes, se reportaron caudales de 33 m<sup>3</sup>/s y 26 m<sup>3</sup>/s respectivamente ocasionando destrucción de las bocatomas de Challata y Calientes, inundación de áreas agrícolas, dejando en aniego la zona de los Baños termales en Calientes, colmatación de las obras de encauzamiento del río Caplina desde Calana hasta el sector Piedra Blanca.

[Frisancho-Camero \(2015\)](#) en su trabajo de grado de la cuenca del río Seco mediante el análisis de frecuencias se estimaron las precipitaciones, intensidades o caudales máximos, para diferentes períodos de retorno. El análisis y procesamiento de datos ha permitido utilizar la metodología y procedimientos, para efectuar un análisis de vulnerabilidad por inundación o desborde, mediante modelamiento hidrodinámico con avenidas generadas para diferentes periodos de retorno, en el cauce del río Seco tramo

desde el cuartel Tarapacá hasta el puente Arunta. La simulación permitió identificar las zonas urbanas asentadas a lo largo del cauce del río Seco que son altamente vulnerables a los desbordes e inundaciones, así como determinar los límites de la faja marginal en el cauce del río en mención (Frisancho-Camero, 2015).

La defensa de Calana es una estructura de encauzamiento. La simulación permitió identificar el caudal máximo que puede soportar la estructura e identificó lugares específicos en el trayecto de la defensa donde el tirante de agua supera su corona, siendo estas zonas expuestas a inundaciones, las velocidades de flujo son altamente erosivas para la estructura, no mayores de 8.03 m/s (Mayta-Rojas & Mamani-Maquera, 2018).

La modelación hidrológica, con fines de gestión de riberas en la cuenca del río Caplina, concluye en cuanto a la caracterización geomorfológica superficial de la cuenca caplina, por su forma indica, una cuenca ligada estrechamente a crecientes súbitas; se realizó análisis estadísticos de los cuales se obtuvo resultados favorables, en cuanto a la consistencia en la medida y variación de los registros, se lograron ajustes de distribuciones LOGNORMAL y LOGPEARSON TIPO III (Vilcanqui-Alarcón et al., 2022). Logró analizar y comparar los caudales promedios mensuales de las riberas de la Bocatoma Calientes de río Caplina mediante la modelación hidrológica y las observaciones en estación hidrométrica Bocatoma Calientes (Choque-Huanca et al., 2020).

### **1.3. Formulación del problema de investigación**

Interrogante Principal

¿De qué manera el modelamiento hidráulico nos permitirá predimensionar diques de encauzamiento en la Quebrada del Diablo, Región Tacna?

Interrogantes Específicas

¿De qué manera la topografía influye en el predimensionamiento de diques de encauzamiento en la Quebrada del Diablo, Región Tacna?

¿De qué manera los factores hidráulicos influyen en el predimensionamiento de diques de encauzamiento en la Quebrada del Diablo, Región Tacna?

¿De qué manera los factores hidrológicos influyen en el predimensionamiento de diques de encauzamiento en la Quebrada del Diablo, Región Tacna?

#### 1.4. Delimitación del estudio

La quebrada Del Diablo (Figuras 1 y 2), pertenece al distrito Alto de la Alianza, provincia Tacna; sus coordenadas UTM (WGS-84) son: 365995, 8009632, a una altitud de 626 m s.n.m. El acceso al área de estudio se realiza por vía aérea y terrestre. La distancia desde la ciudad de Lima hasta la ciudad de Tacna es 1293 km por la carretera Panamericana Sur. Desde el ingreso a la ciudad de Tacna hasta la Asociación de Vivienda La Florida, se accede mediante la Av. Circunvalación Norte hasta la calle Los Lirios.

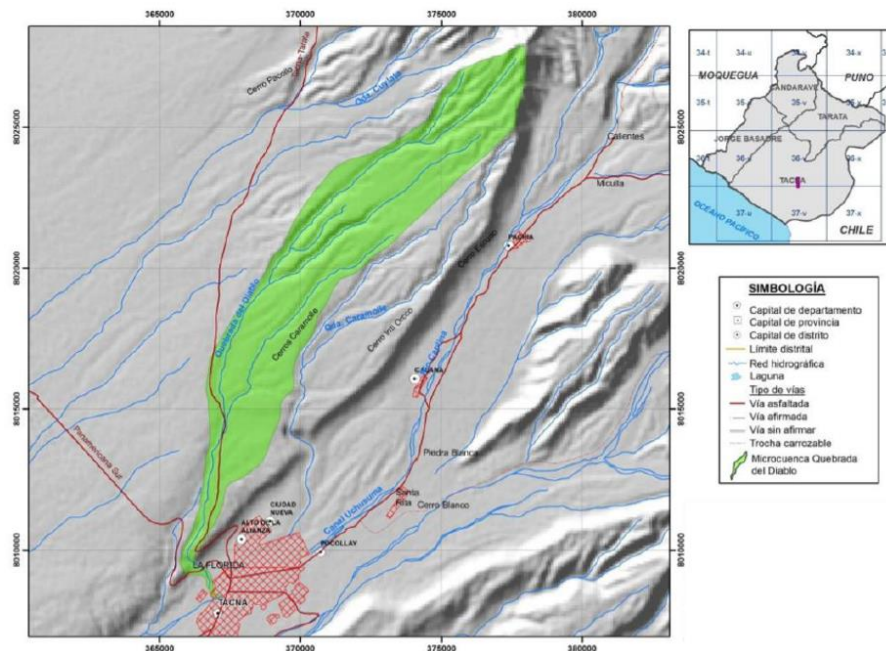


Figura 1. Mapa de ubicación de la Quebrada Del Diablo, región Tacna, al sur de Perú, emplazada en la cabecera del desierto de Atacama



Figura 2. Vista de la Quebrada del Diablo. Región Tacna, provincia Tacna, distrito Alto de la Alianza (Luque-Poma, 2016).

### 1.5. Justificación e importancia de la investigación

El territorio peruano debido a su ubicación geográfica es una de las zonas más inestables del continente, cuyas características geológicas, geomorfológicas, climatológicas y sísmicas facilitan el desarrollo de Movimientos en Masa Así mismo, el proceso de vulnerabilidad, se manifiesta por un crecimiento demográfico urbano marginal, acelerado y caótico, en la presente investigación se desarrollará el modelamiento hidráulico para determinar el predimensionamiento del dique de encauzamiento en la Quebrada del Diablo (Fidel-Smoll et al., 2010).

El distrito Alto de la Alianza presenta un acelerado crecimiento poblacional debido a la migración de otros departamentos vecinos provocando problemas de dotación de agua potable y desagüe, centros densamente poblados e invasiones asentadas en zonas aledañas a la ciudad como el caso del Sector VII del distrito Alto de la Alianza ubicado sobre el cerro Intiorko; esta zona no cuenta con servicios, obras ni asistencia y las viviendas son de material rústico e improvisado, poniendo en riesgo la vida de esas personas ya que

dicho sector presenta una alta vulnerabilidad sísmica y flujos en caso de lluvias cuando se presente grandes avenidas (Aya-Guillén, 2015).

En el borde hiperárido del desierto de Atacama, la ciudad de Tacna en Perú se encuentra entre las ciudades áridas más grandes con un desarrollo urbano constante (Espinoza-Molina et al., 2022). Investigaciones actuales muestran que la precipitación anual máxima probablemente aumentará en más del 30% para el período 2021-2050 en relación con el período 1981-2005, aumentando la probabilidad de eventos de inundación y daños en poblaciones ubicadas aguas abajo (E. Pino-Vargas et al., 2022).

## **1.6. Objetivos de la Investigación**

### **1.6.1. Objetivo general**

Realizar el Modelamiento Hidráulico para determinar el predimensionamiento de diques de encauzamiento en la Quebrada del Diablo, Región Tacna.

### **1.6.2. Objetivos específicos**

- a. Realizar el modelamiento hidrológico e hidráulico de la Quebrada del Diablo.
- b. Realizar el predimensionamiento de las estructuras de protección.

## **1.7. Limitaciones**

La metodología de trabajo tiene soporte en la información de base topográfica, esta información es una limitante económica para el tesista, pero a su vez fue resuelta al haber dispuesto de dicha data generada en el proyecto de investigación para la zona financiado por la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann. Por otro lado, la complejidad de medir el caudal de un huayco, aún sigue siendo una limitante, pues nos apoyamos en métodos indirectos para estimar estos flujos.

## **CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO**

### **2.1. Fundamentos teóricos de la investigación**

#### **2.1.1. El desierto de Atacama**

El desierto de Atacama, se encuentra emplazado en el norte de Chile y sur de Perú, en América del Sur, siendo este un continente caracterizado por diversos fenómenos atmosféricos y regímenes climáticos, desde muy áridos hasta muy húmedos (Ferreira & Reboita, 2022; E. Pino-Vargas & Ascencios-Templo, 2021; E. M. Pino-Vargas & Huayna, 2022). La ciudad de Tacna, donde se ubica la quebrada del Diablo está emplazada en uno de los principales desiertos del mundo (Pino & Chávarri, 2022; Sarricolea-Espinoza & Romero-Aravena, 2015; Sarricolea, Meseguer-Ruiz, et al., 2017); tiene un clima hiperárido y se atribuye a su ubicación subtropical (Rau et al., 2017).

Las tierras secas son el hábitat y la fuente de sustento de aproximadamente dos quintas partes de la población mundial y son muy susceptibles al cambio climático y antropogénico (Pastick et al., 2018). El cambio climático es innegable, y sus efectos, como sequías e intensas precipitaciones, evidencian esta realidad, sin embargo, quedan muchas preguntas sin respuesta, como la frecuencia e intensidad futuras de los extremos climáticos (Reboita et al., 2022).

La zona de estudio se encuentra emplazada al borde norte del núcleo hiperárido del desierto (Figura 2), en esta figura se muestra la ubicación del desierto de Atacama, el núcleo del mismo e imágenes donde apreciamos que este ecosistema ha tenido períodos muy secos y en la actualidad se vienen registrando cambios importantes en su régimen hidrológico (Turpo-Cayo et al., 2022).

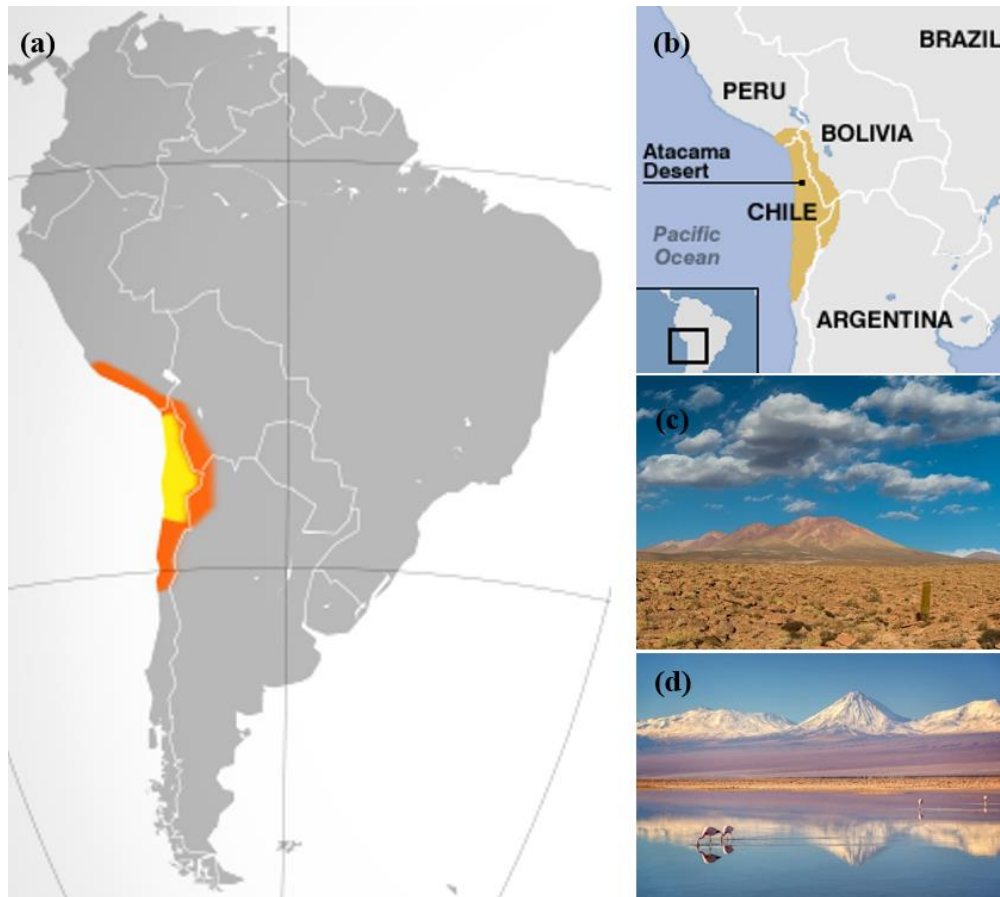


Figura 3. (a) Ubicación del desierto de Atacama. (b) Núcleo hiperárido del desierto de Atacama. (c) Zona hiperárida del desierto. (d) Zona húmeda del desierto

Según los últimos estudio realizados en esta región, haciendo uso del análisis de las interrelaciones y tendencias climáticas, se pudo demostrar las condiciones del cambio climático en relación con la ocurrencia de aluviones, algo importante es que se está definiendo que las condiciones de extrema sequía en el desierto estan cambiando (Espinoza-Molina et al., 2022; E. Pino-Vargas et al., 2022; Pino & Chávarri, 2022). Es así que en los últimos años, se han producido eventos anómalos de precipitación que han generado almacenamiento superficial y flujos superficiales aluviales en áreas donde no eran recurrentes (Garreaud et al., 2003; Houston & Hartley, 2003).

### 2.1.2. El cambio climático

En el mundo, los peligros de lluvias intensas son recurrentes y crecientes, además, son uno de los peligros naturales que causan los daños más severos a la infraestructura e

incluso causan muertes cada año (Roldán et al., 2022). La tierra se están viendo afectadas por los cambios climáticos de diferentes formas, por ejemplo, variaciones en las precipitaciones anuales, temperatura media, olas de calor, modificaciones en las malas hierbas, plagas o microbios, cambio global del CO<sub>2</sub> atmosférico o el nivel de ozono, y las fluctuaciones en el nivel del mar (Raza et al., 2019). Se espera que el cambio climático altere las características de los ecosistemas (Cantonati et al., 2022).

Es necesario evaluar el riesgo relacionado con las roturas de presas de terraplén para preparar planes de acción de emergencia por efectos del cambio climático, los parámetros físicos e hidrodinámicos de la ola de inundación generada por el evento de falla de la presa corresponden a varios parámetros de la brecha, como el ancho, la pendiente y el tiempo de formación (Gaagai et al., 2022). El deslizamiento de tierra de un área montañosa presenta alto riesgo para las viviendas ubicadas en la corona de estos lugares (Miklin et al., 2022).

A su vez, las proyecciones globales del cambio climático indican impactos negativos en los sistemas hidrológicos, con cambios significativos en las precipitaciones y la temperatura en muchas partes del mundo, como resultado, se esperan inundaciones y sequías (E. Pino-Vargas et al., 2022). La precipitación, presenta anomalías con incertidumbre tan grande que no es posible asegurar que los cambios proyectados —más todavía a fines de siglo XXI— sean totalmente atribuibles al cambio climático, por lo tanto hay que diferenciar la fracción que puede ser parte de la variabilidad natural del sistema (Sarricolea, Herrera-Ossandon, et al., 2017).

Fuimos testigos, que en la quebrada El Diablo, en febrero de 2020, ocurrió un huayco, producto de una precipitación anómala, registrada en la zona media y alta de la quebrada, con una intensidad máxima como evento precedente el día 23 de enero de 2020 de 10.4 mm/h y el evento ocurrente del huayco el 21 de febrero con 16.8 mm/h, que

provocó en la quebrada del Diablo pérdidas de tres vidas humanas (Pino & Chávarri, 2022). El evento de febrero fue el que generó un aluvión que cobró vidas humanas y provocó pérdidas económicas (Figura 3).



Figura 4. Imágenes del huaycos en Tacna dejan tres fallecidos (Pino & Chávarri, 2022).

### 2.1.3. Flujo de detritos

Las inundaciones repentinas amenazan la vida de las personas y las propiedades en diferentes regiones del mundo, especialmente en las regiones áridas y semiáridas debido a las inundaciones poco frecuentes (Ramadan et al., 2022). Los flujos de detritos se encuentran entre los peligros geológicos fatales en muchos lugares del mundo (Rosli et al., 2021). El flujo de escombros es uno de los procesos naturales más peligrosos y ocurre en una amplia variedad de entornos en todo el mundo (Turconi et al., 2022). En el sur de Perú, el factor climático ha actuado constantemente, meteorizando y erosionando los materiales, dando como resultado formas derivadas de procesos gravitacionales, fluviales (Rodríguez et al., 2017).

El fenómeno de La Niña genera intensas lluvias con las consiguientes graves inundaciones (Pérez-Montiel et al., 2022; Turconi et al., 2022). El desierto costero no

muestra tendencias significativas, lo que implica la mantención de las condiciones hiperáridas (Sarricolea et al., 2017). La entrada repentina y masiva de agua en regiones que han permanecido hiperáridas durante millones de años es perjudicial para la mayoría de las especies que la habitan (Azua-Bustos et al., 2018).

En América del Sur, se dieron procesos similares evidenciando períodos húmedos y secos muy marcados y que se encuentran debidamente documentados. Alrededor del 70% de los glaciares tropicales del mundo se encuentra en el Perú (Marengo et al., 2009). Asimismo; durante los últimos milenios, la historia del Perú se ha visto fuertemente entrelazada con fenómenos climáticos extremos y una disponibilidad hídrica fluctuante que ha generado flujo de detritos (Gutkowski & Larkin, 2021; Martin et al., 2021; Page, 2021). Actualmente, consideramos que el cambio climático de origen antropogénico requiere desafíos de alcances sin precedentes para los habitantes de la región de estudio, del Perú, y el mundo entero.

#### **2.1.4. Uso de teledetección**

La teledetección es una herramienta crítica para caracterizar los patrones ecohidrológicos y avanzar en la comprensión de las interacciones entre los forzamientos atmosféricos y las respuestas ecohidrológicas; se necesitan resoluciones espaciales y temporales de escala fina a mediana para capturar la heterogeneidad espacial y la respuesta temporalmente intermitente de estos ecosistemas a los forzamientos ambientales (Gaber et al., 2018; Kumar & Mutanga, 2018).

El mapeo de la extensión de superficies usando tecnologías de teledetección, como Landsat, proporcionan un medio asequible para capturar la extensión de las aguas superficiales (Gao et al., 2021; Ticehurst et al., 2022). Es importante analizar los patrones de distribución espaciotemporal del riesgo de inundación global y los factores influyentes detrás de ellos en múltiples escalas (Duan et al., 2022).

No hay duda que el uso de datos de sensores remotos es muy útil para el monitoreo y mapeo de inundaciones (Domeneghetti et al., 2019). Los resultados del modelado obtenidos utilizando productos de lluvia de sensores remotos corregidos y no corregidos se comparan con los valores de descarga en la salida de la cuenca (Bhattacharya et al., 2019; Duan et al., 2022).

#### **2.1.5. Modelamiento hidrológico**

La gestión sostenible del agua es una de las prioridades importantes establecidas en los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de las Naciones Unidas, que exige un uso eficiente de los recursos naturales. La gestión eficiente del agua hoy en día depende mucho de los modelos de simulación (Bhattacharya et al., 2019). Los peligros latentes de desborde e inundación requieren el uso de modelos de simulación hidrológica, como etapa inicial en el proceso de estudio de estos fenómenos (Jin et al., 2022).

La modelización hidrológica es una herramienta importante para la gestión de los recursos hídricos, ya que proporciona una solución factible para representar los principales procesos hidrológicos y predecir futuros regímenes de caudales (Ávila et al., 2022). La cuantificación de las variaciones espaciotemporales de las interacciones entre el agua superficial (SW) y el agua subterránea (GW) a escala de cuenca es vital para la gestión conjunta de los recursos hídricos en la cuenca (Zhang et al., 2022).

#### **2.1.6. Modelamiento hidráulico**

Se usará los Modelos Digitales de Terreno (MDT), se denomina MDT al conjunto de capas (generalmente raster) que representan distintas características de la superficie terrestre derivadas de una capa de elevaciones a la que se denomina Modelo Digital de Elevaciones (MDE) (Santana et al., 2022).

El modelamiento requiere la precipitación pluviométrica como primera variable de entrada al sistema, con distribución espacial y temporal sobre la cuenca (Pino-Vargas et al., 2022). El análisis de las tendencias de las precipitaciones a largo plazo proporciona una gran cantidad de información sobre la variabilidad climática a lo largo del tiempo (Alahacoon & Edirisinghe, 2021).

La precipitación que cae dentro de una cuenca es un contribuyente importante a su suministro de agua, describen los patrones dominantes de precipitación dentro de una gran cuenca fluvial utilizando enfoques geoespaciales y estadísticos, concluyendo que pueden ser utilizados en régimen hidrológico espacialmente diverso y cuencas hidrográficas muy pobladas y vulnerables al clima del mundo (Curtis et al., 2018).

## **2.2. Marco Conceptual**

### **2.2.1. Definiciones conceptuales**

En los últimos años, el cambio climático y las condiciones climáticas extremas han provocado desastres naturales de diversos tamaños y formas en todo el mundo (Hansen et al., 2022; Singh et al., 2022); esto provoca fenómenos meteorológicos extremos, como el aumento de las temperaturas y el cambio de los patrones de lluvia (Hashim et al., 2022; Lioubimtseva et al., 2005; Shmelev et al., 2021). La exploración de campo junto con las evidencias históricas y en el análisis espaciotemporal permiten una gestión adecuada de los flujos de detritos en regiones áridas (Pino-Vargas et al., 2022). El flujo de escombros se encuentran clasificado entre los peligros geológicos fatales (Calista et al., 2020; Luque-Poma, 2016; Rosli et al., 2021). El transporte de estos flujos está relacionada con mezclas mal seleccionadas de suelo, topografía de la cuenca y características de las tormentas (Gong et al., 2020).

Si una zona con alta pendiente se ubica cerca de una región densamente poblada es susceptible a peligros de flujo de escombros (Cheon et al., 2020; Rosli et al., 2021). De esta forma, una zona de transición topográfica extrema, además de características geográficas (como un enorme relieve topográfico y tectónica activa) pueden controlar la ocurrencia de flujos de escombros (Huang et al., 2022), pero la rapidez de flujos de sedimentos cargados de agua son uno de los fenómenos más peligrosos (Jiang et al., 2022).

### **2.2.2. Definición de términos**

El riesgo de flujo de escombros refleja integralmente las propiedades naturales y sociales de los desastres por flujo de escombros y se compone del riesgo del cuerpo que causa el desastre y la vulnerabilidad del portador (Zhou et al., 2022).

El análisis de riesgos, está referido a un procedimiento, que permite identificar y caracterizar los peligros, las vulnerabilidades, calcular, controlar, manejar y comunicar los riesgos, para lograr un desarrollo sostenido basado en una adecuada toma de decisiones (Díez-Herrero & Garrote, 2020; Samanta et al., 2016).

Vulnerabilidad, definida como un proceso mediante el cual se evalúa las condiciones existentes de los factores de vulnerabilidad: exposición, fragilidad y resiliencia, de la población y de sus medios de vida (Noy & Yonson, 2018).

La prevención, es el conjunto de valores, principios, conocimientos y actitudes de una sociedad que le permiten identificar, prevenir, reducir, prepararse, reaccionar y recuperarse de las emergencias o desastres (Zhang, 2000; Zhou et al., 2022).

Desastre, es un conjunto de daños y pérdidas, en la salud, fuentes de sustento, hábitat físico, infraestructura, actividad económica y medio ambiente, que ocurre a consecuencia del impacto de un peligro o amenaza cuya intensidad genera graves

alteraciones en el funcionamiento de las unidades sociales, sobrepasando la capacidad de respuesta local para atender eficazmente sus consecuencias, pudiendo ser de origen natural o inducido por la acción humana (Daher et al., 2021; S. Zhang et al., 2018).

Elementos de Riesgo, es el contexto social, material y ambiental presentado por las personas y por los recursos, servicios y ecosistemas que pueden ser afectados por un fenómeno físico (Ansari-Amoli et al., 2022).

La Estimación del Riesgo comprende las acciones y procedimientos que se realizan para generar el conocimiento de los peligros o amenazas, analizar la vulnerabilidad y establecer los niveles de riesgo que permitan la toma de decisiones en la Gestión del Riesgo de Desastres (GRD) (Mohammadpour et al., 2022).

Estrategia Financiera para la GRD, definido como un instrumento que comprende el conjunto de acciones establecidas para asegurar una adecuada capacidad financiera en los procesos de GRD y una mejor cobertura de los riesgos fiscales derivados de la ocurrencia de desastres (Muzamil et al., 2022).

Exposición, se genera por una relación no apropiada con el ambiente, a mayor exposición, mayor vulnerabilidad, aquí se analizan las unidades sociales, unidades productivas, servicios públicos, infraestructura u otros elementos, que están expuestas a los peligros identificados (Chen et al., 2022).

Evaluación de Riesgos, corresponde al análisis de riesgos, para calcular y controlar los riesgos, previa identificación de los peligros y análisis de las vulnerabilidades, recomendando medidas de prevención y/o reducción del riesgo de desastres y valoración de riesgos (Quesada-Román, 2022).

Identificación de Peligros, se define como un conjunto de actividades de localización, estudio y vigilancia de peligros y su potencial daño, que forma parte del proceso de estimación del riesgo (De Luca et al., 2022; Deser, 2020).

Medidas Estructurales, se refiere a cualquier construcción física para reducir o evitar los riesgos o la aplicación de técnicas de ingeniería para lograr la resistencia y la resiliencia de las estructuras o de los sistemas frente a los peligros (Ansari et al., 2022).

Medidas no Estructurales, referida a una medida que no suponga una construcción física y que utiliza el conocimiento, las prácticas o los acuerdos existentes para reducir el riesgo y sus impactos, especialmente a través de políticas y leyes, una mayor concientización pública, capacitación y educación (Ansari et al., 2022; Pino et al., 2020).

Peligro, se refiere a la probabilidad de que un fenómeno físico, potencialmente dañino, de origen natural o inducido por la acción humana, se presente en un lugar específico con una cierta intensidad y en un periodo de tiempo y frecuencia definidos (CENEPRED, 2018). Prevención, es el proceso de Prevención del Riesgo comprende las acciones que se orientan a evitar la generación de nuevos riesgos en la sociedad en el contexto de la gestión del desarrollo sostenible (CENEPRED, 2018).

Reducción, se refiere al proceso de Reducción del Riesgo y comprende las acciones que se realizan para reducir las vulnerabilidades y riesgos existentes en el contexto de la gestión del desarrollo sostenible; resiliencia, es la capacidad de las personas, familias y comunidades, entidades públicas y privadas, las actividades económicas y las estructuras físicas, para asimilar, adsorber, adaptarse, cambiar, resistir y recuperarse, del impacto de un peligro o amenaza, así como de incrementar su capacidad de aprendizaje y recuperación de los desastres pasados para protegerse mejor en el futuro (CENEPRED, 2018). Riesgo de Desastre, es la probabilidad de que la población y sus medios de vida sufran daños y pérdidas a consecuencia de su condición de vulnerabilidad y el impacto

de un peligro; y vulnerabilidad, es la susceptibilidad de la población, la estructura física o las actividades socioeconómicas, de sufrir daños por acción de un peligro o amenaza (CENEPRED, 2018; Lee & Kwon, 2022).

## CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO

### 3.1. Hipótesis de la investigación

¿El modelamiento hidráulico nos permitirá predimensionar diques de encauzamiento o estructuras de protección en la Quebrada del Diablo, Región Tacna??

### 3.2. Variables, definición conceptual y operacionalización

En la Tabla 1, se muestra la definición de variables, definición conceptual, dimensiones e indicadores utilizados en el presente trabajo de investigación.

Tabla 1. Variables, definición conceptual y operacionalización

Variable	Definición Conceptual	Dimensiones	Indicadores
Gestión de desastres naturales	La percepción climática explica procesos de causa, impacto y respuesta frente a fenómenos naturales (Tobler et al., 2012; Tsangari et al., 2016).	Conocimiento de causa  Conocimiento de impacto  Conocimiento de respuesta o mitigación	Factores del cambio climático: actividades poblacionales, económicas, agrícolas, precipitación, volúmenes de agua almacenada en superficies, temperatura en superficie, derretimiento de glaciares, la sobrepoblación de agua, desarrollo urbano inadecuado.  Consecuencias del cambio climático en: eventos climáticos extremos en regiones áridas.  Comportamientos que pueden reducir el efecto del cambio climático: Adecuada planificación urbana, establecimiento de la franja marginal del cauce.

### **3.3. Metodología empleada**

En primer lugar, se realizó trabajo exploratorio de campo y análisis de información en gabinete, en la búsqueda de evidencias materiales en campo y documentadas que evidencien flujo de detritos en gabinete para la zona de trabajo.

Paso siguiente, se exploraron imágenes multiespectrales de los sensores satelitales ETM (Enhanced Thematic Mapper Plus), con resolución espacial de 30 m. (Aboutaleb et al., 2019; Alvino et al., 2020); se utilizó la plataforma Google Earth Engine (GEE), para identificar cambios (Gaber et al., 2018), realizar mapeos y establecer diferencias en la superficie terrestre (Nieto et al., 2019; Wang et al., 2022).

### **3.4. Diseño de la investigación**

Se propone una adecuada gestión de desastres basada en evidencias de flujo de detritos en una región árida, determinando por simulación las variables de valoración como son la precipitación, niveles de agua en el cauce, niveles de inundación entre otros, para establecer una propuesta de predimensionamiento de estructuras de protección, es así que el diseño seleccionado es transaccional, estos son descriptivos con el objetivo indagar la incidencia y los valores en que se manifiestan estas variables, Así que logramos caracterizar el objeto de estudio y señalamos sus características y propiedades según la temporalidad.

### **3.5. Población y muestra**

La población es el Distrito Alto de la Alianza, provincia Tacna, analizada sobre la base de información física y geográfica.

La muestra corresponde a la quebrada Del Diablo, esta pertenece al distrito Alto de la Alianza, provincia Tacna; sus coordenadas UTM (WGS-84) son: 365995, 8009632, a una altitud de 626 m s.n.m.

El acceso al área de estudio se realiza por vía aérea y terrestre. La distancia desde la ciudad de Lima hasta la ciudad de Tacna es 1293 km por la carretera Panamericana Sur. Desde el ingreso a la ciudad de Tacna hasta la Asociación de Vivienda La Florida, se accede mediante la Av. Circunvalación Norte hasta la calle Los Lirios.

### **3.6. Técnicas e instrumentos de recolección de datos**

Las utilidades de adquirir información para diferentes ramas de la ciencia son muy importantes en un trabajo de investigación, en la hidrología las herramientas de los sistemas de información geográfica facilitan la adquisición de las imágenes LANDSAT 8 en el año 2020, usando el software Google Earth Engine ([Kumar & Mutanga, 2018](#)).

Para validación de la información se realizaron visitas de campo al lugar para verificar las zonas de precipitaciones y derrumbes, así como obtener evidencias de depósitos acumulados en el cauce de la quebrada producto de antiguos flujos. El cauce actual de la quebrada se encuentra obstruido en algunos tramos, por la ocupación del antiguo botadero municipal, canteras de ignimbritas abandonadas, o cruce de trochas y carreteras. Las laderas de la quebrada son inestables porque contiene material suelto. Todo ello compromete la seguridad física de la Asociación de Vivienda La Florida que se encuentra ubicada en pleno cauce.

Se delimitó la cuenca hidrográfica para simular el flujo de lodos ante una avenida máxima en la quebrada Del Diablo, por medio de imágenes digitales en alta resolución y su modelo digital de elevaciones (DEM), mediante el programa QGis. La observación directa en campo y su correlación con las evidencias de las imágenes satelitales no permitirán mapear los cambios en la superficie terrestre. Los métodos de detección de cambios, incluida la resta y clasificación de imágenes, permiten realizar un análisis de detección de cambios. Desde el año 2008, Google pone a disponibilidad gratuita la serie Landsat en la nube para uso de código abierto ([Mutanga & Kumar, 2019](#)).

### 3.7. Procedimiento de la recolección de datos

El procedimiento de recolección de datos corresponde a una secuencia típica, se trabaja las imágenes satelitales en GEE, se realizará un preprocesamiento para identificar las imágenes posibles de utilizar luego del enmascaramiento, limpieza de ruidos entre otros.

En el trabajo de campo logró la identificación de tipos de suelo, su deposición, sedimentación, pendientes, cobertura vegetal, susceptibilidad a la erosión y probables procesos de transporte de materiales sólidos entre otros aspectos vinculantes a la acción erosiva del agua de escorrentía superficial. Un aspecto importante es tener presente la acción de la humedad precedente como un mecanismo de activación de un flujo de lodos.

Se recopilaron y analizaron datos de precipitación diaria de cinco estaciones meteorológicas para el período 1966-2020 (Pino-Vargas et al., 2022). Los datos faltantes se completaron utilizando el software Climatology, que se basa en el enfoque propuesto por Paulhus & Kohler (1952). La estación Jorge Basadre es propia y está operada por el Grupo H2O de la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann (UNJBG) ubicada en Tacna y ha estado recopilando datos de precipitación desde 1993. Los datos de precipitación de la estación Jorge Basadre se ajustan mejor a una distribución Gumbel.

Los datos climatológicos del Perú son recopilados por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI). La precipitación se comparó con los datos obtenidos de la base de datos de Observaciones Climatológicas e Hidrológicas (PISCO) del Perú interpolados de SENAMHI (Aybar-Camacho et al., 2017). Los datos de la base de datos PISCO se ajustaron utilizando la técnica de mapeo de cuantiles y se validaron para la quebrada del Diablo utilizando pluviómetros locales. La precipitación diaria en la estación Jorge Basadre se comparó con la generada por PISCO y el índice de

eficiencia de Nash-Sutcliffe fue de 0.85, lo que muestra una buena correlación de la precipitación estimada por PISCO con los datos reales de la estación.

La precipitación de Jorge Basadre resultó ser 1,31 veces la precipitación estimada por PISCO. La precipitación de PISCO para la cuenca alta y media fue 1.06 veces la precipitación obtenida en la estación Jorge Basadre. Por lo tanto, la precipitación de PISCO fue 1.38 veces la precipitación registrada en la estación automática ubicada cerca de la estación Jorge Basadre. Se identificaron tres eventos principales en el período del 7 de diciembre de 2019 al 7 de mayo de 2021. Uno de ellos fue el evento del 21 de febrero de 2020.

### 3.8. Técnicas de procesamiento y análisis de los resultados

Se utilizó el método de Predicción de Observación Faltante basado en Métricas Espectrales-Temporales (MOPSTM, [Figura 5](#)), lo que ha tenido un buen desempeño al llenar espacios vacíos de área grande de imágenes Landsat de una sola fecha ([Gong et al., 2020](#); [Oncebay & Cunurana, 2021](#)).

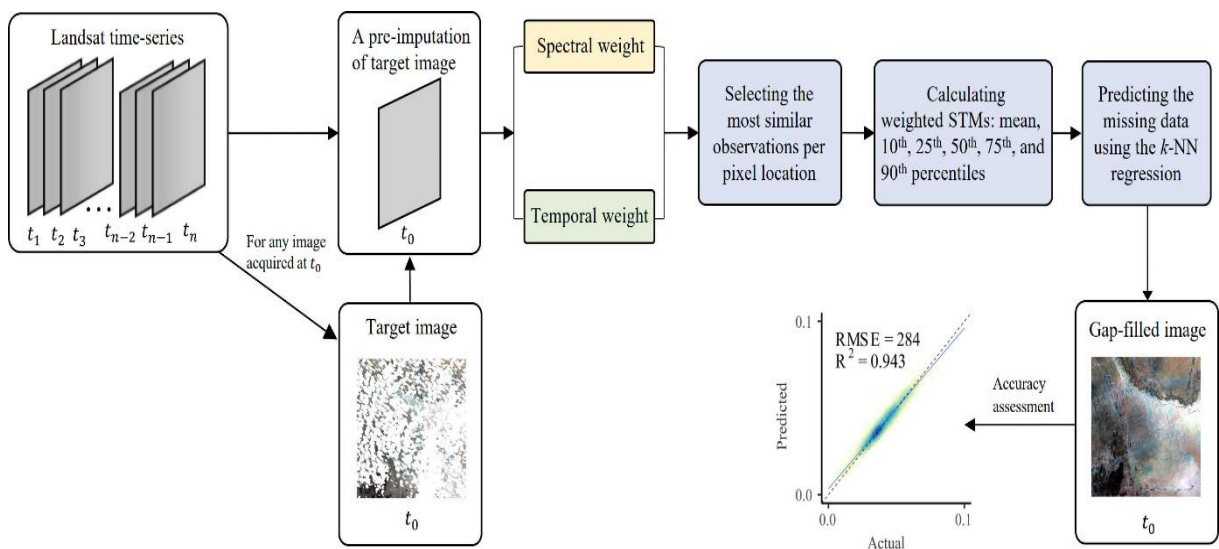


Figura 5. Esquema de flujo para el procesamiento de imágenes satelitales GEE-MOPTM ([Gong et al., 2020](#)).

Asimismo, se elaboraron modelos hidrológicos e hidráulicos. Las simulaciones hidrológicas se realizaron utilizando el software MINERVE RS., se utilizó el modelo Soil Contribution (SOCONT) considerando que la precipitación equivalente es igual a la precipitación ya que la cuenca no tiene glaciares que contribuyan a la escorrentía superficial. La cuenca de la quebrada del Diablo, se dividió en cinco subcuencas y la precipitación se asignó utilizando las estaciones virtuales mencionadas en la subsección anterior. El suelo se caracterizó utilizando muestras recolectadas en la cuenca. Se encontraron limo arcilloso, limo arenoso con grava y arcilla y limo arenoso con grava.

El enfoque de Froelich se utilizó para calcular la brecha generada por el desbordamiento del terraplén del Paso Camiara de 13 metros de altura. La curva volumen-altura se determinó con base en levantamientos topográficos y el volumen se estimó en 23 911,5 m<sup>3</sup> cuando se estaba rebasando el terraplén. Por lo tanto, el ancho de brecha calculado fue de 9,8 m.

Respecto a la modelación hidráulica, se incorporaron dos hidrogramas obtenidos del modelo MINERVE RS al modelo numérico HEC-RAS V 6.0 2D para simular escurrimientos en la quebrada aguas abajo del Paso Camiara y en los sectores urbanos afectados por la inundación del 21 de febrero de 2020. El uso y las capacidades de HEC-RAS 2D. El primer hidrograma corresponde a la condición sin el terraplén del Paso Camiara y el segundo es el resultado de la simulación de rotura de presa generada por el desbordamiento del terraplén del Paso Camiara. Este hidrograma también corresponde al hidrograma aguas arriba de la simulación de rotura de presa, que se describe a continuación (Tabla 2).

Tabla 2. El hidrograma del 21 de febrero de 2020 sin el terraplén del Paso Camiara.

Fecha	Hora	Q (m <sup>3</sup> /s)
21/02/2020	16:00	0.000

21/02/2020	17:00	0.093
21/02/2020	18:00	0.659
21/02/2020	19:00	1.623
21/02/2020	20:00	6.870
21/02/2020	21:00	10.629
21/02/2020	22:00	10.719
21/02/2020	23:00	9.079
22/02/2020	00:00	7.573
22/02/2020	01:00	6.399
22/02/2020	02:00	5.490
22/02/2020	03:00	4.779
22/02/2020	04:00	4.215
22/02/2020	05:00	3.763
22/02/2020	06:00	3.398

Teniendo en cuenta que el hidrograma que se muestra en la Tabla 2 es la condición aguas arriba de la zona de rotura de presa, el agua embalsada detrás del terraplén induce a su ruptura cuando la altura alcanza los 15,7 m, generando así una descarga máxima de 2500,8 m<sup>3</sup>/s (Figura 6).

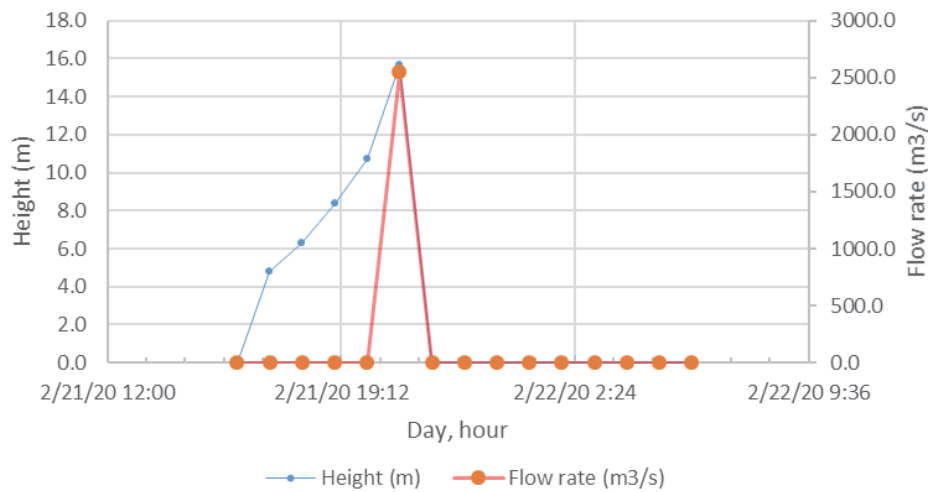


Figura 6. Hidrograma generado para la condición con terraplén y rotura de presa

La fotografía aérea se obtuvo utilizando un dron de ala fija con precisión absoluta X, Y, Z de 15 mm. GSD fue de 50 mm/píxel. El tamaño de los elementos del Modelo Digital del Terreno (DEM) es de 0,2 m x 0,2 m. Con base en la visita de campo y las imágenes satelitales disponibles, se ha verificado que representan adecuadamente las características del terreno. El modelo permite identificar las calles y casas del Asentamiento Humano El Mirador, así como la Asociación de Vivienda La Florida y un relleno que fue erosionado por la acción de la inundación de febrero de 2020. Imágenes satelitales de 2018, antes de que ocurriera el evento, muestran que el relleno se encuentre en buen estado, es decir, que la topografía actual refleje la acción erosiva de los flujos que atravesaron la zona.

Para ejecutar el modelado con salidas adecuadas, se realizaron ajustes sucesivos para tener salidas que representen lo que puede suceder en una serie de escenarios. Como parte del ajuste, se probaron tamaños de malla más grandes (menor resolución) y se redujo el tamaño de malla hasta obtener resultados adecuados. En las simulaciones finales se ha utilizado una malla de 1 m x 1 m para modelar el terreno de tal forma que permita representar tanto las características naturales del terreno del arroyo y del desagüe, como las características de las comunidades de vecinos y urbanistas. Áreas afectadas por los caudales provenientes de la Quebrada del Diablo. Las zonas afectadas son, principalmente, la Asociación de Vivienda de Florida, La Rotonda, Mercado Grau y el Terminal de Buses. Los vertidos de la quebrada discurrían por la Vía Circunvalación (Panamericana Sur), rodeando la Glorieta en dirección sur. El intervalo de tiempo ajustado fue de 0,1 segundos.

El modelo hidráulico requiere coeficientes de rugosidad de Manning (n), para la Quebrada del Diablo se realizaron con base en observaciones de campo y recomendaciones del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS). El coeficiente

de Manning se estimó en 0,035 en el cauce del río. El canal principal es irregular, aunque el ancho no varía significativamente. El fondo presenta depósitos de arena y grava a lo largo de su recorrido, así como material depositado por el derrumbe de taludes. Además de las tablas, se ha utilizado el antiguo método SCS para corroborar el valor de la estimación del coeficiente de Manning.

## CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. Resultados de la simulación hidráulica del evento crítico

En principio buscamos comparar los posibles efectos de una gran crecida producida por una precipitación relativamente intensa en un arroyo seco la mayor parte del tiempo con el evento real que se generó por el represamiento del mismo cauce producido por un terraplén que formaba parte de una carretera local no autorizada. La primera simulación trata el escenario sin terraplén y la segunda aborda la inundación que ocurrió el 21 de febrero de 2020.

#### 4.1.1. Evento sin el terraplén del paso de Camiara

Los resultados de la modelación hidráulica indican que el evento simulado en la condición “sin taponamiento” del cauce (es decir, sin paso Camiara) no genera mayor inundación de las calles, como se observa en la [Figura 7](#). La profundidad máxima dentro de la quebrada (alcance del cañón, aguas arriba del área urbana) es de aproximadamente 0,20 – 0,50 m, excepto en algunos puntos donde puede llegar a 1 m.



Figura 7. Salida de profundidad de flujo superpuesta con imagen satelital del área afectada para la condición sin terraplén

La profundidad de inundación en las calles inundadas alcanza aproximadamente 0.2 m en la mayoría de los casos, debido a que, si bien hay una aceleración del flujo inmediatamente aguas arriba de la entrada al casco urbano, el flujo se dispersa por las calles cuya calzada es de aproximadamente 6 m y cuyas las aceras tienen entre 1 y 1,20 m de ancho. Hay un área en la margen derecha del arroyo cerca de la salida donde se encuentra el relleno sanitario donde hay una excavación donde se estaban depositando los desechos de la ciudad de Tacna. En esta zona hubo una inundación de aproximadamente 0,50 m. Inmediatamente aguas abajo de la rotonda existe una zona deprimida en la que la acumulación de agua alcanzaría los 1,8 m en el tramo más profundo. La [Figura 8](#) muestra las velocidades de flujo y rara vez superan los 2,5 m/s. Se puede inferir del hidrograma presentado en la [Tabla 1](#) que los habitantes de la zona afectada pudieron haber sido advertidos de inundación al inicio del evento ya que se tardó cinco horas en alcanzar el caudal máximo, 10,9 m<sup>3</sup>/s.

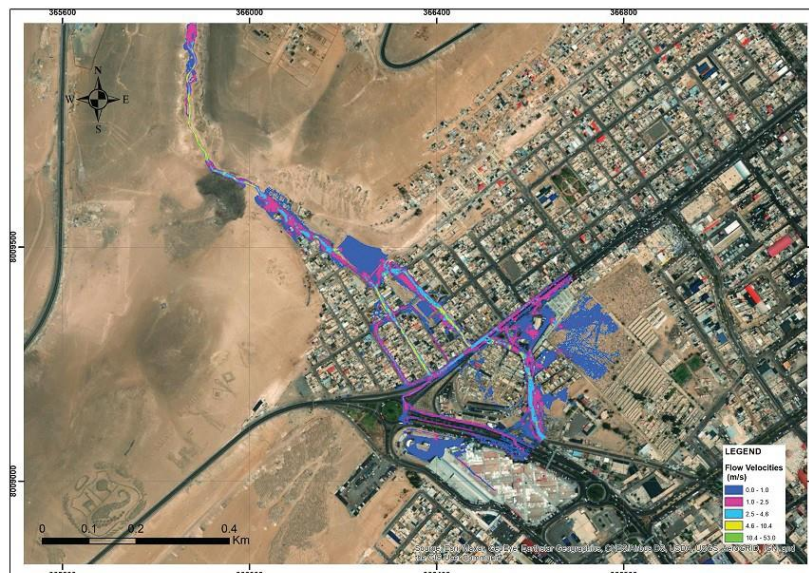


Figura 8. Velocidades de flujo para el escenario "Sin terraplén"

#### 4.1.2. Evento con el terraplén del paso de Camiara

Cuando el hidrograma aguas arriba de la ruptura de la presa se dirige a través de la quebrada del Diablo y hacia la ciudad de Tacna, una gran área se inunda a velocidades muy altas. La [Figura 9](#) muestra con detalle las profundidades de flujo y la [Figura 10](#) muestra las velocidades de flujo. Cerca de la desembocadura de la quebrada, donde un asentamiento humano interrumpe su curso, se alcanzan profundidades de flujo entre 2,8 y 4,9 m en la simulación hidráulica. Esta profundidad es suficiente para cubrir uno o dos pisos de una edificación para vivienda. Además, las velocidades de flujo simuladas cerca de la desembocadura del arroyo son de 5 a 15 m/s e incluso pueden alcanzar los 35 m/s en una de las calles (mostrado en color rojo línea punteada). Estas velocidades que serán examinadas más adelante, pueden causar la destrucción de viviendas como sucedió en las edificaciones que se encontraban más cercanas a la desembocadura de la quebrada del Diablo.



Figura 9. Profundidades máximas de flujo de la recreación del evento del 21 de febrero de 2020

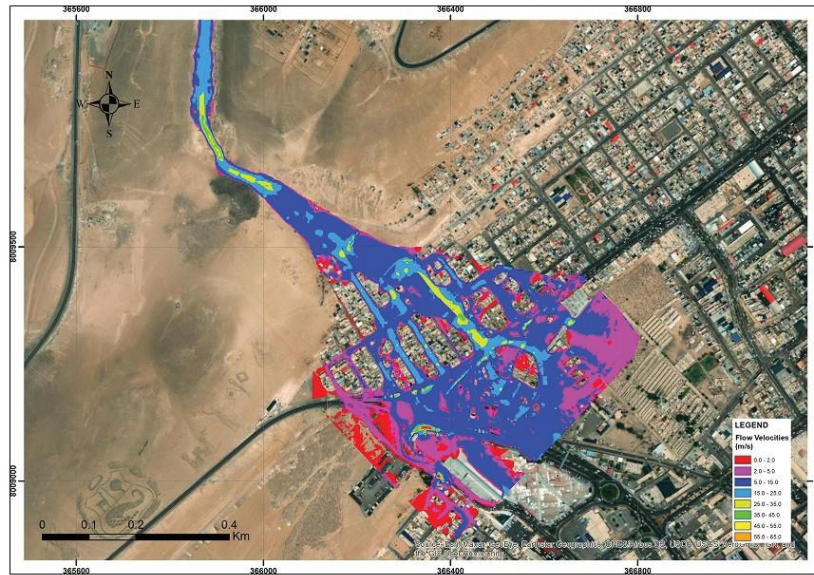


Figura 10. Velocidades máximas de flujo de la recreación del evento del 21 de febrero de 2020

La [Figura 11](#) muestra la destrucción de una casa de ladrillo y concreto donde quedaron en pie algunas columnas de concreto. Es posible que un evento como el descrito en este trabajo no haya causado tal destrucción ya que las profundidades y velocidades no fueron lo suficientemente altas.



Figura 11. Casas destruidas por la inundación del 21 de febrero de 2020

La simulación computarizada realizada con HEC-RAS 2D muestra que el terraplén de la carretera amplificó en gran medida los efectos de la escorrentía en la quebrada del Diablo. Sin el terraplén, se podría haber producido una profundidad de flujo máxima del orden de 0,5 m y velocidades cercanas a los 2 m/s a lo largo de las calles cercanas a la desembocadura de la quebrada. Por un lado, se hizo evidente que no se debe construir ningún terraplén que bloquee el caudal en el arroyo del Diablo y, por otro lado, se debe reubicar el asentamiento humano ubicado cerca de la desembocadura de esta quebrada.

## **4.2. Enfoque conceptual de la propuesta**

### **4.2.1. Caso de una cuenca desértica**

La quebrada del Diablo, se encuentra localizada al borde norte del núcleo hiperárido del desierto de Atacama, el cual es considerado como la zona más árida de la tierra ([Sarricolea et al., 2017](#)), y que la costa desértica peruana es considerada como parte de ésta. Por consiguiente, la interacción de los procesos hidrológico y geomorfológico en la cuenca estudiada, así como los mecanismos de iniciación y tránsito de flujos hiperconcentrados que se producen en la misma, son muy diferentes a los indicados procesos y mecanismos que ocurren en las cuencas húmedas, subhúmeda seca y semiáridas.

Los factores que contribuyen para que la cuenca estudiada no tenga la cantidad suficiente de humedad son los factores atmosféricos, corrientes oceánicas frías y los factores topográficos.

Par esta región, se cuenta con información de la extensión de las cuencas de las presas Kullku y Yarascay y se encuentran por encima de la altitud 3,900 m. s.n.m, que es la cota inferior del área de la cuenca húmeda de las indicadas cuencas, mientras que la cuenca estudiada se encuentra por debajo de la indicada cota inferior (3,900 m. s.n.m.),

es decir, su cuenca no posee área húmeda. Este hecho evidencia que en condiciones hidrológicas normales y húmedas, la interacción de los procesos hidrológico y geomorfológico en las cuencas de las presas Kullku y Yarascay serán totalmente diferentes que en la cuenca de la quebrada del Diablo (Figura 12). Al carecer de área de cuenca húmeda, la cuenca estudiada es seca sin una red de drenaje desarrollada con predominio de cauces secos con ausencia de transporte sedimentos.

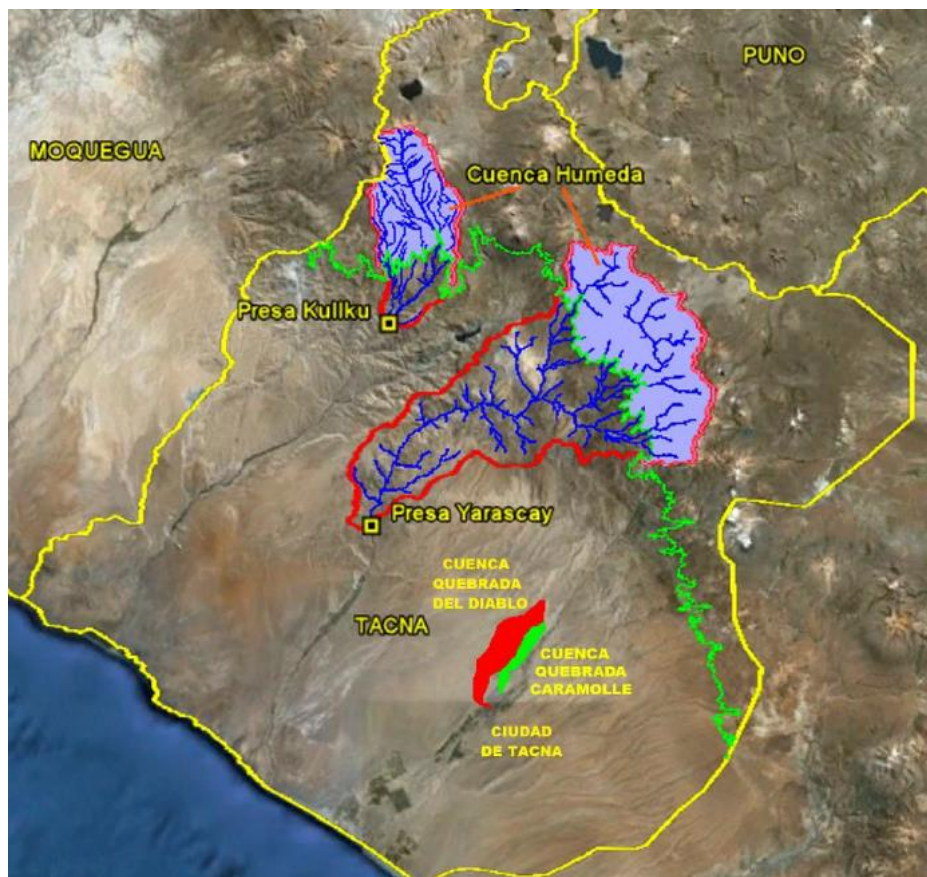


Figura 12. Ubicación de las cuencas colectoras de las presas Kullku y Yarascay, y la cuenca de la quebrada del Diablo

Podemos afirmar, que en esta cuenca árida las descargas de agua en la red de drenaje son más variables, y el proceso de formación de sus cauces para conseguir su equilibrio morfológico es más difícil que en la red de drenaje de cuencas localizadas en las regiones húmedas, donde incluso tienen un caudal base.

#### **4.2.2. El control de huaicos en cuencas desérticas**

El peligro de eventos de esta naturaleza que afecta ocasionalmente a la ciudad de Tacna, habiéndose identificado una recurrencia de 93 años y que con el cambio climático global se vuelve más recurrente, debe ser abordada de forma integral, dado que la fuente del peligro no sólo proviene de la cuenca de la quebrada del Diablo, sino también de las quebradas vecinas.

Según la comunidad científica, los esquemas de control de huaicos guardan cierta similitud con los esquemas de aprovechamientos de recursos hídricos, pero son sustancialmente diferentes en algunos de sus propósitos o fines, y tienen cierta similitud con el control de avenidas. En el caso de los aprovechamientos de agua, la oferta hídrica de la cuenca del periodo de avenidas se almacena en embalses para su utilización en el periodo de estiaje, o se realiza la regulación de los ríos en las cuencas mediante represamientos en el cauce del río o la conformación de embalse fuera del cauce del río.

Para controlar las avenidas normales y/o extraordinarias se utilizan presas laminadoras, que tienen el propósito reducir o laminar el hidrograma de avenidas, con el fin de reducir los desbordes e inundaciones en los tramos del río, aguas abajo de la presa laminadora; el volumen útil del embalse de la presa laminadora sirve para almacenar parte o la totalidad del volumen de agua del hidrograma de avenidas.

En los esquemas de control de huaicos, las presas o diques de retención de sólidos tienen el propósito de almacenar el volumen parcial o total de los flujos de huaicos que se produzcan en el cauce del ríos o quebradas. Los volúmenes excedentes de huaicos son descargados por los aliviaderos hacia el cauce de aguas abajo, para que sean posteriormente almacenados en una presa de retención de sólidos, localizados en aguas abajo del río o quebrada.

En nuestro caso, el objetivo es la reducción total (en lo posible) de las vulnerabilidades de las zonas urbanas afectadas por los huaicos, y la reducción drástica del riesgo de la ciudad de Tacna ante los eventos de huaicos. Para cumplir con estos objetivos, se deben plantear los distintos esquemas de control de huaicos en la quebrada del Diablo.

#### **4.2.3. Factores condicionantes**

los factores condicionantes para la ocurrencia de los procesos de iniciación, desarrollo y deposición de los flujos de huaicos en la quebrada evaluada dependen principalmente de la ocurrencia de eventos hidrológicos extremos en la cabecera de la quebrada. Sin la ocurrencia de precipitaciones extremas, no se producen eventos de huaicos. Asimismo, son factores de importancia las características geológicas y geomorfológicas, que determinan los materiales del substrato rocoso y los depósitos inconsolidados que se encuentran en los cauces de la red de drenaje y laderas de la cuenca, que constituyen de la disponibilidad del material del suelo que se incorporará a los eventos de huaicos.

### **4.3. Propuesta de intervención**

#### **4.3.1. Determinación de caudal pico**

Luego de la simulación hidrológica, se obtienen los siguientes resultados para los caudales pico a diferentes períodos de retorno, en la [Tabla 3](#), escenario sin cambio climático y [Tabla 4](#), escenario con cambio climático, que servirán de base para el predimensionamiento de los elementos de protección.

Tabla 3. Caudal pico y volumen de agua en los puntos de interés, en el escenario sin cambio climático.

	Caudal Pico		Volumen de agua
Diablo 1	TR=50	0.82 m <sup>3</sup> /s	8,505.90 m <sup>3</sup>
	TR=100	2.82 m <sup>3</sup> /s	20,069.94 m <sup>3</sup>
	TR=500	13.63 m <sup>3</sup> /s	68,425.32 m <sup>3</sup>
	TR=1000	20.47 m <sup>3</sup> /s	99,010.20 m <sup>3</sup>
Diablo 2	TR=50	1.24 m <sup>3</sup> /s	13,738.02 m <sup>3</sup>
	TR=100	3.68 m <sup>3</sup> /s	32,499.12 m <sup>3</sup>
	TR=500	18.33 m <sup>3</sup> /s	108,382.62 m <sup>3</sup>
	TR=1000	27.63 m <sup>3</sup> /s	155,086.86 m <sup>3</sup>

Tabla 4. Caudal pico y volumen de agua en los puntos de interés, en el escenario con cambio climático

	Caudal Pico		Volumen de agua
Diablo 1	Escenario RCP8.5 para periodo 2021-2050: 25.96 mm	17.97 m <sup>3</sup> /s	87,901.08 m <sup>3</sup>
	Escenario RCP8.5 para periodo 2051-2080: 49.74 mm	81.58 m <sup>3</sup> /s	389,833.38 m <sup>3</sup>
Diablo 2	Escenario RCP8.5 para periodo 2021-2050: 25.96 mm	25.55 m <sup>3</sup> /s	147,289.98 m <sup>3</sup>
	Escenario RCP8.5 para periodo 2051-2080: 49.74 mm	121.98 m <sup>3</sup> /s	653,215.80 m <sup>3</sup>

#### 4.3.2. Cálculo de flujos hiperconcentrados en la quebrada

Los flujos que servirán de base para el calculo del gasto sólido se muestran en las [Tablas 5 y 6](#) y corresponde a los escenarios sin y con cambio climático respectivamente.

Tabla 5. Flujo a diferentes periodos de retorno sin cambio climático

CUENCA	Caudal máx. (m3/s)	$a$	$K$	$\beta$	Período de Retorno (años)			
					TR = 50	TR = 50	TR = 500	TR = 1000
<b>Diablo 1</b>	Caudal de agua	--	--	--	0.82	2.82	13.63	20.47
	Caudal flujo de barro	1.231	--	--	1.01	3.47	16.78	25.19
	Caudal de Huaico (Fórmula de Takahashi)	2.000	--	--	1.64	5.64	27.26	40.94
	Caudal de Huaico (Fórmula de Sokolov)	3.90	3	0.3	3.20	11.00	53.16	79.83
<b>Diablo 2</b>	Caudal de agua	--	--	--	1.24	3.68	18.33	27.63
	Caudal flujo de barro	1.231	--	--	1.53	4.53	22.56	34.01
	Caudal de Huaico (Fórmula de Takahashi)	2.000	--	--	2.48	7.36	36.66	55.26
	Caudal de Huaico (Fórmula de Sokolov)	3.90	3	0.3	4.84	14.35	71.49	107.76

Tabla 6. Flujo a diferentes periodos de retorno con cambio climático

CUENCA	Caudal máx. (m3/s)	$a$	$K$	$\beta$	Escenario RCP8.5 para periodos	
					2021-2050: 25.96 mm	2051-2080: 49.74 mm
<b>Diablo 1</b>	Caudal de agua	--	--	--	0.82	13.63
	Caudal flujo de barro	1.231	--	--	1.01	16.78
	Caudal de Huaico (Fórmula de Takahashi)	2.000	--	--	1.64	27.26
	Caudal de Huaico (Fórmula de Sokolov)	3.90	3	0.3	3.20	53.16
<b>Diablo 2</b>	Caudal de agua	--	--	--	1.24	18.33
	Caudal flujo de barro	1.231	--	--	1.53	22.56
	Caudal de Huaico (Fórmula de Takahashi)	2.000	--	--	2.48	36.66
	Caudal de Huaico (Fórmula de Sokolov)	3.90	3	0.3	4.84	71.49

En las [Tablas 7 y 8](#), se muestra el cálculo de los volúmenes de sedimentos en escenarios sin y con cambio climático respectivamente para la quebrada del Diablo, estos volúmenes están expresados en m<sup>3</sup>.

Tabla 7. Volumen de sedimentos quebrada del Diablo sin cambio climático

CUENCA	Volumen (m <sup>3</sup> )	Periodo de Retorno (años)			
		TR = 50	TR = 50	TR = 500	TR = 1000
Diablo 1	Volumen de Hidrograma Líquido	8,505.90	20,069.94	68,425.32	99,010.20
	Volumen de Hidrograma de Huayco	17,011.80	40,139.88	136,850.64	198,020.40
Diablo 2	Volumen de Hidrograma Líquido	13,738.02	32,499.12	108,382.62	155,086.86
	Volumen de Hidrograma de Huayco	27,476.04	64,998.24	216,765.24	310,173.72

Tabla 8. Volumen de sedimentos quebrada del Diablo con cambio climático

CUENCA	Volumen (m <sup>3</sup> )	Escenario RCP8.5 para periodos	
		2021-2050: 25.96 mm	2051-2080: 49.74 mm
Diablo 1	Volumen de Hidrograma Líquido	87,901.08	389,833.38
	Volumen de Hidrograma de Huayco	175,802.16	779,666.76
Diablo 2	Volumen de Hidrograma Líquido	147,289.98	653,215.80
	Volumen de Hidrograma de Huayco	294,579.96	1,306,431.60

#### 4.3.3. Estimación de la producción de sedimentos y su transporte al punto de interés

A continuación, se debe determinar el volumen de sedimentos en los puntos de interés, en la [Figura 13](#), se muestra la discretización de la quebrada y en la [Figura 14](#) la ubicación de los puntos de interés, para la ubicación de los diques de contención de huaycos y sus respectivos sedimentos.

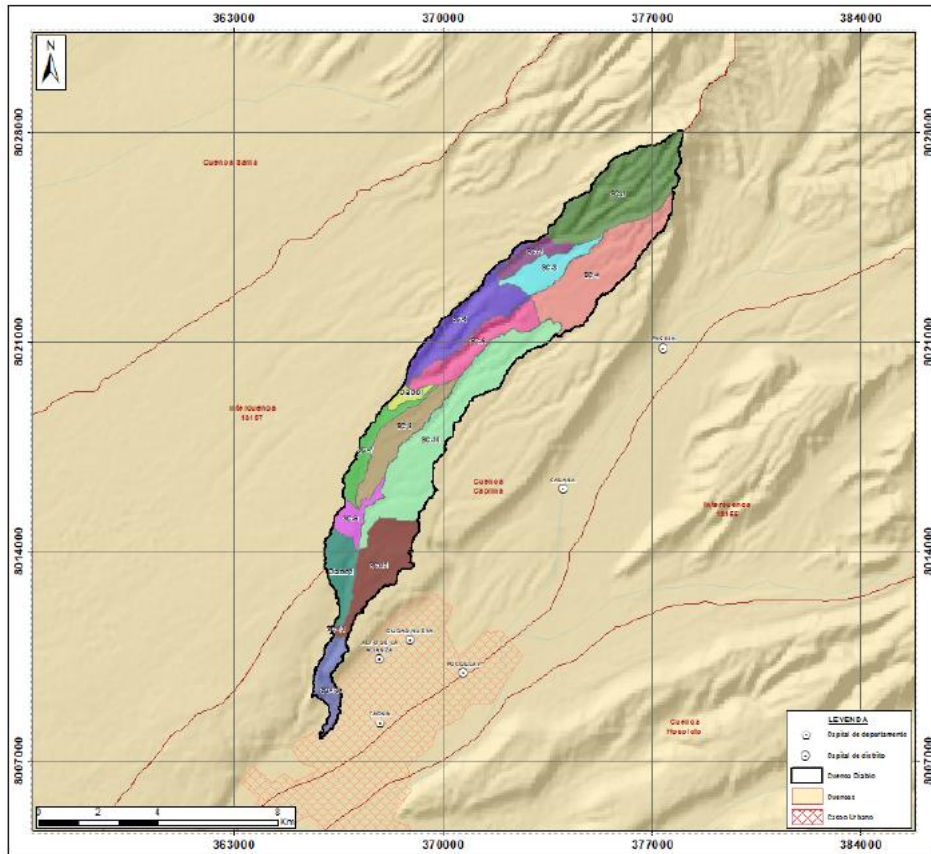


Figura 13. Discretización de la red de drenaje hidrológica de la quebrada del Diablo

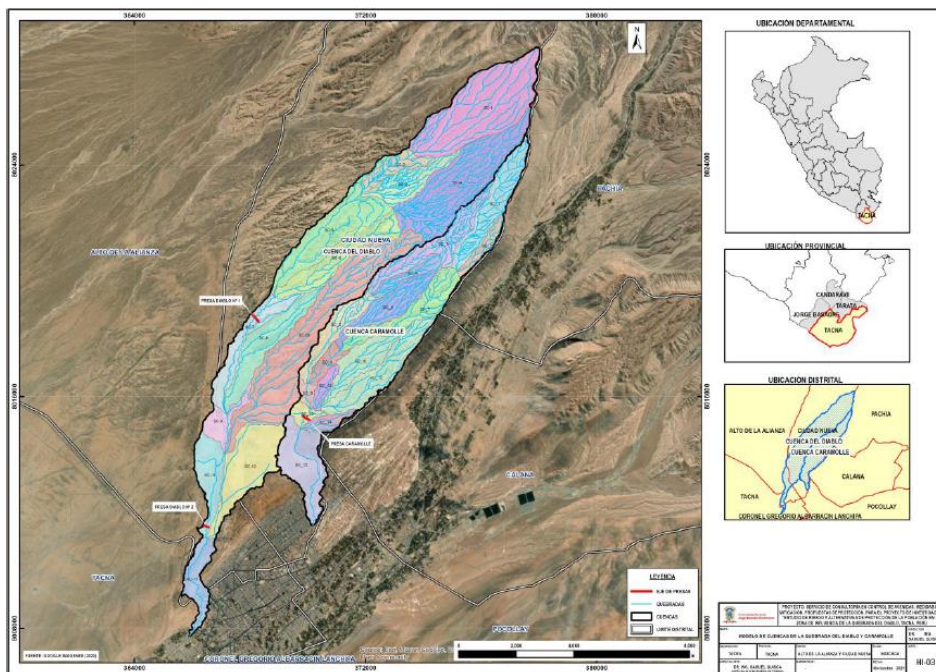


Figura 14. Ubicación de los sitios de emplazamiento de las presas de retención de flujos de huaicos

Para determinar las áreas aportantes de sedimentos en cualquier punto de interés, se han definido las cuencas colectoras, mediante la delimitación hidrográfica de las subcuencas principales que conforman la quebrada del Diablo. De esta forma, se ha obtenido un Modelo Digital de Elevación (MDE) del satélite ALOS-PALSAR, que tiene una resolución de 12.5 m x 12.5 m. Se utilizó el programa QGis para la delimitación de las subcuencas.

Los modelos de erosión del suelo se pueden clasificar según sus características conceptuales, y diferentes escalas de aplicación de espacio y tiempo. Además, algunos de estos modelos fueron diseñados para estimar la pérdida de suelo solo para fines específicos (conservación agrícola) mientras que otros tienen un alcance más amplio, con posibles aplicaciones en planificación de tierras, restauración de ríos y embalses.

Para estimar la producción de sedimentos, se ha utilizado la metodología propuesta por Gavrilovic y Zemljic, la cual cuantifica el proceso erosivo en función de las características morfológicas, vegetación y uso del suelo, distribución de precipitaciones y temperatura. Las variables de climáticas alteran la producción de sedimentos por erosión hídrica superficial. Este modelo se basa en el método de erosión potencial, y se basa en la interacción de los procesos geomorfológicos e hidrológicos de erosión de laderas y la red de drenaje de la cuenca. Este método es más integral, es un modelo distribuido de erosión, que se diferencia de los métodos hidrométricos, que son localizados y particulares para el cauce del río.

Se define de este modo la descarga media anual de material erosionado (G) como el producto de la producción de sedimentos (W) y el coeficiente de retención (R).

$$G = W \times R \text{ (m}^3 \text{ / año)}$$

(a) Volumen promedio anual erosionado de sedimento (W)

$$W = T \times h \times 3.14 \times Z^{3/2} \times F \text{ (m}^3 \text{ / año)}$$

donde:

T = coeficiente de temperatura

h = precipitación media anual [mm/año].

F = superficie de la cuenca [km<sup>2</sup>].

Z = coeficiente de erosión

(b) Variable de Coeficiente de Temperatura (T)

Para obtener esta variable se utilizó un modelo de elevación digital e información de temperaturas de 5 estaciones meteorológicas, para lo cual se implementó los siguientes pasos: Se realizó la regresión lineal múltiple, considerando la temperatura como la variable dependiente, y como variables independientes se consideró las coordenadas proyectadas este, norte y altitud en el Datum WGS84 19 Sur.

Seguidamente se realizó la regresión lineal múltiple y se obtuvo la modelación espacial de la temperatura media mensual y anual.

$$t = [(X \cdot x) + (Y \cdot y) + (Z \cdot z)] + C$$

siendo:

X = Variable de coordenada X

Y = Variable de coordenada Y

Z = Variable de coordenada Z

x = Coeficiente de coordenada X

y = Coeficiente de coordenada Y

z = Coeficiente de coordenada Z

C = Coeficiente de regresión lineal múltiple

Finalmente, con la información especializada de la temperatura y la siguiente ecuación se obtuvo la distribución espacial del coeficiente de temperatura.

$$T = [(t / 10) + 0.1]^{1/2}$$

donde:

T = coeficiente de temperatura

t = temperatura media anual (°C)

(c) Variable de Precipitación (h)

Para obtener este factor se utilizó información de precipitación media anual de 5 estaciones meteorológicas cercanas a la zona del proyecto. La modelación espacial de la precipitación a partir de datos puntuales de las estaciones pluviométricas se realizó con el método de interpolación de la media ponderada por el inverso de la distancia (IDW).

(d) Coeficiente de Erosión (Z)

El coeficiente de erosión está definido como:

$$Z = X * Y (\varphi + I^{1/2})$$

donde:

X = coeficiente de uso del suelo.

Y = coeficiente de resistencia del suelo a la erosión.

$\varphi$  = coeficiente que evalúa los procesos erosivos observados.

I = gradiente de la pendiente superficial [en %].

(e) Coeficiente de Uso de Suelo “X”

Para el cálculo del coeficiente de uso de suelo X, se ha trabajado con la imagen del satélite Landsat 25 del mes de octubre del 2021 (Figura 15). Este mes es el más despejado, teniendo menor porcentaje de interferencia por nubosidad. También, al ser un mes seco es el más crítico a los procesos de erosión de la cuenca.

La metodología aplicada fue la siguiente:

Como primer paso se realizó la combinación de las bandas 4 y 5 de las imágenes Landsat 8, este procesamiento digital se realizó con el Software Qgis.

Paso siguiente se realizó la corrección geométrica o georreferenciación de las imágenes, con el fin de situar correctamente cada uno de los puntos de las imágenes en sus coordenadas geográficas y puedan ser superpuestas al momento de realizar la integración del modelo final.

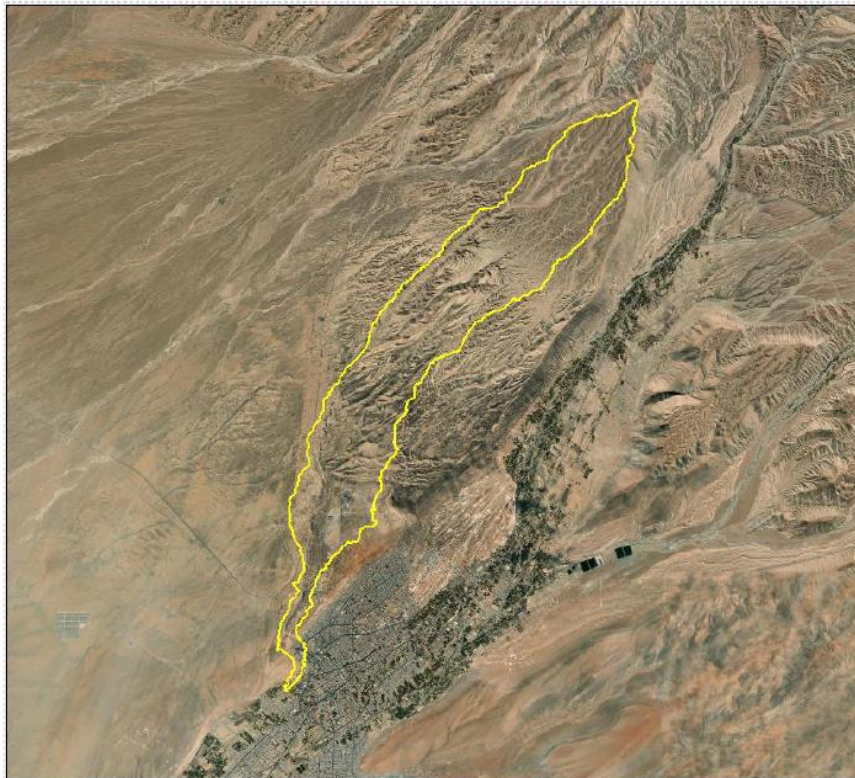


Figura 15. Imagen satelital Landsat 8 – quebrada del Diablo

Una vez que las imágenes han sido corregidas geométricamente y adecuadas a una proyección UTM, se procede a calcular el Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), a través de la siguiente fórmula, siendo Banda5 = infrarrojo cercano y Banda4 = rojo visible.

$$NDVI = \frac{Banda\ 5 - Banda\ 4}{Banda\ 5 + banda\ 4}$$

A los mapas de NDVI analizados se realizó una reclasificación (Reclass) para identificar los diferentes tipos de cobertura presentes en la cuenca colectora, obteniéndose así la distribución espacial con diferentes clases de porcentaje de cobertura, se asignaron valores de entre 0.05 y 1.0, de acuerdo con el uso del suelo y su cobertura vegetal (Tabla 9).

Tabla 9. Valores del parámetro X por categoría de uso de suelo

CATEGORÍA	SUBCATEGORIAS	“X”
Áreas sin cobertura vegetal	Tierras baldías que no se pueden arar.	1.00
	Campos arados arriba/debajo de la colina.	0.90
Pastizales dañados y tierras cultivadas	Los huertos o viñedos sin vegetación baja.	0.70
	Campo de contorno cultivado.	0.63
	Arbustos forestales degradados sobre el suelo erosionado.	0.60
	Pastos de montaña seca.	0.60
Bosques y arbustos dañados, pastizales	Prados y cultivos perennes similares.	0.40
Bosque de coníferas con poca arboleda, escasos arbustos, praderas de arbustos	Pastizales de pasto crecido y drenado.	0.30
Bosques mixtos y malezas densas, bosques dispersos con arbustos bajo arboles más grandes (underwood)	Buen bosque en laderas empinadas.	0.20
	Buen bosque en laderas suaves.	0.05

(f) Coeficiente de Resistencia de Suelo a la Erosión “Y”

Para la determinación del coeficiente “Y” fue utilizado como base el mapa de geología, definiendo valores de resistencia a la erosión entre 0.25 a 2 (Tabla 10).

Tabla 10. Valores del parámetro Y por categoría del suelo

CATEGORÍA	SUBCATEGORIAS	“Y”
Sedimentos finos y suelos poco resistentes a la erosión	Arena y grava y suelo suelto	2.00
Sedimentos, morrenas, arcillas y otras rocas débiles	Loes, toba, suelos salinos, suelos de estepa y similares	1.60
Rocas blandas, estabilizada (pendiente de talud, esquistos, arcillas rígidas)	Meteorización de piedras calizas y margas	1.20
	Serpentina, piedra arenisca roja, depósitos de flysch	1.10
	Parapodzol, podzol, esquisto desintegrado, maschist, gneis, esquisto arcilloso, etc.	1.00
Rocas parcialmente resistentes a la erosión	Caliza compacta y schistose, suelos tierraroja y fumose-silicatos	0.90
	Suelo forestal marrón y suelos de montaña	0.80
	Suelos smonitsa, valle y húmedos (back bog)	0.60
Rocas duras resistentes a la erosión	Chernozem y depósitos aluviales de buena textura	0.50
	Rocas ígneas compactas desnudas	0.25

(g) Coeficiente de Resistencia de Suelo a la Erosión “ $\phi$ ”

Los valores del coeficiente  $\phi$  se asignaron de acuerdo con el mapa de pendientes y red de drenaje de las microcuencas (Tabla 11).

Tabla 11. Valores del parámetro  $\phi$

CATEGORÍA	SUBCATEGORIAS	“ $\phi$ ”
Cuenca completamente erosionada con barrancos y deslizamientos de tierra	La cuenca o zona completamente conectada por barrancos y procesos de erosión profundos.	1.00
	Alrededor del 80% del área está bajo arroyuelos y barrancos.	0.90
50-80% de las cuencas con erosión en arroyuelos y deslizamientos	Alrededor del 50% del área está bajo arroyuelos y barrancos.	0.80
	Toda el área está conectada por la erosión de la superficie, detritus y escombros, algunos arroyuelos y barrancos (erosión profunda) y fuerte erosión kárstica.	0.70
Erosión laminar, talud de escombros, pendiente con arroyuelos y barrancos, desprendimiento de rocas.	Toda el área está conectada por la erosión, pero sin efectos visibles profundos (arroyuelos, barrancos, desprendimientos de rocas, etc.).	0.60
	El 50% del área está conectada por la erosión de la superficie, mientras que el resto de la cuenca está desconectada.	0.50
Erosión laminar en un 20-50% de las cuencas	El 20% del área está conectada por la erosión de la superficie y el 80% esta desconectada.	0.30
	La superficie de la tierra sin efecto visible de erosión, deslizamientos menores de rocas en canales fluviales.	0.20
Signos menores de erosión en las cuencas	La superficie de la tierra sin efecto visible de la erosión, la mayoría son campos de cultivo.	0.15
	La superficie de la tierra sin efecto visible de erosión, principalmente plantas creciendo bajo arboles más grandes o cultivos perennes (prados, pastizales, etc.).	0.10

(h) Gradiente de la Pendiente Superficial (I)

Para la obtención del gradiente de la pendiente superficial, se partió del Modelo Digital de Elevación DEM del satélite ALOS-PALSAR. A partir del DEM recortado se obtuvo el ráster con las pendientes expresadas en porcentajes.

Obtenidas las variables; coeficiente de uso del suelo “X”, coeficiente de resistencia del suelo a la erosión “Y”, coeficiente que evalúa los procesos erosivos observados “φ” y gradiente de la pendiente superficial “I” en %”, se procedió a calcular el coeficiente de erosión a través de la siguiente fórmula, con valor promedio área por parámetro calculado para la cuenca colectora:

$$Z = X * Y * (\varphi + I^{1/2})$$

Seguidamente, se procedió a determinar el volumen promedio anual erosionado de sedimento, la siguiente [Figura 16](#), resumen el modelo aplicado.

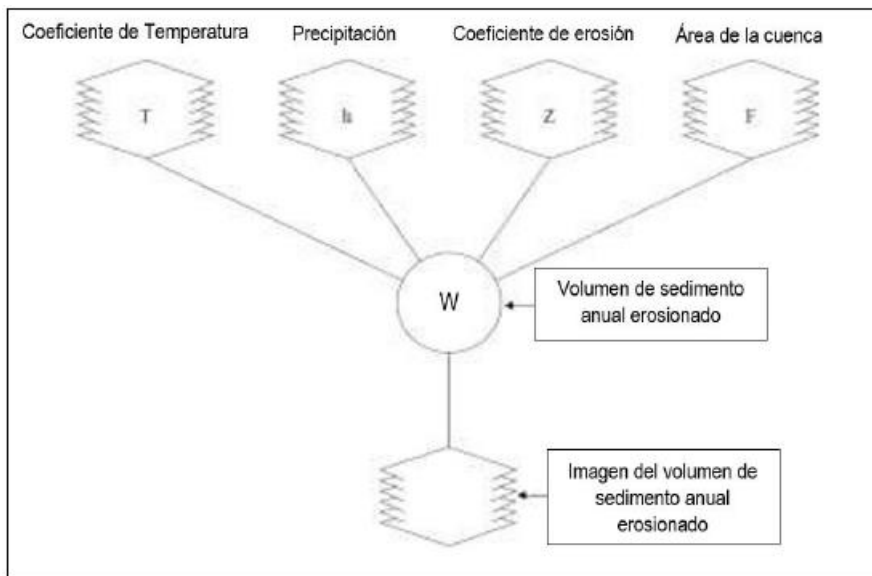


Figura 16. Modelo espacial para calcular el volumen promedio anual erosionado

(i) Coeficiente de retención (R)

El coeficiente R indica la relación entre el volumen de sedimento que efectivamente pasa por la sección de cierre de la cuenca y el volumen total de material producido por erosión superficial. La expresión para el coeficiente de retención de sedimentos es la siguiente:

$$R = [ (O \times D)^{1/2} \times (L + Li) ] / [ (L + 10) \times F ]$$

donde:

O = Perímetro de la cuenca [km].

D = Diferencia entre la elevación media y mínima (km).

D = Dm - Dc

Dm = Cota media de la cuenca

Dc = Cota mínima de la cuenca

Li = Longitud total de los afluentes fluviales laterales [km].

L = Longitud de la cuenca por el talweg del cauce principal [km].

F = Superficie de la cuenca [km<sup>2</sup>].

El valor de R depende de parámetros que caracterizan a la cuenca, por lo que no se puede trabajar con las celdas como unidad de cálculo. El método define un único valor de R para la cuenca y por lo tanto todas las celdas incluidas en ella tendrán el mismo valor. Se calculó el parámetro R para las subcuencas, para las que fueron definidas todas las variables necesarias para el cálculo del coeficiente de retención, con el objeto de representar de la mejor forma los aspectos asociados con la deposición de sedimentos dentro de cada zona del área de estudio.

- (j) Volumen de sedimentos producido por erosión y transportado a la sección de cierre de la cuenca “G”

El cálculo final consistió en la determinación del volumen de sedimento producido por erosión y transportado a la sección final de la Cuenca (G) para la cuenca de aporte, multiplicando los correspondientes valores de W y R.

A continuación, Figuras 18 y 19, a, b, c y d, mostramos las capas de las diferentes coberturas que nos permitieron determinar el volumen de sedimentos en el punto de interés.

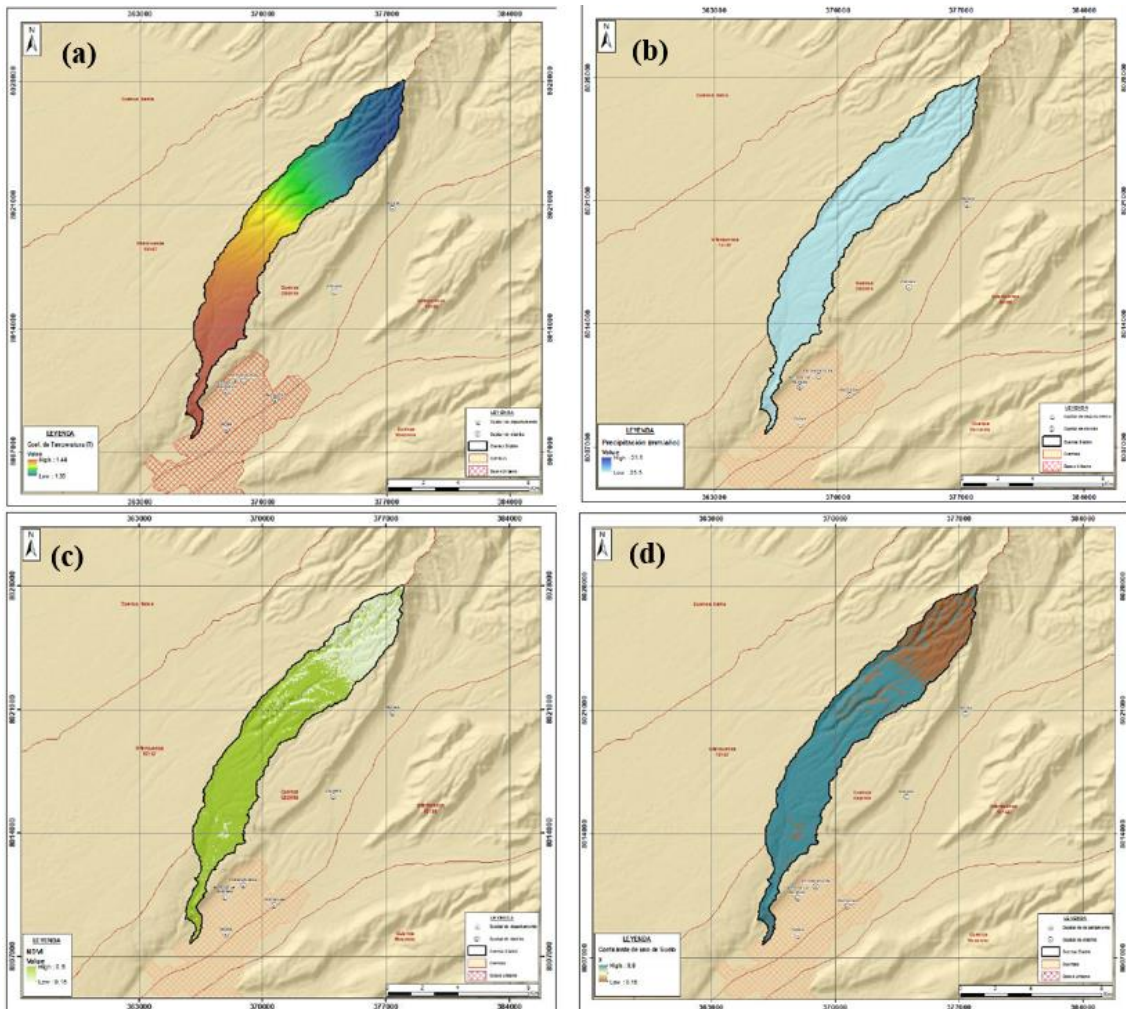


Figura 17. Coberturas (a) Distribución espacial del coeficiente de temperatura. (b) Distribución espacial de la precipitación media anual (mm/año). (c) Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) (d) Variación espacial del coeficiente de uso de suelo "X"

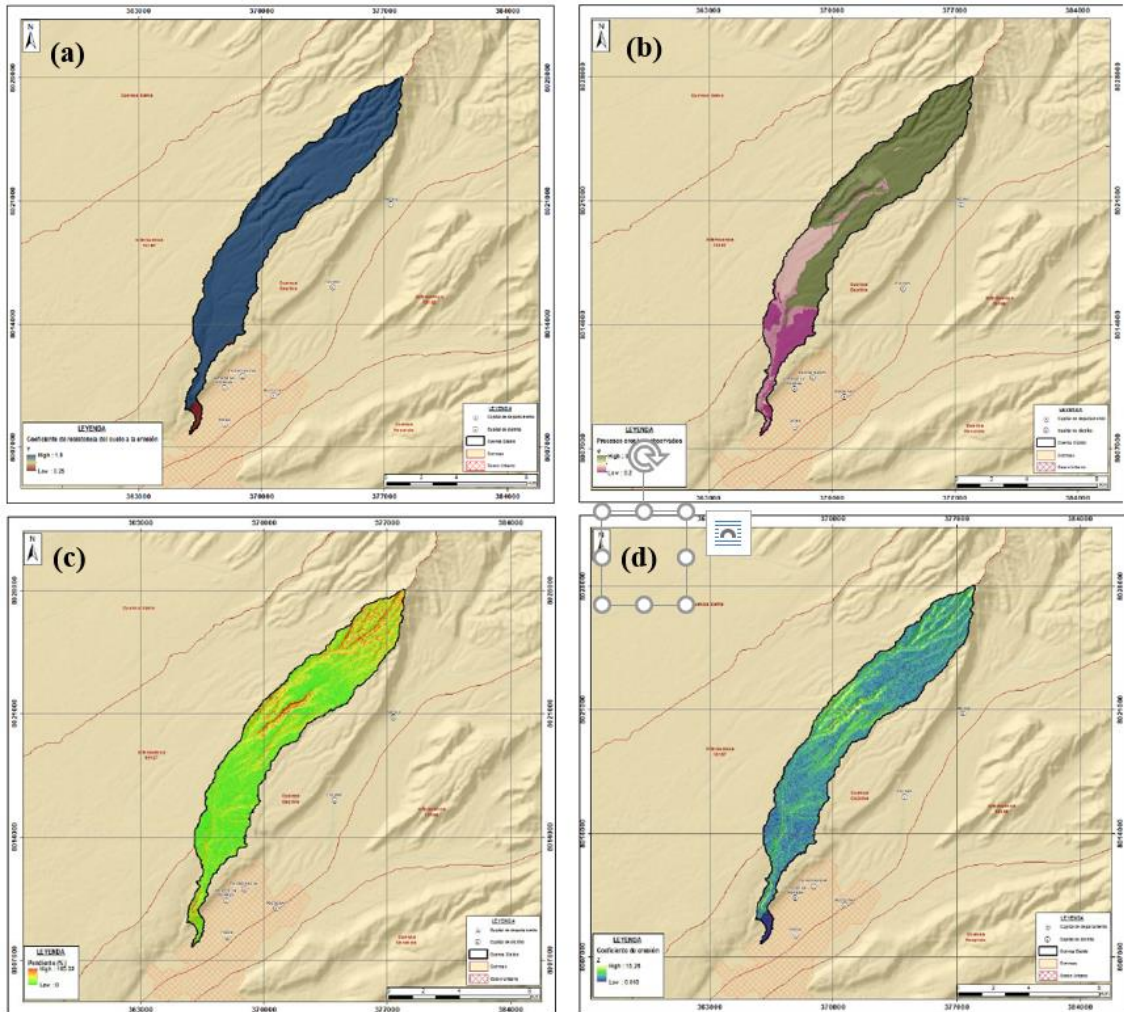


Figura 18. Coberturas (a) Variación espacial del coeficiente del suelo a la erosión “Y”. (b) Variación espacial del coeficiente que evalúa los procesos observados “φ”. (c) Variación espacial de la pendiente superficial I (%). (d) Distribución espacial del coeficiente de erosión “Z”.

(k) Producción Media Anual Especifica de Sedimentos – W ( $m^3/año/Km^2$ )

Teniendo todos los valores del coeficiente de erosión, temperatura, precipitación media anual y el área de la cuenca se procedió a calcular el volumen promedio anual erosionado de sedimento de la quebrada del Diablo con escenario sin cambio climático alcanzando valores promedio de  $962.54 m^3/año/km^2$  (Figura 19), y con un escenario con cambio climático el promedio de producción es de  $1877.52 m^3/año/Km^2$  (Figura 20).

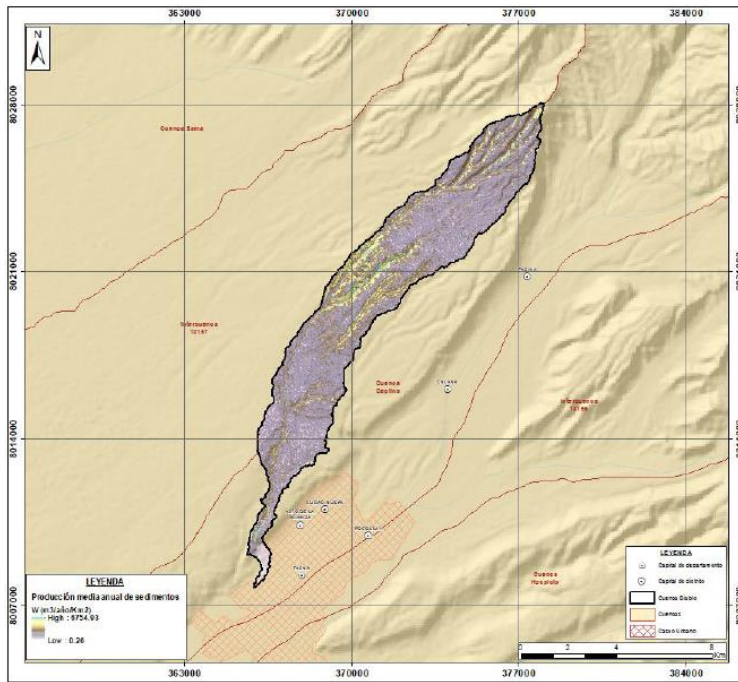


Figura 19. Producción específica media anual de sedimentos–W (m³/año/km²) sin cambio climático

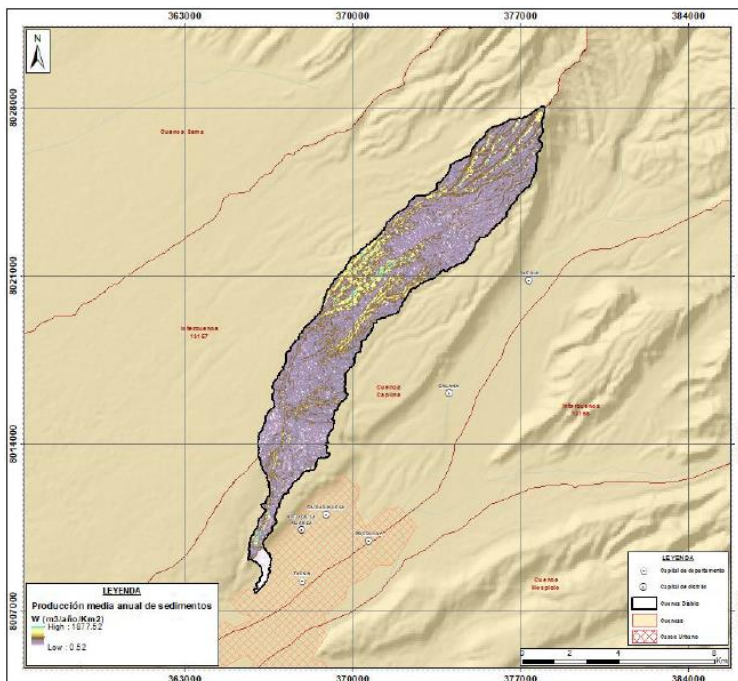


Figura 20. Producción específica media anual de sedimentos–W (m³/año/km²) con cambio climático

(I) Coeficiente de Retención de Sedimentos (R)

En la [Figura 21](#), se muestra la discretización de las 15 subcuencas colectoras, asimismo en la [Figura 22](#), se presentan los resultados de los coeficientes de retención de sedimentos calculado en las subcuencas colectoras, por las dimensiones de estas se considera un coeficiente de retención por cuenca de aporte.

Finalmente, el volumen de sedimento producido por erosión y transportado a la sección de cierre de la cuenca “G”, se multiplican los valores de la producción bruta específica de sedimentos (W) por el coeficiente de retención (R) por subcuencas de aporte. Los resultados para escenarios sin y con cambio climático en las [Tablas 12 y 13](#).

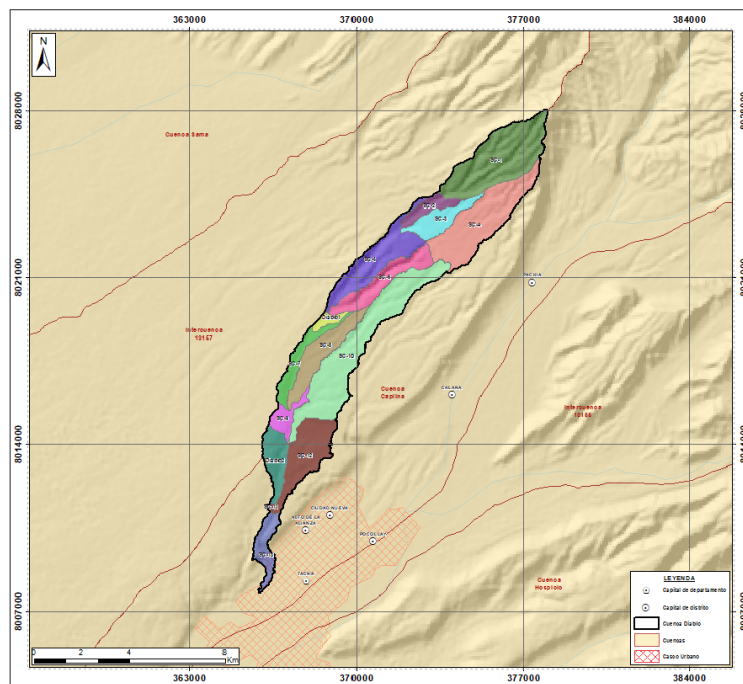


Figura 21. Subcuencas de aporte aguas arriba del punto de interés

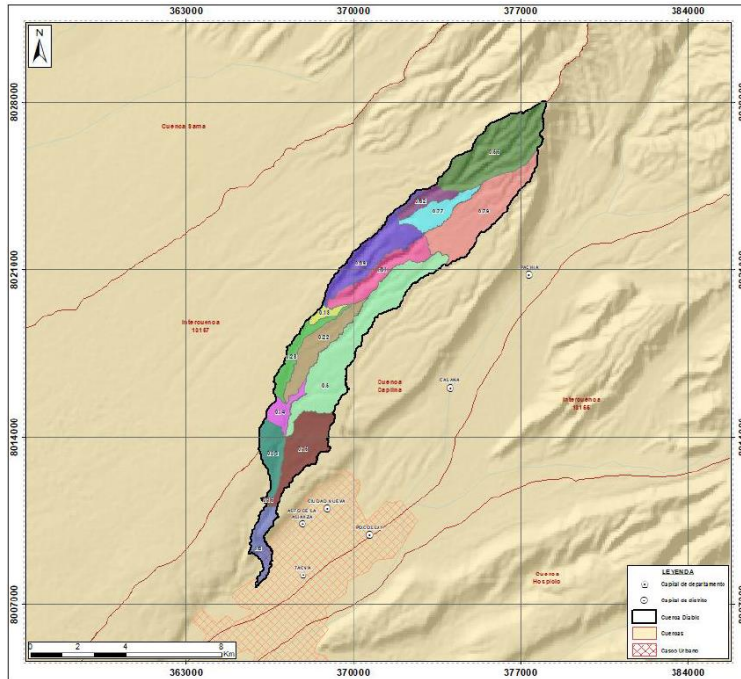


Figura 22. Coeficientes de retención de sedimentos

(m) Volumen de sedimento producido por erosión y transportado a la sección de cierre de la cuenca.

Tabla 12. Producción de sedimento en los puntos de interés de la Quebrada del Diablo, sin cambio climático

Quebrada	Área	R	W	G (m3/año)	Total
SC_1	8.19	0.55	1109.30	615.35	
SC_2	1.29	0.62	1085.07	673.36	
SC_3	2.13	0.77	706.16	542.31	
SC_4	7.33	0.79	728.65	574.19	
SC_5	4.78	0.36	1335.81	478.37	
SC_6	3.24	0.31	1485.93	460.65	
Diablo 01	0.55	0.18	1047.69	189.63	3533.86
SC_7	2.42	0.28	891.51	250.03	
SC_8	3.33	0.22	786.69	174.48	
SC_9	1.23	0.14	698.09	97.22	
SC_10	9.98	0.50	1015.63	512.42	
Diablo 02	2.18	0.13	857.65	108.92	4676.93
SC_11	2.28	0.15	873.56	130.94	
SC_12	4.47	0.15	645.31	94.69	
SC_13	1.82	0.20	737.48	146.52	
<b>TOTAL</b>				5049.080	

R - Coeficiente de Retención de Sedimentos

W - Producción anual de Sedimentos por Erosión Superficial

G - Descarga Media Anual del Material Erosionado (m3/año)

Tabla 13. Producción de sedimento en los puntos de interés de la Quebrada del Diablo, con cambio climático

Quebrada	Área	R	W	G (m3/año)	Total
SC_1	8.19	0.55	2163.79	1200.29	
SC_2	1.29	0.62	2116.52	1313.45	
SC_3	2.13	0.77	1377.43	1057.82	
SC_4	7.33	0.79	1421.30	1120.01	
SC_5	4.78	0.36	2605.61	933.11	
SC_6	3.24	0.31	2898.43	898.53	
Diablo 01	0.55	0.18	2043.60	369.89	6893.11
SC_7	2.42	0.28	1648.40	462.30	
SC_8	3.33	0.22	1534.51	340.33	
SC_9	1.23	0.14	1361.70	189.64	
SC_10	9.98	0.50	1981.08	999.52	
Diablo 02	2.18	0.13	1672.92	212.46	9097.36
SC_11	2.28	0.15	2344.35	351.41	
SC_12	4.47	0.15	1258.74	184.70	
SC_13	1.82	0.20	1438.53	285.81	
<b>TOTAL</b>				9919.271	

R - Coeficiente de Retención de Sedimentos

W - Producción anual de Sedimentos por Erosión Superficial

G - Descarga Media Anual del Material Erosionado (m3/año)

#### 4.3.4. Mecanismos de producción y deposición de sedimentos

El proceso de ocurrencia de huaicos en la quebrada estudiada, se producen como resultado de la acción de las precipitaciones extremas en la cabecera y dentro de la misma, así como de la disponibilidad de capas de suelos residuales sobre las laderas y en los cauces de las quebradas. En nuestro caso específico, la humedad antecedente no es un factor determinante, debido a que los eventos hidrológicos extremos no se eventos secuenciales, sino por el contrario con largos espaciamientos temporales, lo que determina que los suelos carezcan de humedad antecedente.

Actualmente, no se ha establecido una clasificación consensuada de la iniciación de los flujos de huaicos. Algunos investigadores como [Paulhus & Kohler \(1952\)](#), clasifican el inicio del flujo de huaicos según la forma en que se induce, por deslizamiento superficial y por escorrentía. [Wu y Liu \(2011\)](#) proponen una teoría unificada de iniciación

del flujo de huaicos aplicando la teoría de homogeneización, donde el primer paso de la derivación de la teoría unificada se inicia a escala microscópica del suelo.

Otros investigadores, como Wang (2001), dividen la iniciación del flujo de huaicos en tres tipos: el primero, consiste en que los materiales del deslizamiento se precipitan en el flujo y se mezcla con el agua para formar el flujo de huaico; el segundo, la iniciación del flujo de huaico se forma por la erosión hidráulica de los sedimentos del el lecho del cauce de la quebrada u hondonada; y el tercer tipo, el flujo de huaico se forma por el arrastre de los depósitos procedentes del colapso de las orillas.



Figura 23. Vista de la parte alta de la cuenca de la quebrada del Diablo, que se constituye como cuenca colectora

#### **4.3.5. Mecanismo del tránsito de las ondas de flujos de huaicos**

El mecanismo del proceso de desarrollo de los flujos de huaicos se caracteriza por el movimiento altamente no-permanente de una o más ondas de flujos de huaicos por el cauce de la quebrada, donde en el frente de onda se acumulan las piedras de mayores tamaños. Reológicamente, el flujo de huaicos puede presentarse como flujo

hiperconcentrado, flujo de barro, flujo de piedras, y flujos de barros con piedras con granulometría extendida, el cual se le conoce como flujos de escombros o flujos de detritos o flujos de huaicos.

Debido a la naturaleza dinámica del proceso, se tiene que tomar en cuenta muchas variables, de las cuales algunas son la fuerte erosión en la zona de origen, la erosión hacia abajo en la trayectoria del flujo de huaico y la sedimentación en la zona de deposición. También, se debe predecir el peligro y el potencial de daños inducidos por el flujo de huaicos, desencadenado por una precipitación extrema asociado a un evento hidrológico extremo en las cuencas estudiadas.

Los resultados de la simulación deben reproducir el tránsito del flujo de huaicos y los daños que causará a la infraestructura. Esto sugiere que, dado el alto nivel de riesgo de flujo de huaicos previsto, debe ser oportuna la planificación de medidas de prevención o reducción del flujo de huaicos, y la planificación de medidas de prevención o reducción del riesgo por huaicos (Figura 24).



Figura 24. Vista de la zona media y baja de la quebrada del Diablo

#### 4.3.6. Mecanismo del proceso de deposición de los flujos de huaicos

Dado que la magnitud de estos efectos de dispersión de partículas depende de la velocidad de corte (gradiente vertical de velocidad), para que el flujo siga manteniendo su alta concentración de sólidos se requiere una velocidad de corte suficiente. Por tal razón, la velocidad de corte es, independientemente del tipo de flujo de huaico, proporcional a la pendiente longitudinal del cauce de la quebrada, y se hace pequeña con el aplanamiento de la pendiente. Por lo tanto, si el flujo de huaicos sale a una zona que se aplanan gradualmente, tiende a continuar su movimiento diluyendo la concentración de sólidos al depositar el exceso de sólidos por encima de la concentración de equilibrio, que es una función de las condiciones topográficas del lugar de salida (Figura 25).



Figura 25. Vista desde aguas abajo de la boca de salida que la quebrada del Diablo, donde se observa una caída rocosa que funciona como un control geológico de erosión de la quebrada.

### 4.3.7. Propuesta estructural

Las obras de control de flujos de escombros se dividen en los siguientes tipos, mostrados en la [Tabla 14 \(Borovoi et al., 1983\)](#).

Tabla 14. Tipos de obras de control de huaicos (flujos de escombros o flujos de detritos)

Rasgos característicos de las estructuras		Tipos principales de obras de control de huaicos
Por el propósito	Por la ubicación	
Presas o diques de retención	Cauce	Sistemas de vasos de presas de retención de flujos de huaicos; vasos de retención de flujos de huaicos individuales y presas; Fosas-trampas profundas; plataformas de contención laterales, etc.
De paso		Canales, pasos aéreos de huaicos, puentes
Direccionales hacia la estructura de paso		Presas direccionales, de barrera y espigones
Preventivos		Presas de regulación de agua
Estabilizadores	Ladera y cauce	Andenes o terrazas, zanjas de captación de las colinas, muros de contención, sistemas de drenaje, diques, rápidos

La presa de retención de sólidos es una medida estructural convencional que funciona bien en el control de huaicos de quebradas y ríos pequeños, cuando el volumen del vaso de retención de sólidos es suficiente para la retención del hidrograma de la onda u ondas de huaicos. En caso contrario, los sedimentos llenan el vaso de la presa de retención, y la capacidad de la presa para controlar los huaicos puede disminuir, o simplemente desaparecer.

De acuerdo con las condicionantes de la necesidad de emplazar una presa o dique de retención de huaicos, estas pueden ser presas cerradas, presas con aberturas para la descarga de agua con sedimentos finos y gruesos, y las presas abiertas que permiten la descarga del flujo de huaico, pero que retienen las piedras, bolonería y rocas ([Schwindt et al., 2018](#)).

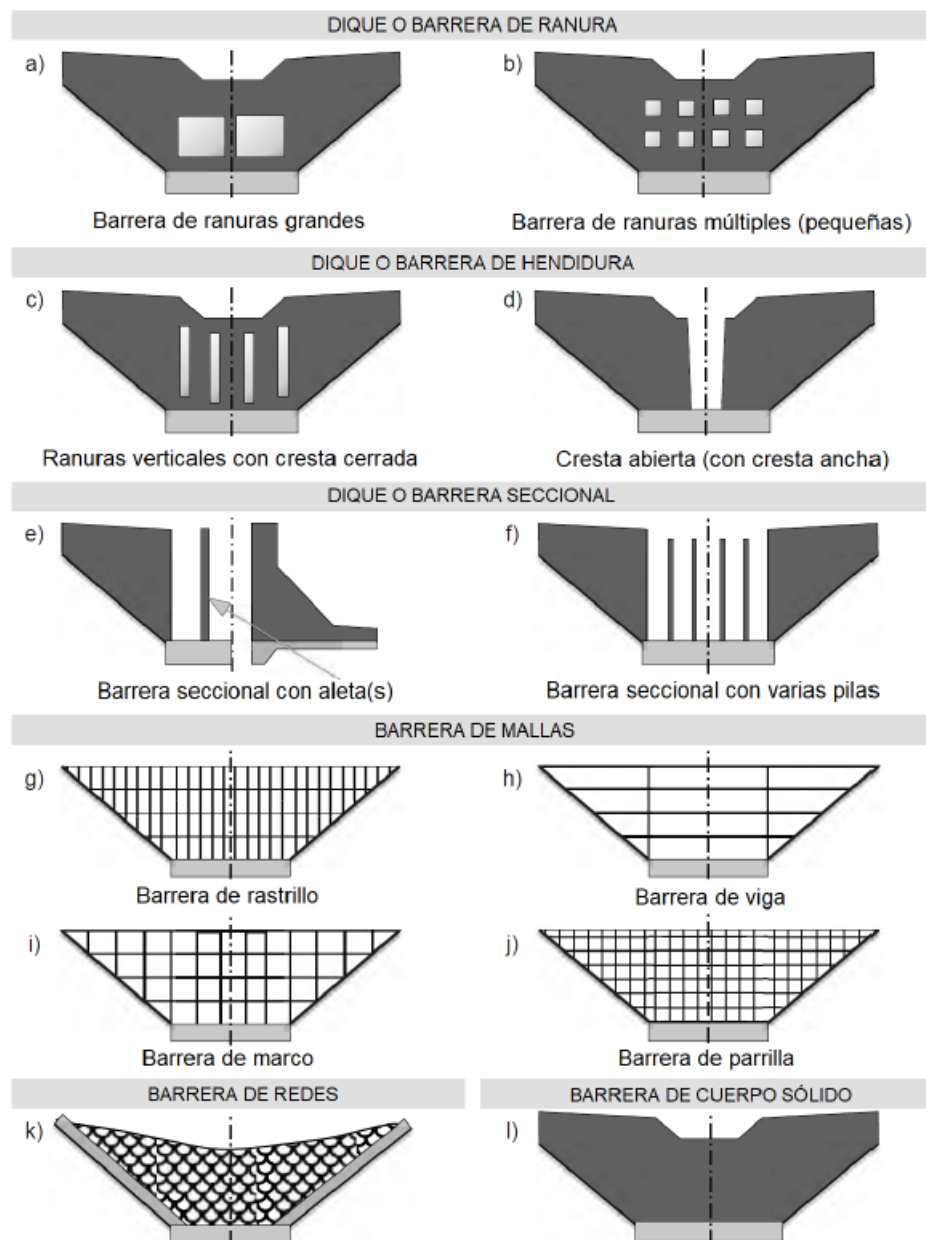


Figura 26. Clasificación de barreras torrenciales, adaptado a lo reportado por Schwindt (2017).

También, señalan que la indicada norma debe tomar en cuenta los aspectos medioambientales o paisajísticos, además de la prevención de catástrofes. Indican que se debe prestar más atención a las presas Sabo abiertas o parcialmente abiertas, dado que pueden controlar eficazmente los vertidos de sedimentos y capturar los flujos de huacos

y los restos de madera, sin afectar a la continuidad de los niveles del lecho del río, ni a las corrientes de agua, ni obstruir indebidamente el paso de animales o peces (Figura 27).

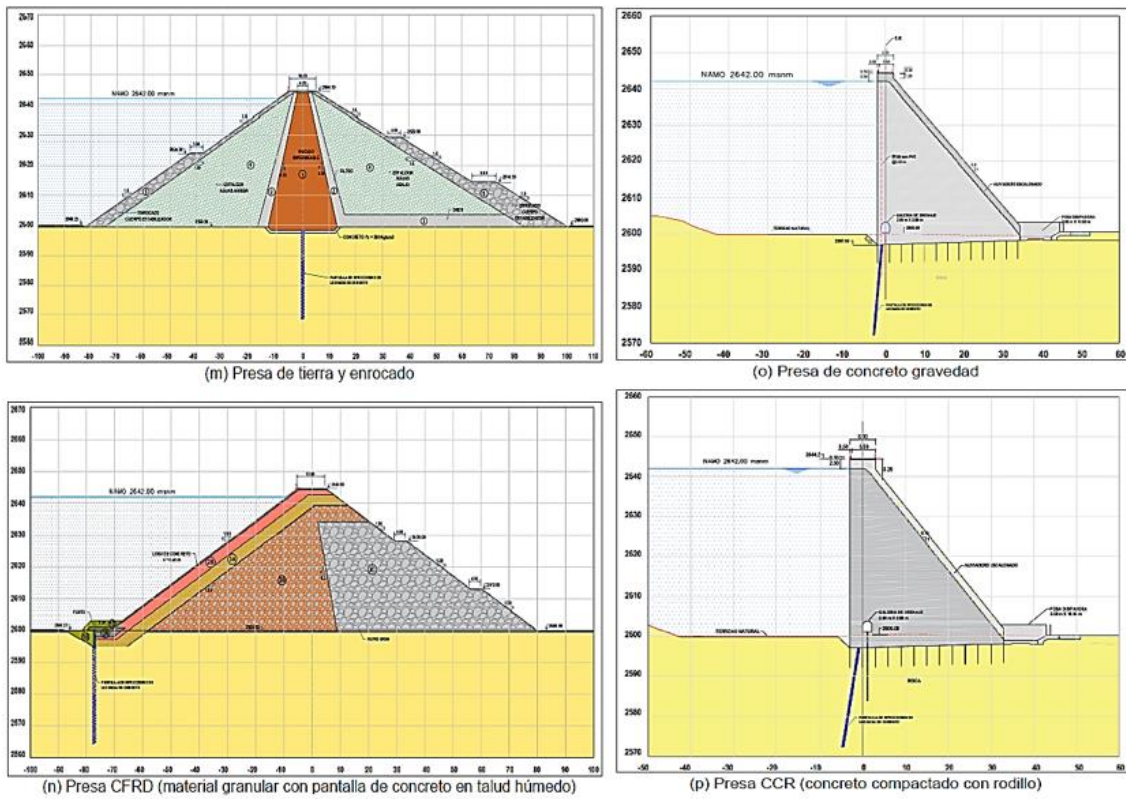


Figura 27. (m y n) Tipos de presas de tierra y enrocado de almacenamiento de agua que podrían ser utilizados con reajustes en el control de huaicos en cuencas con alta disponibilidad de sedimentos. (o y p) Tipos de presas de concreto-gravedad de almacenamiento de agua que podrían ser utilizados con reajustes en el control de huaicos en cuencas con alta disponibilidad de sedimentos

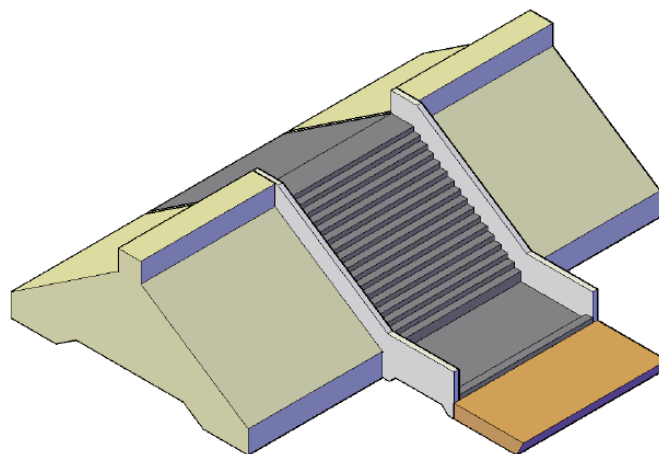


Figura 28. Tipos de presas de concreto-gravedad o de concreto ciclópeo, que ha sido propuesto para el control de huaicos en cuencas con alta disponibilidad de sedimentos.

#### **4.4. Planteamientos de las alternativas del esquema de control de huaicos**

El peligro por los eventos de huaicos que afecta ocasionalmente a la ciudad de Tacna, y que con el cambio climático global se vuelve recurrente, debe ser abordado de forma integral, dado que la fuente del peligro proviene de la cuenca de la Quebrada del Diablo.

El planteamiento de alternativas debe ser por esquemas de control de huaicos, que guarda cierta similitud con el análisis de alternativas de esquemas de aprovechamientos hidráulicos, pero que son sustancialmente diferentes por sus propósitos o fines. En nuestro caso, el objetivo es la reducción total (en lo posible) de las vulnerabilidades de las zonas urbanas afectadas por los huaicos, y la reducción drástica del riesgo de la ciudad de Tacna ante los eventos de huaicos. Para cumplir con estos objetivos, en las alternativas de esquemas de control de huaicos deben ser incluidos la cuenca de la Quebrada del Diablo, que se constituye como la fuente natural de los eventos de huaicos que afectan la ciudad de Tacna.

##### **4.4.1. Esquema de control de huaicos**

Los componentes de obras de un esquema de control de huaicos en la cuenca de la Quebrada del Diablo, son: (a) Presa de retención de huaicos, conformada de concreto masivo, mampostería de piedra, tierra, tierra y enrocado. (b) Aliviadero para la descarga de los caudales excedentes de huaicos, de tipo aliviadero convencional, aliviadero escalonado, aliviadero mixto. (c) Captación de huaico en el embalse para su trasvase de cuenca. (d) Descarga de fondo del flujo de huaico, de ameritarse técnicamente.

La selección de la posición de la altura del volumen útil del embalse durante el proceso de diseño de la presa de retención de huaicos es una tarea compleja. El cálculo usualmente se inicia con la designación de algunas variantes de la profundidad del

embalse para cada cota de la retención para el cual se realiza la regulación de caudales durante el periodo de las observaciones hidrológicas (Figura 29).

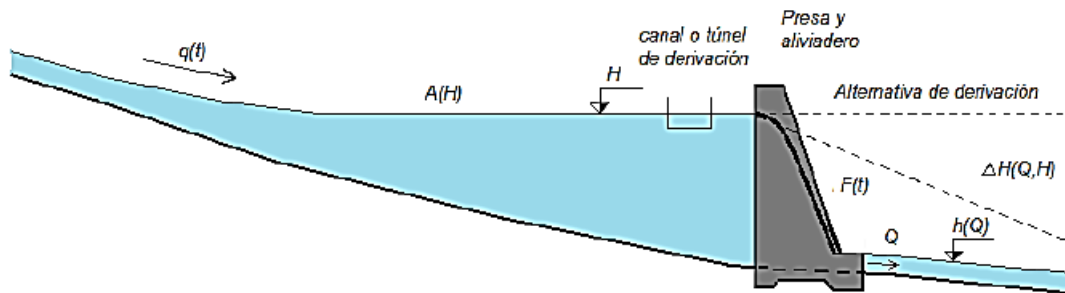


Figura 29. Esquema de una presa de retención de sedimentos con aliviadero y canal o túnel de derivación

En las presas de retención de huaicos no es necesario la exigencia de la impermeabilización del vaso, pues las pérdidas de filtración de agua por el vaso y por el cuerpo, fundación y estribos de la presa es permitido, siempre y cuando no se presenten altos gradientes hidráulicos, que causen la tubificación, fractura hidráulica y erosión interna del material de suelo que conforman el cuerpo y fundación de la presa. Asimismo, el funcionamiento discontinuo en el tiempo de la presa favorece en el relajamiento de las exigencias geotécnicas y estructurales de la presa y fundación. Sin embargo, la seguridad de la presa de retención de huaicos deberá estar asegurada, pues el colapso de esta estructura puede acarrear grandes afectaciones en aguas abajo de la presa.

#### 4.4.2. Planteamiento de los esquemas de control

Considerando las condicionantes físicas, geológicas, morfológicas y otras, de las cuencas de las quebradas involucradas y asociadas a los eventos de huaicos, en la cuenca de la quebrada El Diablo se plantean dos (02) lugares de emplazamiento de presas de retención de huaicos en la quebrada del Diablo y un (01) lugar en la quebrada Caramolle (Figura 30).

Presa de Retención de Huaicos PRH-D1: El volumen de flujo de huaico que se generan en la cuenca colectora, asociados al periodo de retorno de diseño, será retenido por la presa de retención de huaicos, y los excedentes será captados por un aliviadero ubicado en la margen derecha del vaso, y conducido por trasvase de cuenca hacia la cuenca vecina. La presa de retención de flujos de huaicos funcionaría como presa laminadora, para reducir drásticamente el hidrograma de las ondas de flujos de huaicos en el cauce principal de la indicada como cuenca colectora.

Presa de Retención de Huaicos PRH-D2: El volumen de flujo de huaico que se generan en la cuenca colectora será retenido por la presa de retención de huaicos, y los excedentes será captados por un aliviadero ubicado en la margen derecha del vaso, y conducido por trasvase de cuenca hacia la cuenca vecina. La presa de retención de flujos de huaicos también funcionaría como presa laminadora, para atenuar el hidrograma de las ondas de flujos de huaicos en el cauce de la quebrada del Diablo.

En el desarrollo de este trabajo y por las evidencias encontradas se evidencia que la cuenca de la quebrada Caramolle, presenta características similares a la estudia y aun siendo contigua, se puede prever el emplazamiento de una presa de retención de huaicos:

Presa de Retención de Huaicos PRH-C1: En este sitio se emplazará una presa para la retención de huaicos, y los excedentes será captados por un aliviadero ubicado en la margen derecha del vaso, y conducido por trasvase de cuenca hacia la cuenca vecina. El espejo de agua del vaso de almacenamiento del flujo bifásico servirá para la laminación del hidrograma de huaico.

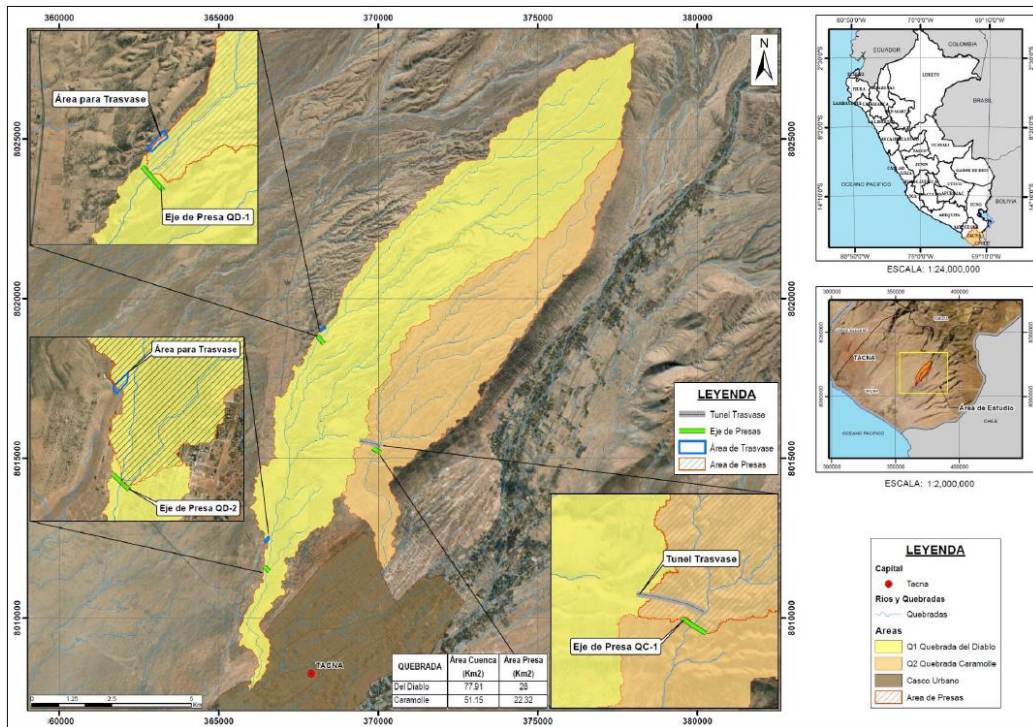


Figura 30. Planteamiento de alternativas de medidas estructurales para el control integral de huaicos que afectan la ciudad de Tacna

En las Figuras 31, 32 y 33 se puede apreciar la ubicación de los puntos de emplazamiento de los ejes de presas de retención de sedimentos.

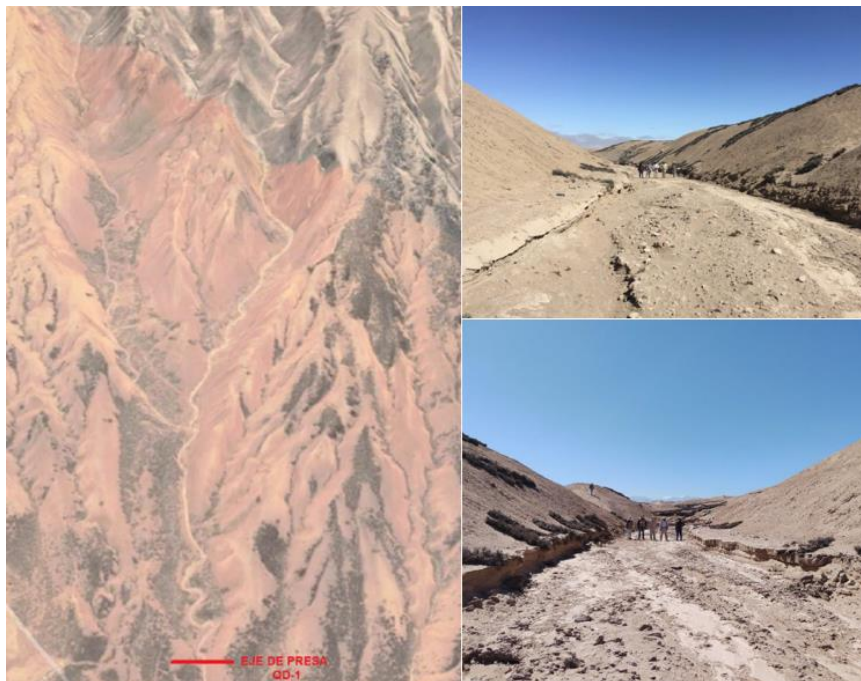


Figura 31. Vista del eje de la presa QD-1 de control de huaicos y el vaso de almacenamiento de sólidos, donde se observan la red de drenaje que llega a la misma.



Figura 32. Vista del eje de la presa QD-2 de control de huaicos y el vaso de almacenamiento de sólidos

#### 4.5. Predimensionamiento de los diques

Una vez identificados los lugares de emplazamiento de los diques, y estableciendo la posición del eje, podemos establecer parámetros de predimensionamiento de las estructuras. Los resultados del análisis de alternativas de presas de retención de huaicos en los sitios de emplazamientos indican las siguientes alternativas propuestas.

PRH-D1: Presa de tierra y enrocado para la retención de huaicos en la quebrada del Diablo, con 24.00 m de altura. Dentro del esquema de obras, se tiene previsto la construcción de una captación y aliviadero para los caudales de excedencia de huaicos, seguido de un canal abierto de conducción hacia la cuenca vecina, localizado en la margen derecha.

PRH-D2: Presa de concreto-gravedad o concreto ciclópeo para la retención de huaicos en la quebrada del Diablo, con 25.00 m de altura. Dentro del esquema de obras, se tiene previsto la construcción de una captación y aliviadero para los caudales de excedencia de huaicos, seguido de un canal abierto de conducción hacia la cuenca vecina, localizado en la margen derecha.

#### 4.5.1. Presa de retención de huaycos PRH-D1

El tipo de presa de retención de huaicos seleccionado como la alternativa óptima es una presa de enrocado con núcleo central de suelo impermeable. En la [Figura 33 y 34](#), se muestra en planta el esquema de obras propuesto para el control de huaicos, compuesto por la presa de retención, el vaso de almacenamiento de huaicos, y por la margen derecha del vaso, la ubicación del aliviadero y canal de trasvase de los flujos de huaicos hacia la cuenca vecina de la margen derecha. Los excedentes de volúmenes de huaicos que el vaso de almacenamiento no pueda almacenar, será derivados hacia una quebrada de la cuenca vecina por donde las vulnerabilidades que ocasionen sean mínimas o inexistentes.

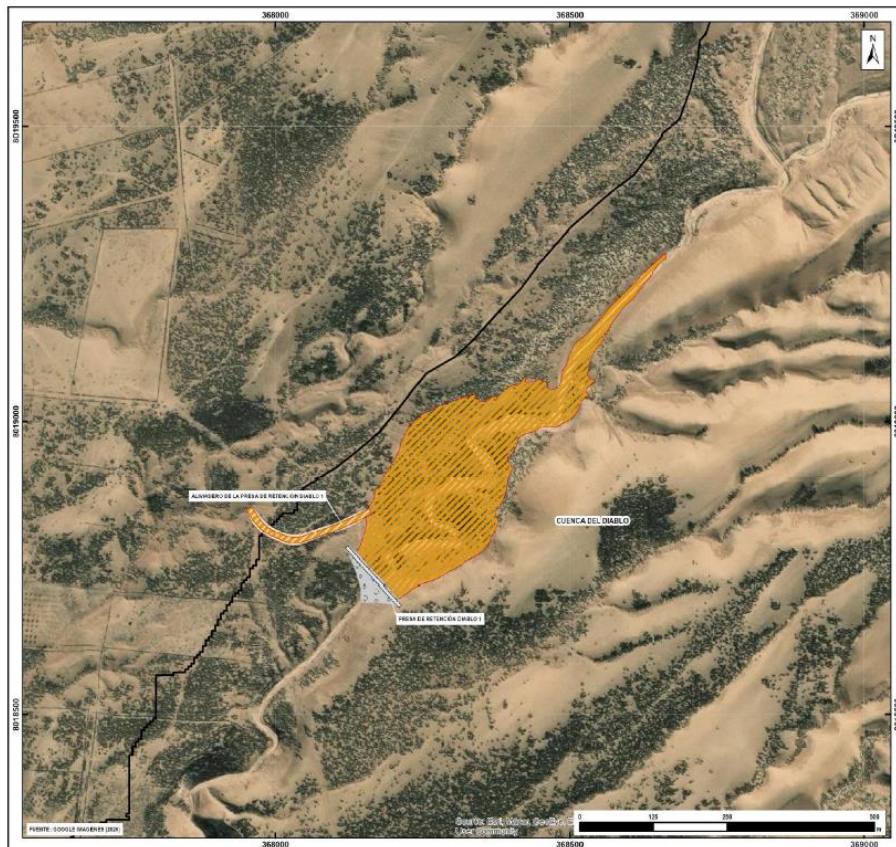


Figura 33. Vista en planta del esquema de obras propuesto para la presa de retención de huaicos PRH-D1 en la quebrada del Diablo. Se muestra el vaso de almacenamiento de huaicos y el trasvase de los flujos de huaicos se realizará por un aliviadero y canal abierto

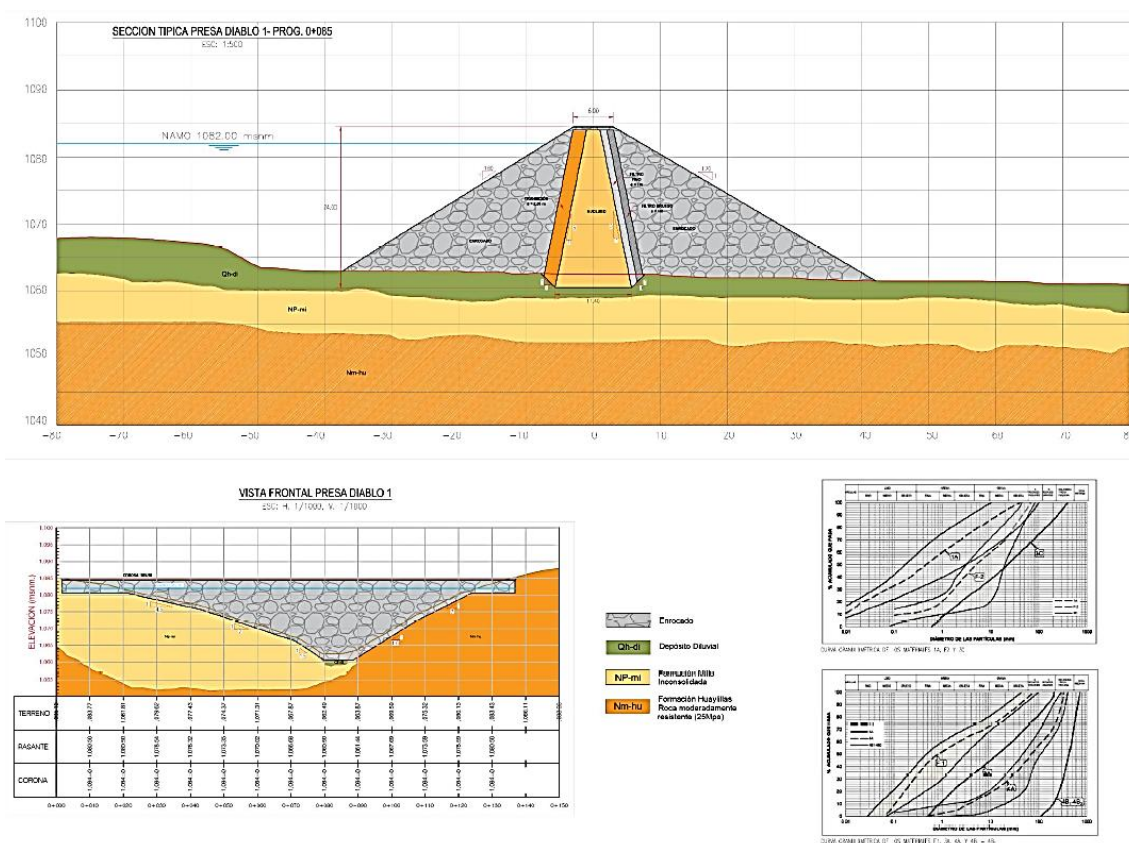


Figura 34. Sección predimensionada de la presa de retención de huaicos PRH-D1 en la quebrada del Diablo

#### 4.5.2. Presa de retención de huaicos PRH-D2

El tipo de presa de retención de huaicos seleccionado como la alternativa óptima es una presa de enrocado con núcleo central de suelo impermeable. En la [Figura 35 y 36](#), se ha seleccionado el tipo de presa de retención de huaicos como una presa de concreto-gravedad. Se muestra en planta el esquema de obras propuestas para el control de huaicos, compuesto por la presa de retención, el vaso de almacenamiento de huaicos, y por la margen derecha del vaso, la ubicación del aliviadero y canal de trasvase de los flujos de huaicos hacia la cuenca vecina de la margen derecha. Los excedentes de volúmenes de huaicos que el vaso de almacenamiento no pueda almacenar, será derivados hacia una quebrada de la cuenca vecina por donde las vulnerabilidades que ocasionen sean mínimas o inexistentes.

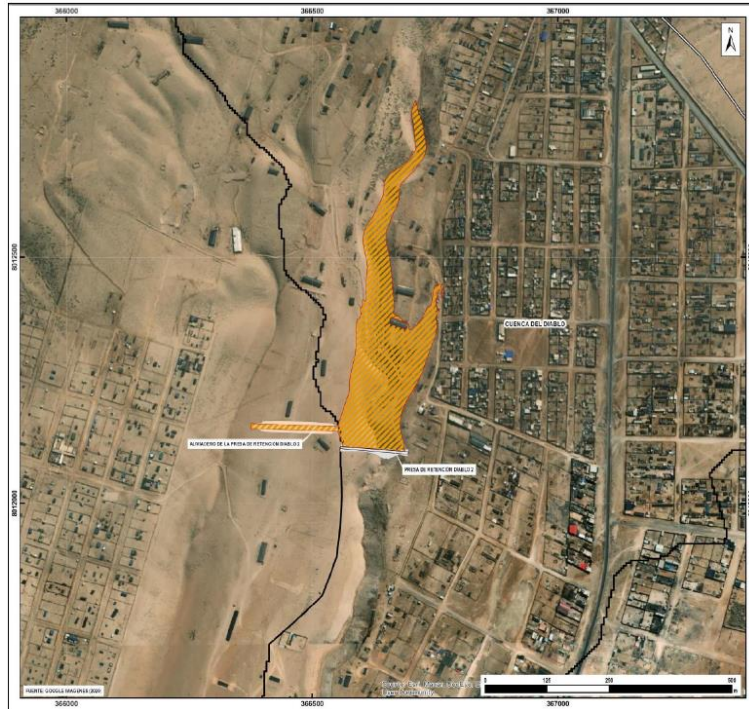


Figura 35. Vista en planta del esquema de obras propuesto para la presa de retención de huacos PRH-D2 en la quebrada del Diablo.

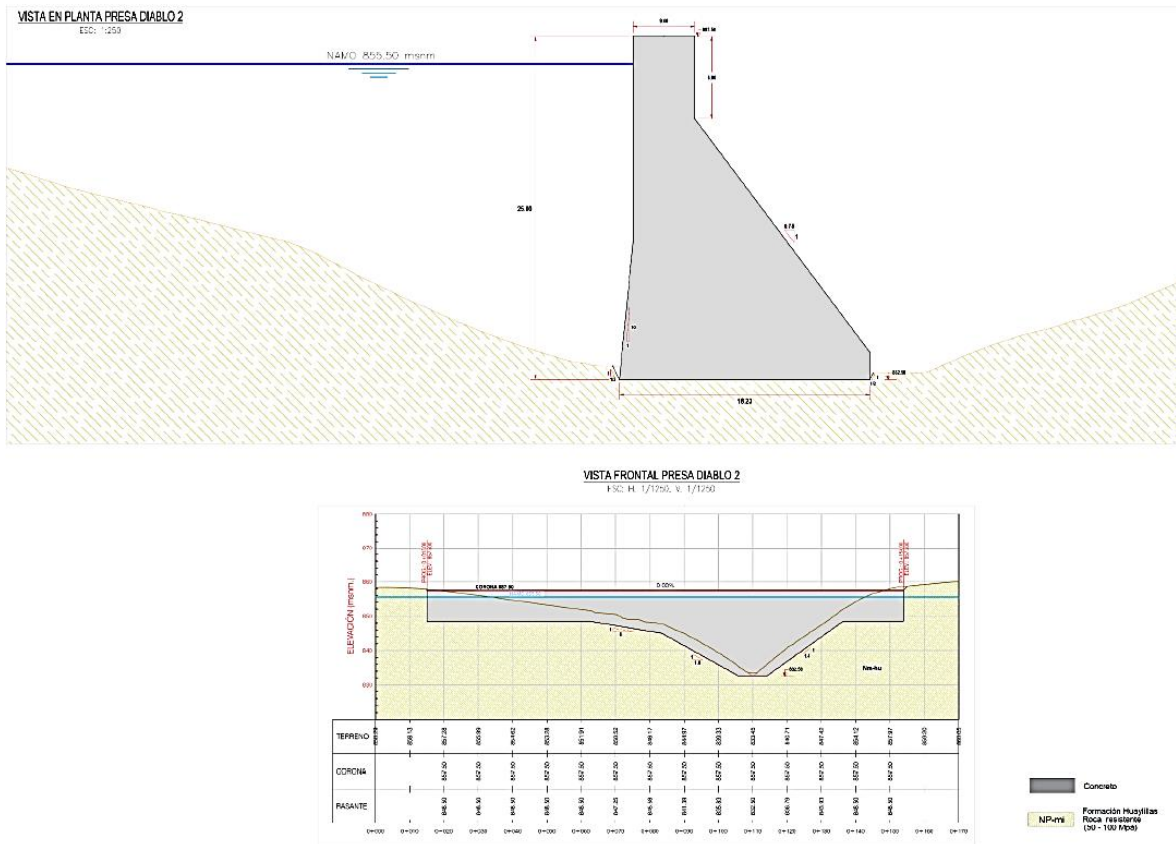


Figura 36. Sección predimensionada de la presa de retención de huacos PRH-D2 en la quebrada del Diablo

## **Conclusiones y recomendaciones**

### **Conclusiones**

Apoyados en la información de base, se realizó una comparación entre los efectos de una hipotética inundación que pudo haber ocurrido sin la presencia de un terraplén de tierra que eventualmente colapsó y con el terraplén que colapsó. Este último fue el hecho que dejó tres muertos, viviendas, edificio público e infraestructura afectados.

En un primer escenario se simuló suponiendo que el hidrograma entrante se enrutaba a través de la quebrada y hacia la ciudad de Tacna. El segundo escenario fue la recreación del evento ocurrido el 21 de febrero de 2020. Esto validado realizando una visita de campo para verificar las condiciones del sitio y se realizaron simulaciones hidrológicas e hidráulicas.

En el escenario en el que no se consideró el terraplén Camiara, la inundación en la ciudad de Tacna no produjo grandes áreas afectadas o fue poco significativamente profunda. Las velocidades eran bajas y los habitantes podrían haber sido advertidos ya que se detectó por primera vez la escorrentía y se tardó seis horas en alcanzar la descarga máxima.

El antiguo terraplén colocado sobre la quebrada del Diablo jugó un papel importante en la inundación de la ciudad de Tacna. La simulación del evento de ruptura de la presa arrojó resultados que de alguna manera reproducen los eventos del 21 de febrero de 2020. Las altas velocidades y profundidades pueden causar la destrucción que se observó en el área.

Esta investigación concluye que un pequeño aumento en la precipitación condujo a un gran desastre no por la magnitud o la intensidad de la precipitación, sino por la existencia de un terraplén que reprimió los flujos entrantes hasta que se desbordó, lo que provocó flujos más rápidos y profundos río abajo. Por lo tanto, no se debe construir un

nuevo terraplén a lo largo de la Quebrada del Diablo ya que puede constituir un peligro para los habitantes de la ciudad de Tacna.

Una conclusión importante, es que los asentamientos humanos situados cerca de la desembocadura de la quebrada del Diablo deben ser reubicados a una zona segura.

Como medida de mitigación del efecto destructivo de estos eventos hidrológicos anómalos, se plantea dos estructuras o diques de retención de flujo de escombros, con características elementales definidas de la siguiente manera, PRH-D1: Presa de tierra y enrocado para la retención de huaicos, con 24.00 m de altura. Dentro del esquema de obras, se tiene previsto la construcción de una captación y aliviadero para los caudales de excedencia de huaicos, seguido de un canal abierto de conducción hacia la cuenca vecina, localizado en la margen derecha. La PRH-D2: Presa de concreto-gravedad o concreto ciclópeo para la retención de huaicos en la quebrada del Diablo, con 25.00 m de altura. Dentro del esquema de obras, se tiene previsto la construcción de una captación y aliviadero para los caudales de excedencia de huaicos, seguido de un canal abierto de conducción hacia la cuenca vecina, localizado en la margen derecha.

### **Recomendaciones**

Se recomienda, ampliar los estudios a la quebrada Caramolle, contigua a la quebrada del Diablo, esta quebrada en el verano de 2020, también se activó y se estima que en un evento futuro de similar o mayor intensidad que el de 2020, los efectos en la zona norte de la ciudad de Tacna pueden ser devastadores.

## Referencias bibliográficas

- Aboutalebi, M., Torres-Rua, A. F., Kustas, W. P., Nieto, H., Coopmans, C., & McKee, M. (2019). Assessment of different methods for shadow detection in high-resolution optical imagery and evaluation of shadow impact on calculation of NDVI, and evapotranspiration. *Irrigation Science*, 37(3), 407–429. <https://doi.org/10.1007/s00271-018-0613-9>
- Alahacoon, N., & Edirisinghe, M. (2021). Spatial Variability of Rainfall Trends in Sri Lanka from 1989 to 2019 as an Indication of Climate Change. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10(2), 84. <https://doi.org/10.3390/ijgi10020084>
- Alaya-García, E., & Riquero-Miranda, W. G. (2021). Caracterización de los modelamientos hidráulicos numéricos de inundaciones fluviales, Cajamarca 2020. *Repositorio Institucional - UPN*. <https://renati.sunedu.gob.pe/handle/sunedu/3002726>
- Alvino, F. C. G., Aleman, C. C., Filgueiras, R., Althoff, D., & da Cunha, F. F. (2020). VEGETATION INDICES FOR IRRIGATED CORN MONITORING. *Engenharia Agrícola*, 40(3), 322–333. <https://doi.org/10.1590/1809-4430-eng.agric.v40n3p322-333/2020>
- Ansari-Amoli, A., Aghighi, H., & Lopez-Baeza, E. (2022). Drought Risk Evaluation in Iran by Using Geospatial Technologies. *Remote Sensing*, 14(13), 3096. <https://doi.org/10.3390/rs14133096>
- Ansari, M. S., Warner, J., Sukhwani, V., & Shaw, R. (2022). Implications of Flood Risk Reduction Interventions on Community Resilience: An Assessment of Community Perception in Bangladesh. *Climate*, 10(2), 20. <https://doi.org/10.3390/cli10020020>
- Ávila, L., Silveira, R., Campos, A., Rogiski, N., Gonçalves, J., Scortegagna, A., Freitas, C., Aver, C., & Fan, F. (2022). Comparative Evaluation of Five Hydrological Models in a Large-Scale and Tropical River Basin. *Water*, 14(19), 3013. <https://doi.org/10.3390/w14193013>
- Aya-Guillén, J. P. (2015). Estudio de suelos con fines de cimentación en las asociaciones de vivienda San Cristóbal, San Juan Bosco y San Fernando del sector VII del distrito Alto de la Alianza – Región Tacna. *Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann*. <http://repositorio.unjbg.edu.pe/handle/UNJBG/2817>
- Aybar-Camacho, C. L., Lavado-Casimiro, W., Huerta, A., Fernández Palomino, C., Vega-Jácome, F., Sabino Rojas, E., & Felipe-Obando, O. (2017). Uso del producto grillado PISCO de precipitación en estudios, investigaciones y sistemas operacionales de monitoreo y pronóstico hidrometeorológico. Nota Técnica N° 001 SENAMHI-DHI-2017. *Repositorio Institucional - SENAMHI*. <http://repositorio.senamhi.gob.pe/handle/20.500.12542/260>
- Azua-Bustos, A., Fairén, A. G., González-Silva, C., Ascaso, C., Carrizo, D., Fernández-Martínez, M. Á., Fernández-Sampedro, M., García-Descalzo, L., García-Villadangos, M., Martín-Redondo, M. P., Sánchez-García, L., Wierzchos, J., & Parro, V. (2018). Unprecedented rains decimate surface microbial communities in the hyperarid core of the Atacama Desert. *Scientific Reports*, 8(1), 16706. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-35051-w>
- Bhattacharya, B., Mazzoleni, M., & Ugay, R. (2019). Flood Inundation Mapping of the

- Sparsely Gauged Large-Scale Brahmaputra Basin Using Remote Sensing Products. *Remote Sensing*, 11(5), 501. <https://doi.org/10.3390/rs11050501>
- Borovoi, A. A., Mikhailov, L. P., Moiseev, I. S., & Radchenko, V. G. (1983). Soils and methods of constructing earth dams. *Hydrotechnical Construction*, 17(6), 333–339. <https://doi.org/10.1007/BF01427189>
- Calista, M., Menna, V., Mancinelli, V., Sciarra, N., & Miccadei, E. (2020). Rockfall and Debris Flow Hazard Assessment in the SW Escarpment of Montagna del Morrone Ridge (Abruzzo, Central Italy). *Water*, 12(4), 1206. <https://doi.org/10.3390/w12041206>
- Cantonati, M., Lichtenwöhler, K., Leonhardt, G., Seifert, L., Mustoni, A., Hotzy, R., Schubert, E., Blattner, L., Bilous, O., Lotz, A., Poschlod, B., & Gerecke, R. (2022). Using Springs as Sentinels of Climate Change in Nature Parks North and South of the Alps: A Critical Evaluation of Methodological Aspects and Recommendations for Long-Term Monitoring. *Water*, 14(18), 2843. <https://doi.org/10.3390/w14182843>
- CENEPRED. (2018). *Glosario de Términos*.
- Chen, Z., Kong, F., & Zhang, M. (2022). A Case Study of the “7-20” Extreme Rainfall and Flooding Event in Zhengzhou, Henan Province, China from the Perspective of Fragmentation. *Water*, 14(19), 2970. <https://doi.org/10.3390/w14192970>
- Cheon, E., Lee, S.-R., & Lee, D.-H. (2020). Hazard Assessment Based on the Combination of DAN3D and Machine Learning Method for Planning Closed-Type Barriers against Debris-Flow. *Water*, 12(1), 170. <https://doi.org/10.3390/w12010170>
- Choque-Huanca, R., Mamani-Ccantuta, D. R., & Vilcanqui Alarcón, A. N. (2020). Determinación de la faja marginal del río Caplina en el distrito de Pachia y Calana mediante modelamiento hidráulico. *INGENIERÍA INVESTIGA*, 2(2), 388–404. <https://doi.org/10.47796/ing.v2i2.413>
- Curtis, S., Crawford, T., Rahman, M., Paul, B., Miah, M., Islam, M., & Patel, M. (2018). A Hydroclimatological Analysis of Precipitation in the Ganges–Brahmaputra–Meghna River Basin. *Water*, 10(10), 1359. <https://doi.org/10.3390/w10101359>
- da Cruz e Sousa, R., & Miranda, O. L. (2018). Incorporating wetlands in hydrologic and hydraulic models for flood zone delineation: An application to Durán, Ecuador. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 28, 375–383. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2018.03.023>
- Daher, B., Hamie, S., Pappas, K., Nahidul Karim, M., & Thomas, T. (2021). Toward Resilient Water-Energy-Food Systems under Shocks: Understanding the Impact of Migration, Pandemics, and Natural Disasters. *Sustainability*, 13(16), 9402. <https://doi.org/10.3390/su13169402>
- De Luca, D. L., Apollonio, C., & Petroselli, A. (2022). The Benefit of Continuous Hydrological Modelling for Drought Hazard Assessment in Small and Coastal Ungauged Basins: A Case Study in Southern Italy. *Climate*, 10(3), 34. <https://doi.org/10.3390/cli10030034>
- Deser, C. (2020). “Certain Uncertainty: The Role of Internal Climate Variability in Projections of Regional Climate Change and Risk Management.” *Earth’s Future*, 8(12). <https://doi.org/10.1029/2020EF001854>

- Díez-Herrero, A., & Garrote, J. (2020). Flood Risk Analysis and Assessment, Applications and Uncertainties: A Bibliometric Review. *Water*, 12(7), 2050. <https://doi.org/10.3390/w12072050>
- Domeneghetti, A., Schumann, G. J.-P., & Tarpanelli, A. (2019). Preface: Remote Sensing for Flood Mapping and Monitoring of Flood Dynamics. *Remote Sensing*, 11(8), 943. <https://doi.org/10.3390/rs11080943>
- Duan, Y., Xiong, J., Cheng, W., Li, Y., Wang, N., Shen, G., & Yang, J. (2022). Increasing Global Flood Risk in 2005–2020 from a Multi-Scale Perspective. *Remote Sensing*, 14(21), 5551. <https://doi.org/10.3390/rs14215551>
- Espinoza-Molina, J., Acosta-Caipa, K., Chambe-Vega, E., Huayna, G., Pino-Vargas, E., & Abad, J. (2022). Spatiotemporal Analysis of Urban Heat Islands in Relation to Urban Development, in the Vicinity of the Atacama Desert. *Climate*, 10(6), 87. <https://doi.org/10.3390/cli10060087>
- Ferreira, G. W. S., & Reboita, M. S. (2022). A New Look into the South America Precipitation Regimes: Observation and Forecast. *Atmosphere*, 13(6), 873. <https://doi.org/10.3390/atmos13060873>
- Fidel-Smoll, L., Villacorta-Chambi, S. P., Zavala-Carrión, B. L., Vílchez-Mata, M. S., Valderrama Murillo, P. A., Núñez Juárez, S., Luque Poma, G., Rosado Seminario, M., Medina Allecca, L., Vásquez Acuña, J. M., & Ochoa Zubiata, M. B. (2010). Mapa de susceptibilidad por movimientos en masa del Perú. *Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico – INGEMMET*. <https://repositorio.ingemmet.gob.pe/handle/20.500.12544/2906>
- Frisancho-Camero, F. L. (2015). Análisis de vulnerabilidad mediante modelamiento hidrodinámico del cauce del río seco del Cono Sur de la ciudad de Tacna. *Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann*. <http://repositorio.unjbg.edu.pe/handle/UNJBG/1024>
- Gaagai, A., Aouissi, H. A., Krauklis, A. E., Burlakovs, J., Athamena, A., Zekker, I., Boudoukha, A., Benaabidate, L., & Chenchouni, H. (2022). Modeling and Risk Analysis of Dam-Break Flooding in a Semi-Arid Montane Watershed: A Case Study of the Yabous Dam, Northeastern Algeria. *Water*, 14(5), 767. <https://doi.org/10.3390/w14050767>
- Gaber, A., Abdelkareem, M., Abdelsadek, I., Koch, M., & El-Baz, F. (2018). Using InSAR Coherence for Investigating the Interplay of Fluvial and Aeolian Features in Arid Lands: Implications for Groundwater Potential in Egypt. *Remote Sensing*, 10(6), 832. <https://doi.org/10.3390/rs10060832>
- Gao, C., Huang, C., Wang, J., & Li, Z. (2021). Modelling Dynamic Hydrological Connectivity in the Zoigê Area (China) Based on Multi-Temporal Surface Water Observation. *Remote Sensing*, 14(1), 145. <https://doi.org/10.3390/rs14010145>
- Garreaud, R., Vuille, M., & Clement, A. C. (2003). The climate of the Altiplano: observed current conditions and mechanisms of past changes. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 194(1–3), 5–22. [https://doi.org/10.1016/S0031-0182\(03\)00269-4](https://doi.org/10.1016/S0031-0182(03)00269-4)
- Gong, L., Tang, C., Xiong, J., & Li, N. (2020). Debris Flow Generation Based on Critical Discharge: A Case Study of Xiongmao Catchment, Southwestern China. *Water*, 12(2), 552. <https://doi.org/10.3390/w12020552>

- Gutkowski, S., & Larkin, C. (2021). Spiritual ambiguity in interfaith humanitarianism: Local faith communities, Syrian refugees, and Muslim–Christian encounters in Lebanon and Jordan. *Migration Studies*, 9(3), 1054–1074. <https://doi.org/10.1093/migration/mnab024>
- Hansen, M. C., Potapov, P. V, Pickens, A. H., Tyukavina, A., Hernandez-Serna, A., Zalles, V., Turubanova, S., Kommareddy, I., Stehman, S. V, Song, X.-P., & Kommareddy, A. (2022). Global land use extent and dispersion within natural land cover using Landsat data. *Environmental Research Letters*, 17(3), 034050. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac46ec>
- Hashim, B. M., Al Maliki, A., Sultan, M. A., Shahid, S., & Yaseen, Z. M. (2022). Effect of land use land cover changes on land surface temperature during 1984–2020: a case study of Baghdad city using landsat image. *Natural Hazards*, 112(2), 1223–1246. <https://doi.org/10.1007/s11069-022-05224-y>
- Houston, J., & Hartley, A. J. (2003). The central Andean west-slope rainshadow and its potential contribution to the origin of hyper-aridity in the Atacama Desert. *International Journal of Climatology*, 23(12), 1453–1464. <https://doi.org/10.1002/joc.938>
- Huang, Y., Sun, J., & Zhu, C. (2022). Mechanism and Prevention of Debris Flow Disaster. *Water*, 14(7), 1143. <https://doi.org/10.3390/w14071143>
- Irma, S. M., Coaquira Ticona, E., & Vilcanqui Alarcón, A. N. (2021). Modelo hidráulico para delimitación de faja marginal río Caplina Sector Río Seco, distrito G. Albarracín L. - Tacna - 2020. *INGENIERÍA INVESTIGA*, 3(1), 534–545. <https://doi.org/10.47796/ing.v3i1.479>
- Jiang, H., Zou, Q., Zhou, B., Hu, Z., Li, C., Yao, S., & Yao, H. (2022). Susceptibility Assessment of Debris Flows Coupled with Ecohydrological Activation in the Eastern Qinghai-Tibet Plateau. *Remote Sensing*, 14(6), 1444. <https://doi.org/10.3390/rs14061444>
- Jin, H., Rui, X., & Li, X. (2022). Analysing the Performance of Four Hydrological Models in a Chinese Arid and Semi-Arid Catchment. *Sustainability*, 14(6), 3677. <https://doi.org/10.3390/su14063677>
- Kong, Y., Pang, Z., & Froehlich, K. (2013). Quantifying recycled moisture fraction in precipitation of an arid region using deuterium excess. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 65(1), 19251. <https://doi.org/10.3402/tellusb.v65i0.19251>
- Kumar, L., & Mutanga, O. (2018). Google Earth Engine Applications Since Inception: Usage, Trends, and Potential. *Remote Sensing*, 10(10), 1509. <https://doi.org/10.3390/rs10101509>
- Lee, S., & Kwon, H. (2022). Breaking the Negative Feedback Loop of Disaster, Conflict, and Fragility: Analyzing Development Aid by Japan and South Korea. *Sustainability*, 14(16), 10003. <https://doi.org/10.3390/su141610003>
- Li, Z., Chen, M., Gao, S., Luo, X., Gourley, J. J., Kirstetter, P., Yang, T., Kolar, R., McGovern, A., Wen, Y., Rao, B., Yami, T., & Hong, Y. (2021). CREST-iMAP v1.0: A fully coupled hydrologic-hydraulic modeling framework dedicated to flood inundation mapping and prediction. *Environmental Modelling & Software*, 141, 105051. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2021.105051>
- Lioubimtseva, E., Cole, R., Adams, J. M., & Kapustin, G. (2005). Impacts of climate and

- land-cover changes in arid lands of Central Asia. *Journal of Arid Environments*, 62(2), 285–308. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2004.11.005>
- Luque-Poma, G. (2016). Zonas críticas por peligros geológicos en la región Tacna. *Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico – INGEMMET*. <https://repositorio.ingemmet.gob.pe/handle/20.500.12544/2028>
- Luque-Poma, G., & Gomez-Velásquez, H. D. (2016). Evaluación geológica - geodinámica en la Quebrada del Diablo. Región Tacna, provincia Tacna, distrito Alto de la Alianza, paraje Quebrada del Diablo. *Repositorio Institucional INGEMMET*. <https://repositorio.ingemmet.gob.pe/handle/20.500.12544/1193>
- Malou, T., Garambois, P.-A., Paris, A., Monnier, J., & Larnier, K. (2021). Generation and analysis of stage-fall-discharge laws from coupled hydrological-hydraulic river network model integrating sparse multi-satellite data. *Journal of Hydrology*, 603, 126993. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126993>
- Marengo, J. A., Jones, R., Alves, L. M., & Valverde, M. C. (2009). Future change of temperature and precipitation extremes in South America as derived from the PRECIS regional climate modeling system. *International Journal of Climatology*, 29(15), 2241–2255. <https://doi.org/10.1002/joc.1863>
- Martin, S. F., Bergmann, J., Rigaud, K. K., & Yameogo, N. D. (2021). Climate change, human mobility, and development. *Migration Studies*, 9(1), 142–149. <https://doi.org/10.1093/migration/mnaa030>
- Mayta-Rojas, C. A., & Mamani-Maquera, E. R. (2018). Modelación Hidráulica de la Defensa de Calana con el Fin de Determinar la Vulnerabilidad ante Máximas Avenidas. *Universidad Privada de Tacna*. <http://repositorio.upt.edu.pe/handle/20.500.12969/549>
- Miklin, L., Podolszki, L., Gulam, V., & Markotić, I. (2022). The Impact of Climate Changes on Slope Stability and Landslide Conditioning Factors: An Example from Kravarsko, Croatia. *Remote Sensing*, 14(8), 1794. <https://doi.org/10.3390/rs14081794>
- Mohammadpour, A., Gharehchahi, E., Badeenezhad, A., Parseh, I., Khaksefidi, R., Golaki, M., Dehbandi, R., Azhdarpoor, A., Derakhshan, Z., Rodriguez-Chueca, J., & Giannakis, S. (2022). Nitrate in Groundwater Resources of Hormozgan Province, Southern Iran: Concentration Estimation, Distribution and Probabilistic Health Risk Assessment Using Monte Carlo Simulation. *Water*, 14(4), 564. <https://doi.org/10.3390/w14040564>
- Mutanga, O., & Kumar, L. (2019). Google Earth Engine Applications. *Remote Sensing*, 11(5), 591. <https://doi.org/10.3390/rs11050591>
- Muzamil, S. A. H. B. S., Zainun, N. Y., Ajman, N. N., Sulaiman, N., Khahro, S. H., Rohani, M. M., Mohd, S. M. B., & Ahmad, H. (2022). Proposed Framework for the Flood Disaster Management Cycle in Malaysia. *Sustainability*, 14(7), 4088. <https://doi.org/10.3390/su14074088>
- Narvaez-Montoya, C., Torres-Martínez, J. A., Pino-Vargas, E., Cabrera-Olivera, F., Loge, F. J., & Mahlknecht, J. (2022). Predicting adverse scenarios for a transboundary coastal aquifer system in the Atacama Desert (Peru/Chile). *Science of The Total Environment*, 806, 150386. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150386>

- Nieto, H., Kustas, W. P., Torres-Rúa, A., Alfieri, J. G., Gao, F., Anderson, M. C., White, W. A., Song, L., Alsina, M. del M., Prueger, J. H., McKee, M., Elarab, M., & McKee, L. G. (2019). Evaluation of TSEB turbulent fluxes using different methods for the retrieval of soil and canopy component temperatures from UAV thermal and multispectral imagery. *Irrigation Science*, 37(3), 389–406. <https://doi.org/10.1007/s00271-018-0585-9>
- Noy, I., & Yonson, R. (2018). Economic Vulnerability and Resilience to Natural Hazards: A Survey of Concepts and Measurements. *Sustainability*, 10(8), 2850. <https://doi.org/10.3390/su10082850>
- Oncebay, G. G. J., & Cunurana, G. R. R. (2021). *Propuesta de un modelo de gestión de riesgos para prevenir desastres naturales ocasionado por huaycos en el sector de la Quebrada del Diablo - Tacna 2021*.
- Page, B. (2021). Towards a psychoanalytic migration studies: A son, a brother, a father, an American, and his house in a Cameroonian village. *Migration Studies*, 9(3), 1195–1214. <https://doi.org/10.1093/migration/mnab027>
- Pareja-Dominguez, M. A., Pascual-Figueroa, H. D., & Silva-Dávila, M. R. (2022). *Evaluation of the Effectiveness of Flexible Debris Flow Barriers for Control of Huaycos Using Satellite Images and GIS, in the Basin of Rímac River, Perú* (pp. 29–41). [https://doi.org/10.1007/978-981-16-6140-2\\_4](https://doi.org/10.1007/978-981-16-6140-2_4)
- Pastick, N., Wylie, B., & Wu, Z. (2018). Spatiotemporal Analysis of Landsat-8 and Sentinel-2 Data to Support Monitoring of Dryland Ecosystems. *Remote Sensing*, 10(5), 791. <https://doi.org/10.3390/rs10050791>
- Paulhus, J. L. H., & Kohler, M. A. (1952). INTERPOLATION OF MISSING PRECIPITATION RECORDS. *Monthly Weather Review*, 80(8), 129–133. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1952\)080<0129:IOMPR>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1952)080<0129:IOMPR>2.0.CO;2)
- Pérez-Montiel, J. I., Cardenas-Mercado, L., & Nardini, A. G. C. (2022). Flood Modeling in a Coastal Town in Northern Colombia: Comparing MODCEL vs. IBER. *Water*, 14(23), 3866. <https://doi.org/10.3390/w14233866>
- Pérez, J. I., Escobar, J. R., & Fragozo, J. M. (2018). Modelación Hidráulica 2D de Inundaciones en Regiones con Escasez de Datos. El Caso del Delta del Río Ranchería, Riohacha-Colombia. *Información Tecnológica*, 29(4), 143–156. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642018000400143>
- Pino-Vargas, E., & Ascencios-Templo, D. (2021). THE IMPLEMENTATION THE CLOSURE AS A TOOL TO CONTROL THE DEGRADATION OF THE COASTAL AQUIFER LA YARADA, TACNA, PERU. *Dialogo Andino*, 66. <https://doi.org/10.4067/S0719-26812021000300489>
- Pino-Vargas, E., Chávarri-Velarde, E., Ingol-Blanco, E., Mejía, F., Cruz, A., & Vera, A. (2022). Impacts of Climate Change and Variability on Precipitation and Maximum Flows in Devil's Creek, Tacna, Peru. *Hydrology*, 9(1), 10. <https://doi.org/10.3390/hydrology9010010>
- Pino-Vargas, E. M., & Huayna, G. (2022). Spatial and temporal evolution of olive cultivation due to pest attack, using remote sensing and satellite image processing. *Scientia Agropecuaria*, 13(2), 149–157. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2022.013>
- Pino, E. (2019). El acuífero costero La Yarada, después de 100 años de explotación como

- sustento de una agricultura en zonas áridas: una revisión histórica. *Idesia*, 37(3), 39–45. <https://doi.org/10.4067/S0718-34292019000300039>
- Pino, E., & Chávarri, E. (2022). Evidencias de cambio climático en la región hiperárida de la Costa sur de Perú, cabecera del Desierto de Atacama. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 13(1), 1–34. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2022-01-08>
- Pino, E., Ramos, L., Mejía, J., Chávarri, E., & Ascencios, D. (2020). Mitigation measures for the La Yarada coastal aquifer, an overexploited system in arid areas. *Idesia*, 38(3). <https://doi.org/10.4067/S0718-34292020000300021>
- Quesada-Román, A. (2022). Disaster Risk Assessment of Informal Settlements in the Global South. *Sustainability*, 14(16), 10261. <https://doi.org/10.3390/su141610261>
- Ramadan, E. M., Shahin, H. A., Abd-Elhamid, H. F., Zelenakova, M., & Eldeeb, H. M. (2022). Evaluation and Mitigation of Flash Flood Risks in Arid Regions: A Case Study of Wadi Sudr in Egypt. *Water*, 14(19), 2945. <https://doi.org/10.3390/w14192945>
- Ramos-Solórzano, J. A. (2021). Comparación de un Modelamiento Hidraulico del Sistema de Alcantarillado con y sin el Programa Pipe en Autocad Civil. *Repositorio Institucional - UPLA*. <https://renati.sunedu.gob.pe/handle/sunedu/2888528>
- Rau, P., Bourrel, L., Labat, D., Melo, P., Dewitte, B., Frappart, F., Lavado, W., & Felipe, O. (2017). Regionalization of rainfall over the Peruvian Pacific slope and coast. *International Journal of Climatology*, 37(1), 143–158. <https://doi.org/10.1002/joc.4693>
- Raza, A., Razzaq, A., Mehmood, S., Zou, X., Zhang, X., Lv, Y., & Xu, J. (2019). Impact of Climate Change on Crops Adaptation and Strategies to Tackle Its Outcome: A Review. *Plants*, 8(2), 34. <https://doi.org/10.3390/plants8020034>
- Reboita, M. S., da Rocha, R. P., Souza, C. A. de, Baldoni, T. C., Silva, P. L. L. da S., & Ferreira, G. W. S. (2022). Future Projections of Extreme Precipitation Climate Indices over South America Based on CORDEX-CORE Multimodel Ensemble. *Atmosphere*, 13(9), 1463. <https://doi.org/10.3390/atmos13091463>
- Ritter, B., Wennrich, V., Medialdea, A., Brill, D., King, G., Schneiderwind, S., Niemann, K., Fernández-Galego, E., Diederich, J., Rolf, C., Bao, R., Melles, M., & Dunai, T. J. (2019). “Climatic fluctuations in the hyperarid core of the Atacama Desert during the past 215 ka.” *Scientific Reports*, 9(1), 5270. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-41743-8>
- Rodríguez Valdivia, A., Albornoz Espinoza, C., & Tapia Tosetti, A. (2017). Geomorfología del área de Putre, andes del norte de Chile: acción volcánica y climática en su modelado. *Diálogo Andino*, 54, 7–20. <https://doi.org/10.4067/S0719-26812017000300007>
- Roldán, F., Salazar, I., González, G., Roldán, W., & Toro, N. (2022). Flow-Type Landslides Analysis in Arid Zones: Application in La Chimba Basin in Antofagasta, Atacama Desert (Chile). *Water*, 14(14), 2225. <https://doi.org/10.3390/w14142225>
- Rosli, M. I., Che Ros, F., Razak, K. A., Ambran, S., Kamaruddin, S. A., Nor Anuar, A., Marto, A., Tobita, T., & Ono, Y. (2021). Modelling Debris Flow Runout: A Case Study on the Mesilau Watershed, Kundasang, Sabah. *Water*, 13(19), 2667. <https://doi.org/10.3390/w13192667>
- Sacachipana-Berrios, J. J. (2019). Modelamiento hidráulico bidimensional de la

- bocatoma Jila San Jeronimo con HEC – RAS. *Universidad Nacional Del Altiplano*. <https://renati.sunedu.gob.pe/handle/sunedu/3218921>
- Samanta, S., Koloa, C., Kumar Pal, D., & Palsamanta, B. (2016). Flood Risk Analysis in Lower Part of Markham River Based on Multi-Criteria Decision Approach (MCDA). *Hydrology*, 3(3), 29. <https://doi.org/10.3390/hydrology3030029>
- Santana, L. S., Ferraz, G. A. e S., Marin, D. B., Faria, R. de O., Santana, M. S., Rossi, G., & Palchetti, E. (2022). Digital Terrain Modelling by Remotely Piloted Aircraft: Optimization and Geometric Uncertainties in Precision Coffee Growing Projects. *Remote Sensing*, 14(4), 911. <https://doi.org/10.3390/rs14040911>
- Sarricolea-Espinoza, P., & Romero-Aravena, H. (2015). Variabilidad y cambios climáticos observados y esperados en el Altiplano del norte de Chile. *Revista de Geografía Norte Grande*, 62, 169–183. <https://doi.org/10.4067/S0718-34022015000300010>
- Sarricolea, P., Herrera-Ossandon, M., & Meseguer-Ruiz, Ó. (2017). Climatic regionalisation of continental Chile. *Journal of Maps*, 13(2), 66–73. <https://doi.org/10.1080/17445647.2016.1259592>
- Sarricolea, P., Meseguer-Ruiz, O., & Romero-Aravena, H. (2017). Tendencias de la precipitación en el norte grande de Chile y su relación con las proyecciones de cambio climático. *Diálogo Andino*, 54, 41–50. <https://doi.org/10.4067/S0719-26812017000300041>
- Savio, A. A. Del, Astocahuana, S. I. Q., & Navarro, L. F. C. (2019). Numerical Simulation of Debris Flows of the Catastrophic Event of February 2019 in Mirave – Peru. *Ambiente e Agua - An Interdisciplinary Journal of Applied Science*, 14(6), 1. <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2437>
- Schwindt, S., Franca, M. J., Reffo, A., & Schleiss, A. J. (2018). Sediment traps with guiding channel and hybrid check dams improve controlled sediment retention. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18(2), 647–668. <https://doi.org/10.5194/nhess-18-647-2018>
- Shmelev, S. E., Salnikov, V., Turulina, G., Polyakova, S., Tazhibayeva, T., Schnitzler, T., & Shmeleva, I. A. (2021). Climate Change and Food Security: The Impact of Some Key Variables on Wheat Yield in Kazakhstan. *Sustainability*, 13(15), 8583. <https://doi.org/10.3390/su13158583>
- Singh, N. P., Anand, B., Srivastava, S. K., Kumar, N. R., Sharma, S., Bal, S. K., Rao, K. V., & Prabhakar, M. (2022). Risk, perception and adaptation to climate change: evidence from arid region, India. *Natural Hazards*, 112(2), 1015–1037. <https://doi.org/10.1007/s11069-022-05216-y>
- Ticehurst, C., Teng, J., & Sengupta, A. (2022). Development of a Multi-Index Method Based on Landsat Reflectance Data to Map Open Water in a Complex Environment. *Remote Sensing*, 14(5), 1158. <https://doi.org/10.3390/rs14051158>
- Tobler, C., Visschers, V. H. M., & Siegrist, M. (2012). Addressing climate change: Determinants of consumers' willingness to act and to support policy measures. *Journal of Environmental Psychology*, 32(3), 197–207. <https://doi.org/10.1016/j.jenvp.2012.02.001>
- Tsangari, H., Paschalidou, A. K., Kassomenos, A. P., Vardoulakis, S., Heaviside, C., Georgiou, K. E., & Yamasaki, E. N. (2016). Extreme weather and air pollution

- effects on cardiovascular and respiratory hospital admissions in Cyprus. *Science of The Total Environment*, 542, 247–253. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.10.106>
- Turconi, L., Tropeano, D., Savio, G., Bono, B., De, S. K., Frasca, M., & Luino, F. (2022). Torrential Hazard Prevention in Alpine Small Basin through Historical, Empirical and Geomorphological Cross Analysis in NW Italy. *Land*, 11(5), 699. <https://doi.org/10.3390/land11050699>
- Turpo-Cayo, E. Y., Borja, M. O., Espinoza-Villar, R., Moreno, N., Camargo, R., Almeida, C., Hopfgartner, K., Yarleque, C., & Souza, C. M. (2022). Mapping Three Decades of Changes in the Tropical Andean Glaciers Using Landsat Data Processed in the Earth Engine. *Remote Sensing*, 14(9), 1974. <https://doi.org/10.3390/rs14091974>
- Velásquez-Chávez, A. A. (2015). Modelamiento hidrológico e hidráulico del río santa, tramo asentamiento humano las flores, distrito de Carhuaz, Ancash. *Universidad Nacional Agraria La Molina*. <http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/20.500.12996/1836>
- Vera, A., Pino-Vargas, E., Verma, M. P., Chucuya, S., Chávarri, E., Canales, M., Torres-Martínez, J. A., Mora, A., & Mahlknecht, J. (2021). Hydrodynamics, Hydrochemistry, and Stable Isotope Geochemistry to Assess Temporal Behavior of Seawater Intrusion in the La Yarada Aquifer in the Vicinity of Atacama Desert, Tacna, Peru. *Water*, 13(22), 3161. <https://doi.org/10.3390/w13223161>
- Vilcanqui-Alarcón, A., Pino-Vargas, E., & Vargas-Bernuy, J. (2022). Geomorphological alteration in relation to anthropic actions in the Caplina riverbed, Tacna, Peru. *Agroindustrial Science*, 12(1), 47–58. <https://doi.org/10.17268/agroind.sci.2022.01.06>
- Villacorta, S. P., Evans, K. G., Nakatani, K., & Villanueva, I. (2020). Large debris flows in Chosica, Lima, Peru: the application of hydraulic infrastructure for erosion control and disaster prevention. *Australian Journal of Earth Sciences*, 67(3), 425–436. <https://doi.org/10.1080/08120099.2020.1690577>
- Wang, J., Li, D., Cao, W., Lou, X., Shi, A., & Zhang, H. (2022). Remote Sensing Analysis of Erosion in Arctic Coastal Areas of Alaska and Eastern Siberia. *Remote Sensing*, 14(3), 589. <https://doi.org/10.3390/rs14030589>
- Wang, Z., Cui, Z., He, T., Tang, Q., Xiao, P., Zhang, P., & Wang, L. (2021). Attributing the Evapotranspiration Trend in the Upper and Middle Reaches of Yellow River Basin Using Global Evapotranspiration Products. *Remote Sensing*, 14(1), 175. <https://doi.org/10.3390/rs14010175>
- Yusoff, S., & Yusoff, N. H. (2022). Disaster Risks Management through Adaptive Actions from Human-Based Perspective: Case Study of 2014 Flood Disaster. *Sustainability*, 14(12), 7405. <https://doi.org/10.3390/su14127405>
- Zhang, B. . (2000). Asymptotic behavior of solutions of certain difference equations. *Applied Mathematics Letters*, 13(1), 13–18. [https://doi.org/10.1016/S0893-9659\(99\)00138-X](https://doi.org/10.1016/S0893-9659(99)00138-X)
- Zhang, K., Shalehy, M. H., Ezaz, G. T., Chakraborty, A., Mohib, K. M., & Liu, L. (2022). An integrated flood risk assessment approach based on coupled hydrological-hydraulic modeling and bottom-up hazard vulnerability analysis. *Environmental*

*Modelling & Software*, 148, 105279. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2021.105279>

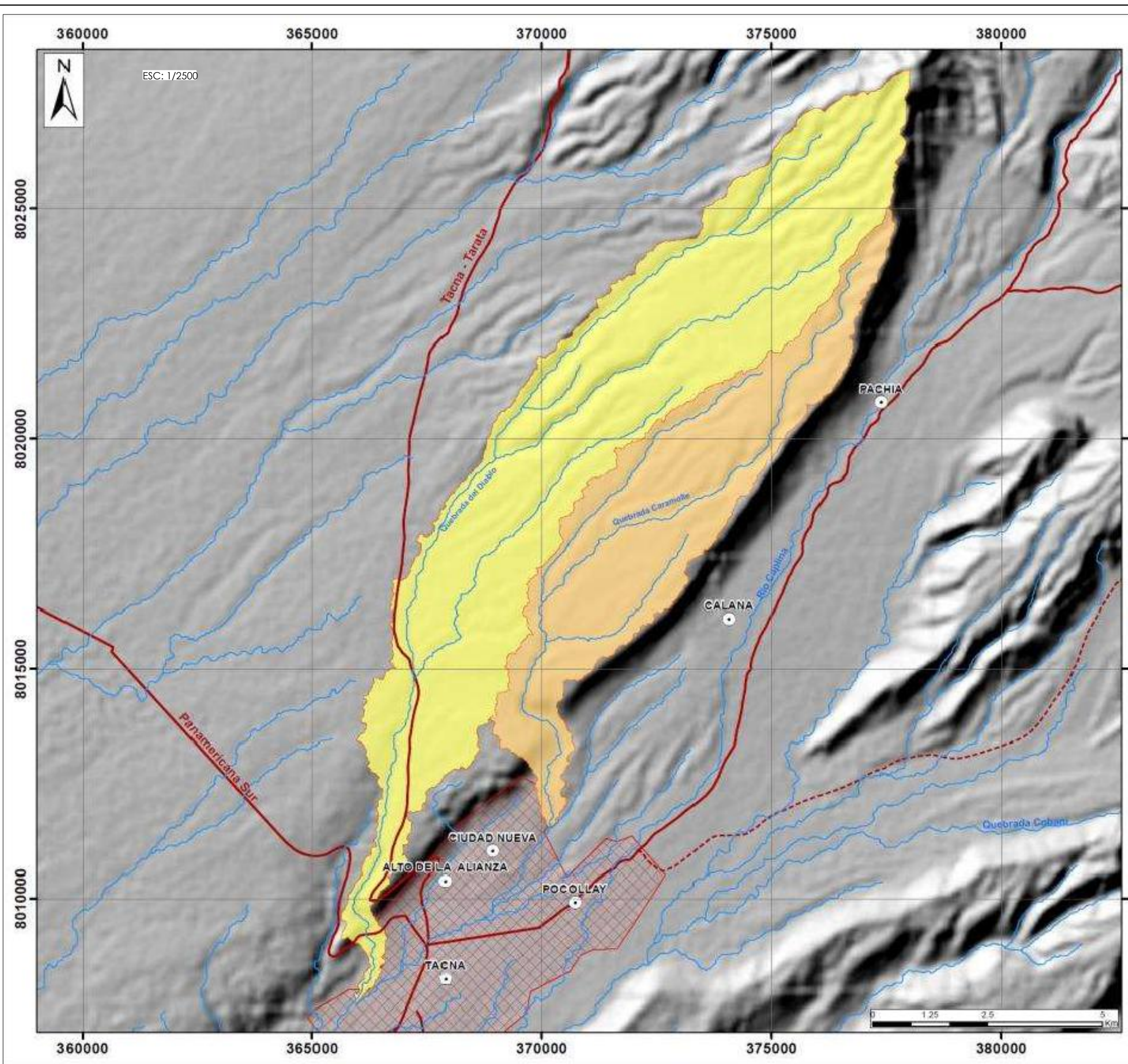
Zhang, L., Dai, Y., Lin, J., Han, J., Sun, X., Li, X., Liu, P., & Liao, A. (2022). Evaluating Spatiotemporal Variations of Groundwater–Surface Water Interaction Using an Integrated Hydrological Model in Huashan Basin, China. *Sustainability*, 14(21), 14325. <https://doi.org/10.3390/su142114325>

Zhang, S., Li, Y., Ma, M., Song, T., & Song, R. (2018). Storm Water Management and Flood Control in Sponge City Construction of Beijing. *Water*, 10(8), 1040. <https://doi.org/10.3390/w10081040>

Zhou, Y., Yue, D., Liang, G., Li, S., Zhao, Y., Chao, Z., & Meng, X. (2022). Risk Assessment of Debris Flow in a Mountain-Basin Area, Western China. *Remote Sensing*, 14(12), 2942. <https://doi.org/10.3390/rs14122942>

## **Anexos**

Mapa de Ubicación.....	U-01
Esquema Hidráulico - Presa de retención y aliviadero del Diablo 1.....	L-01
Vista en Planta de Embalse - Presa de retención Diablo 1.....	L-02
Vista en Planta y Perfil Longitudinal - Presa de retención Diablo 1.....	L-03
Sección Típica y Vista Frontal – Presa de retención Diablo 1.....	L-04
Esquema Hidráulico - Presa de retención y aliviadero del Diablo 2.....	L-05
Vista en Planta de Embalse - Presa de retención Diablo 2.....	L-06
Vista en Planta y Perfil Longitudinal - Presa de retención Diablo 2.....	L-07
Sección Típica y Vista Frontal – Presa de retención Diablo 2.....	L-08



ESCALA: 1:2.500.000

**SIMBOLOGÍA**

- Capital de departamento
- Capital de distrito
- Red Hidrográfica

**Tipo de Vías**

- Via Asfaltada
- - - Trocha Carrosable
- Q1 Quebrada del Diablo
- Q2 Quebrada Caramolle
- ▨ Casco Urbano

**INGEMMET**  
 INSTITUTO GEOLOGICO, MINERO Y METALURGICO

DISTRITO ALTO DE LA ALIANZA  
**MAPA DE UBICACIÓN**  
 SECTOR QUEBRADA DEL DIABLO

Version Digital 2015

0 1 2 3 Km

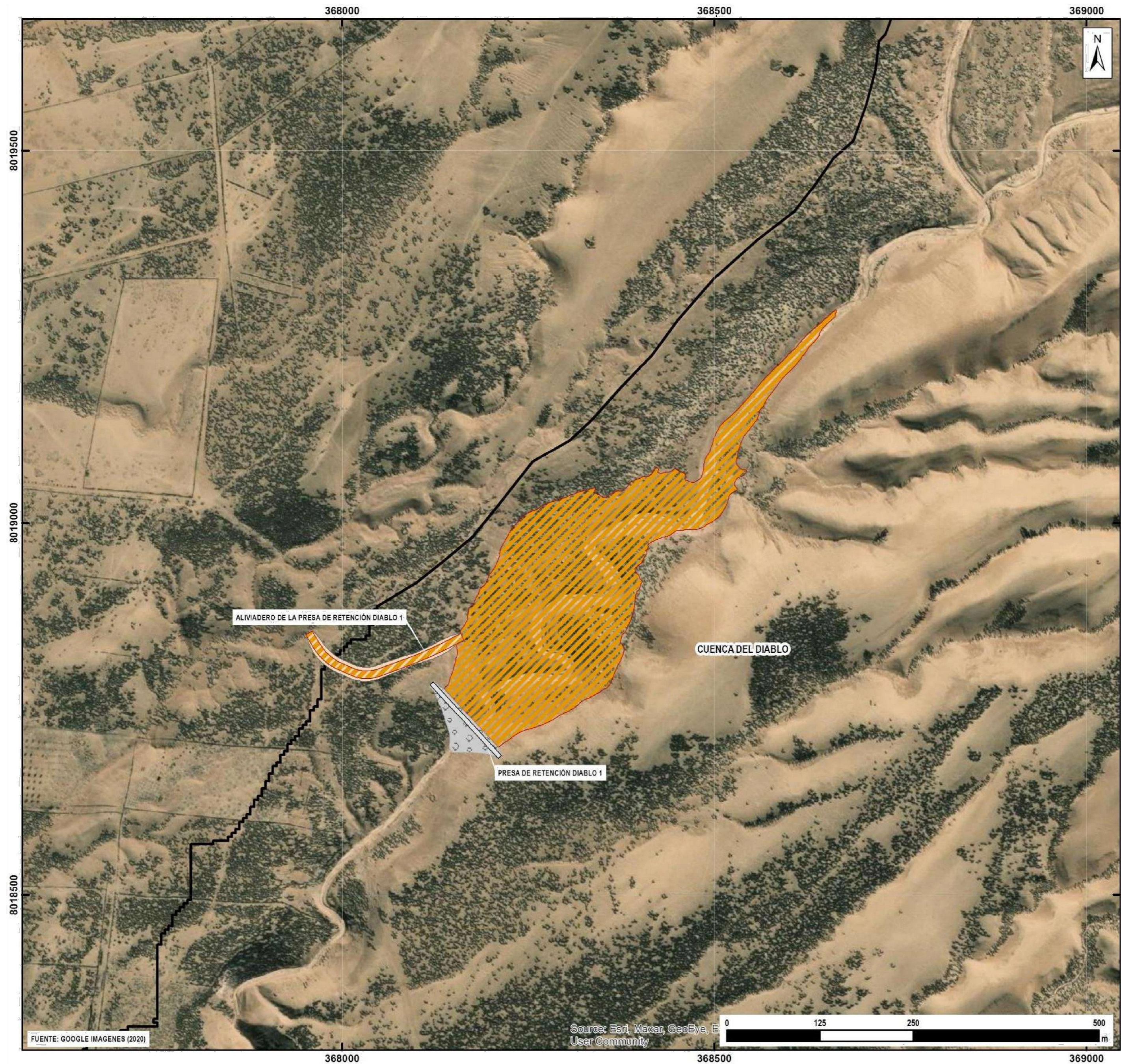
**01**



UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN  
 FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA  
 ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL



"MODELAMIENTO HIDRAULICO PARA DETERMINAR EL  
 PREDIMENSIONAMIENTO DE DIQUES DE ENCAJAMIENTO  
 EN LA QUEBRADA DEL DIABLO, REGION TACNA"



**UBICACIÓN DEPARTAMENTAL**



**UBICACIÓN PROVINCIAL**



**UBICACIÓN DISTRITAL**



UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

DEPARTAMENTO: TACNA  
PROVINCIA: TACNA  
DISTRITO: ALTO DE LA ALIANZA, CIUDAD NUEVA  
ESCALA INDICADA  
PLANO: ESQUEMA HIDRAULICO - PRESA DE RETENCION Y ALVIADERO DEL DIABLO 1  
D.E.F.C.

PROYECTO: MODELAMIENTO HIDRAULICO PARA DETERMINAR EL PREDOMINANTE DE LOS TIPOS DE ENCLASAMIENTO EN LA CUENCA DEL DIABLO, REGION TACNA

VISTA EN PLANTA EMBALSE - PRESA DIABLO 1

ESC: 1/2500



LEYENDA VISTA EN PLANTA

	CURVAS DE NIVEL TOPOGRAFÍA
	CURVAS DE NIVEL DISEÑO
	EJES DE INTERVENCIÓN



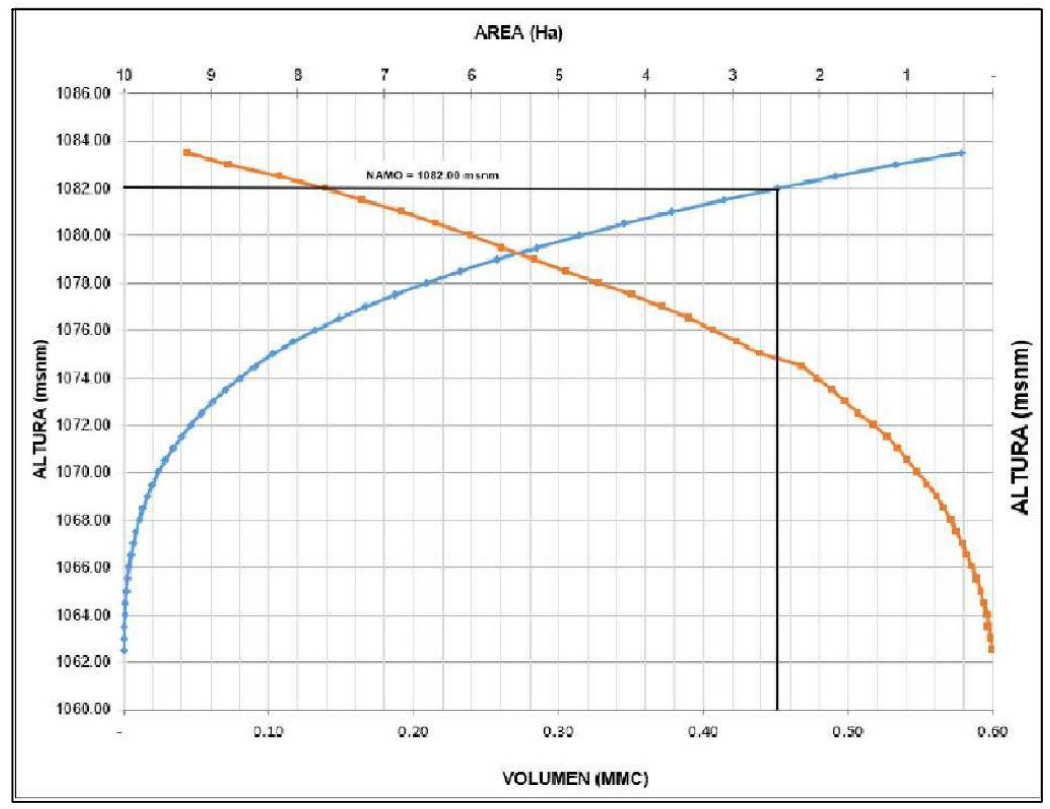
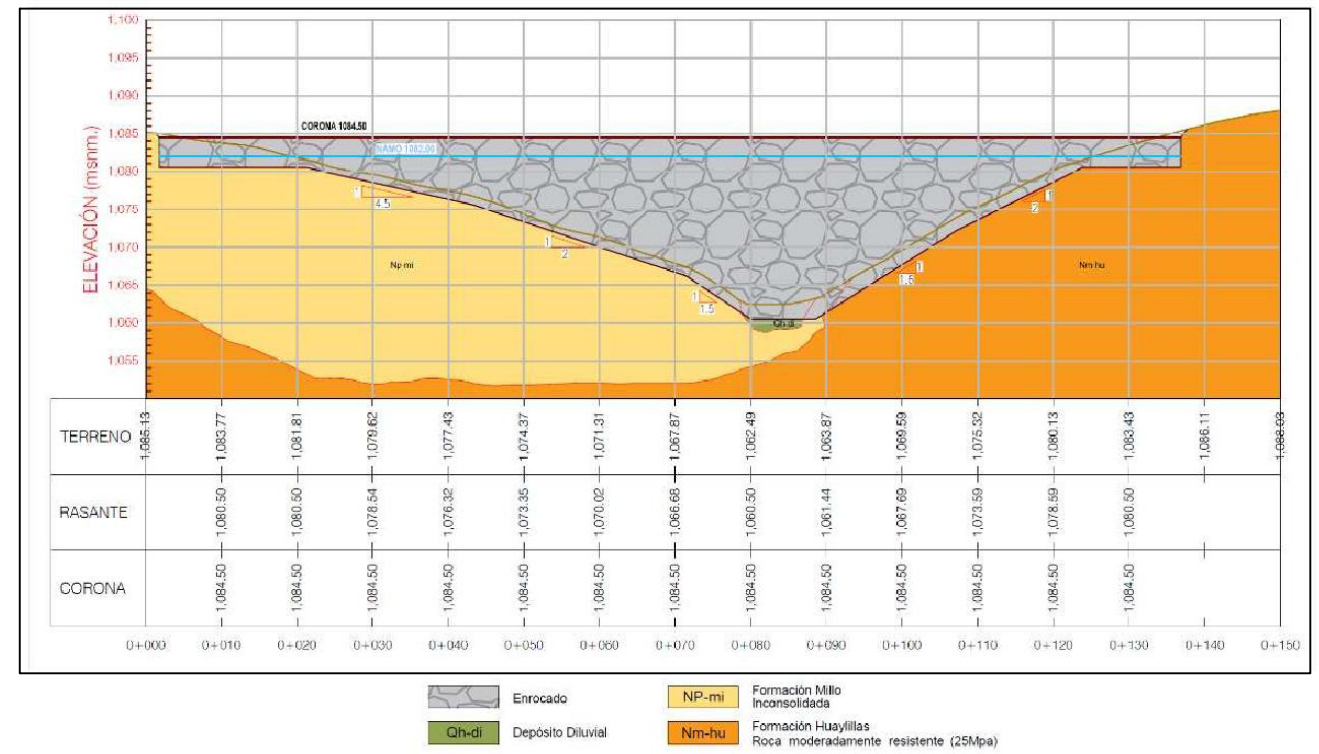
UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

TACNA  
TACNA  
ALTO DE LA ALINZA  
CERRO NUEVA  
INDICADA  
VISTA EN PLANTA DE  
EMBALSE PRESA DE  
RETENCIÓN DIABLO 1  
D.E.F.C.

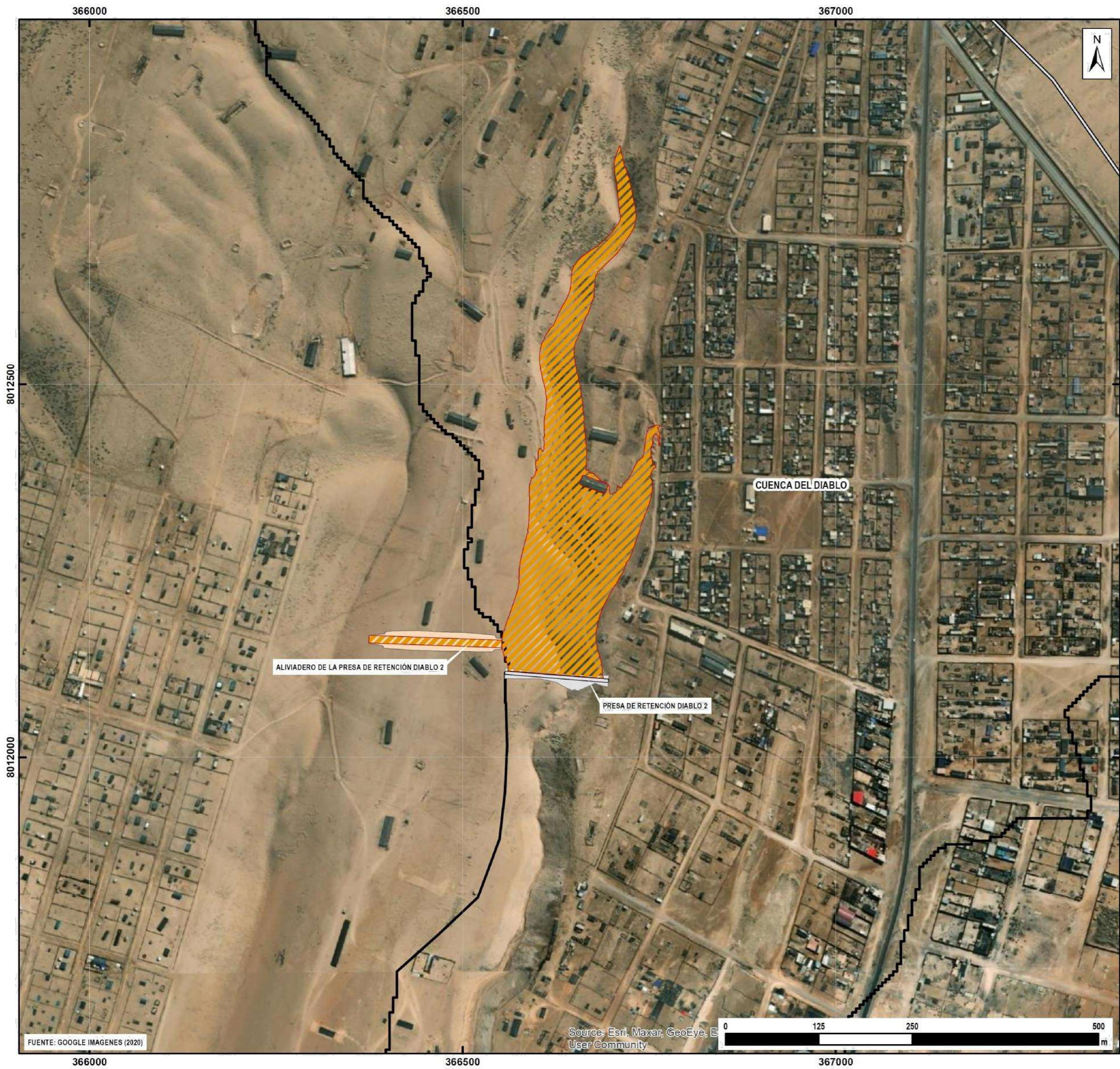
"MODELAMIENTO HIDRÁULICO PARA DETERMINAR EL  
PREDIMENSIONAMIENTO DE DIQUES DE ENCAUSAMIENTO  
EN LA QUEBRADA DEL DIABLO, REGIÓN TACNA"



**PERFIL LONGITUDINAL PRESA DIABLO 1**  
ESC: H. 1/1000, V. 1/1000







UBICACIÓN DEPARTAMENTAL



UBICACIÓN PROVINCIAL



UBICACIÓN DISTRITAL



FUENTE: GOOGLE IMAGENES (2020)

Source: Esri, Maxar, GeoEye, User Community



UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

DEPARTAMENTO: TACNA  
PROVINCIA: TACNA  
DISTRITO: ALTO DE LA ALIANZA, CIUDAD NUEVA  
ESQUEMA HIDRAULICO - PRESA DE RETENCIÓN Y ALVIADERO DEL DIABLO 2  
D.E.F.C.

PROYECTO: MODELAMIENTO HIDRAULICO PARA DETERMINAR EL PREDOMINANTE DE LOS TIPOS DE ENCLASAMIENTO EN LA QUEBRADA DEL DIABLO, REGION TACNA

VISTA EN PLANTA EMBALSE - PRESA CARAMOLLE

ESC: 1/2000



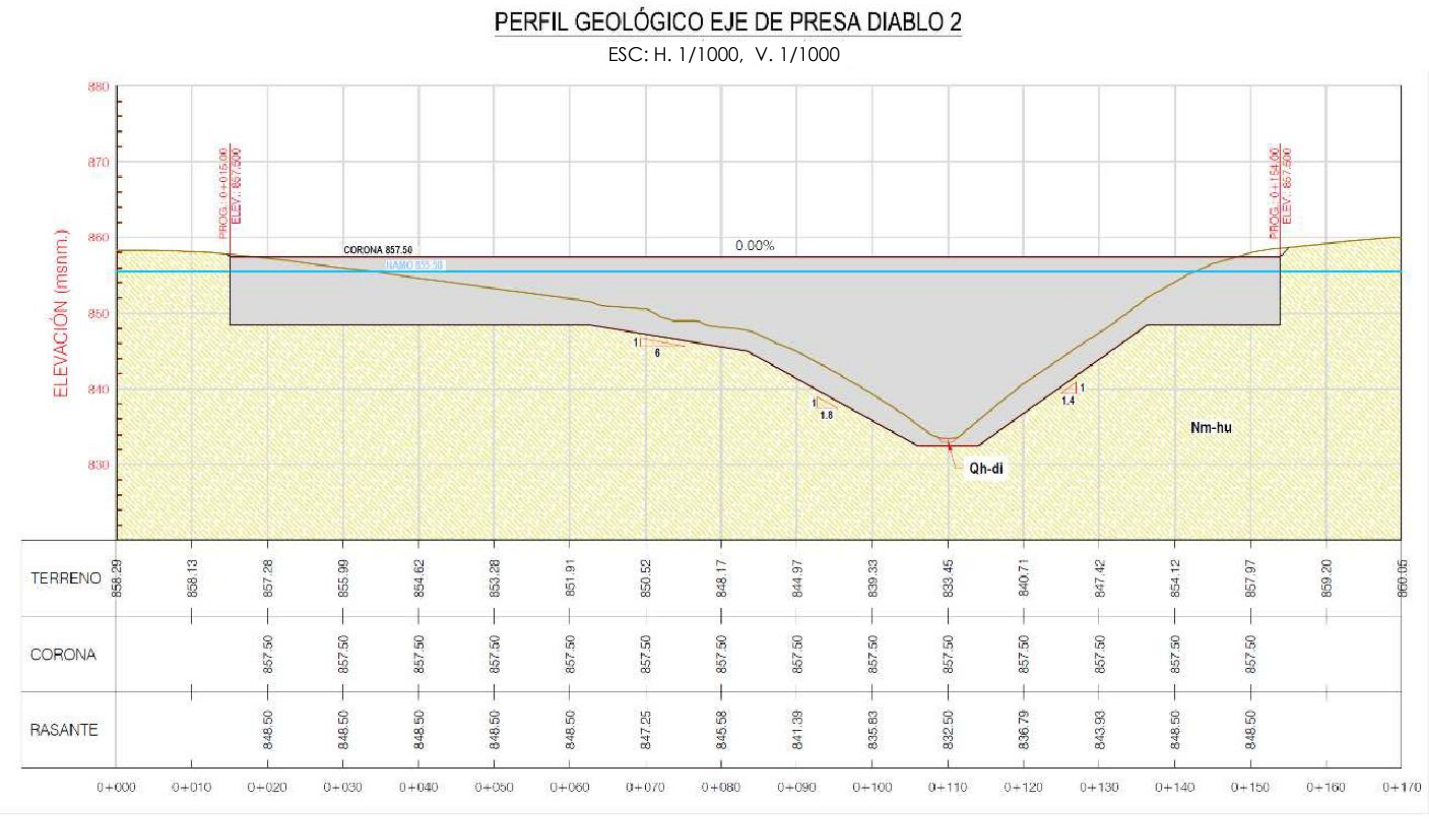
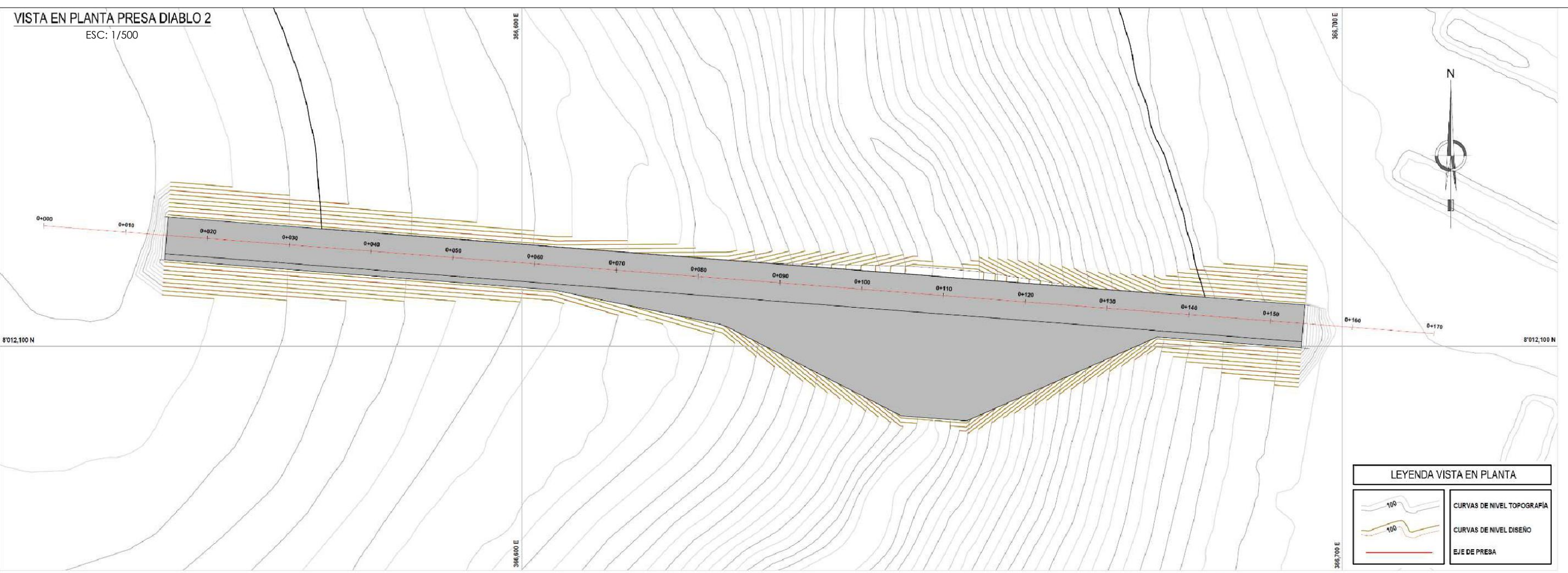
LEYENDA VISTA EN PLANTA	
	CURVAS DE NIVEL TOPOGRAFÍA
	CURVAS DE NIVEL DISEÑO
	EJES DE INTERVENCIÓN



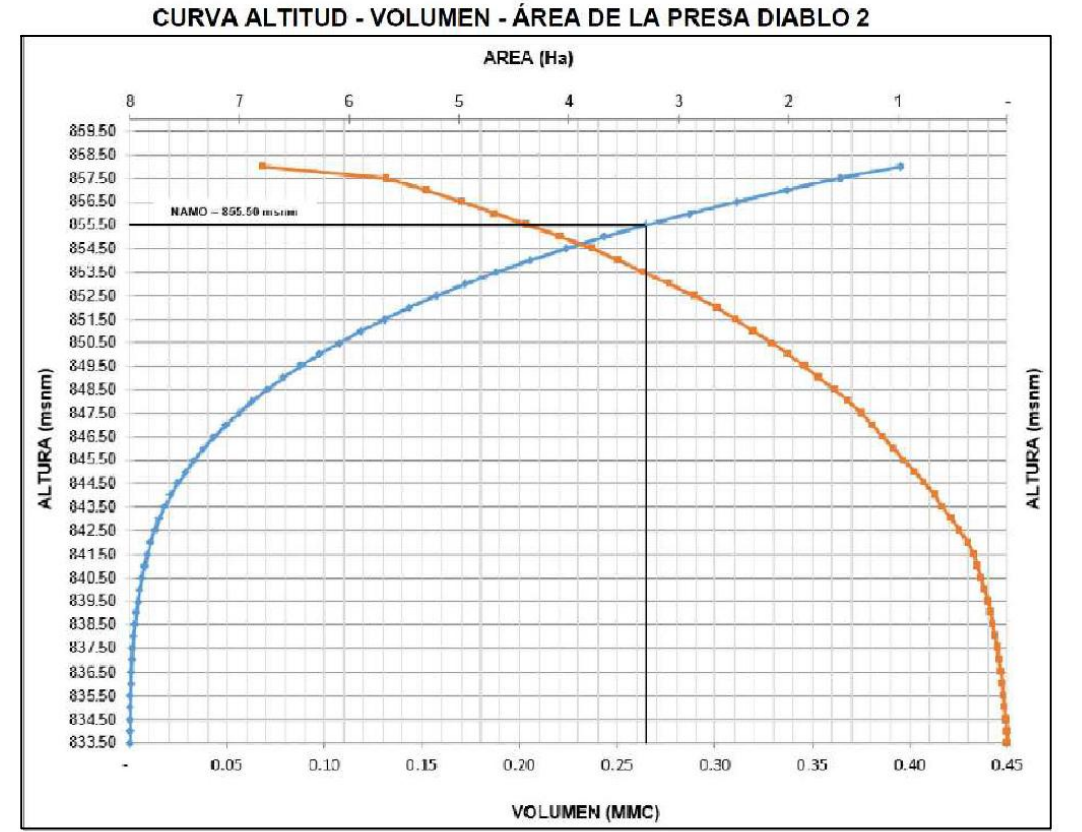
UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

TACNA  
TACNA  
ALTO DE LA ALMIRANTE  
CERRO NUEVA  
INDICADA  
ALTO  
VISTA EN PLANTA DE  
EMBALSE PRESA DE  
RETENCIÓN DIABLO 2  
C.A.  
D.E.F.C.

"MODELAMIENTO HIDRÁULICO PARA DETERMINAR EL  
PREDISEÑO DE DIQUES DE ENCAJAMIENTO  
EN LA QUEBRADA DEL DIABLO, REGIÓN TACNA"

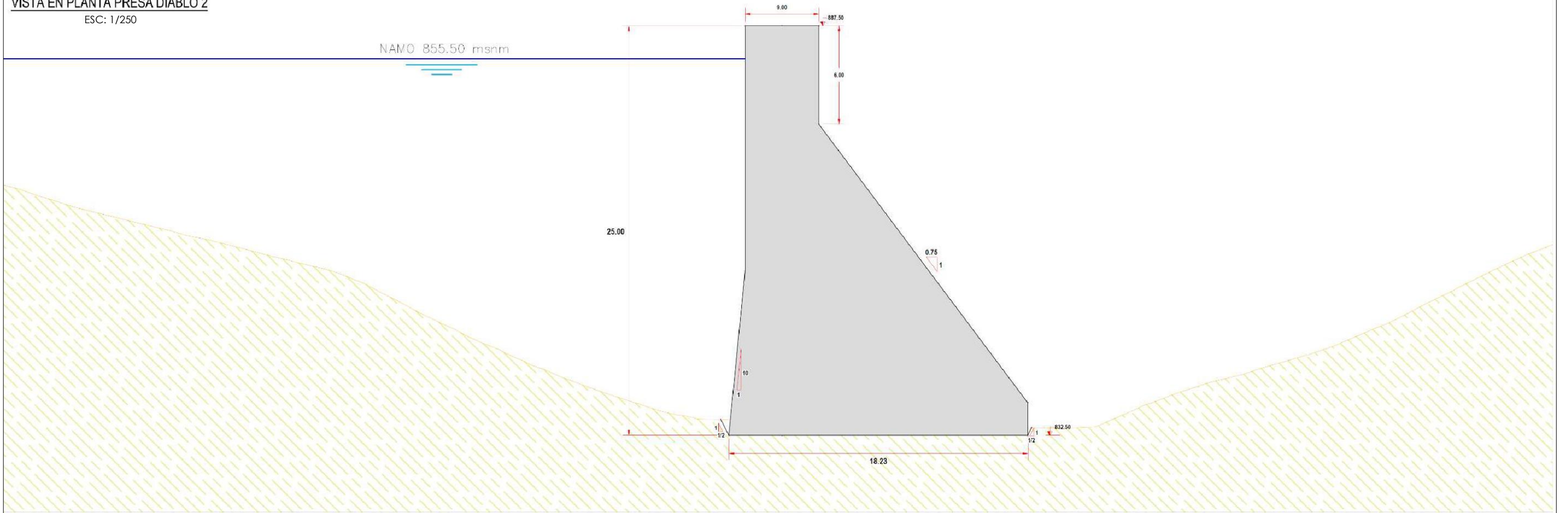


**Qh-di** Depósito Diluvial  
**NP-mi** Formación Huayllillas Roca resistente (50 - 100 Mpa)



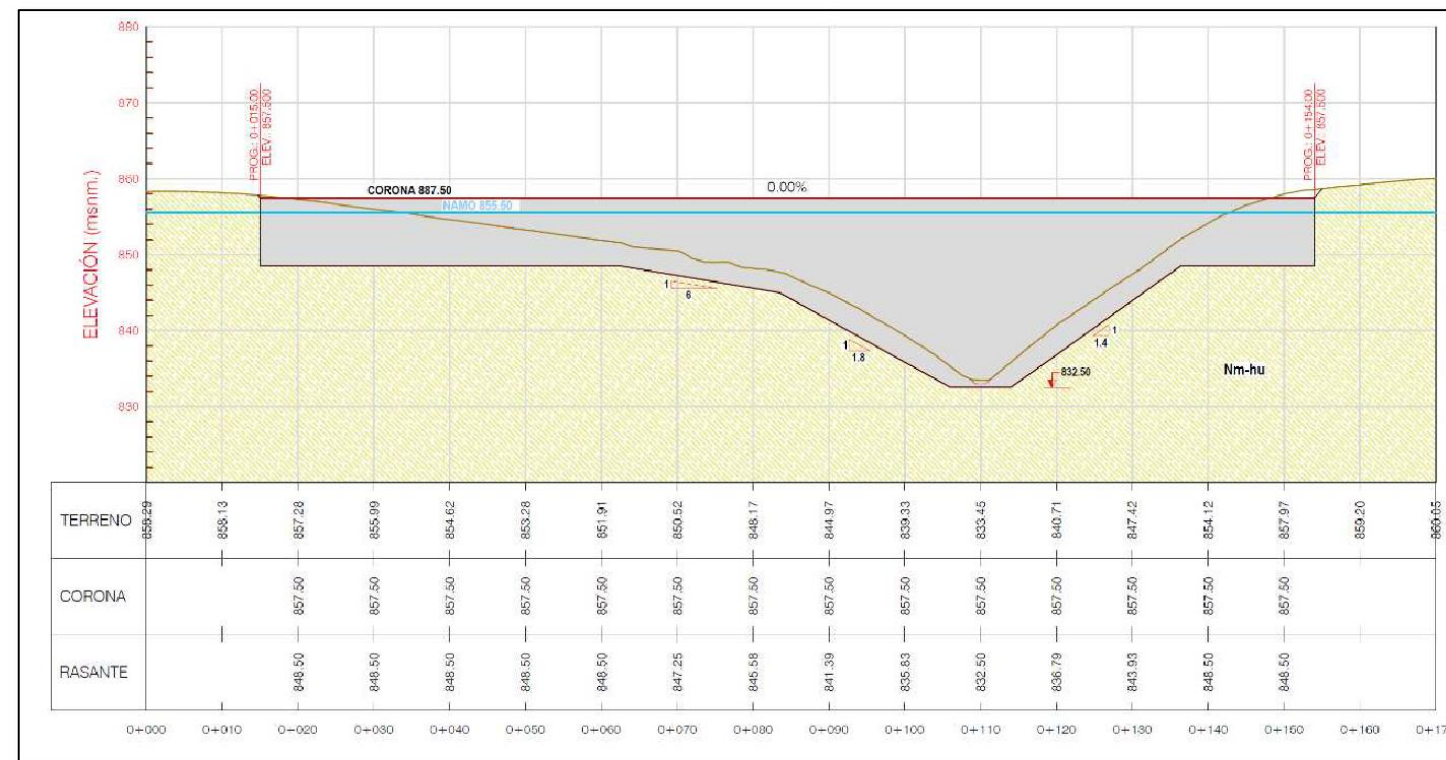
VISTA EN PLANTA PRESA DIABLO 2

ESC: 1/250



VISTA FRONTAL PRESA DIABLO 2

ESC: H. 1/1250, V. 1/1250



- Concreto
- NP-mi Formación Huayllillas Roca resistente (50 - 100 Mpa)