

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

Facultad de Ingeniería Civil, Arquitectura y Geotecnia

Escuela Profesional de Ingeniería Civil

“ANÁLISIS COMPARATIVO DEL MODELAMIENTO HIDRÁULICO
UTILIZANDO IBER Y HEC-RAS PARA DETERMINAR ÁREAS
INUNDABLES EN LA QUEBRADA DEL
DIABLO, REGIÓN TACNA”

TESIS

Presentado por:

Bach. Lenin Yamir Cachicatari Arocutipa

Para optar el Título Profesional de:

INGENIERO CIVIL

TACNA - PERÚ

2023

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

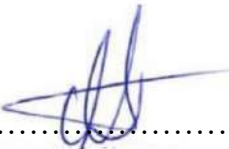
Facultad de Ingeniería Civil, Arquitectura y Geotecnia

Escuela Profesional de Ingeniería Civil

**“ANÁLISIS COMPARATIVO DEL MODELAMIENTO HIDRÁULICO
UTILIZANDO IBER Y HEC-RAS PARA DETERMINAR ÁREAS
INUNDABLES EN LA QUEBRADA DEL
DIABLO, REGIÓN TACNA”**

Tesis sustentada y aprobada el día 23 de junio de 2023 estando integrado el
Jurado Calificador por:


PRESIDENTE


:
Dr. Ing. Víctor Yapuchura Platero

SECRETARIO


:
Mtro. Ing. César José Avendaño Jihuallanga

VOCAL


:
Dr. Ing. Alexander Nicolas Vilcanqui Alarcon

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 R.F. N° 118-2023-FIAG/UNJBG de la tesis titulada: “ANÁLISIS COMPARATIVO DEL MODELAMIENTO HIDRÁULICO UTILIZANDO IBER Y HEC-RAS PARA DETERMINAR ÁREAS INUNDABLES EN LA QUEBRADA DEL DIABLO, REGIÓN TACNA”, presentado por el Bachiller Lenin Yamir Cachicatari Arocutipa para optar el título profesional 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 Antiplagio **TURNITIN** cuenta con el nivel de similitud cuyo porcentaje es 6% por lo que **CERTIFICO LA SIMILARIDAD** de la tesis, la cual 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 trámites respectivos para su obtención del título profesional.



Firma de Asesor

DNI N° 00486621

Nombre y apellidos del asesor: Edwin Martin Pino Vargas

Dedicatoria

A Dios, por permitirme estar hoy presente; a mi esposa Claudia Alejandra y mi hijo Henry por haberme apoyado incondicionalmente a lo largo de esta investigación, a mis padres y mis suegros por alentarme a culminar esta investigación y cumplir con mis objetivos.

Agradecimiento

Quiero agradecer en primer lugar a Dios, por guiarme y darme la fuerza para no rendirme a pesar de las adversidades. A mi esposa Claudia y mi hijo Henry por acompañarme y brindarme su apoyo a lo largo de esta investigación. A mis padres y suegros por las palabras de aliento. Finalmente, a los docentes de la Escuela de Ingeniería Civil que fueron partícipes de esta investigación, por haberme apoyado con las consultas y guiarme a lo largo de toda la investigación.

Índice general

Portada.....	i
Hoja de jurados.....	ii
Certificado de similitud	iii
Dedicatoria.....	iv
Agradecimiento	v
Índice general	vi
Índice de tablas	x
Índice de figuras	xi
Resumen	xv
Abstract.....	xvii
Introducción.....	1
Capítulo I: Aspectos generales.....	2
1.1 Antecedentes.....	2
1.1.1 Internacionales.....	2

1.1.2	Nacionales	5
1.1.3	Locales.....	8
1.2	Planteamiento del problema.....	10
1.3	Formulación del problema	11
1.3.1	Formulación interrogativa del problema general.....	11
1.3.2	Formulación interrogativa de los problemas específicos	11
1.4	Formulación de hipótesis	12
1.4.1	Hipótesis principal.....	12
1.4.2	Hipótesis secundarias	12
1.5	Justificación	12
1.6	Definición de Objetivos	13
1.6.1	Objetivo General.....	13
1.6.2	Objetivos específicos.....	13
Capítulo II:	Marco teórico	15
2.1	Bases teóricas.....	15
2.1.1	Hidrología.....	15
2.1.2	Hidráulica	18
2.2	Definición de términos básicos.....	22
2.2.1	Hidrología.....	22

2.2.2	Precipitación	22
2.2.3	RCP 4.5.....	23
2.2.4	RCP 8.5.....	23
2.2.5	Modelo Hidrológico	23
2.2.6	Caudales Máximos	24
2.2.7	Curva de Nivel.....	24
2.2.8	Modelo de Elevación Digital.....	24
2.2.9	IBER	24
2.2.10	HEC RAS	24
Capítulo III: Marco metodológico		26
3.1	Tipo de Investigación.....	26
3.2	Nivel de Investigación	26
3.3	Población y muestra de investigación.....	26
3.3.1	Población	26
3.3.2	Muestra	26
3.4	Técnicas e instrumentos para la recolección de datos	27
3.4.1	Procedimiento para obtener la topografía.....	27
3.4.2	Procedimiento para obtener la geometría	31
3.4.3	Procedimiento para establecer la rugosidad	48

3.4.4	Procedimiento para obtener los caudales máximos.....	53
Capítulo IV:	Desarrollo de la investigación	57
4.1	Modelo hidráulico IBER.....	57
4.1.1	Entrada de datos.....	57
4.1.2	Resultados IBER	69
4.2	Modelo hidráulico HEC RAS	73
4.2.1	Entrada de datos.....	73
4.2.2	Resultados HEC RAS	79
Capítulo V:	Discusión de resultados.....	87
Capítulo VI:	Conclusiones y recomendaciones	95
6.1	Conclusiones	95
6.2	Recomendaciones	96
Bibliografía.....		98
Anexos	¡Error! Marcador no definido.	
6.3	Anexo 1: Artículo científico “Impacts of Climate Change and Variability on Precipitation and Maximum Flows in Devil’s Creek, Tacna, Peru.”	104

Índice de tablas

Tabla 1 Caudales máximos en la Quebrada del Diablo	55
Tabla 2 Resultados máximos de la variable “Calado” en IBER	69
Tabla 3 Resultados máximos de la variable “Velocidad” en IBER.....	70
Tabla 4 Resultados mínimos de la variable “Cota de Agua” en IBER.....	70
Tabla 5 Resultados máximos de la variable “Calado” en HEC RAS	79
Tabla 6 Resultados máximos de la variable “Velocidad” en HEC RAS.....	80
Tabla 7 Resultados mínimos de la variable “Cota de Agua” en HEC RAS	80
Tabla 8 Coeficientes de Correlación del “Calado”, “Velocidad” y “Cota de Agua”	94

Índice de figuras

Figura 1 <i>Topografía de la microcuenca de la quebrada del diablo</i>	27
Figura 2 <i>Topografía de la desembocadura de la quebrada del diablo</i>	28
Figura 3 <i>Configuración de unidades, escala y sistema de coordenadas</i>	29
Figura 4 <i>Superficie creada con la herramienta “Contours”</i>	29
Figura 5 <i>Configuración del DEM a exportar</i>	30
Figura 6 <i>Delimitación de la zona de estudio</i>	32
Figura 7 <i>Polígono de límites en formato shapefile</i>	33
Figura 8 <i>Exportar polígono en formato shapefile</i>	33
Figura 9 <i>Configuración del espacio de trabajo en QGIS</i>	34
Figura 10 <i>Archivo Shapefile en QGIS</i>	35
Figura 11 <i>Configuración de la herramienta “convertir de líneas a polígonos”</i>	36
Figura 12 <i>Cortes del polígono para determinar la geometría</i>	38
Figura 13 <i>Geometría exportada en formato DXF para IBER</i>	38
Figura 14 <i>Creación de nuevo proyecto en HEC RAS</i>	40
Figura 15 <i>Herramienta RAS MAPPER con el shapefile “límites” de la zona de estudio</i> ...41	

Figura 16	<i>Herramienta Create New RAS Terrain</i>	41
Figura 17	<i>DEM importado en RAS MAPPER</i>	42
Figura 18	<i>Delimitación de la zona de trabajo con la herramienta “2D Flow áreas”</i>	43
Figura 19	<i>Tamaño de celda de la malla a generar en RAS MAPPER</i>	43
Figura 20	<i>Herramienta “Refinement Regions” en RAS MAPPER.</i>	44
Figura 21	<i>Colocación de “Boundary conditions Lines” aguas arriba</i>	45
Figura 22	<i>Colocación de “Boundary conditions Lines” aguas abajo</i>	46
Figura 23	<i>Selección de campos en RAS MAPPER para determinar la rugosidad</i>	47
Figura 24	<i>Importación exitosa del archivo Shapefile de rugosidades en RAS MAPPER</i> ... 47	
Figura 25	<i>Uso de la Herramienta de geometría “de líneas a polígonos”</i>	49
Figura 26	<i>Delimitación de áreas con coeficientes de rugosidad</i>	49
Figura 27	<i>Tabla de atributos del polígono shapefile</i>	50
Figura 28	<i>Simbología categorizada de rugosidades en QGIS</i>	51
Figura 29	<i>Etiquetas activas en el polígono de rugosidades</i>	52
Figura 30	<i>Entorno IBER y creación de nuevo proyecto</i>	57
Figura 31	<i>Importación de la geometría en IBER con la extensión DXF</i>	58
Figura 32	<i>Geometría importada en formato DXF</i>	59
Figura 33	<i>Utilizando la herramienta “Colapsar” en IBER</i>	60
Figura 34	<i>Creación de superficies con la herramienta “Búsqueda”</i>	60
Figura 35	<i>Herramienta “Asignar tamaño a superficies”</i>	61
Figura 36	<i>Asignación de tamaño de mallado a las superficies en IBER</i>	62
Figura 37	<i>Creación de malla en IBER</i>	63
Figura 38	<i>Importación del DEM en el modelo IBER</i>	64

Figura 39 Vista en 3D del modelo hidráulico en IBER.....	65
Figura 40 Asignación de rugosidades en modelo hidráulico en IBER.....	66
Figura 41 Selección de caudal de ingreso y punto de salida	66
Figura 42 Procesamiento del modelo hidráulico en IBER	67
Figura 43 Resultado de la simulación en IBER.....	68
Figura 44 Zonas inundables según escenario RCP4.5 2021-2050.....	70
Figura 45 Zonas inundables según escenario RCP8.5 2021-2050.....	71
Figura 46 Zonas inundables según escenario RCP4.5 2051-2080.....	72
Figura 47 Zonas inundables según escenario RCP8.5 2051-2080.....	72
Figura 48 Ingreso de datos del hidrograma en HEC RAS	73
Figura 49 Definición de “BC lines” en la salida del modelo en HEC RAS.....	75
Figura 50 Definición de la herramienta “Unsteady Flow Analysis”	76
Figura 51 Zonas inundables en la herramienta RAS MAPPER de HEC RAS.....	77
Figura 52 Modelo 3D de las zonas inundables en HEC RAS.....	78
Figura 53 Zonas inundables según escenario RCP4.5 2021-2050.....	80
Figura 54 Zonas inundables según escenario RCP8.5 2021-2050.....	81
Figura 55 Zonas inundables según escenario RCP4.5 2051-2080.....	82
Figura 56 Zonas inundables según escenario RCP8.5 2051-2080.....	82
Figura 57 Simulación 3D de zonas inundables en HEC RAS escenario RCP 4.5 2021-2050	83
Figura 58 Simulación 3D de zonas inundables en HEC RAS escenario RCP 8.5 2021-2050	84

Figura 59 <i>Simulación 3D de zonas inundables en HEC RAS escenario RCP 4.5 2051-2080</i>	85
Figura 60 <i>Simulación 3D de zonas inundables en HEC RAS escenario RCP 8.5 2051-2080</i>	85
Figura 61 <i>Simulación de los escenarios RCP4.5 2021-2050 y RCP4.5 2051-2080 en IBER</i>	88
Figura 62 <i>Hidrogramas de los escenarios RCP4.5 2021-2050 y RCP4.5 2051-2080</i>	89
Figura 63 <i>Simulación del escenario RCP4.5 2021-2050 en HEC RAS</i>	90
Figura 64 <i>Simulación del escenario RCP4.5 2051-2080 en HEC RAS</i>	90
Figura 65 <i>Gráfico de dispersión del “Calado” entre IBER y HEC RAS</i>	92
Figura 66 <i>Gráfico de dispersión del “Velocidad” entre IBER y HEC RAS</i>	92
Figura 67 <i>Gráfico de dispersión del “Cota de Agua” entre IBER y HEC RAS</i>	93

Resumen

La presente investigación se realizó en la zona denominada la quebrada del diablo, en el distrito de Alto de la Alianza que se encuentra en la ciudad de Tacna. Debido a que el 21 de febrero de 2020 ocurrió un huaico al activarse la quebrada del diablo fue necesario realizar diversas investigaciones que ayuden a alertar, organizar y proteger a la población, por este motivo el objetivo del presente estudio es analizar los modelos hidráulicos que generan los programas IBER y Hec Ras, analizando las variables de calado, velocidad y área de inundación con el fin de comparar el comportamiento hidráulico en la evaluación de zonas inundables. La metodología que se empleó fue en primer lugar, obtener la topografía de la zona de estudio para el DEM y el seccionamiento de la quebrada, se hizo uso de los softwares QGIS y Ras Mapper para determinar las secciones, coeficientes de rugosidad y delimitar la geometría de la zona de estudio. En segundo lugar, para la parte hidrológica se utilizó la información de un artículo en el cual se desarrolla una investigación sobre los caudales máximos en la zona de estudio teniendo como escenarios RCP4.5 y RCP8.5 para los años 2021-2050 y 2051-2080 los cuales fueron calibrados y validados. En tercer lugar,

se realiza la simulación en la quebrada del diablo teniendo como entrada de datos la topografía, la geometría, rugosidad y los caudales máximos dando como resultado el área de inundación utilizando los programas HEC RAS e IBER. Finalmente, se compara las simulaciones teniendo en cuenta las variables de calado, velocidad y área de inundación. Se concluye, que el modelo que más se ajusta es el modelo IBER, sin embargo, el procesamiento es más complicado que el modelo HEC RAS, esto debido a que el modelo IBER realiza la simulación en 2D, por otro lado, en el modelo HEC RAS el procesamiento es más sencillo ya que el modelo es más eficiente con geometrías regulares.

Palabras clave: Análisis comparativo, IBER, HEC RAS, Quebrada del diablo, Áreas inundables.

Abstract

The present investigation was carried out in the area known as "la quebrada del diablo", in the district of Alto de la Alianza, which is located in the city of Tacna. Due to the fact that on February 21, 2020 a landslide occurred when the Devil's Creek was activated, it was necessary to carry out various investigations to help alert, organize and protect the population. For this reason, the objective of this study is to analyze the hydraulic models generated by the IBER and Hec Ras programs, analyzing the variables of draft, velocity and flood area in order to compare the hydraulic behavior in the evaluation of flood zones. The methodology used was, first, to obtain the topography of the study area for the DEM and the sectioning of the creek, using QGIS and Ras Mapper software to determine the sections, roughness coefficients and delimit the geometry of the study area. Secondly, for the hydrological part, information from an article was used in which an investigation on the maximum flows in the study area was carried out using RCP4.5 and RCP8.5 scenarios for the years 2021-2050 and 2051-2080, which were calibrated and validated. Thirdly, the simulation is carried out in the Devil's Creek using as input data the

topography, geometry, roughness and maximum flows resulting in the flood area using the HEC RAS and IBER programs. Finally, the simulations are compared taking into account the variables of draft, velocity and flood area. It is concluded that the model that best fits is the IBER model, however, the processing is more complicated than the HEC RAS model, because the IBER model performs the simulation in 2D, on the other hand, in the HEC RAS model the processing is simpler since the model is more efficient with regular geometries.

Keywords: Comparative Analysis, IBER, HEC RAS, Devil's Creek, Flood Area.

Introducción

La presente investigación plantea realizar un análisis comparativo del modelamiento hidráulico utilizando los softwares HEC RAS e IBER para determinar zonas inundables en la quebrada del diablo, región Tacna. Para determinar el software más adecuado para la zona de estudio. De manera que se expone la presente a través de los siguientes capítulos: En el Capítulo I, encontraremos los aspectos generales de la investigación, se realiza el planteamiento del problema, hipótesis, justificación y objetivos. En el Capítulo II, se hace mención al marco teórico, conceptos claves y datos relacionados al modelamiento hidráulico en los dos programas (IBER Y HEC RAS). En el Capítulo III, se detalla el marco metodológico que sigue la presente investigación, la cual es una metodología de investigación aplicada con un nivel de investigación experimental. En el Capítulo IV, se detalla el desarrollo de la investigación, en el cual se realiza el modelamiento considerando la topografía, la geometría, rugosidad y caudales máximos para los distintos escenarios (RCP4.5 y RCP8.5) en los programas IBER Y HEC RAS. En el Capítulo V, se realiza el análisis y discusión de los resultados obtenidos en la simulación con los programas IBER Y HEC RAS, en la cual se toma en cuenta las variables como el calado, la velocidad y la cota de agua, dichos parámetros muestran los resultados más confiables. En el Capítulo VI, obtenemos las conclusiones y recomendaciones producto de la presente investigación.

CAPITULO I

ASPECTOS GENERALES

1.1 ANTECEDENTES

1.1.1 Internacionales

1.1.1 En el ámbito internacional, los antecedentes investigados seleccionados han sido los siguientes:

Ortiz et al. (2017) realiza una comparación de los modelos hidráulicos realizados en Iber y Hec Ras en la zona de la quebrada La Guardia en Venezuela. En el estudio abordaron en primer lugar una comparativa desde la facilidad de la creación de los modelos viendo el manejo de datos y la entrada de los mismos en los programas, en segundo lugar, compararon los resultados encontrando similitud en los perfiles. Finalmente concluyen que para geometrías simples o sencillas es mejor usar el programa Hec Ras debido a que la entrada de datos y la generación del modelo es más sencilla, sin embargo, para geometrías más irregulares como el flujo a través de puentes o similares es mejor el programa Iber ya que utiliza un análisis bidimensional y representa resultados confiables.

Muñoz et al. (2022) realizaron un estudio en Ecuador en el que buscaban identificar el programa adecuado para obtener un mapa de inundaciones más certero. Ejecutaron la simulación con los dos softwares considerando las variables de elevaciones de nivel de agua, velocidades y áreas de inundación. Finalmente, concluyen que los

programas tienen resultados similares, sin embargo, resaltan que usando Hec Ras el modelamiento es más rápido, pero no muestra resultados de gran calidad en la simulación, por otro lado, utilizando el software Iber se muestra una mejor calidad en los resultados y que este por ser bidimensional representa una mejor alternativa para el modelamiento hidráulico.

Pérez Pérez-Olaya (2015) realizó la investigación denominada “*Estudio hidráulico para la determinación de zonas inundables y análisis valorado de soluciones de protección en el municipio de Balmaseda, Vizcaya, comunidad autónoma del país Vasco*”, la cual tuvo como objetivo principal determinar las zonas inundables a causa del río Cadagua el cual tiene su cauce cerca al municipio de Balmaseda-Vizcaya, y el planteamiento de posibles soluciones de carácter estructural para brindar protección y disminuir las posibilidades de un desastre que cause pérdidas. Donde se tuvo como resultados que la inundación se da a causa de los muros y puentes que obstruyen el flujo y suponen además la superación en general del cauce principal, además se consideró como tiempo medio esperado de inundación es de quinientos años. Dicho antecedente guarda referencia con la presente investigación en las variables de estudio hidráulico y determinación de zonas inundables.

Volonté & Gil (2019) realizaron una investigación que conlleva a relaciones de eventos extremos con la hidrogeomorfología histórica, todo con el fin de la determinación las zonas inundables. Tiene como unidad analítica la cuenca que fluye por el arroyo ubicado en San Bernardo ciudad de Buenos Aires – Argentina. La investigación realizada permite usar una metodología teniendo como base diferentes técnicas y métodos

que al unirlos o entrelazarlos permiten realizar una zonificación de la posible inundación. Resaltan que las máximas avenidas o crecidas van correlacionados con las precipitaciones torrenciales. En conclusión, la correlación de los métodos históricos, geomorfológicos e hidrográficos permite comprobar y asegurarse que los datos sean correctos y viables.

Murillo et al. (2008) realizaron una investigación relacionada con un modelo Bidimensional GUAD – 2D, el cual es un modelo numérico el cual permite una valoración de situaciones de acuerdo las hipótesis propuestas. Usando un tiempo promedio de retorno de cincuenta años determinan la posibilidad de pérdidas por inundación del río Cinca teniendo en cuenta la unidad urbana de Fraga. En conclusión, el modelo de simulación GUAD 2D es un modelo que puede predecir con un grado de confiabilidad alto los factores de una inundación.

Menéndez Pidal et al. (2020) realizaron un estudio en la Península Ibérica realizando modelos hidrológicos para luego con los resultados usar softwares como Iber y Hec Ras para definir áreas de inundación o zonas con la peligrosidad necesaria que amerite una gestión de medidas preventivas, todo ello considerando los pasos como lo es un modelado hidrológico con datos fidedignos y del propio servicio de meteorología los cuales brindan dicha información con la cual se estima los caudales máximos que serán necesarios para la realización del modelo hidráulico en dichos programas, finalmente concluyen que las inundaciones son desastres que perjudican a la sociedad ya que conllevan a pérdidas no solo económicas, sino también, pérdidas humanas.

1.1.2 Nacionales

En el ámbito nacional, los antecedentes investigados seleccionados han sido los siguientes:

Pancca Cruz & Belizario Quispe (2020) realizaron una comparación entre los modelos Hec Ras e Iber en la cuenca baja del río Coata, realizaron el procesamiento de datos meteorológicos para luego ingresarlos en los programas Hec Ras e Iber encontrando que para la creación de los modelos hidráulicos era más sencillo realizarlo en el programa Hec Ras, esto debido a la facilidad de la incorporación de los modelos de elevación digital, caudales y secciones en la zona de estudio, además, estos muestran resultados confiables y en menor tiempo. Por otro lado, utilizando el software Iber se encontró que produce datos más confiables, pero en mayor tiempo ya que representa de una manera más clara y confiable geometrías en ríos con gran irregularidad.

Bolivar Bello (2020) realizó un modelamiento hidrológico en primer lugar y posteriormente el modelamiento hidráulico del río Marañón con el objetivo de realizar el pre dimensionamiento de una estructura llamada Puente Tingo Chico. En primer lugar hizo uso del data meteorológica confiable y luego utilizando el programa HEC-HMS y después de procesar la información obtuvo los caudales máximos, en segundo lugar, para el modelamiento hidráulico concluye que los modelos muestran gran similitud pero que la diferencia está en que con el programa Hec Ras no se pueden obtener resultados confiables al realizar modelos que incluyan estructuras como puentes, para lo cual, el software Iber resulta tener mejores resultados ya que manejan de manera más eficiente los flujos en 2D.

Zabaleta Castro & Espejo Mariño (2021) realizaron una investigación que tuvo como objetivo comparar los modelos de Hec Ras e Iber con el modelamiento hidráulico de una poza disipadora inclinada. Para la comparación tuvieron en cuenta los parámetros de calado, velocidad, n° de Froude y energía mostrando como resultado que ambos modelos tuvieron diferencias entre el 1% y 8% teniendo ambos programas con características de calidad ISO 9126.

Escarcena Quiza (2014) llevó a cabo la investigación “*Determinación de áreas inundables de la parte media de la microcuenca del Río Zapatilla – Centro Poblado de Ancoamaya - Ilave*”, la cual tuvo como objetivo principal determinar las áreas más vulnerables con la finalidad de prevenir inundaciones en el Centro Poblado Ancoamaya – Ilave, realizando simulaciones de eventos extremos como inundaciones utilizando un software especializado como HEC – RAS en una de las vertientes de la microcuenca Zapatilla denominado río Camillaqui. Los resultados significativos considerables fueron factores como el área de la cuenca que tiene como unidad aproximadamente 58 kilómetros cuadrados, contorno delimitado de la cuenca aproximadamente 36 kilómetros y la distancia de puntos extremos del río es 10.9 Km., con el método estadístico de Gumbel se obtuvo el caudal más significativo de $71.76\text{m}^3/\text{s}$ para un tiempo promedio de retorno de 50 años, asimismo, se obtuvo un tramo de 3.5 km. Con lo que se calcula para hacer muros y evitar el desborde. Este antecedente está relacionado con la presente investigación en la variable cota de agua.

Trigoso Marín (2018) realizó la investigación denominada “*Modelamiento hidráulico de la quebrada Calispuquio – tramo ciudad de Cajamarca – Ciudad*”

universitaria, con fines de prevención de inundaciones” esta investigación tuvo como finalidad zonificar las áreas propensas a inundaciones teniendo como base una precipitación máxima en la unidad del barranco perteneciente a Calispuquio, contiguo al departamento de cajamarca, usando datos hidrológicos en primer lugar para hacer el modelamiento, luego datos topográfico, así como también datos cartográficos trabajados en programas especializados como AutoCAD, Arc Gis e Iber. Tomando como referencia la zona estudiada la distancia considerada fue de 3.2km de longitud. Los resultados obtenidos con el software IBER fueron de 10.8 ha total de inundación, considerando una profundidad de flujo máximo de 2100 mm, y este valor es considerado demasiado alto. Planteó medidas de prevención, como: resarcimiento de 10 m. de canal desgastado en las avenidas contiguas, limpieza del canal, aumentar muro hasta 3.2 m. y reducir la rugosidad. Este antecedente se asemeja a la presente investigación en las variables modelamiento hidráulico y prevención de inundaciones, además del software a emplear que es IBER.

García Tocto (2019) realizó la investigación denominada *“Modelado Hidráulico del Río Amojú Aplicando el Software Iber para Zonificar Áreas Inundables en la Ciudad de Jaén, Perú”* la cual tuvo como objetivo efectuar un modelo hidráulico en un tramo del afluente Amojú considerando la urbe Jaén. con la finalidad de determinar franjas con alta posibilidad de inundación considerando grandes precipitaciones o de intensidad tal que sea probabilísticamente significativo. Donde se obtuvo una máxima fluencia de 150 metros cúbicos por segundo para un tiempo promedio de cuarenta años, 25% de incertidumbre y tiempo promedio de retorno 140 años. Con los datos procesados en el software IBER se obtuvo que las zonas con mayor probabilidad de inundación son la zona I con 0.93 hectáreas posiblemente peligrosas; zonas II, con 0.48 hectáreas posiblemente

peligrosas; zona V, con 0.5 hectáreas posiblemente peligrosas; finalmente la zona VI, perteneciente a San Camilo, sector que tiene 2.6 hectáreas posiblemente peligrosas. Este antecedente tiene relación con la presente investigación en las variables modelado hidráulico y zonas inundables, además del software a usar IBER.

Morales Chiara (2011) realizó la investigación denominada “*Determinación de áreas de inundación del Río Cabanillas para la delimitación de la faja marginal*” el cual es un estudio que realizó en la cuenca Cabanillas entre los tramos Río Verde y Cerrillos. La finalidad de esta pesquisa fue establecer las zonas de riesgo a inundaciones del río Cabanillas usando caudales estimados con diferentes períodos de retorno. Los caudales son utilizados son estimados en base a un promedio de precipitaciones máximas diarias utilizando modelos de Número de curva del Servicio de Conservación de Suelos y el hidrograma unitario.

1.1.3 Locales

En el ámbito local, los antecedentes investigados seleccionados han sido los siguientes:

Pinedo Aguilar & Garcia Iquise (2022) realizaron un estudio incluyendo el diseño de un dique logrando la mitigación de daños mediante el modelamiento hidráulico en la quebrada del diablo, teniendo en consideración la información obtenida del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú, pasando luego a un modelo hidrológico teniendo como resultados caudales máximos de 0.00 m³/s, 0.17 m³/s y 0.94 m³/s para periodos de retorno de 25, 50 y 100 años. Finalmente concluyen que haciendo uso de diques ubicados estratégicamente tiene como resultado una mitigación del 100%.

Juculaca Incacutipa (2021) realizó un estudio en la zona de la quebrada del diablo utilizando periodos de retorno de 50, 100, 200 y 500 años para luego ingresar los datos al modelo hidráulico utilizando Hec Ras y sus extensiones, todo con el fin de demostrar las zonas afectadas según un nivel de vulnerabilidad en diferentes categorías. Finalmente, concluye que la quebrada del diablo presenta un riesgo inminente ante la ocurrencia de precipitaciones y es susceptible a su activación.

Talledo Walde & Cardoso Cusihualpa (2021) realizaron una investigación en la cual realizan un modelo hidrológico e hidráulico con el fin de plantear un mapa de amenazas, de igual manera se realizó el cálculo de caudales máximo de 50, 100, 200, 250 y 500 años. Sin embargo, el modelo hidráulico se hizo con el software FLO-2D donde se obtuvo velocidades y calados máximos. Asimismo, se realizó la calibración de resultados contrastándolos con medidas realizadas después del evento suscitado el 21 de febrero de 2020.

Mayta Rojas & Mamani Maquera (2018) realizaron la investigación denominada “Modelación hidráulica de la defensa de Calana con el fin de determinar la vulnerabilidad ante máximas avenidas.”. La cual tuvo como objetivo realizar una simulación hidráulica para determinar los riesgos por las máximas avenidas. La investigación destaca la peligrosidad de las máximas avenidas y la localización de una defensa estratégica para poder hacer frente a la posible catástrofe ya que de concretarse una máxima avenida no considerada la estructura actual que se encuentra en el puente de la carretera Calana - Pachía no sería capaz de soportarlo, por lo tanto, dejaría inundaciones en zonas colindantes, daño a los cultivos e incluso vidas humanas.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Según Gonzales et al.(2014) en el Perú han ocurrido cambio climáticos devastadores, como lo es el fenómeno del niño el cual se manifiesta con lluvias intensas en zonas desérticas y sequías en zonas altoandinas. Asimismo, según Pino-Vargas et al.(2019), Tacna es una región que pertenece a la cabecera del desierto de Atacama y además presenta una de las superficies más áridas y susceptibles al cambio climático. Asimismo, menciona que recientemente se vienen presentando lluvias en periodos más extensos y de mayor rigor especialmente en la región de Tacna considerada una de las más secas del mundo.

Según Laura Quispe (2019) en la región de Tacna han ocurrido numerosas inundaciones que han conllevado a la pérdida de recursos humanos y materiales, por tal razón de han llevado a cabo numerosos estudios tales como zonas de inundación (Mayta Rojas & Mamani Maquera, 2018).

En consecuencia, debido al cambio climático, el 21 de febrero de 2021 se ha presentado precipitaciones anómalas en la zona de la quebrada del diablo causando flujos de lodo en el distrito de alto de la alianza (Garcia Aquino, 2022). Por lo tanto se ha comprobado la necesidad de la elaboración de modelos de gestión de riesgos(Jara Oncebay & Ramos Cunurana, 2021), identificación de zonas vulnerables (Juculaca Incacutipa, 2021), flujo de detritos y erosión (Mejía-Marcacuzco et al., 2021).

Es por ello que se ha visto conveniente realizar la comparación de diferentes programas como lo son Iber y Hec Ras para determinar las zonas inundables en la zona de estudio de la quebrada del diablo, ello con motivo de comparar las diferencias que contiene

cada programa y el modelamiento que conlleva. En consecuencia, se aborda el problema analizando los programas Iber y Hec Ras. Según Azouagh et al. (2018) se pueden utilizar programas de modelamiento hidráulico como Hec – RAS y sus extensiones como Hec – GeoRas integrando los GIS para la delimitación de zonas inundables generando mapas de inundación (Kumar et al., 2020).

1.3 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.3.1 Formulación interrogativa del problema general

- ¿Cuáles son las diferencias en el modelamiento hidráulico utilizando Iber y Hec Ras en la quebrada del diablo, región Tacna?

1.3.2 Formulación interrogativa de los problemas específicos

- ¿Cuál es la velocidad máxima del modelo hidráulico utilizando Iber y Hec Ras en la quebrada del diablo, región Tacna?
- ¿Cuál es el calado máximo del modelo hidráulico utilizando Iber y Hec Ras en la quebrada del diablo, región Tacna?
- ¿Cuál es la cota mínima en el modelamiento utilizando Iber y Hec Ras en la quebrada del diablo, región Tacna?

1.4 FORMULACIÓN DE HIPÓTESIS

1.4.1 Hipótesis principal

- El modelo hidráulico permitirá determinar las diferencias entre el software Iber y Hec Ras en la quebrada del diablo, región Tacna.

1.4.2 Hipótesis secundarias

- La Velocidad máxima en distintos escenarios del modelo hidráulico utilizando Iber y Hec Ras permitirá observar las diferencias entre los programas en la quebrada del diablo.
- El Calado máximo en distintos escenarios del modelo hidráulico utilizando Iber y Hec Ras permitirá observar las diferencias entre los programas en la quebrada del diablo.
- La Cota de agua mínima del modelo hidráulico utilizando Iber y Hec Ras permitirá observar las diferencias entre los programas en la quebrada del diablo.

1.5 JUSTIFICACIÓN

El presente trabajo de investigación resulta conveniente en el sentido de los cambios climáticos que están surgiendo recientemente debido a la variabilidad en la precipitación, es por ello que resulta indispensable un estudio que nos muestre las diferencias al utilizar diferentes softwares identificando las zonas que se puedan inundar para elegir

correctamente el programa según las necesidades de los proyectos para que puedan mitigar los posibles desastres que se puedan originar por estos aumentos en la precipitación.

La presente investigación tiene como implicancia práctica el uso de los mapas de inundaciones para poder realizar proyectos que aseguren las zonas expuestas a inundaciones, tales franjas identificadas llevan en su interior infraestructura y personas habitándolas, zonas que de presentarse precipitaciones intensas estarían expuestas a peligros como lo son las inundaciones.

El presente trabajo de investigación tiene un valor teórico en la utilización de datos meteorológicos como son la precipitación y caudales máximos. De esta forma se usará datos fidedignos que contengan la información para luego convertirla en parámetros para los nuevos estudios o proyectos de investigación.

1.6 DEFINICIÓN DE OBJETIVOS

1.6.1 Objetivo General

- Realizar el modelamiento hidráulico utilizando IBER y HEC-RAS para determinar áreas inundables en la quebrada del diablo, región Tacna.

1.6.2 Objetivos específicos

- Determinar la velocidad máxima en distintos escenarios del modelo hidráulico utilizando Iber y Hec Ras en la quebrada del diablo, región Tacna.
- Determinar el calado máximo en distintos escenarios del modelo hidráulico utilizando Iber y Hec Ras en la quebrada del diablo, región Tacna.

- Determinar la cota de agua mínima utilizando Iber y Hec Ras en la quebrada del diablo, región Tacna.

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 BASES TEÓRICAS

2.1.1 *Hidrología*

2.1.1.1 Precipitación

Las precipitaciones son grandes acumulaciones de vapor de agua que se transforman en forma de lluvia, representando un fenómeno hidrológico de gran importancia. Este proceso ocurre cuando el aire húmedo, que no está completamente saturado, cerca de la superficie terrestre es elevado rápidamente a grandes alturas, ya sea mediante convección u otro mecanismo similar, lo cual provoca una expansión debido a la disminución de la presión. Como resultado de esta expansión, se produce la condensación del vapor de agua, que finalmente se manifiesta como precipitación (Pancca Cruz & Belizario Quispe, 2020).

2.1.1.2 Escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5

De acuerdo al Quinto Informe del IPCC, se han establecido cuatro nuevas trayectorias de concentración representativas (RCP, por sus siglas en inglés) como escenarios de emisión. Estas trayectorias se caracterizan por su Forzamiento Radiativo (FR) total proyectado para el año 2100, que varía entre 2,6 y 8,5 W/m².

Las cuatro trayectorias RCP incluyen un escenario en el que se aplican medidas de mitigación que resultan en un nivel muy bajo de forzamiento (RCP2.6), dos escenarios de estabilización (RCP4.5 y RCP6.0) y un escenario con un nivel muy alto de emisiones de gases de efecto invernadero (RCP8.5). Estos nuevos RCP consideran los efectos de políticas dirigidas a limitar el cambio climático en el siglo XX, a diferencia de los escenarios de emisión utilizados en el Cuarto Informe de Evaluación del IPCC: Cambio Climático 2007 (AR4) (llamados SRES, por sus siglas en inglés), los cuales no tuvieron en cuenta los efectos de posibles políticas o acuerdos internacionales para mitigar las emisiones (IPCC, 2014).

2.1.1.3 Modelo Hidrológico

El objetivo principal del análisis del sistema hidrológico es estudiar las operaciones del sistema y, por lo tanto, puede predecir su salida. El modelo físico busca representar el sistema a menor escala, como el modelo hidráulico, mientras que el modelo matemático busca representar el sistema basado en una serie de funciones que conectan varios tipos de variables de salida con variables que se incluirán, donde la mayoría tiene aleatorias (Pinedo Aguilar & Garcia Iquise, 2022)

Los modelos hidrológicos son herramientas esenciales que nos permiten comprender y determinar el funcionamiento de los diferentes componentes del ciclo hidrológico. Estos modelos tienen la capacidad de inferir las posibles condiciones futuras en base a la información disponible en el presente, y también pueden utilizarse para simular otros procesos, como la calidad del agua, entre otros. La modelización se emplea para estudiar el ciclo hidrológico en una cuenca, y la precisión de las predicciones obtenidas

depende en gran medida de la calidad de la información proporcionada y de nuestra comprensión del sistema y del modelo que lo representa (Garcia Aquino, 2022).

2.1.1.4 Caudales Máximos

Los caudales máximos son flujos enormes no convencionales de agua, que se manifiesta en un tiempo determinado conocido como periodo de retorno. La estimación de estos es fundamental para establecer el tamaño del sistema de drenaje y proteger la iluminación de zanjas de drenaje urbano, alcantarillado, vertederos de basura, puentes y presas (Juculaca Incacutipa, 2021).

Por otro lado, se conoce como un evento que se produce en niveles muy altos, en los cuales el agua sobrepasa o inunda las zonas aledañas. Las crecientes causan daños económicos, pérdidas de vidas humanas o trastornan toda actividad social o económica de una región, para el diseño de estructuras hidráulicas tales como bocatomas, canales, puentes, etc. Asimismo, se señala que las máximas crecidas de un río son los caudales que han superado a todos los demás observados durante un determinado período de tiempo. Cuando este período es de un año, se denomina serie anual al conjunto de estas crecidas máximas. Además, se define como serie parcial a la lista de crecidas cuya magnitud es mayor que un valor arbitrariamente establecido según los objetivos que se busquen al realizar la separación (Pancca Cruz & Belizario Quispe, 2020).

Garcia Aquino (2022) considera como crecida cualquier flujo de agua que excede la capacidad de contención de diques o barreras, ya sean construidos por el hombre o de origen natural. También conocida como crecida de diseño, estas crecidas pueden tener efectos negativos si no se implementan medidas de mitigación o control del agua. Al diseñar diversas estructuras hidrológicas, es fundamental tener en cuenta tres elementos: los

caudales, las elevaciones y los volúmenes de agua, ya que son las magnitudes que caracterizan las crecidas.

2.1.2 Hidráulica

2.1.2.1 Curvas de Nivel

Es una línea que une todos los puntos del mapa que tienen la misma posición (normalmente altura o profundidad). Las curvas de nivel suelen estar impresas en mapas en color para indicar la topografía y en azul para indicar los glaciares y las profundidades marinas. La impresión de los relieves a menudo se enfatiza con sombras que imitan las sombras proyectadas por los relieves en la luz del norte o del noroeste (Juculaca Incacutipa, 2021).

Las curvas de nivel son una serie de líneas ficticias que conectan puntos con la misma altitud en relación a un plano de referencia, generalmente el nivel medio del mar. Utilizando las curvas de nivel, es posible representar de manera sencilla y precisa la topografía de un terreno en comparación con otros métodos, ya que en conjunto reflejan de manera cualitativa y cuantitativa las elevaciones, depresiones y características destacadas del terreno (Pancca Cruz & Belizario Quispe, 2020).

2.1.2.2 Secciones Transversales

Son divisiones 2D en gráficos de tres dimensiones. De otra forma, se interpreta encontrando la intersección de un nivel de dos dimensiones y un diagrama de tres dimensiones. Para un número específico de tres dimensiones, la sección cruzada depende de la dirección de la capa o "sección". Un caso particular puede ser considerar un cilindro.

Varios cortes en planta o de lado pueden producir un círculo o un rectángulo (Juculaca Incacutipa, 2021).

2.1.2.3 Modelo de Elevación Digital (DEM)

El Modelo de Elevación Digital (DEM) es una parte del Modelo Digital de Terreno (MDT) el cual es una representación numérica de datos que describe la distribución tridimensional del terreno. Un DEM consiste en una matriz ordenada de números que representa la distribución espacial de las alturas especificado en el sistema de coordenadas elegido (Pancca Cruz & Belizario Quispe, 2020).

2.1.2.4 Perfil Longitudinal

Es una sección longitudinal o un plano que representa el camino o la diferencia de elevación entre dos lugares determinados, representa varios desniveles, pendientes, distancias parciales y muestra el punto de partida (trayecto) del recorrido. Estos datos reflejarán el comportamiento de los terrenos en construcción (proyectos de vivienda, terrazas) y en obras (trazos de caminos, proyectos de oleoductos, etc.) (Juculaca Incacutipa, 2021).

Asimismo, el perfil longitudinal se refiere a una representación gráfica del terreno a lo largo de un eje longitudinal en un plano horizontal, que se obtiene trazando una línea quebrada a partir de la intersección entre la superficie topográfica y un plano vertical que contiene dicho eje. Esta herramienta se utiliza para mostrar de manera visual el relieve y las características del terreno a lo largo de un eje longitudinal específico (Pancca Cruz & Belizario Quispe, 2020).

2.1.2.5 Rugosidad

De acuerdo a Chow et al. (1994), al aplicar la fórmula de Manning o la fórmula de Ganguillet y Kutter, el mayor desafío radica en determinar el coeficiente de rugosidad (n) debido a la falta de un método exacto para seleccionar su valor. En el estado actual del conocimiento, la elección de un valor de n implica estimar la resistencia al flujo en un canal determinado, lo cual es un asunto difícil de precisar.

Para determinar adecuadamente el coeficiente de rugosidad (n), se deben considerar cuatro enfoques generales:

- Comprender los factores que influyen en el valor de n .
- Consultar una tabla de valores típicos de n para diferentes tipos de canales.
- Examinar y familiarizarse con algunos canales representativos cuyos coeficientes de rugosidad no se conocen.
- Determinar el valor de n mediante un procedimiento analítico basado en la distribución de velocidades o la rugosidad del canal.

Asimismo, es necesario iniciar con un estudio de suelos que es un conjunto de actividades que permite obtener información en un área específica. Es una de las piezas de información más importantes en la planificación, diseño y ejecución de proyectos de construcción. Por lo tanto, dichos levantamientos se realizan antes del inicio de cualquier actividad que involucre el movimiento de tierras, para determinar la naturaleza y el carácter del terreno, lo cual es fundamental para determinar el tipo y el estado de los cimientos (Juculaca Incacutipa, 2021)

Finalmente, existen factores que afectan el coeficiente de rugosidad de Manning, como lo es la rugosidad de la superficie, vegetación, irregularidad del cauce del río, socavaciones, obstrucciones, tamaño y forma del cauce, nivel y caudal.

2.1.2.6 Áreas Inundables

Las inundaciones ocurren cuando las lluvias intensas o prolongadas superan la capacidad de retención del suelo, rebasando el volumen máximo que puede transportar el río y provocando el desbordamiento del cauce principal, inundando así los terrenos adyacentes. Este desbordamiento del cauce se puede traducir en áreas afectadas las cuales se pueden cuantificar como una capa superficial expresada en m² lo cual conocemos como áreas inundables cuando se estima las zonas que podrían ser afectadas cuando ocurran eventos anómalos. Las inundaciones provocan perjuicios a la vida de las personas, sus propiedades y la infraestructura, además de ocasionar daños significativos al medio ambiente y al suelo de las áreas ribereñas. Estas inundaciones son responsables de la erosión y sedimentación de las fuentes de agua. Es importante distinguir las zonas inundables en función del nivel de peligro que representan (Pancca Cruz & Belizario Quispe, 2020).

2.1.2.7 Modelos unidimensionales y bidimensionales

Según Howard et al. (2012) los modelos de flujo de canal abierto unidimensionales son los más utilizados en el modelado hidráulico. Existen modelos bidimensionales (TELEMAC-2D, HVEL2D y RMA2), pero rara vez se utilizan en la investigación de paleo-inundaciones. En una revisión de la

sensibilidad de los parámetros de los modelos unidimensionales y bidimensionales (por ejemplo, n de Manning) y la precisión general del modelo numérico, los resultados no son concluyentes en cuanto a si el modelo bidimensional agrega complejidad. Vale la pena usar el modelo de tamaño. Existe evidencia de que los modelos hidráulicos bidimensionales basados en elementos finitos y métodos numéricos de volumen finito son relativamente insensibles a los coeficientes de rugosidad de la superficie. Trabajos recientes han demostrado que el modelado de inundaciones unidimensionales generalmente proporciona resultados similares a los modelos bidimensionales.

Asimismo, las simulaciones 2D representan proyectos detallados de desarrollo urbano a pequeña escala y opciones obligatorias para proyectos a gran escala, especialmente para entornos urbanos complejos donde los supuestos unidimensionales generalmente no son aplicables y se debe evaluar el impacto socioeconómico de las inundaciones (Grimaldi et al., 2013).

2.2 DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS

2.2.1 Hidrología

La interacción del agua con los organismos vivos implica su movimiento en la superficie y subsuelo de la tierra, así como los procesos químicos, físicos y biológicos que ocurren a lo largo de su recorrido (Pancca Cruz & Belizario Quispe, 2020)

2.2.2 Precipitación

Las precipitaciones son acumulaciones masivas de vapor de agua que se transforman en forma de lluvia, representando un fenómeno hidrológico de gran

importancia. Este proceso ocurre cuando el aire húmedo, que no está saturado, cerca de la superficie terrestre se eleva rápidamente a grandes alturas, ya sea por convección u otros mecanismos que producen el mismo efecto. Durante este ascenso, el aire se expande debido a la disminución de la presión, lo que conlleva a la condensación del vapor de agua y finalmente a la precipitación (Pancca Cruz & Belizario Quispe, 2020).

2.2.3 RCP 4.5

Son escenarios de emisión de GEI (gas de efecto invernadero) en el cual los esfuerzos en mitigarlos conducen a un nivel de forzamiento muy bajo, intermedio y muy alto. El nivel RCP 4.5 corresponde a un escenario de estabilización (IPCC, 2014).

2.2.4 RCP 8.5

Son escenarios de emisión de GEI (gas de efecto invernadero) en el cual los esfuerzos en mitigarlos conducen a un nivel de forzamiento muy bajo, intermedio y muy alto. El nivel RCP 8.5 corresponde a un escenario con un nivel muy alto de emisión (IPCC, 2014).

2.2.5 Modelo Hidrológico

Los modelos hidrológicos son herramientas esenciales que nos permiten comprender y determinar el funcionamiento de los diferentes componentes del ciclo hidrológico. Estos modelos tienen la capacidad de inferir las posibles condiciones futuras en base a la información disponible en el presente, y también pueden utilizarse para simular otros procesos, como la calidad del agua, entre otros (García Aquino, 2022).

2.2.6 Caudales Máximos

Los caudales máximos son flujos enormes no convencionales de agua, que se manifiesta en un tiempo determinado conocido como periodo de retorno (Juculaca Incacutipa, 2021).

2.2.7 Curva de Nivel

Las curvas de nivel son una serie de líneas ficticias que conectan puntos con la misma altitud en relación a un plano de referencia, generalmente el nivel medio del mar. Utilizando las curvas de nivel, es posible representar de manera sencilla y precisa la topografía de un terreno (Pancca Cruz & Belizario Quispe, 2020).

2.2.8 Modelo de Elevación Digital

Un DEM consiste en una matriz ordenada de números que representa la distribución espacial de las alturas especificado en el sistema de coordenadas elegido (Pancca Cruz & Belizario Quispe, 2020).

2.2.9 IBER

Es un software de modelización numérica del flujo de agua en lámina libre en 2D. La herramienta denominada IBER integra un módulo hidrodinámico, un módulo de turbulencia y un módulo de transporte de sedimentos. Emplea el método de volúmenes finitos para resolver las ecuaciones correspondientes de manera precisa y eficiente (Bladé et al., 2014).

2.2.10 HEC RAS

El Cuerpo de Ingenieros de la Armada del Ejército de los Estados Unidos ha desarrollado una herramienta gratuita llamada HEC RAS versión 6.3.1, que nos permite

simular el flujo de agua utilizando modelos 1D/2D, así como modelos completamente 2D (Pancca Cruz & Belizario Quispe, 2020).

CAPITULO III

MARCO METODOLÓGICO

3.1 TIPO DE INVESTIGACIÓN

Aplicada, debido a que se requiere realizar un análisis comparativo entre los modelos hidráulicos para determinar áreas inundables utilizando IBER Y HEC RAS en la quebrada del diablo, región Tacna.

3.2 NIVEL DE INVESTIGACIÓN

El nivel de investigación es experimental, debido a que se requiere encontrar un modelo óptimo para la realización de simulaciones para determinar las áreas inundables y alertar a la población para que tome las medidas necesarias.

3.3 POBLACIÓN Y MUESTRA DE INVESTIGACIÓN

3.3.1 Población

Microcuenca de la quebrada del diablo, región Tacna.

3.3.2 Muestra

Desembocadura de la quebrada del diablo, distrito Alto de la Alianza.

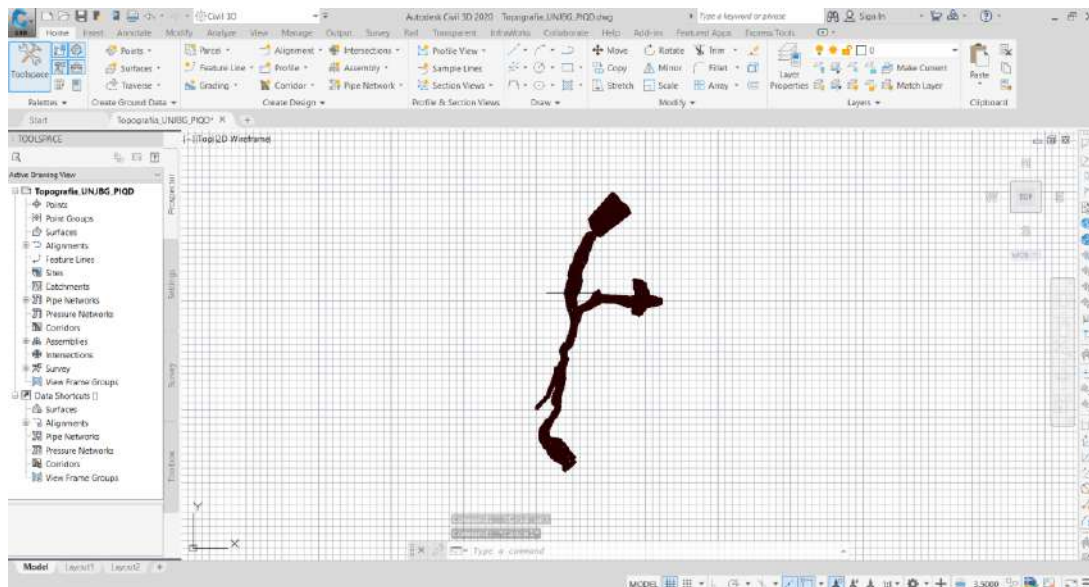
3.4 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS PARA LA RECOLECCIÓN DE DATOS

3.4.1 Procedimiento para obtener la topografía

El procedimiento para obtener la topografía inicia con la producción de las curvas de nivel en el programa Autodesk CIVIL 3D para lo cual contó con la información del artículo científico “Impacts of Climate Change and Variability on Precipitation and Maximum Flows in Devil’s Creek, Tacna, Peru”(Pino-Vargas et al., 2022). La información requerida tiene que estar a nivel de modelo digital de elevación (DEM), para lo cual se necesita procesar los datos de las curvas de nivel obtenidas.

Figura 1

Topografía de la microcuenca de la quebrada del diablo

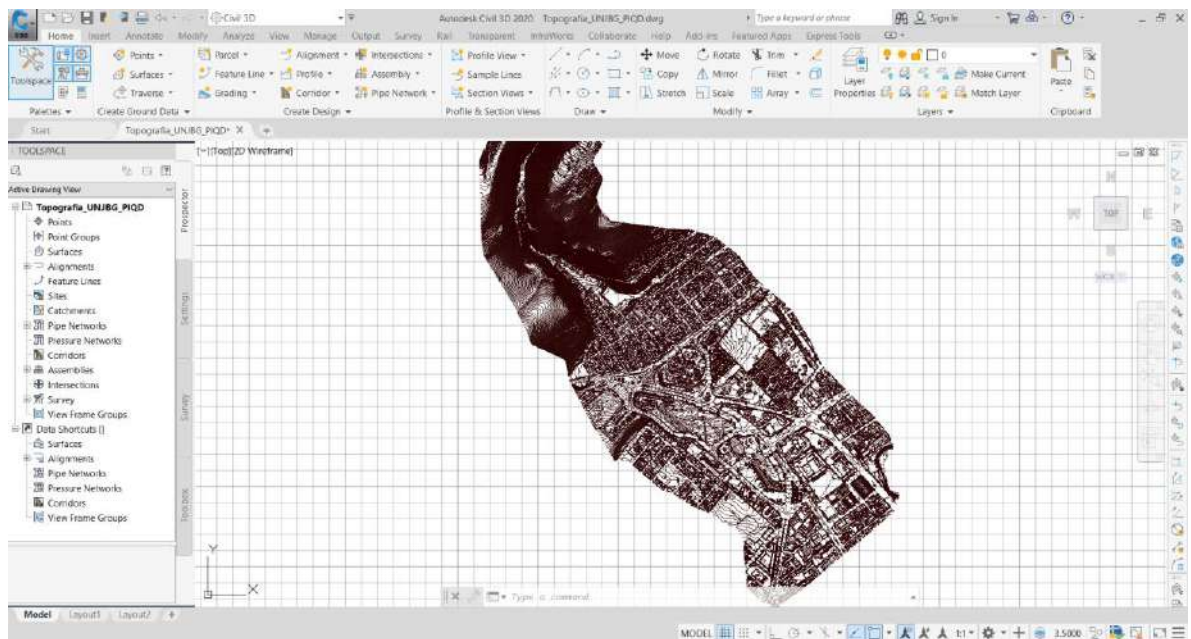


Nota: Como podemos ver en la Figura 1 se tiene la topografía de toda la microcuenca de la quebrada del diablo.

Luego se procede a recortar la zona de estudio debido a que no es necesario realizar el modelo hidráulico en toda la cuenca para obtener las zonas inundables. Es por ello que se realiza la posterior delimitación con fines de seccionar la zona más importante y de análisis debido a que se requiere observar las zonas inundadas como parte de la simulación con los softwares IBER y HEC RAS. Asimismo, se usará la misma topografía para ambos modelos debido a que se necesita comparar los modelos hidráulicos con las mismas condiciones.

Figura 2

Topografía de la desembocadura de la quebrada del diablo

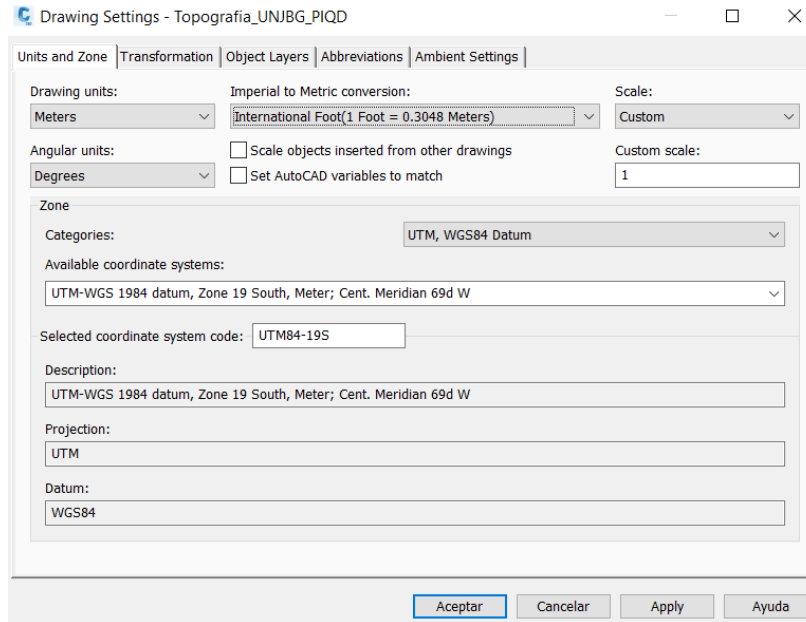


Nota: Se puede observar que se cuenta con la topografía de la zona de la desembocadura que se utilizará en los modelos en IBER y HEC RAS.

Por consiguiente, se ha realizado la verificación de las unidades de medida, la escala y el sistema de coordenadas. Las cuales deben estar en metros, custom y UTM, WGS84 zona 19S respectivamente.

Figura 3

Configuración de unidades, escala y sistema de coordenadas

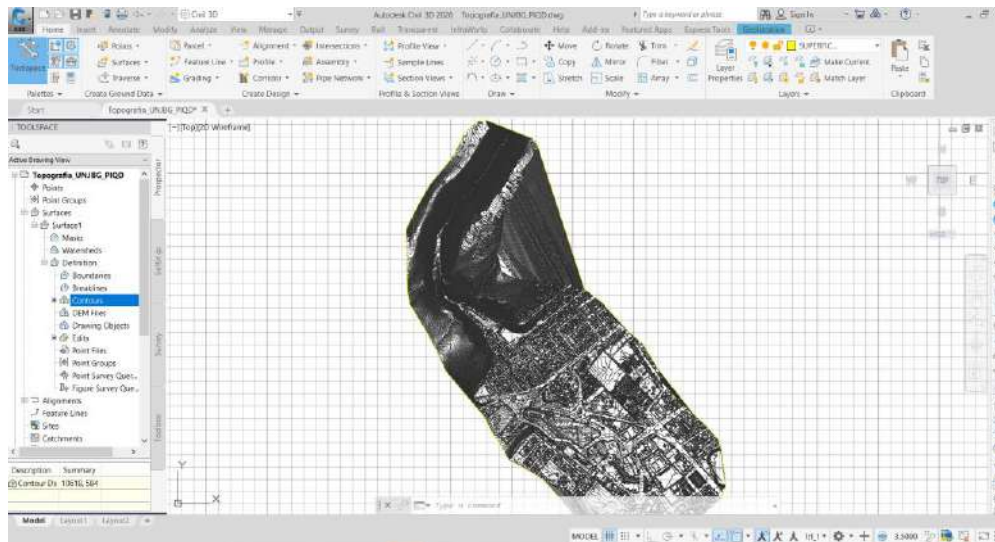


Nota: Se puede apreciar la configuración de las unidades, escala y sistema de coordenadas.

Luego se procede a crear una superficie usando la herramienta “Contours”. En primer lugar, procedió a crear una capa la cual se nombró como “superficie”. En segundo lugar, se creó una superficie usando como “layer” la capa “superficie”. Finalmente usando la herramienta “Contours” creamos nuestra superficie teniendo como condición el rango de intervalos de las curvas de nivel los números 0.50m a 2.00m y se generó las curvas de nivel como se muestra en la figura 4.

Figura 4

Superficie creada con la herramienta “Contours”

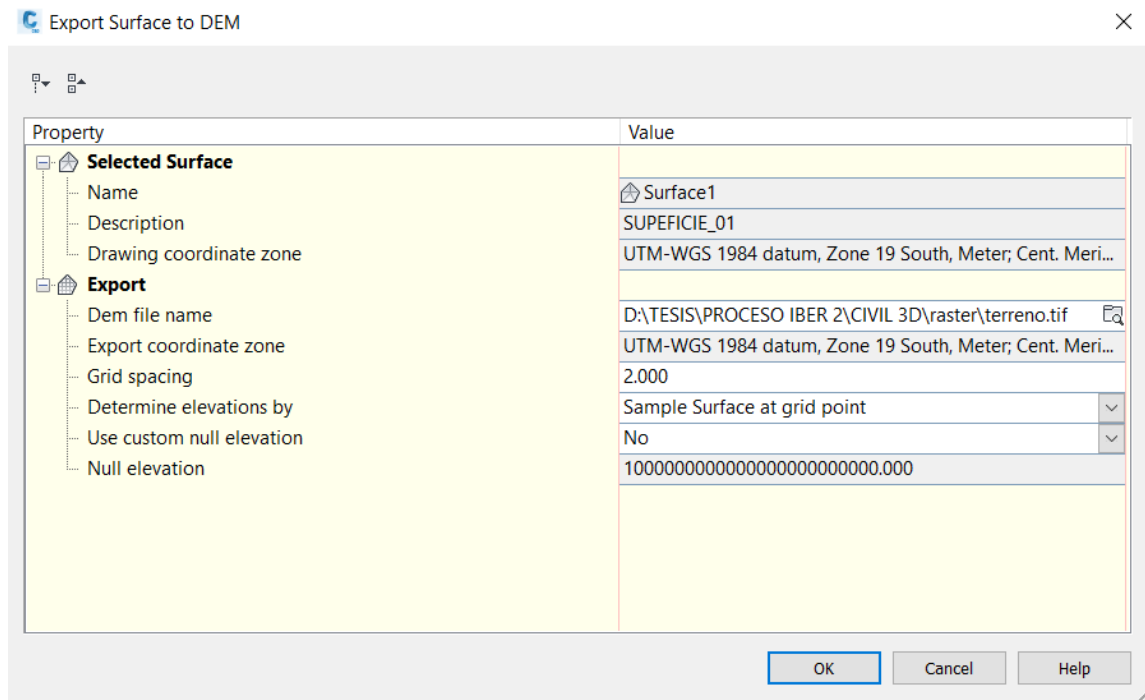


Nota: Se puede apreciar que se han desactivado las capas dejando solo la capa “superficie”.

Por consiguiente, se realizó la exportación de la topografía a formato de modelo de elevación digital usando el comando “SURFACEEXPORTTODEM” el cual configuramos como se muestra en la figura 5.

Figura 5

Configuración del DEM a exportar



Nota: Se puede apreciar que las coordenadas son UTM-WGS84-19S y el espacio de las celdas es de 2.00 m.

Finalmente, guardamos el archivo en nuestra carpeta de trabajo con el cual tendríamos del DEM corregido para el modelamiento hidráulico con los softwares IBER y HEC RAS. Asimismo, estos se encuentran georreferenciados en el sistema UTM-WGS84-ZONA 19S.

3.4.2 Procedimiento para obtener la geometría

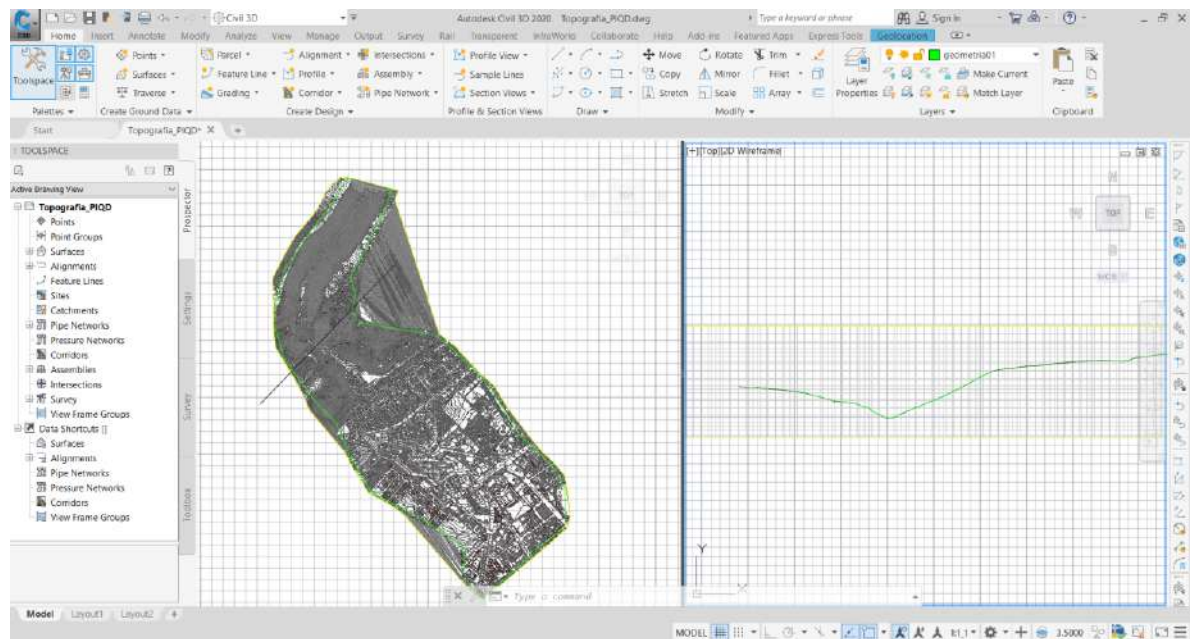
3.4.2.1 Para el software IBER

Para obtener la geometría con el software IBER necesitamos crear un archivo shapefile. Para ello, usaremos el software QGIS y Autodesk Civil 3D. En primer lugar, abrimos nuestro archivo de superficie (Figura 4) con la cual delimitaremos la zona por medio polilíneas. En segundo lugar, creamos una capa la cual llamamos “geometríaq”,

continuamos con la generación de polilíneas usando el comando “PL”, usando este comando delimitaremos toda la zona de estudio conocido como la desembocadura de la quebrada del diablo. Asimismo, usamos un perfil rápido para verificar las secciones de la superficie, esto para corroborar dónde se ubica el cauce de la desembocadura de la quebrada del diablo. Finalmente cerramos la polilínea formando un polígono como se muestra en la Figura 6.

Figura 6

Delimitación de la zona de estudio



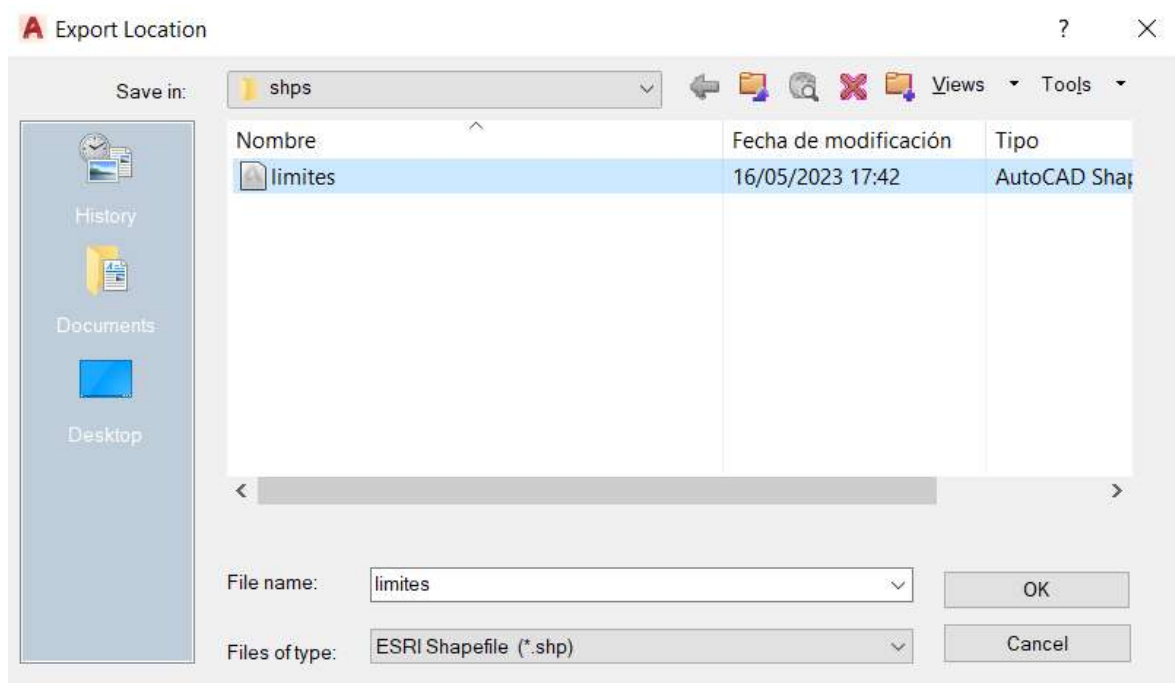
Nota: Se puede apreciar la delimitación realizada con la capa de color verde.

Continuamos con la exportación del polígono a shapefile usando el comando “MAPEXPORT” el cual guardaremos en nuestra carpeta de trabajo con la extensión “ESRI Shapefile (*.shp)” como se aprecia en la Figura 7, luego verificaremos la información

concerniente al object type, el cual dejamos en “Line” y dejamos lo demás por defecto como se muestra en la Figura 8.

Figura 7

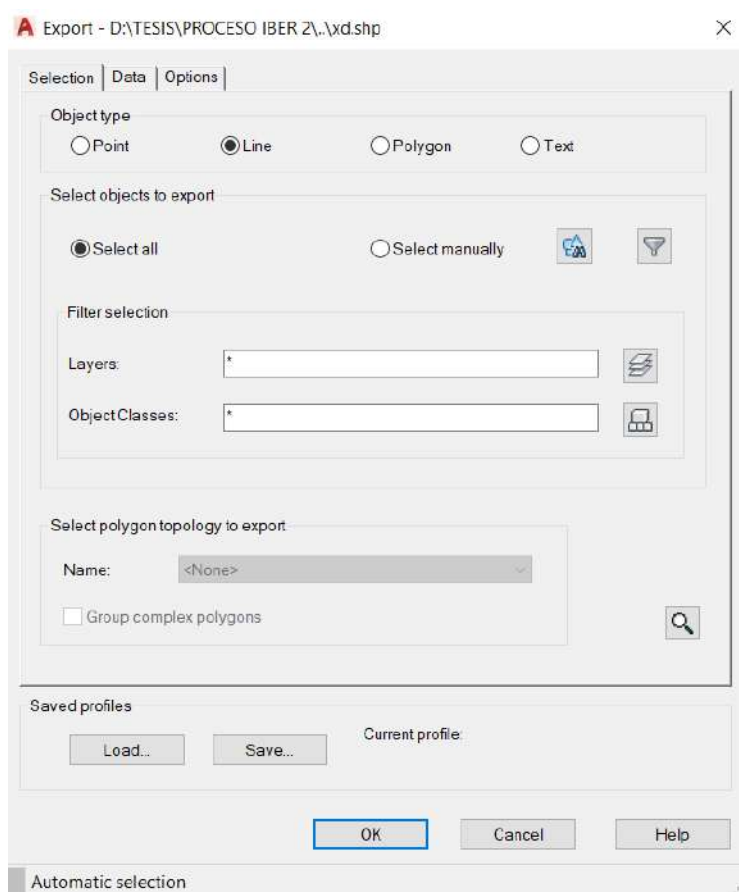
Polígono de límites en formato shapefile



Nota: Se puede apreciar la extensión “(*.shp)”.

Figura 8

Exportar polígono en formato shapefile

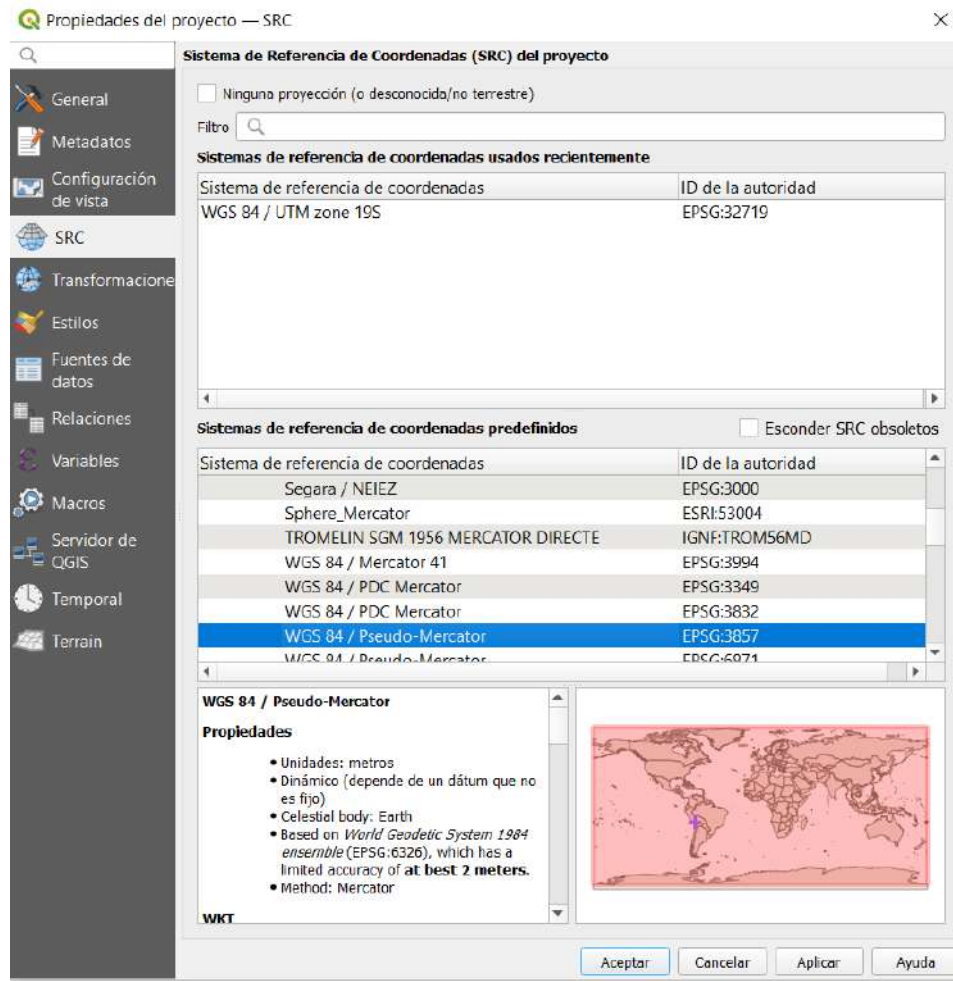


Nota: Se aprecia las características de la geometría a exportar.

Continuamos abriendo QGIS, creamos un nuevo proyecto y lo guardamos en nuestra carpeta de trabajo. En primer lugar, configuramos nuestro espacio de trabajo y definimos nuestro sistema de coordenadas como se muestra en la Figura 9. Ahora bien, para crear nuestra geometría desde QGIS necesitamos abrir nuestro archivo shapefile que hemos generado en Autodesk Civil 3D, para ello, vamos a nuestra carpeta de trabajo y arrastramos el shapefile “límites” a QGIS y activamos un Quick Map Services de Google Satellite como se muestra en la Figura 10.

Figura 9

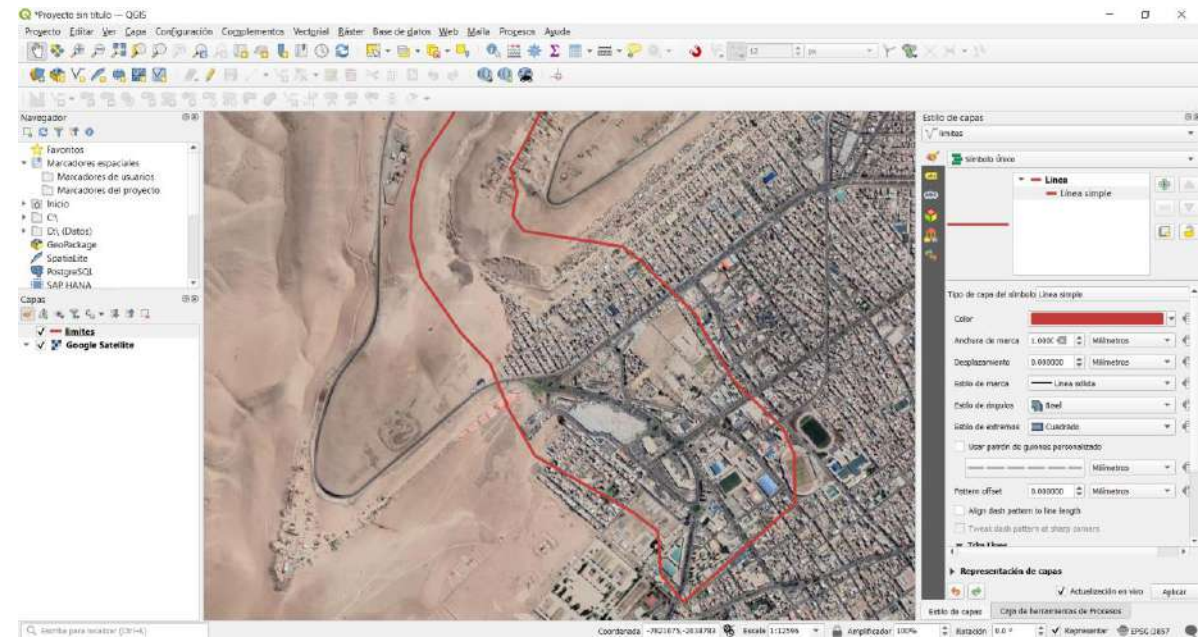
Configuración del espacio de trabajo en QGIS



Nota: Se puede apreciar que el sistema de referencia de coordenadas es WGS84/UTM Zona 19S.

Figura 10

Archivo Shapefile en QGIS

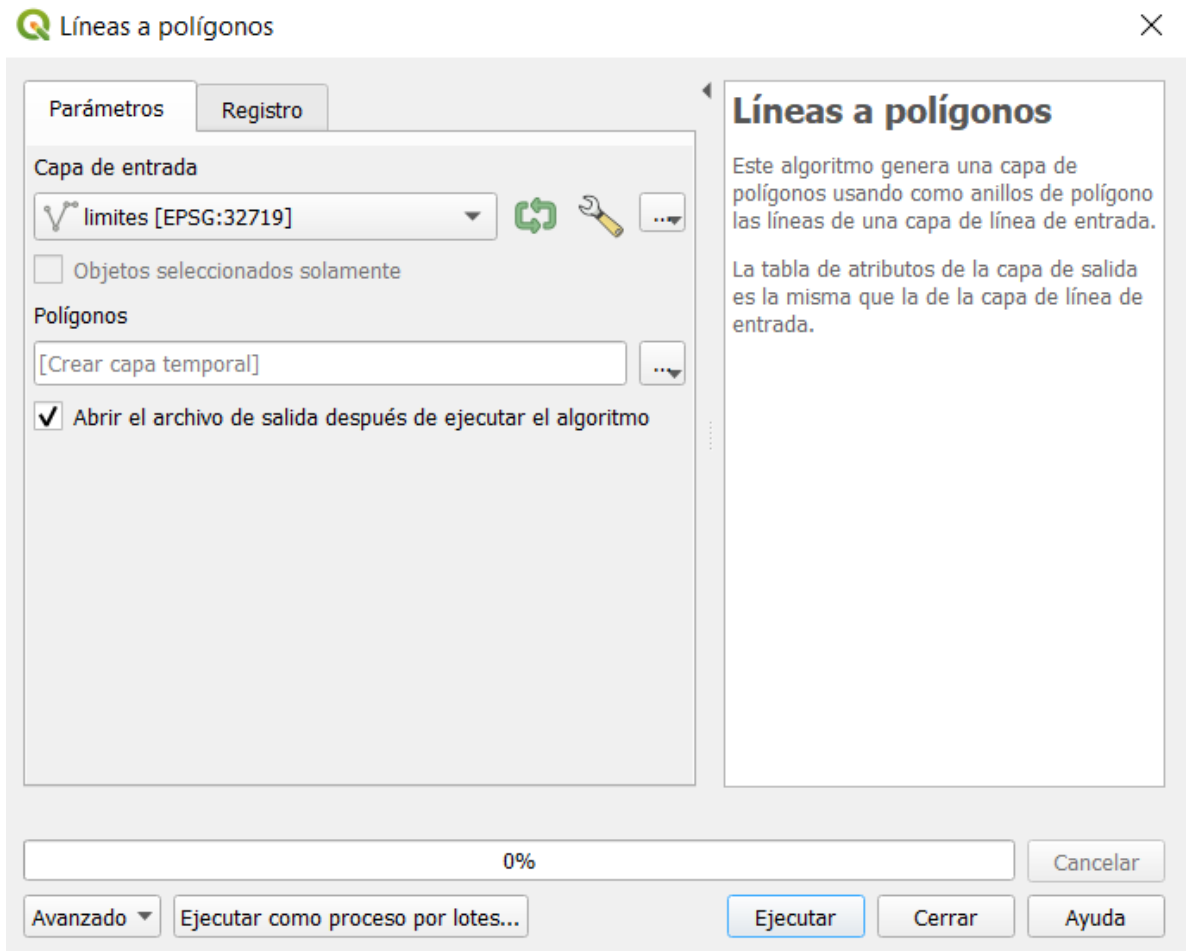


Nota: Se puede observar el límite de la zona de estudio de color rojo el cual ya se encuentra importado en nuestra carpeta de trabajo.

Luego, usamos la herramienta de geometría “convertir de líneas a polígonos” para lo cual iremos a la pestaña “Vectorial”, luego “Herramientas de geometría” y finalmente “de líneas a polígonos” como se aprecia en la figura 11.

Figura 11

Configuración de la herramienta “convertir de líneas a polígonos”

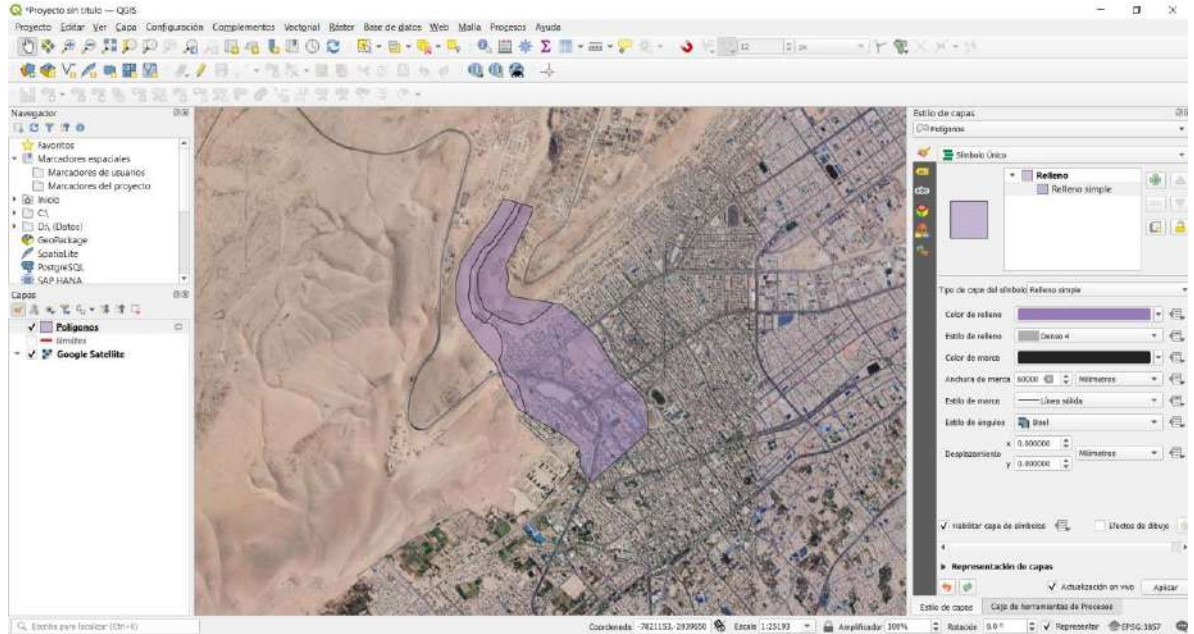


Nota: Se puede apreciar que usaremos como capa de entrada el archivo shapefile que importamos desde Autodesk Civil 3D.

Continuando, apreciamos el shapefile polígonos que tenemos que asignar cierta transparencia para poder delimitar la zona de trabajo para ello en la “Caja de Herramientas de Procesos” luego asignamos una transparencia y procedemos a editar usando la herramienta “Conmutar edición”, luego habilitamos la opción “auto ensamblado” y realizamos los cortes en el polígono usando la herramienta “dividir objetos espaciales” como se muestra en la Figura 12.

Figura 12

Cortes del polígono para determinar la geometría

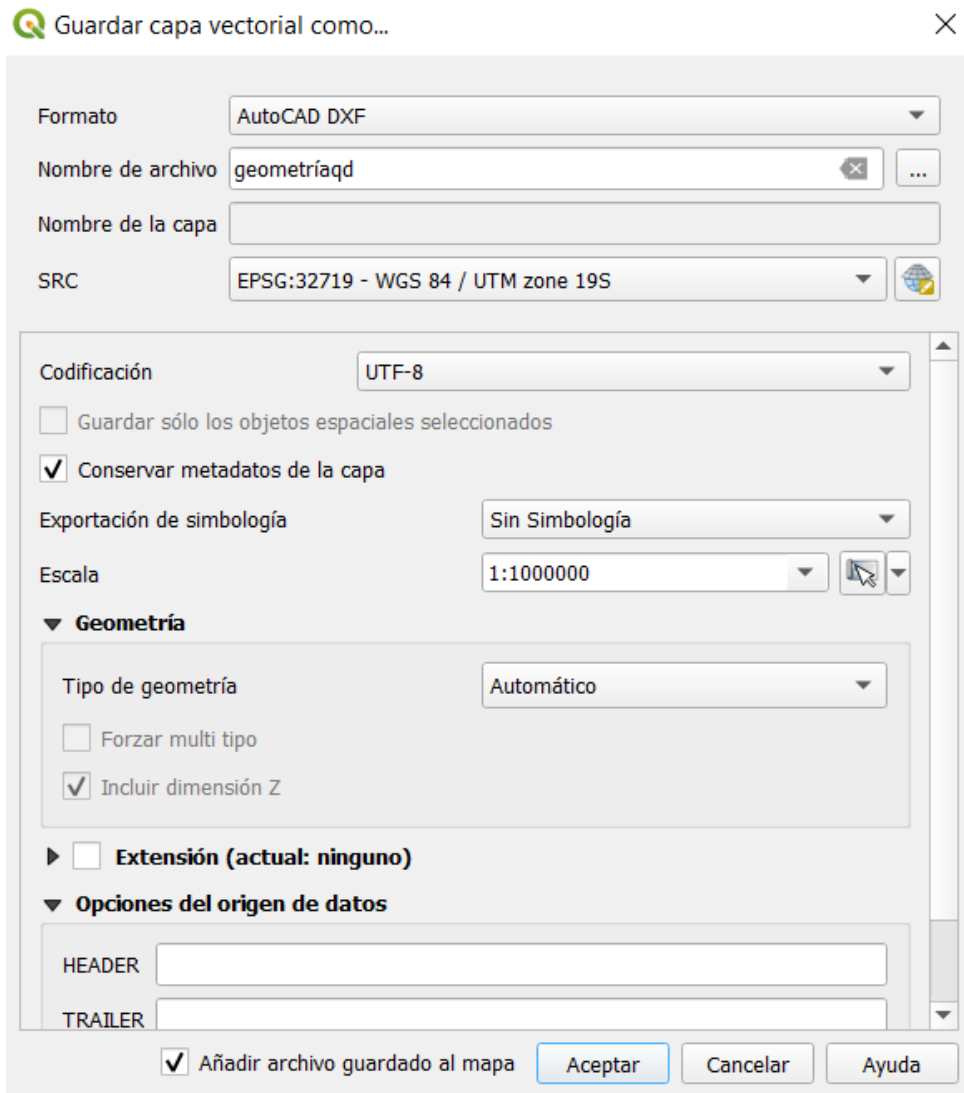


Nota: Se aprecia de color morado transparente la geometría de la zona de estudio ya definido.

Finalmente, la geometría trabajada la exportamos y al guardamos como se muestra en la Figura 13.

Figura 13

Geometría exportada en formato DXF para IBER



Nota: Se puede apreciar el formato de salida y el sistema de referencia de coordenadas WGS84-UTM Zona 19S.

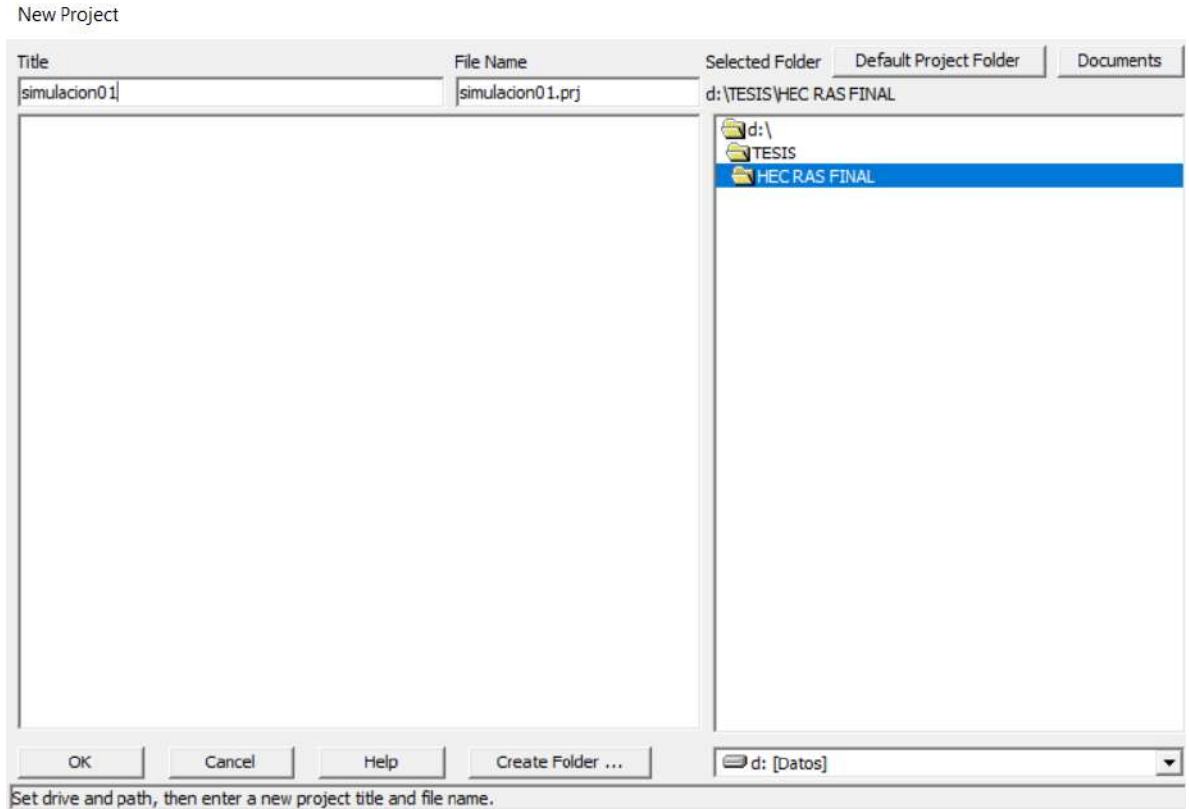
3.4.2.2 Para el software HEC RAS

En primer lugar, usaremos la versión HEC RAS v.6.3.1 en el cual se puede trabajar con RAS MAPPER, esta aplicación permite crear la geometría sin tener que exportar e importar información desde ARC GIS. Continuamos abriendo la aplicación, luego nos

dirigimos a crear nuevo proyecto y guardamos el mismo en nuestra carpeta de trabajo como se muestra en la Figura 14.

Figura 14

Creación de nuevo proyecto en HEC RAS



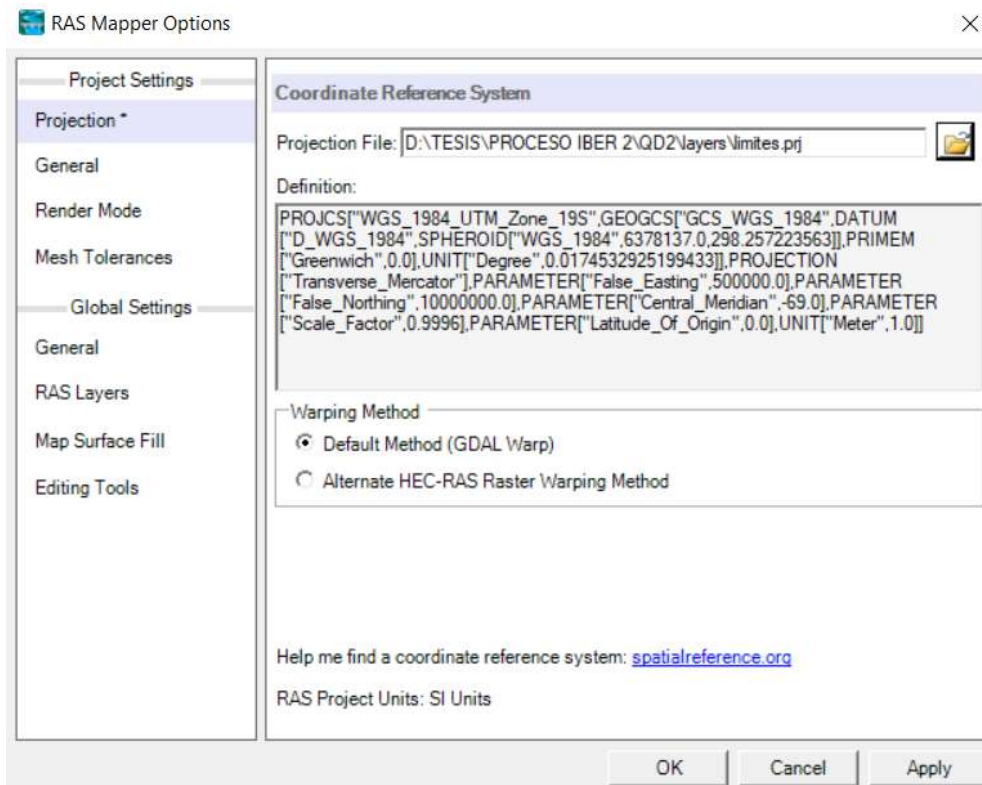
Nota: Se aprecia la ventana de “New Project” con el cual guardaremos nuestro proyecto.

Luego, abrimos la herramienta RAS MAPPER ubicado en la barra de herramientas de HEC RAS, la cual nos abrirá una nueva ventana, por consiguiente, tenemos que especificar el sistema de referencia de coordenadas, para ello nos dirigimos a la pestaña “Project”, luego escogemos “Set projection”, nos abrirá una ventana en la que debemos ingresar nuestro archivo shapefile “límites” el cual importamos y dejamos como se ve en la Figura 15. Luego nos dirigimos a la capa “Terrains” y escogemos “Create New RAS

Terrain”. Luego, importamos nuestro archivo DEM creado con el programa Autodesk Civil 3D como se muestra en la Figura 16 y Figura 17.

Figura 15

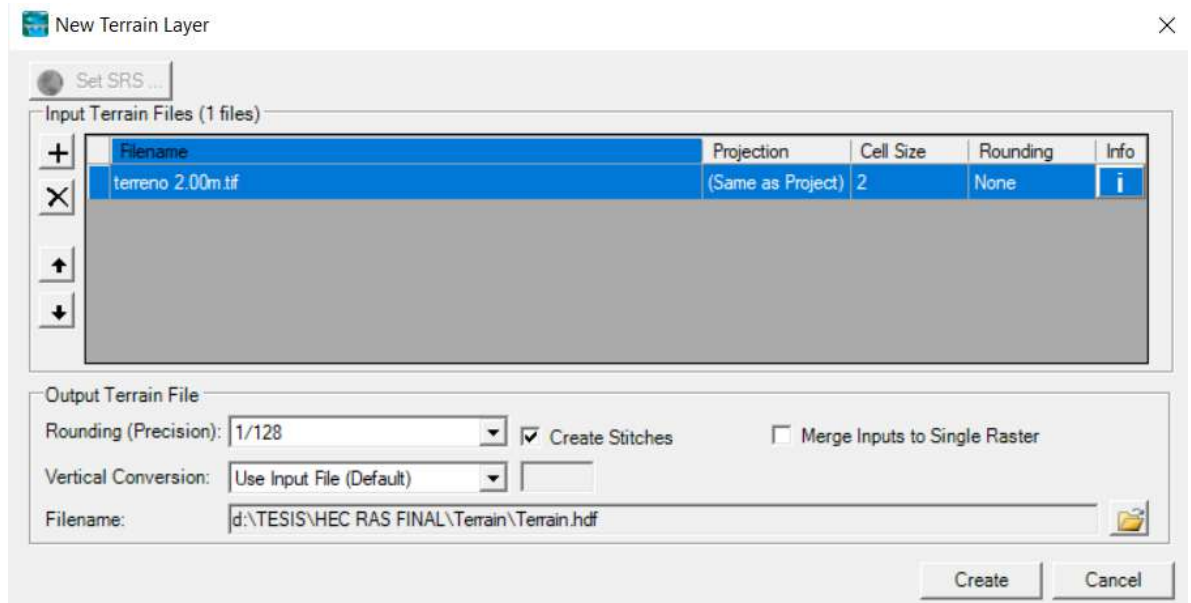
Herramienta RAS MAPPER con el shapefile “límites” de la zona de estudio



Nota: Se aprecia la georreferenciación del sistema de coordenadas WGS84-UTM Zona 19S.

Figura 16

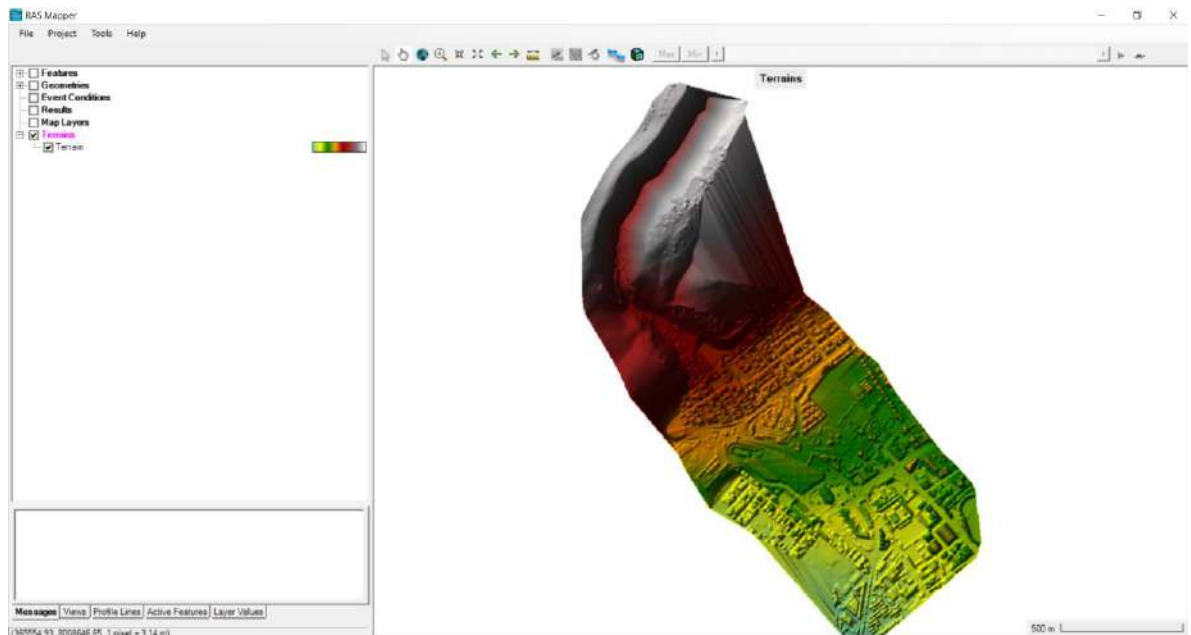
Herramienta Create New RAS Terrain



Nota: Se observa que importamos nuestro DEM creado en programa Civil 3D, también se observa el tamaño de la celda que en nuestro caso es 2.00 m.

Figura 17

DEM importado en RAS MAPPER

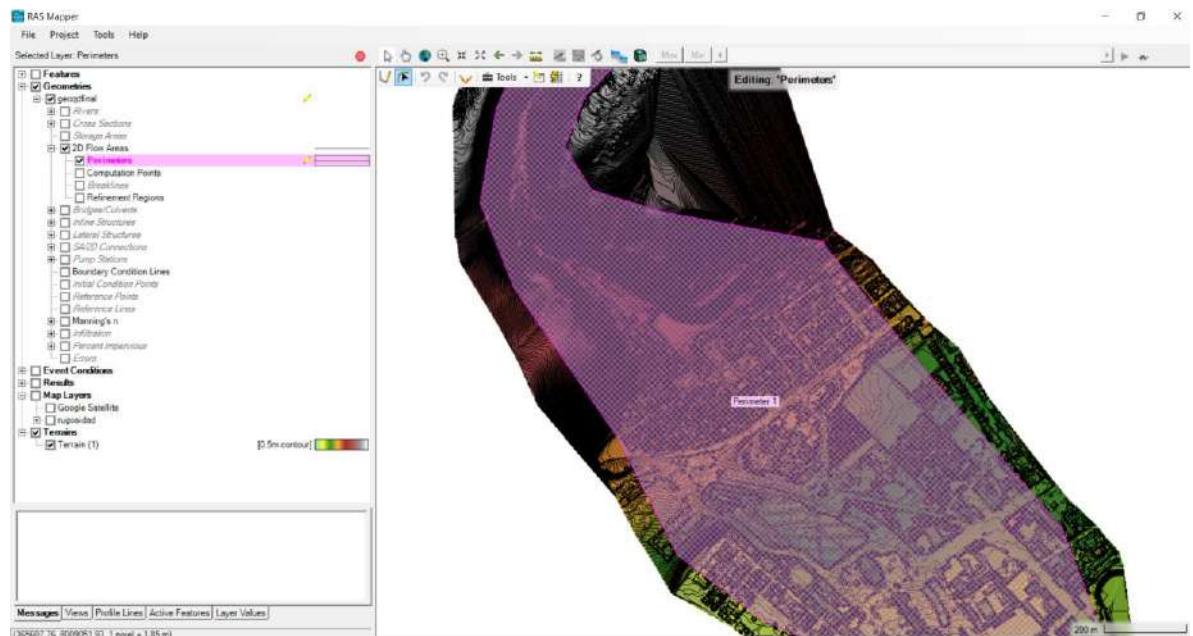


Nota: Se aprecia la topografía importada en la herramienta RAS MAPPER.

Por consiguiente, ahora podemos delimitar la zona de estudio creando nuestra malla, para ello nos dirigimos al panel de capas y damos click derecho a “Geometries”, luego “Add new geometry”, colocamos el nombre de la geometría como “geoqdfinal” y luego continuar. A continuación, se despliega una barra de capas en la cual seleccionaremos “2D Flow áreas”, continuamos delimitando la zona de trabajo como se muestra en la Figura 18 y escogemos una malla de tamaño de celda número 8 como se muestra en la figura 19.

Figura 18

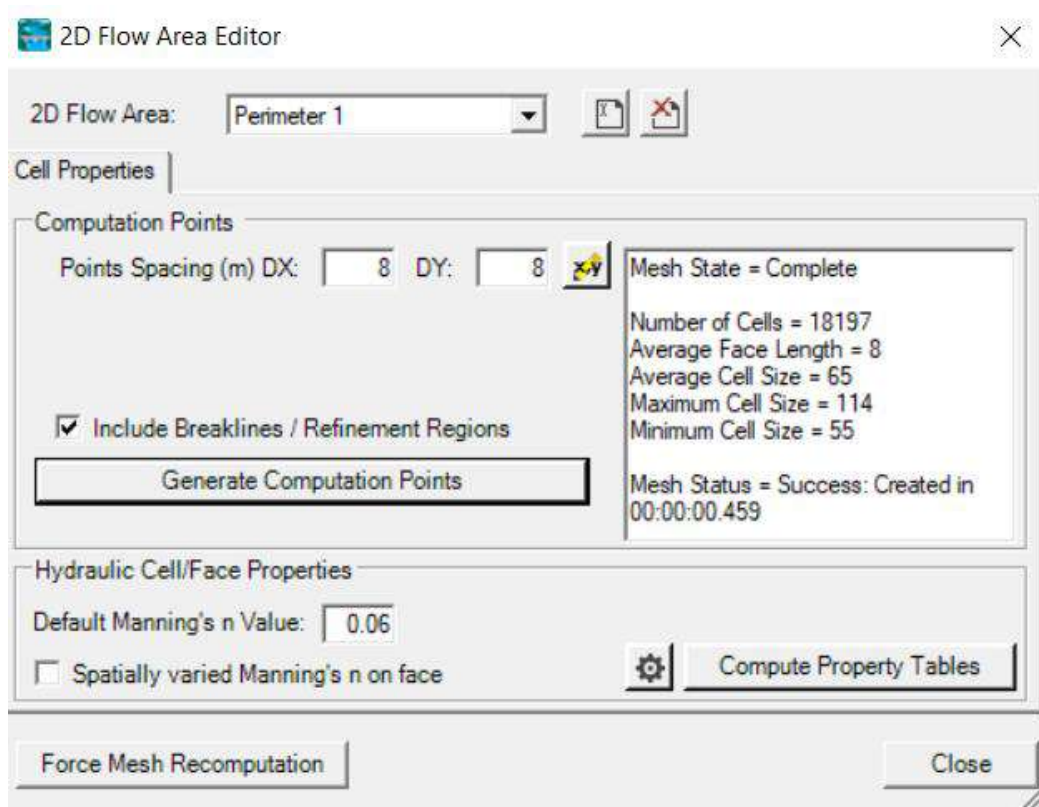
Delimitación de la zona de trabajo con la herramienta “2D Flow áreas”



Nota: Se aprecia el mallado generado de color rosado en la zona de trabajo.

Figura 19

Tamaño de celda de la malla a generar en RAS MAPPER

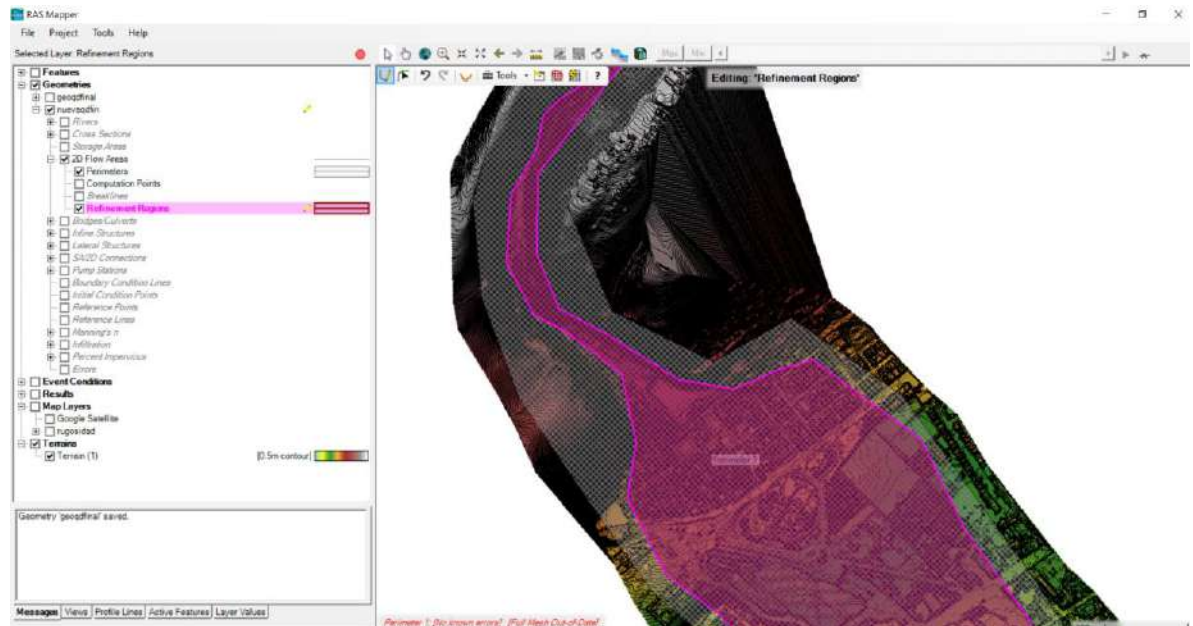


Nota: Se aprecia el tamaño de celda en metros, el número de celdas y el tamaño de las celdas.

En segundo lugar, necesitamos afinar la malla generada en el cauce, para ello nos dirigimos al panel de capas y seleccionamos la herramienta “Refinement Regions” y delimitamos la zona donde la malla debe ser más refinada para el posterior análisis como se muestra en la Figura 20.

Figura 20

Herramienta “Refinement Regions” en RAS MAPPER.



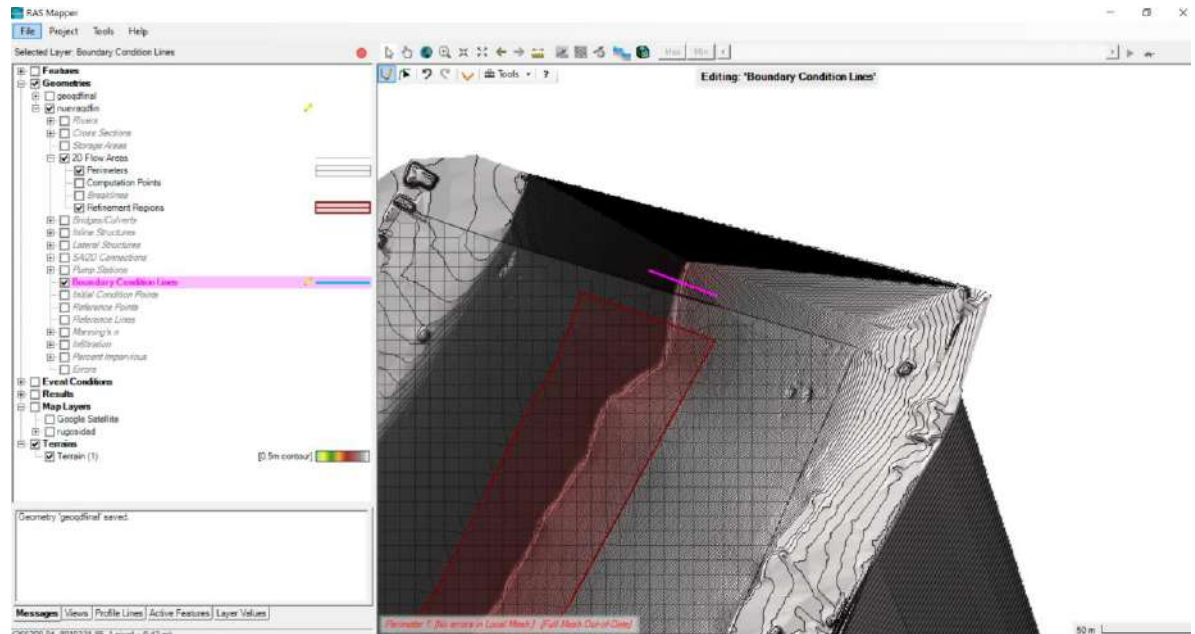
Nota: Se puede apreciar, la región generada y refinada.

Continuando con el procedimiento para refinar el cauce, se utiliza la herramienta “Enforce refinement regions” y luego la herramienta “Recompute out-of-the-date Meshes”, y tendríamos la geometría en RAS MAPPER.

Por consiguiente, necesitamos colocar las condiciones de entrada y salida, para lo cual usaremos la herramienta “Boundary conditions Lines”, en la cual seleccionaremos una línea como entrada de los caudales y otra línea como salida, para ello nos dirigimos aguas arriba y colocamos una línea transversal en cauce como se muestra en la Figura 21 y luego nos dirigimos aguas abajo y colocamos una línea transversal como se muestra en la Figura 22 indicando la entrada caudal aguas arriba y salida aguas abajo respectivamente.

Figura 21

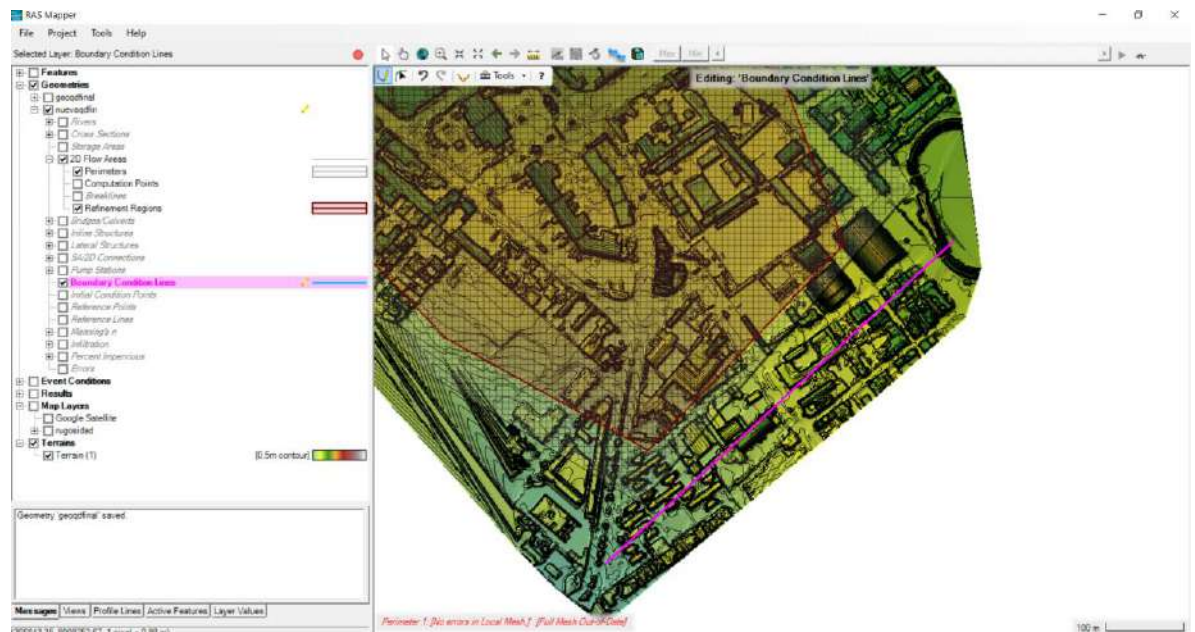
Colocación de “Boundary conditions Lines” aguas arriba



Nota: Se puede apreciar la línea de ingreso de caudal de color rosado.

Figura 22

Colocación de “Boundary conditions Lines” aguas abajo



Nota: Se puede apreciar la herramienta “Boundary conditions lines” en la salida del caudal.

Finalmente, establecemos la rugosidad como capa del proyecto, para ello nos dirigimos al panel de capas y escogemos la opción “Map Layers”, luego click derecho y escogemos “Create New RAS LAYER” y elegimos “Land Cover Layer”, se genera un cuadro de diálogo indicando que debemos importar el archivo de rugosidades del punto 3.4.3, para ello seleccionamos nuestra carpeta de trabajo y lo importamos, debemos observar la detección de los coeficientes asignados en nuestro archivo shapefile. Para ello nos dirigimos a la opción “Add Fields” y elegimos el campo “n” como se muestra en la Figura 23. Posteriormente, escogemos el tamaño de celda y guardamos como se muestra en la Figura 24.

Figura 23

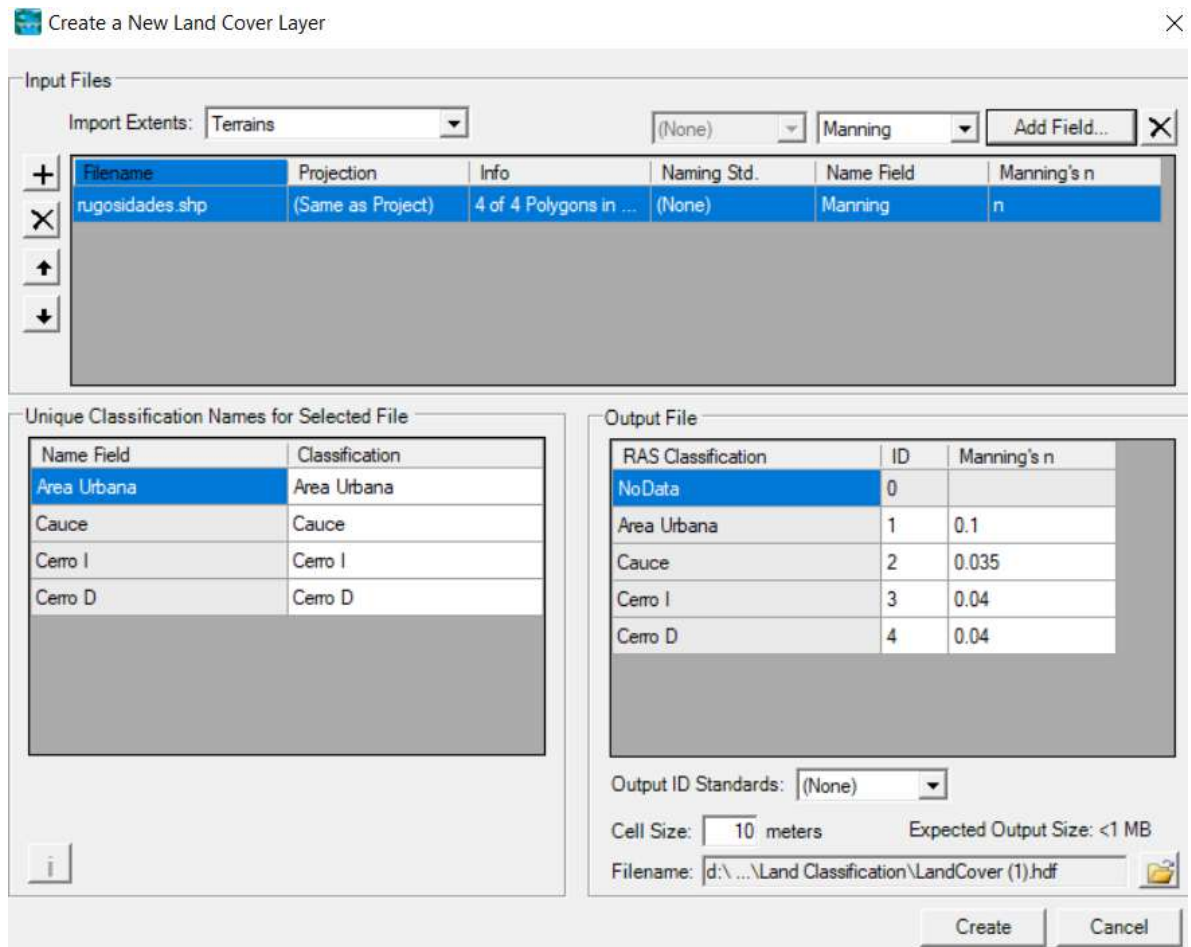
Selección de campos en RAS MAPPER para determinar la rugosidad



Nota: Se puede apreciar el campo “n” reconocido en RAS MAPPER.

Figura 24

Importación exitosa del archivo Shapefile de rugosidades en RAS MAPPER



Nota: Se puede apreciar la lectura de datos según la rugosidad en la herramienta RAS MAPPER.

Como último paso, guardamos nuestra geometría y la cargamos en el proyecto.

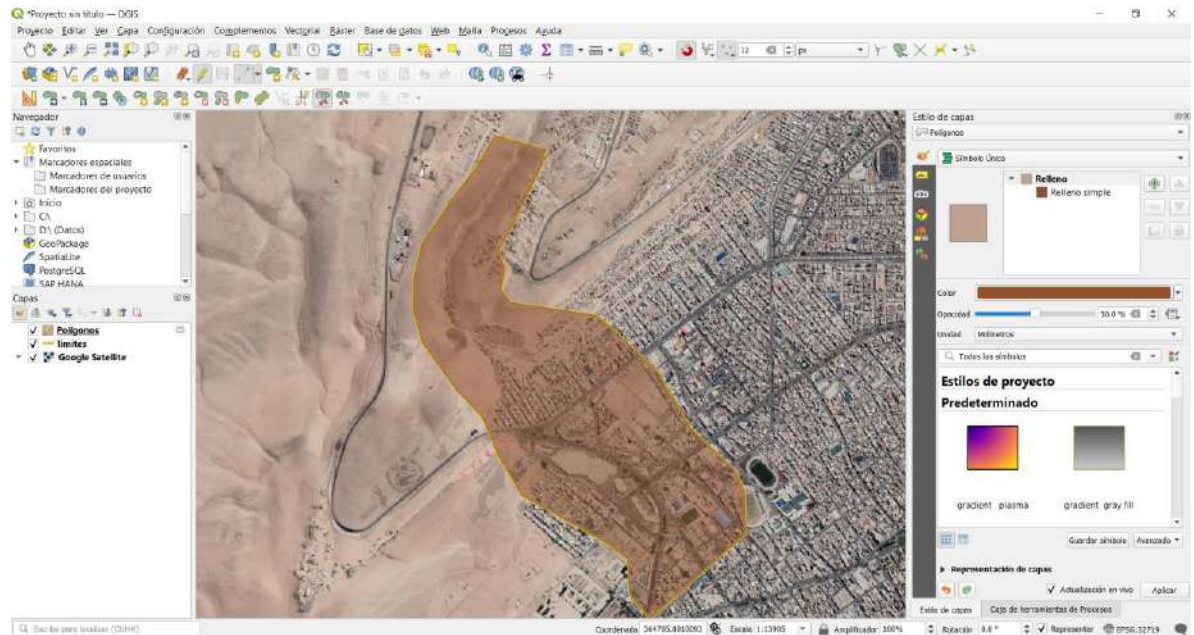
3.4.3 Procedimiento para establecer la rugosidad

Para establecer la rugosidad en ambos modelos usaremos un polígono shape recortado delimitando las zonas con los coeficientes de rugosidad de Manning según el área, esto se ve reflejado en la tabla de atributos del polígono. En primer lugar, abrimos nuestro archivo “límites” en QGIS, luego procedemos a utilizar la herramienta de

geometría “de líneas a polígonos” en la cual mostrará toda el área de la zona de estudio, sin embargo, para poder trabajar le damos una opacidad del 50% como se ve en la Figura 25.

Figura 25

Uso de la Herramienta de geometría “de líneas a polígonos”

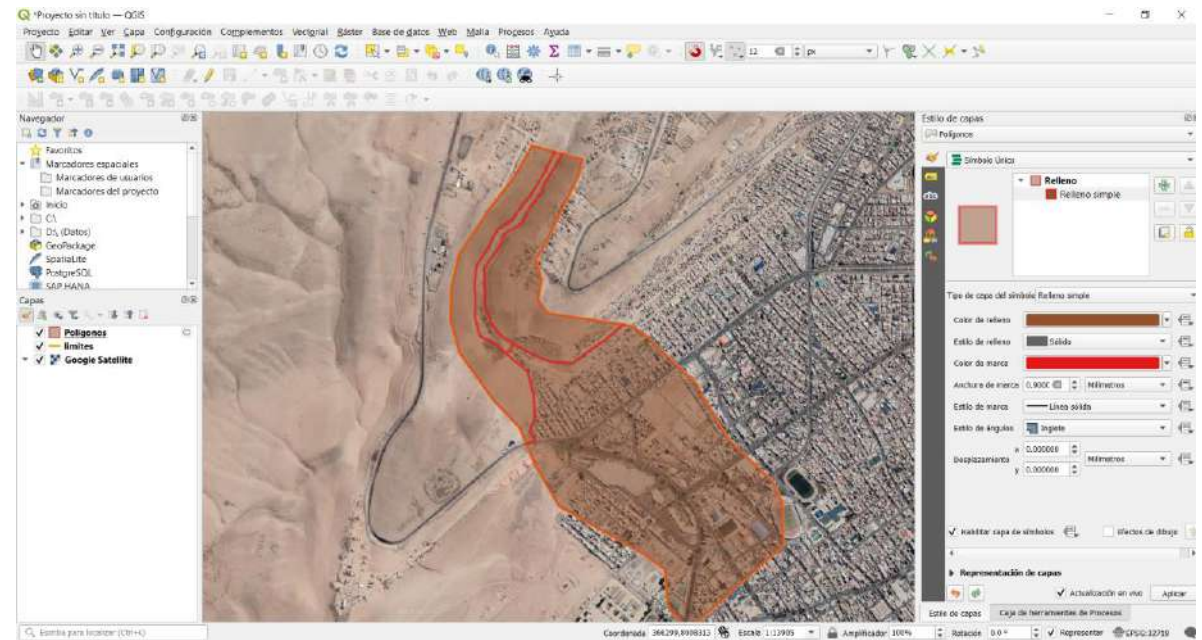


Nota: Se puede apreciar la zona de estudio de color marrón con una opacidad de 50%.

En segundo lugar, realizaremos los cortes con la herramienta “Conmutar edición” y luego la herramienta “dividir objetos espaciales” teniendo habilitado la herramienta “auto ensamblar” teniendo como resultado las áreas con diferentes coeficientes de rugosidad como se muestra en la Figura 26.

Figura 26

Delimitación de áreas con coeficientes de rugosidad



Nota: Se observa la delimitación de las zonas de color rojo.

En tercer lugar, abriremos la tabla de atributos para colocar los campos “ID”, “Manning” y “n” como se muestra en la Figura 27.

Figura 27

Tabla de atributos del polígono shapefile

Polígonos— Objetos Totales: 4, Filtrados: 4, Seleccionados: 0

	FID	ID	Manning	n
1	0	3.000	Franja 2	0.04
2	0	2.000	Franja 1	0.04
3	0	4.000	Ciudad	0.3
4	0	1.000	Cauce	0.035

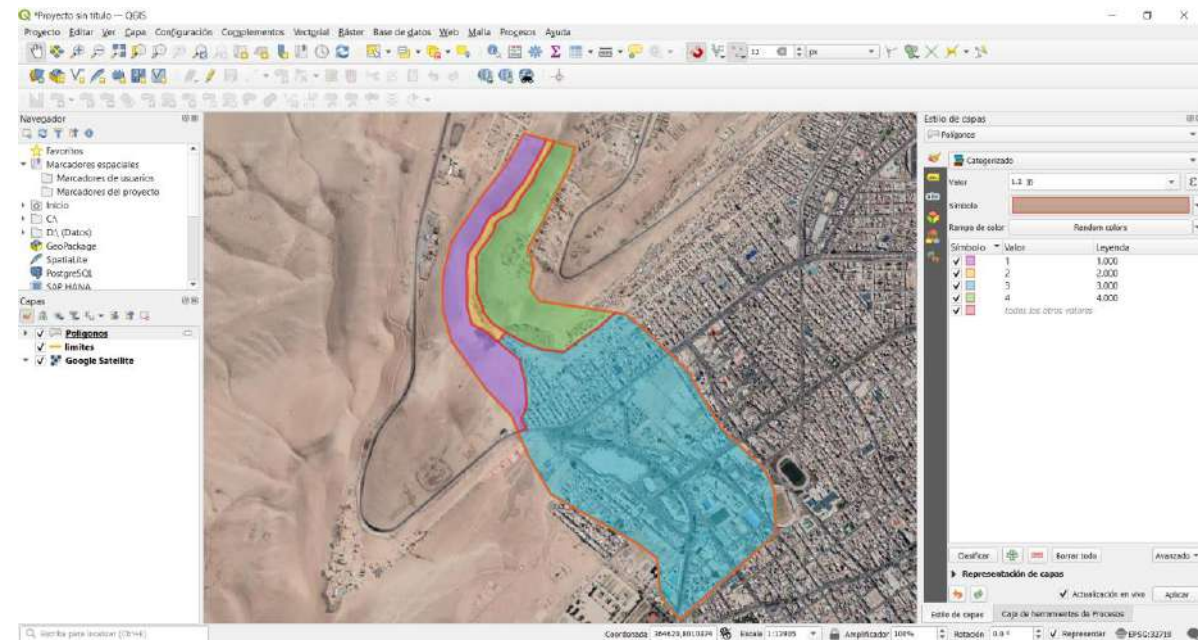
Mostrar todos los objetos espaciales

Nota: Se puede apreciar los campos agregados “ID”, “Manning”, y “n”

En cuarto lugar, colocaremos una etiqueta que permita distinguir las zonas con coeficientes de rugosidad diferentes, esto lo realizamos dirigiéndonos a “Estilo de capas” y haciendo click en “simbología”, en ese apartado buscaremos la simbología denominada “Categorizado” y mostrará los polígonos con áreas diferentes como se aprecia en el Figura 28.

Figura 28

Simbología categorizada de rugosidades en QGIS

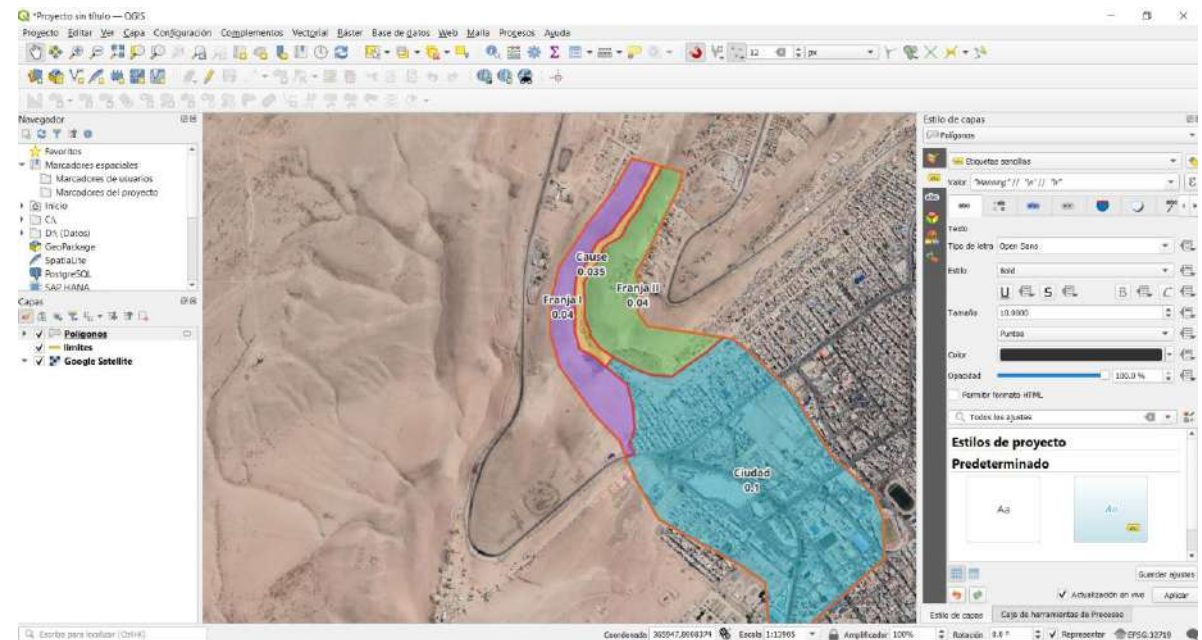


Nota: Se puede apreciar con diferentes colores las zonas con rugosidades diferentes.

Finalmente, colocamos etiquetas que nos muestren el nombre y el valor de cada área de rugosidad diferente según la tabla de atributos como se muestra en la Figura 29.

Figura 29

Etiquetas activas en el polígono de rugosidades



Nota: Se puede apreciar el polígono de rugosidades en las áreas de “cause”, “Franja I”, “Franja II” y “Ciudad”.

Posteriormente, guardamos el archivo en formato ESRI Shapefile. Cabe resaltar que el mismo polígono de rugosidades se usa para los modelos de IBER y HEC RAS.

3.4.4 Procedimiento para obtener los caudales máximos

Para obtener los caudales máximos se tomó en consideración el artículo científico “Impacts of Climate Change and Variability on Precipitation and Maximum Flows in Devil’s Creek, Tacna, Peru”(Pino-Vargas et al., 2022) en el cual se aborda una serie de procesos por el cual se determina los caudales máximos en distintos escenarios que se detallan a continuación:

3.4.4.1 Datos de precipitación y temperatura histórica

Según Pino-Vargas et al. (2022) se seleccionaron la data histórica de precipitación de manera diaria de 5 estaciones que cuentan con pluviómetros alrededor de la microcuenca

de la quebrada del diablo desde el año 1966 hasta 2020. Se realizó el llenado de datos faltantes utilizando el programa Climatol. Por otro lado, se tuvo el problema de que una estación no contaba con los datos desde el año 1966 y teniendo la riguridad de trabajar con un período mínimo de 30 años se utilizó del producto grillado PISCOp. Es por ello que, se usaron los datos PISCOp corrigiendo los valores con estaciones cercanas.

3.4.4.2 Modelos y escenarios de circulación general

Se consideró modelos que incluyan el cambio climático y por ello incluyeron en el estudio 15 modelos climáticos regionales. Finalmente, con respecto a los escenarios de emisión de GEI se seleccionaron escenarios RCP4.5(emisión intermedia) y RCP 8.5(emisión alta) para el período 2021-2080 (Pino-Vargas et al., 2022).

3.4.4.3 Corrección de sesgo y reducción de escala

Se empleó la corrección de sesgo y downscaling entre las fechas 01/01/1981 hasta 31/12/2005 para el período de 2021-2080 (Pino-Vargas et al., 2022).

3.4.4.4 Modelado hidrológico

Para el modelado hidrológico de la quebrada del diablo se tuvieron en cuenta los análisis de frecuencia total diaria, asimismo, se consideró eventos de precipitación estimados teniendo como comparación al producto PISCOp en la estación JORGE BASADRE y la precipitación total diaria en la estación desde el 1 de enero de 1993 al 21 de abril de 2014 teniendo como resultado una buena correspondencia. Por otro lado, se consideró también la precipitación registrada por el pluviómetro FIAG UNJBG desde el 7/12/2019 hasta el 7/05/2021. Finalmente, el uso de pluviómetros virtuales y el pluviómetro JORGE BASADRE para corroborar la información de la precipitación en la quebrada del Diablo con respecto a la estación FIAG UNJBG. Asimismo, para el análisis espacial se

consideró los productos satelitales IMERG-F, IMERG-E y CHORROS. En conclusión, los resultados de correlación entre los resultados corroboran la cantidad de precipitación de la quebrada del diablo (Pino-Vargas et al., 2022).

3.4.4.5 Modelo hidrológico de la Quebrada del Diablo

Para el modelamiento hidrológico para obtener el caudal máximo producido en la Quebrada del Diablo se realizó usando el software RS MINERVE y el modelo hidrológico de precipitación – escorrentía SOCONT (Pino-Vargas et al., 2022).

3.4.4.6 Caudales máximos en la quebrada del diablo

Se manejó una topología donde no se consideró el terraplén informal Paso Camiara. También, se conservaron los parámetros y condiciones iniciales para cada una de las subcuencas. Con el fin de generar el caudal máximo en la Quebrada del Diablo, procedente de los eventos de precipitación máxima formados por los modelos de cambio climático lo que dio como resultado la Tabla 1

Tabla 1

Caudales máximos en la Quebrada del Diablo

Tiempo (Hora)	Años	Años	Años	Años
	2021–2050 RCP4.5	2021–2050 RCP8.5	2051–2080 RCP4.5	2051–2080 RCP8.5
1	0	0	0	0
2	0.1	0.1	0.1	0.2
3	2.2	2.5	1.2	14
4	4.9	5.5	2.9	16.6
5	23.7	26,0	13.5	76.4
6	30.4	32,9	19.1	78.6
7	26,0	27.7	17.6	55.7
8	19.1	20.1	13.8	34,9
9	14.4	15.1	10.9	23,9
10	11.3	11.7	8.9	17.5
11	9.1	9.5	7.4	13.4

12	7.6	7.8	6.3	10.7
13	6.4	6.6	5.4	8.7
14	5.5	5.7	4.7	7.3
15	4.9	5	4.2	6.3

Nota: Adaptación de caudales máximos según los diferentes escenarios RCP (Pino-Vargas et al., 2022).

CAPITULO IV

DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

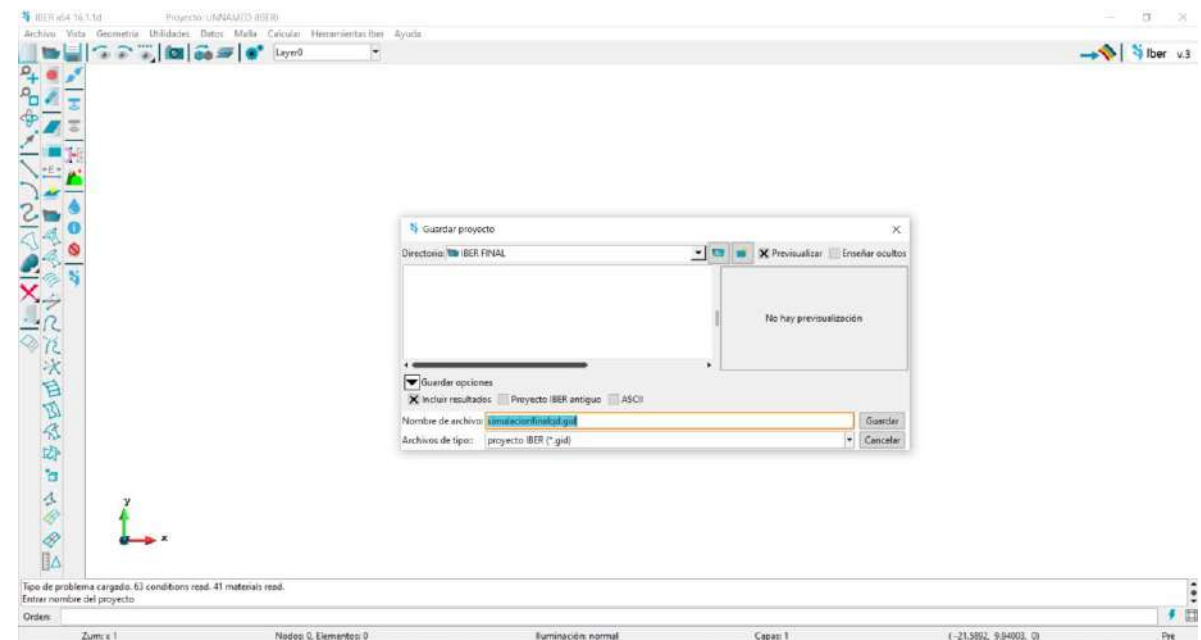
4.1 MODELO HIDRÁULICO IBER

4.1.1 Entrada de datos

En primer lugar, para el análisis hidráulico en el software IBER necesitamos abrir el programa y cargar la información que hemos preparado como la topografía, geometría, rugosidad y caudales máximos, por ello nos dirigimos a la pestaña “Archivo”, luego a “Nuevo” y guardamos el proyecto en nuestra carpeta de trabajo como se muestra en la Figura 30.

Figura 30

Entorno IBER y creación de nuevo proyecto

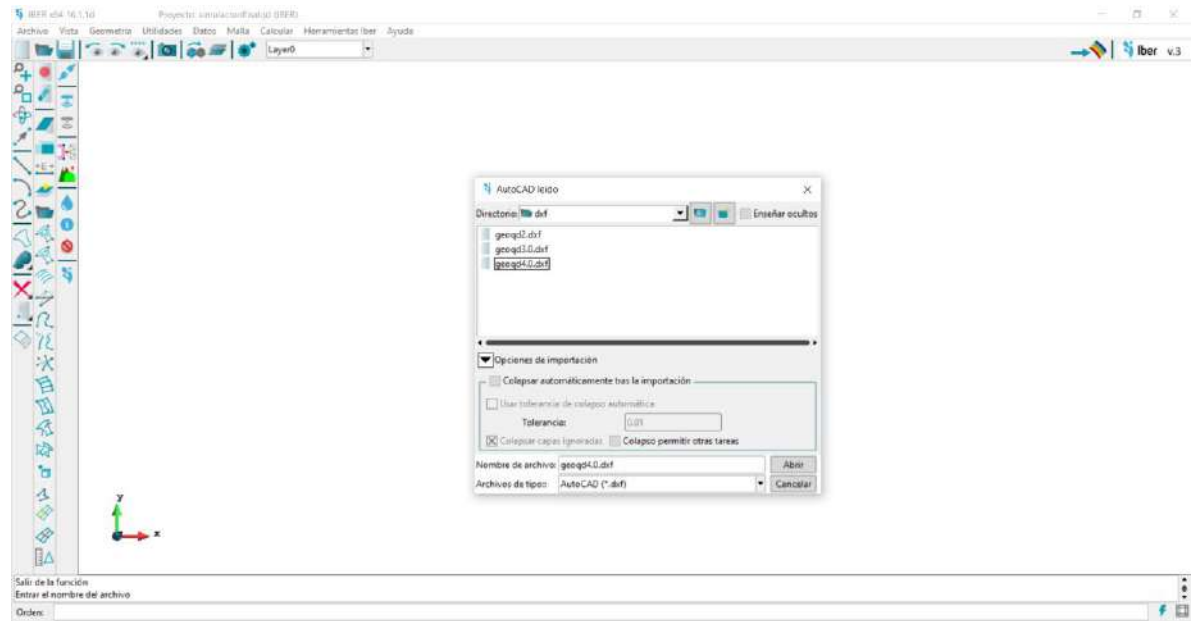


Nota: Se puede apreciar el entorno IBER y la creación y guardado de un nuevo proyecto.

En segundo lugar, importaremos nuestra geometría, iremos a la pestaña “archivo”, luego a la opción “importar” y seleccionamos la extensión DXF. En consecuencia, se ejecuta una ventana donde escogeremos nuestra geometría preparada en QGIS como se muestra en la Figura 31 y la Figura 32.

Figura 31

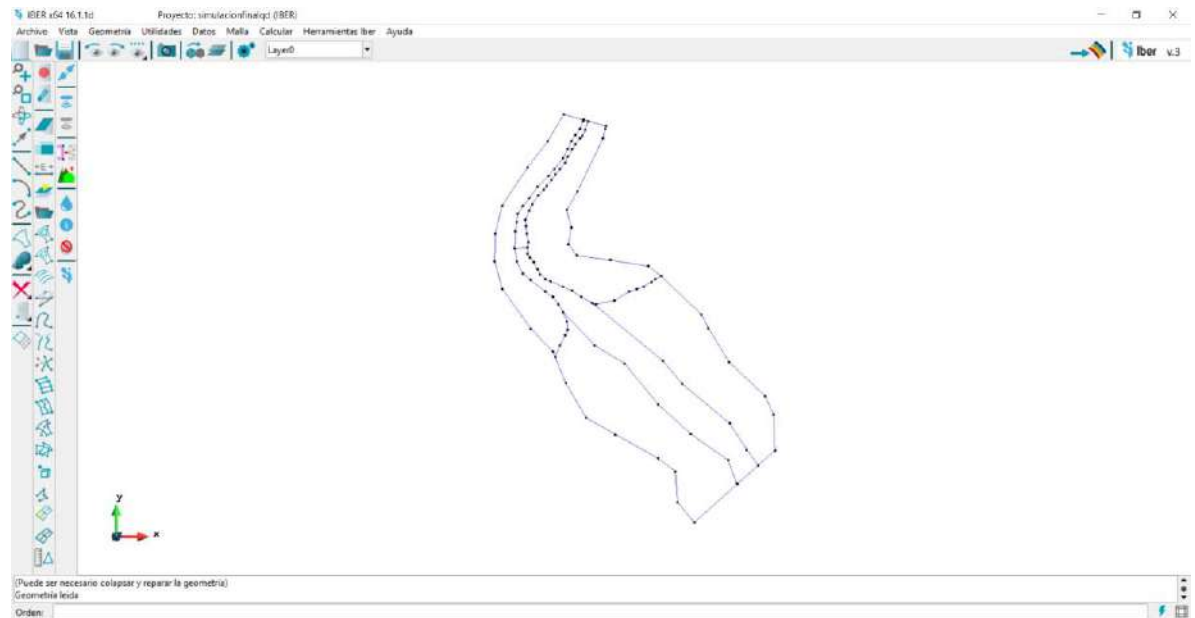
Importación de la geometría en IBER con la extensión DXF



Nota: Se puede apreciar el entorno IBER importando archivos DXF.

Figura 32

Geometría importada en formato DXF

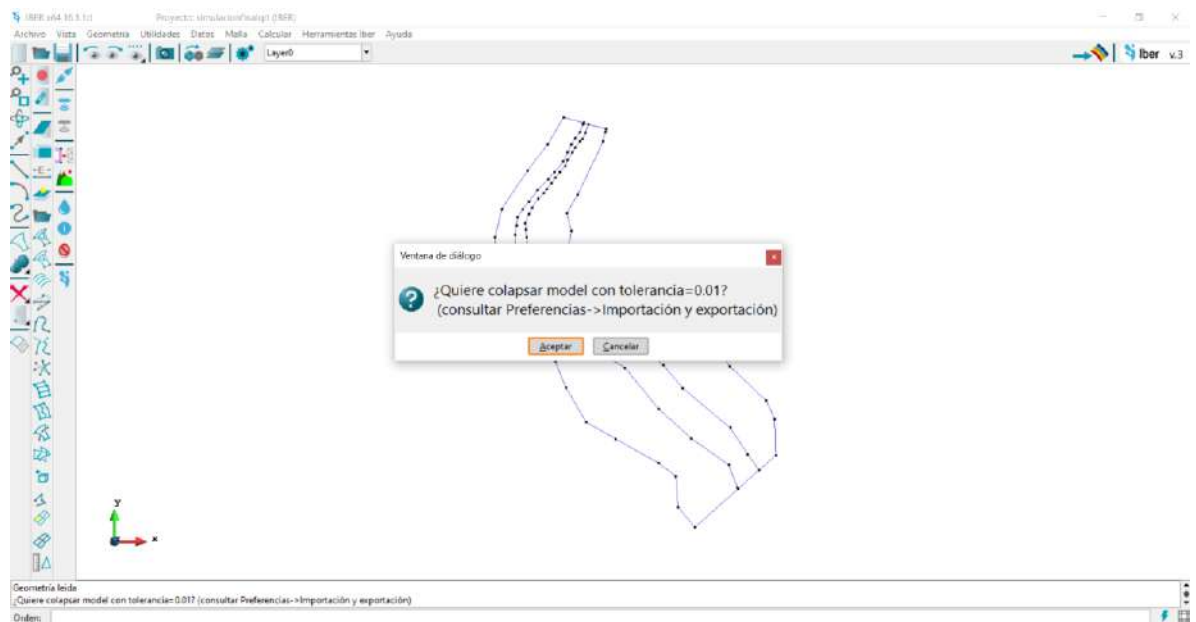


Nota: Se puede apreciar la geometría importada en IBER.

En tercer lugar, necesitamos colapsar el modelo, esto debido a que el programa al realizar el mallado bidimensional puede repetir algunos puntos. En consecuencia, nos dirigimos a la pestaña “Geometría”, luego “Editar” y seleccionamos “Colapsar modelo”, se genera un cuadro al cual le damos aceptar como se muestra en la Figura 33.

Figura 33

Utilizando la herramienta “Colapsar” en IBER

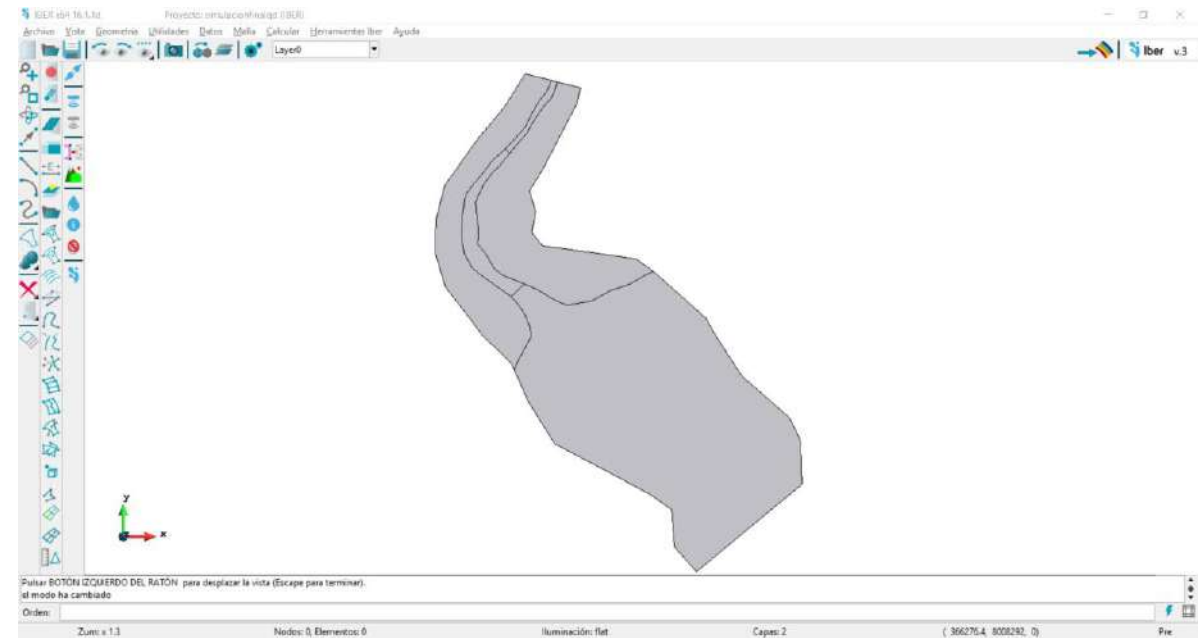


Nota: Se aprecia el cuadro de dialogo especificando la tolerancia al cual daremos “aceptar”.

En cuarto lugar, creamos las superficies de trabajo, nos dirigimos a la pestaña “Geometría”, luego a “Crear”, buscamos la opción “Superficie Nurbs” y seleccionamos “Búsqueda”. Luego asignamos a cada polígono la superficie y cambiamos la vista a “flat” para confirmar que se ha creado las superficies como se muestra en la Figura 34.

Figura 34

Creación de superficies con la herramienta “Búsqueda”

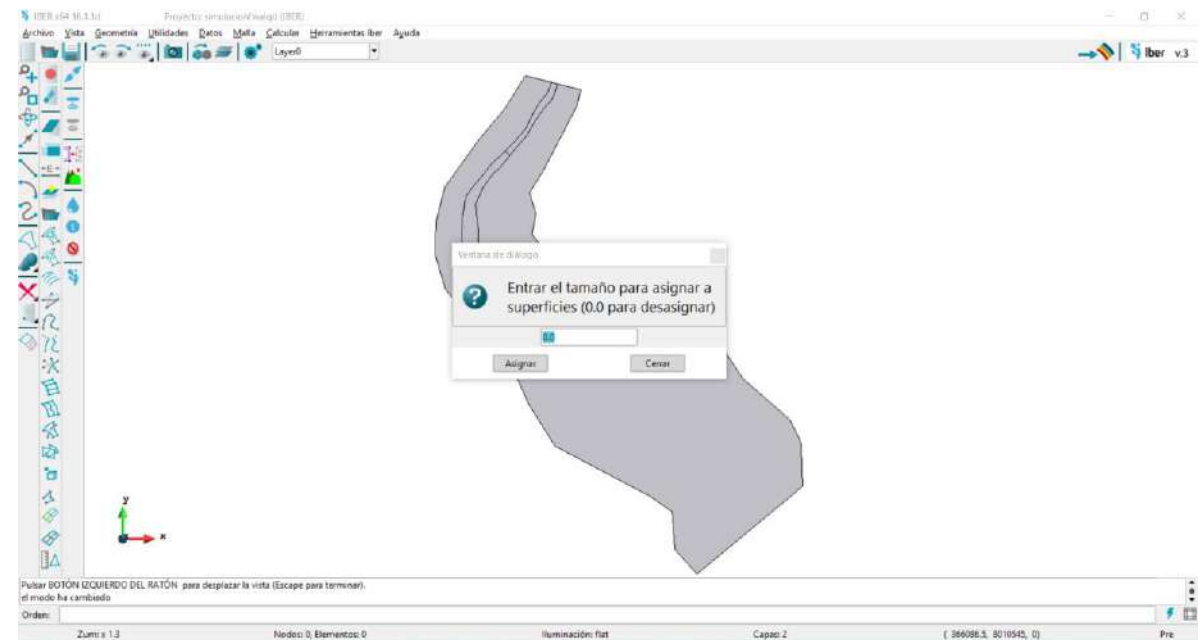


Nota: Podemos apreciar la geometría creada con las superficies aplicadas.

En quinto lugar, nos dirigimos a la pestaña “malla”, luego “No estructurada” y escogemos la opción “asignar tamaño a superficies” como se muestra en la Figura 35.

Figura 35

Herramienta “Asignar tamaño a superficies”

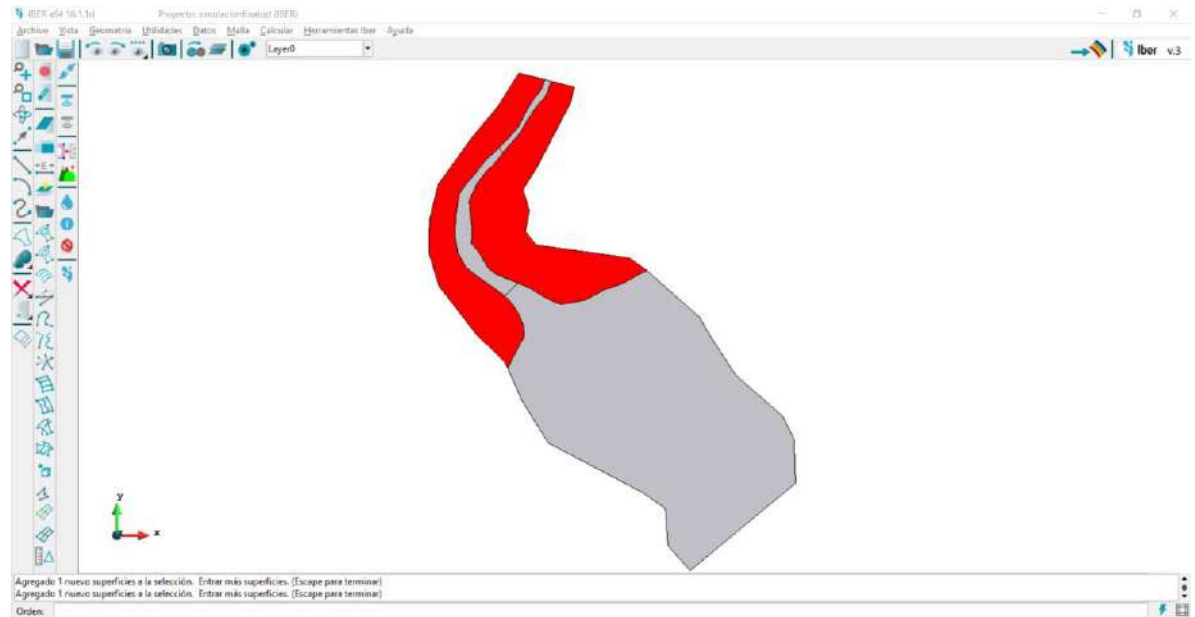


Nota: Se puede observar la ventana de diálogo en la cual colocaremos el tamaño de superficie para la generación de la malla no estructurada.

Para la asignación del tamaño a asignar para las mallas es de acuerdo a la precisión que se requiera tener, para nuestro caso de estudio se considera mallas de 6 y 8 m como se aprecia en la Figura 36, esto define también el uso computacional debido a que al realizar la simulación el tiempo de análisis computacional es directamente proporcional al tamaño de la malla.

Figura 36

Asignación de tamaño de mallado a las superficies en IBER

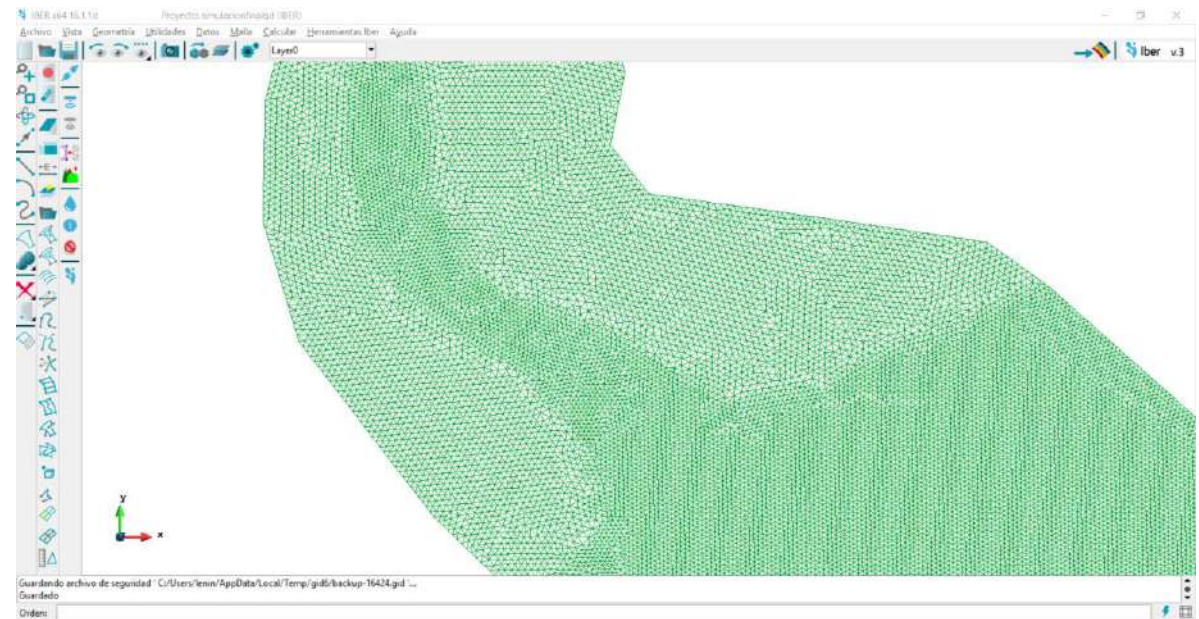


Nota: Se puede observar la asignación del tamaño en color rojo.

Luego, nos dirigimos a la pestaña “Malla” y elegimos la opción “Generar malla”, se genera un cuadro de diálogo el cual damos “aceptar” y se genera la malla como se muestra en la Figura 37.

Figura 37

Creación de malla en IBER

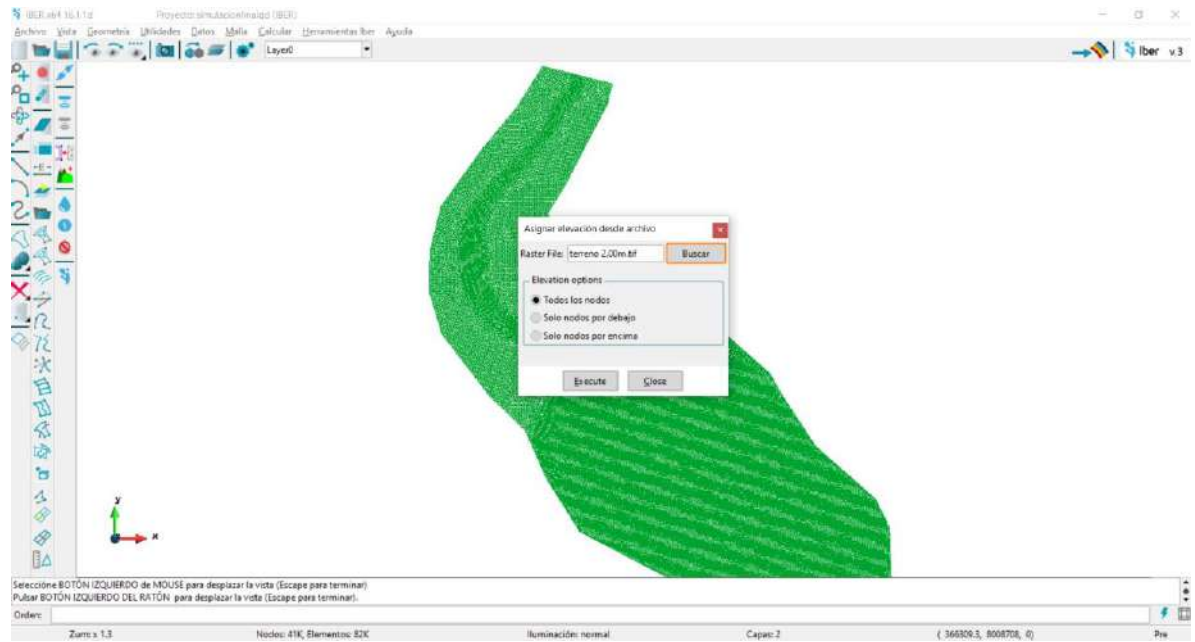


Nota: Se puede apreciar la generación de la malla en color verde.

En sexto lugar, insertaremos la topografía, para ello nos dirigimos a la opción “Herramientas Iber”, luego buscamos la opción “malla” y elegimos “Set elevation from file”, se genera un cuadro de diálogo en el cual seleccionamos nuestro DEM generado en CIVIL 3D como se muestra en la Figura 38 y Figura 39.

Figura 38

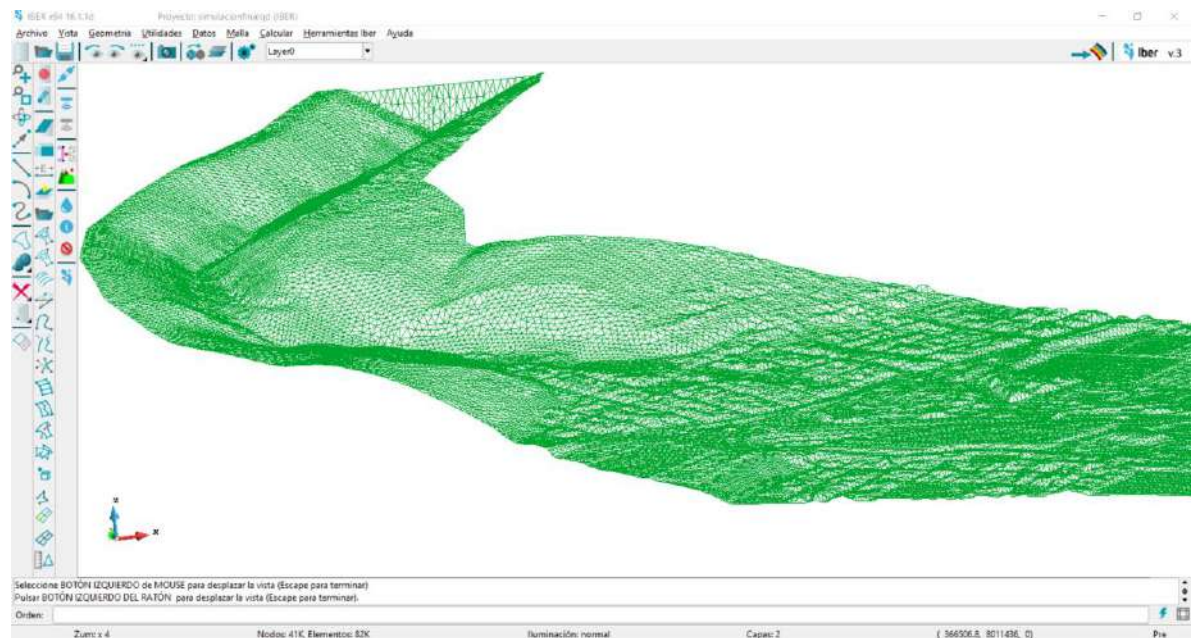
Importación del DEM en el modelo IBER



Nota: Se puede apreciar el cuadro de diálogo y el DEM cargado para su importación.

Figura 39

Vista en 3D del modelo hidráulico en IBER

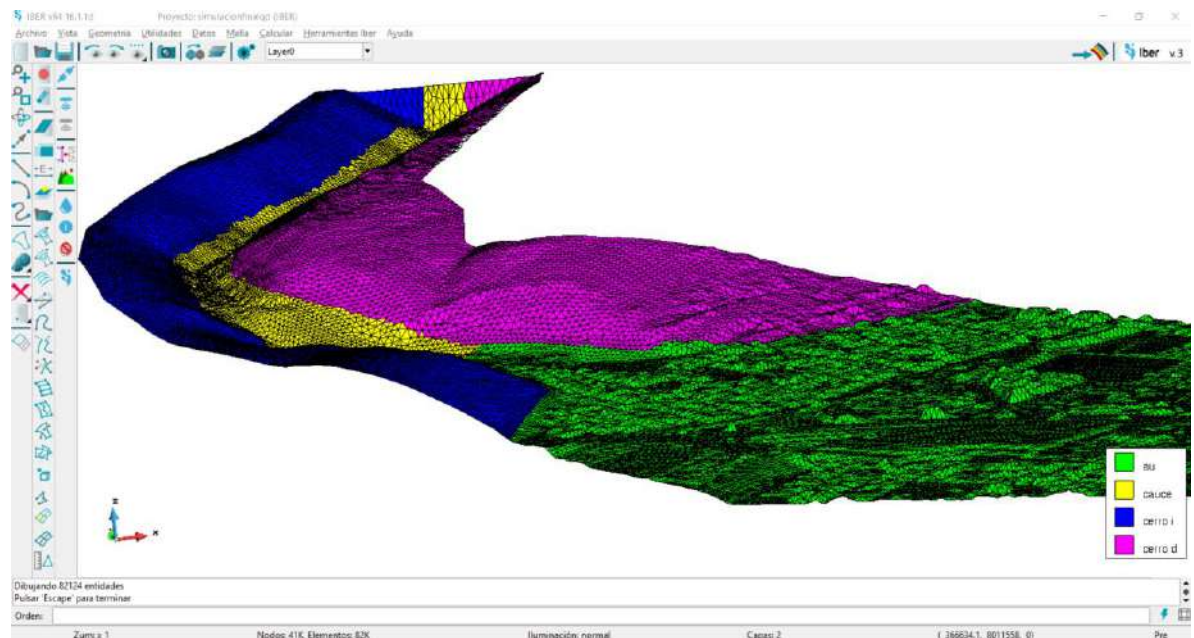


Nota: Se puede apreciar una vista isométrica del modelo con las cotas aplicadas.

En sétimo lugar, colocaremos nuestra rugosidad, para ello nos dirigimos a la pestaña “datos”, luego “rugosidad” y elegimos la opción “selección automática”, escogemos el archivo ASCII y se carga como se muestra en la Figura 40.

Figura 40

Asignación de rugosidades en modelo hidráulico en IBER

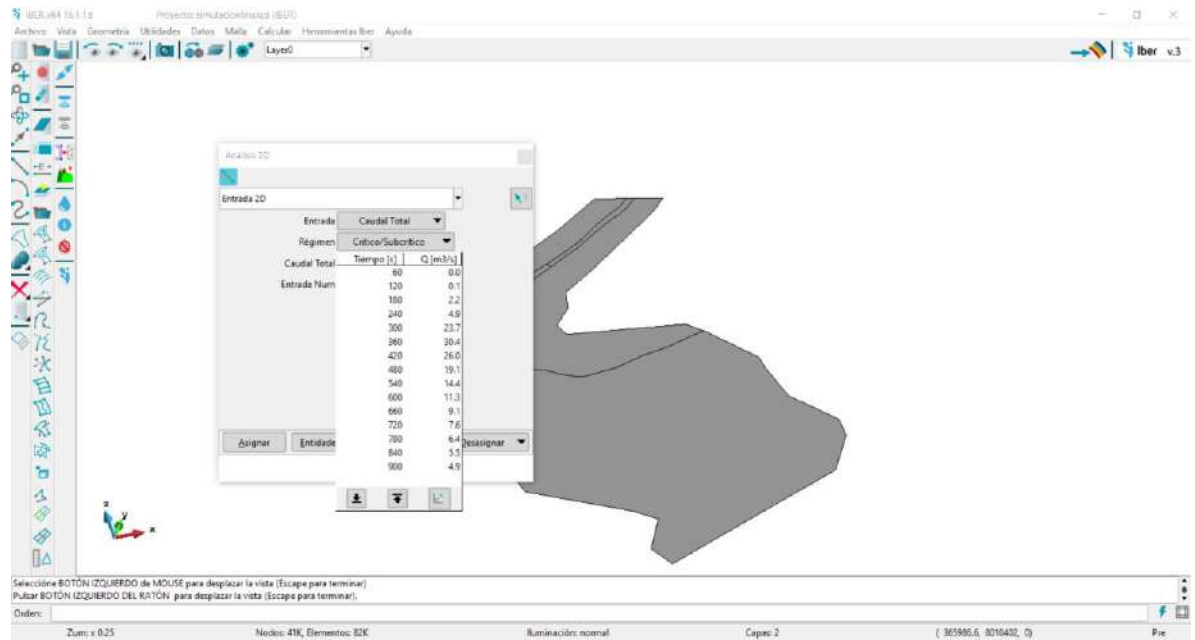


Nota: Se muestra de colores la asignación de las rugosidades en el modelo hidráulico.

En octavo lugar asignamos los caudales con los que se aplica al proyecto, para ello nos dirigimos a la pestaña “datos”, luego a la opción “hidrodinámica” y seleccionamos la opción “condiciones de contorno”. Asignamos nuestro caudal de ingreso y especificamos nuestro punto de salida como se muestra en la Figura 41.

Figura 41

Selección de caudal de ingreso y punto de salida



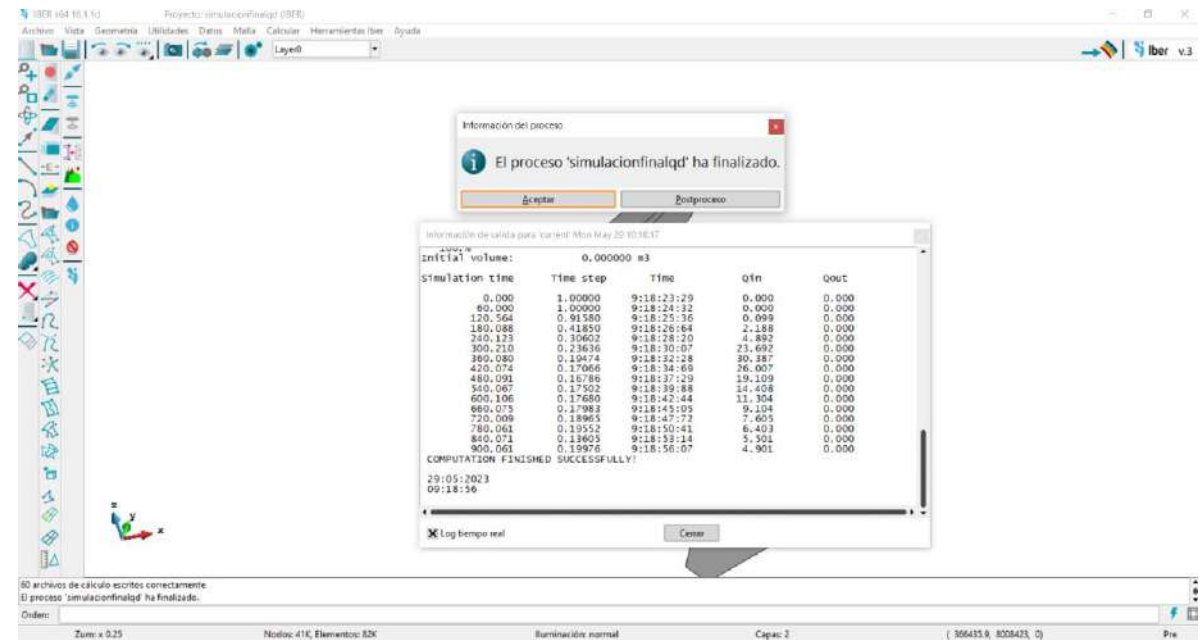
Nota: Se aprecia los caudales colocados y las condiciones de contorno.

Luego, generamos la malla otra vez para guardar las condiciones colocadas, para ello utilizamos el comando “Ctrl + G”.

Finalmente, le damos a la herramienta calcular, el software realiza el cálculo en base a las condiciones que hemos colocado y según el hidrograma colocado como se muestra en la Figura 42.

Figura 42

Procesamiento del modelo hidráulico en IBER

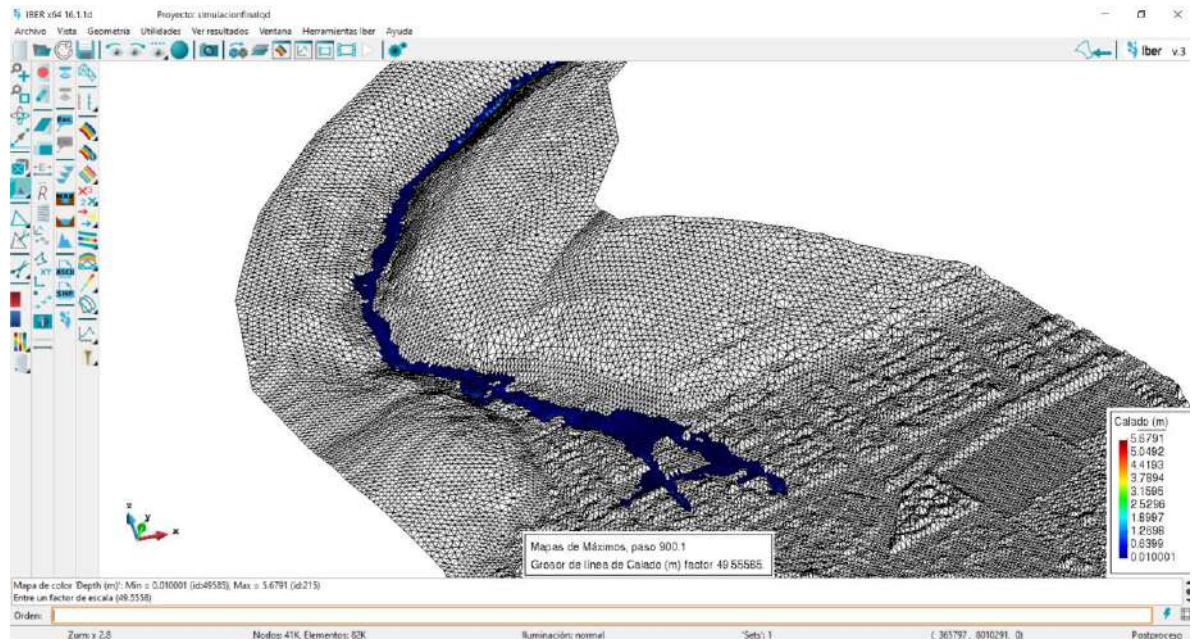


Nota: Se puede apreciar el tiempo de simulación y los recursos computacionales que se han usado.

En consecuencia, obtenemos el resultado de la simulación como se muestra en la Figura 43.

Figura 43

Resultado de la simulación en IBER



Nota: Se puede apreciar de colores el mapa de Máximos con respecto al Calado.

4.1.2 Resultados IBER

Como parte del modelamiento, se realiza el cálculo con los caudales máximos y en los diferentes escenarios especificados en el punto 3.4.4., los resultados se muestran en la Tabla 2, Tabla 3 y Tabla 4 para lo cual se ha considerado representar los resultados máximos debido que en la variable “Calado” la expresión mínima es 0.01 para todos los escenarios, para la variable “velocidad” la expresión mínima es 0.01 para todos los escenarios y para la variable “Cota de Agua” la expresión máxima es descartada debido a la diferencia de procesos que se realiza en el modelamiento.

Tabla 2

Resultados máximos de la variable “Calado” en IBER

IBER	Calado (m)			
	2021-2050 RCP4.5	2021-2050 RCP8.5	2051-2080 RCP4.5	2051-2080 RCP8.5
Máx	1.3168	1.3179	1.0773	2.6892

Nota: Se puede apreciar la variable “Calado” en los diferentes escenarios.

Tabla 3

Resultados máximos de la variable “Velocidad” en IBER

IBER	Velocidad (m/s)			
	2021-2050 RCP4.5	2021-2050 RCP8.5	2051-2080 RCP4.5	2051-2080 RCP8.5
Máx	6.8771	10.744	8.9271	14.777

Nota: Se muestra la velocidad en m/s en los diferentes escenarios.

Tabla 4

Resultados mínimos de la variable “Cota de Agua” en IBER

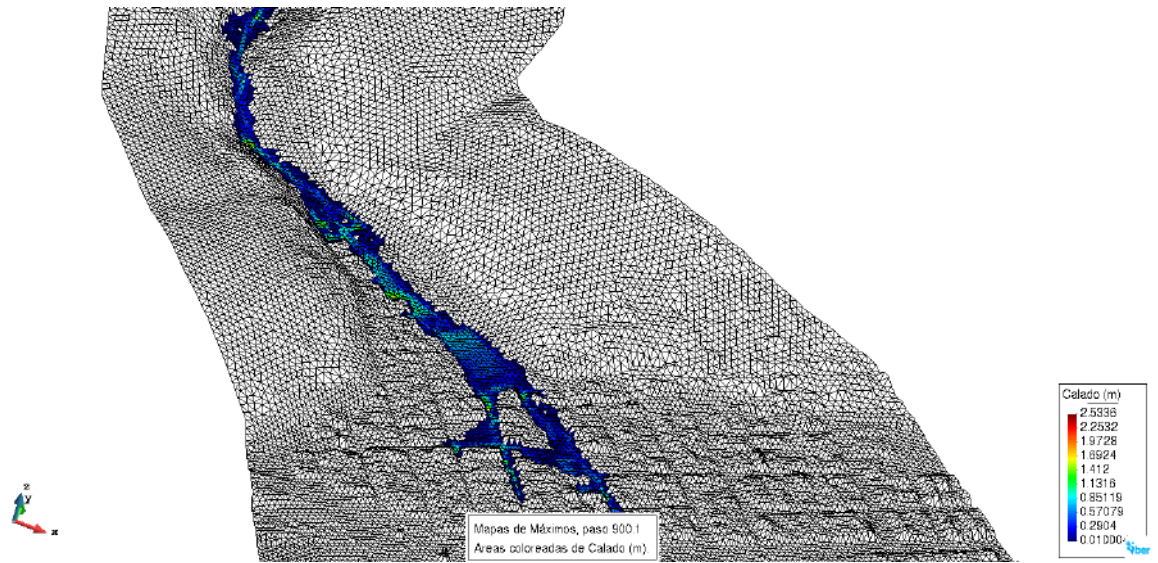
IBER	Cota de Agua (m.s.n.m.)			
	2021-2050 RCP4.5	2021-2050 RCP8.5	2051-2080 RCP4.5	2051-2080 RCP8.5
Min	624.49	622.47	630.34	609.16

Nota: Se muestra la variable “Cota de Agua” expresado en metros para los diferentes escenarios.

Finalmente, se representa el modelamiento hidráulico utilizando IBER en la Figura 44, Figura 45, Figura 46 y Figura 47.

Figura 44

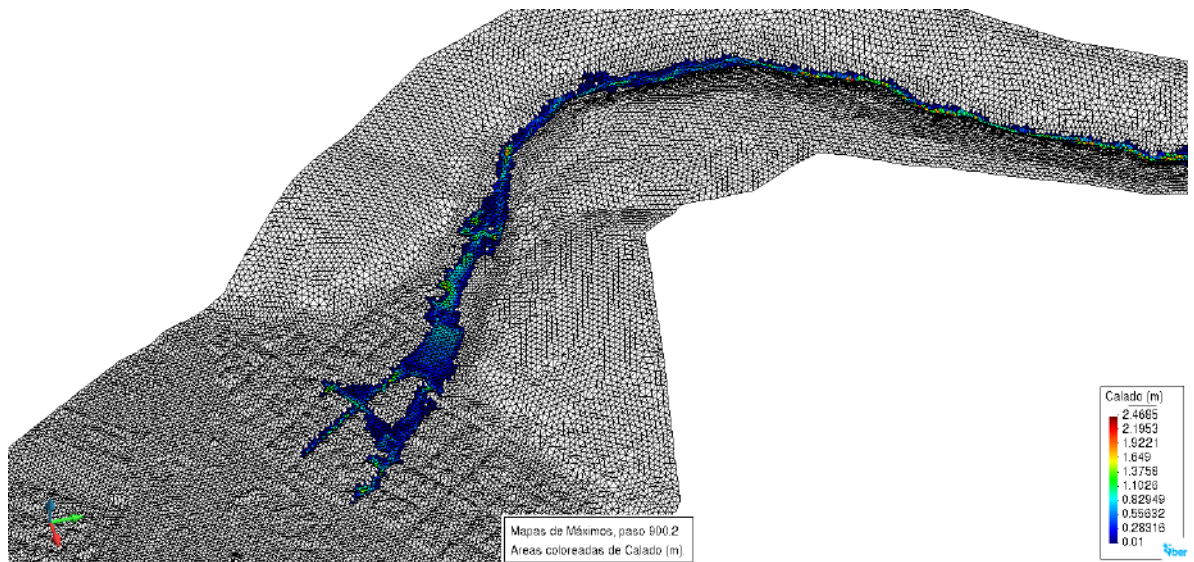
Zonas inundables según escenario RCP4.5 2021-2050



Nota: Se muestra el mapa de máximos, en el paso 900 (s) según el hidrograma del escenario RCP4.5 2021-2050.

Figura 45

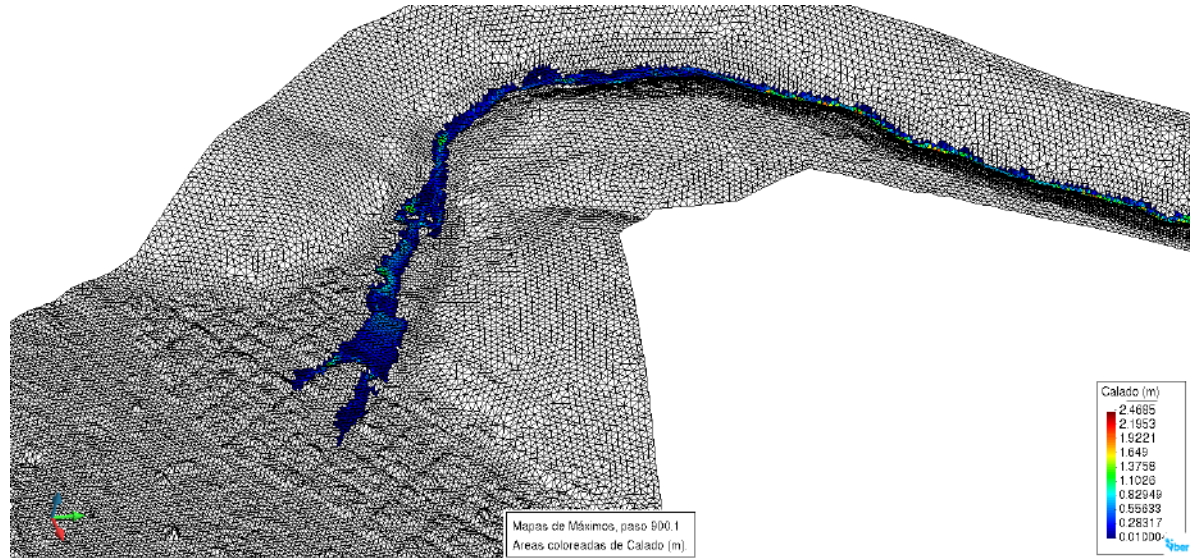
Zonas inundables según escenario RCP8.5 2021-2050



Nota: Se muestra el mapa de máximos, en el paso 900 (s) según el hidrograma del escenario RCP8.5 2021-2050.

Figura 46

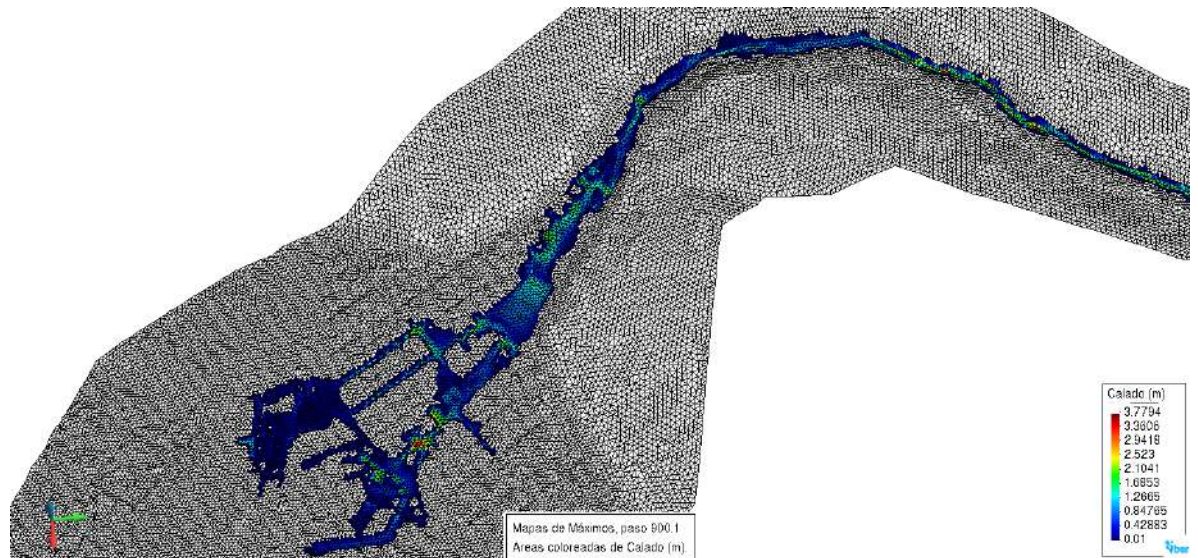
Zonas inundables según escenario RCP4.5 2051-2080



Nota: Se muestra el mapa de máximos, en el paso 900 (s) según el hidrograma del escenario RCP4.5 2051-2080.

Figura 47

Zonas inundables según escenario RCP8.5 2051-2080



Nota: Se muestra el mapa de máximos, en el paso 900 (s) según el hidrograma del escenario RCP8.5 2051-2080.

4.2 MODELO HIDRÁULICO HEC RAS

4.2.1 Entrada de datos

En primer lugar, para la entrada de datos necesitamos guardar nuestro proyecto y continuando con el punto 3.4.2. una vez guardada la geometría, necesitamos definir las condiciones de entrada y salida, para ello utilizaremos la herramienta “View/Edit unsteady Flow data”, se genera un cuadro de diálogo el cual procedemos a guardar en nuestra carpeta de trabajo. A continuación, a definimos nuestros “BC Lines”, nos dirigimos a “BC Lines” y escogemos la opción “Aguas arriba”, luego seleccionamos la opción “Flow Hydrograph” y colocamos nuestro dato de hidrograma como se muestra en la Figura 48.

Figura 48

Ingreso de datos del hidrograma en HEC RAS

Flow Hydrograph

2D: Perimeter 1 BCLine: aguas arriba

Read from DSS before simulation Select DSS file and Path

File:

Path:

Enter Table Data time interval: 1 Hour

Select/Enter the Data's Starting Time Reference

Use Simulation Time: Date: 29MAY2023 Time: 0000

Fixed Start Time: Date: 29MAY2023 Time: 1500

No. Ordinates

Hydrograph Data			
	Date	Simulation Time	Flow
		(hours)	(m3/s)
1	28May2023 2400	0:00:00	0
2	29May2023 0100	1:00:00	0
3	29May2023 0200	2:00:00	0.1
4	29May2023 0300	3:00:00	2.5
5	29May2023 0400	4:00:00	5.5
6	29May2023 0500	5:00:00	26
7	29May2023 0600	6:00:00	32.9
8	29May2023 0700	7:00:00	27.7
9	29May2023 0800	8:00:00	20.1
10	29May2023 0900	9:00:00	15.1
11	29May2023 1000	10:00:00	11.7
12	29May2023 1100	11:00:00	9.5
13	29May2023 1200	12:00:00	7.8
14	29May2023 1300	13:00:00	6.6
15	29May2023 1400	14:00:00	5.7

Time Step Adjustment Options ("Critical" boundary conditions)

Monitor this hydrograph for adjustments to computational time step

Max Change in Flow (without changing time step):

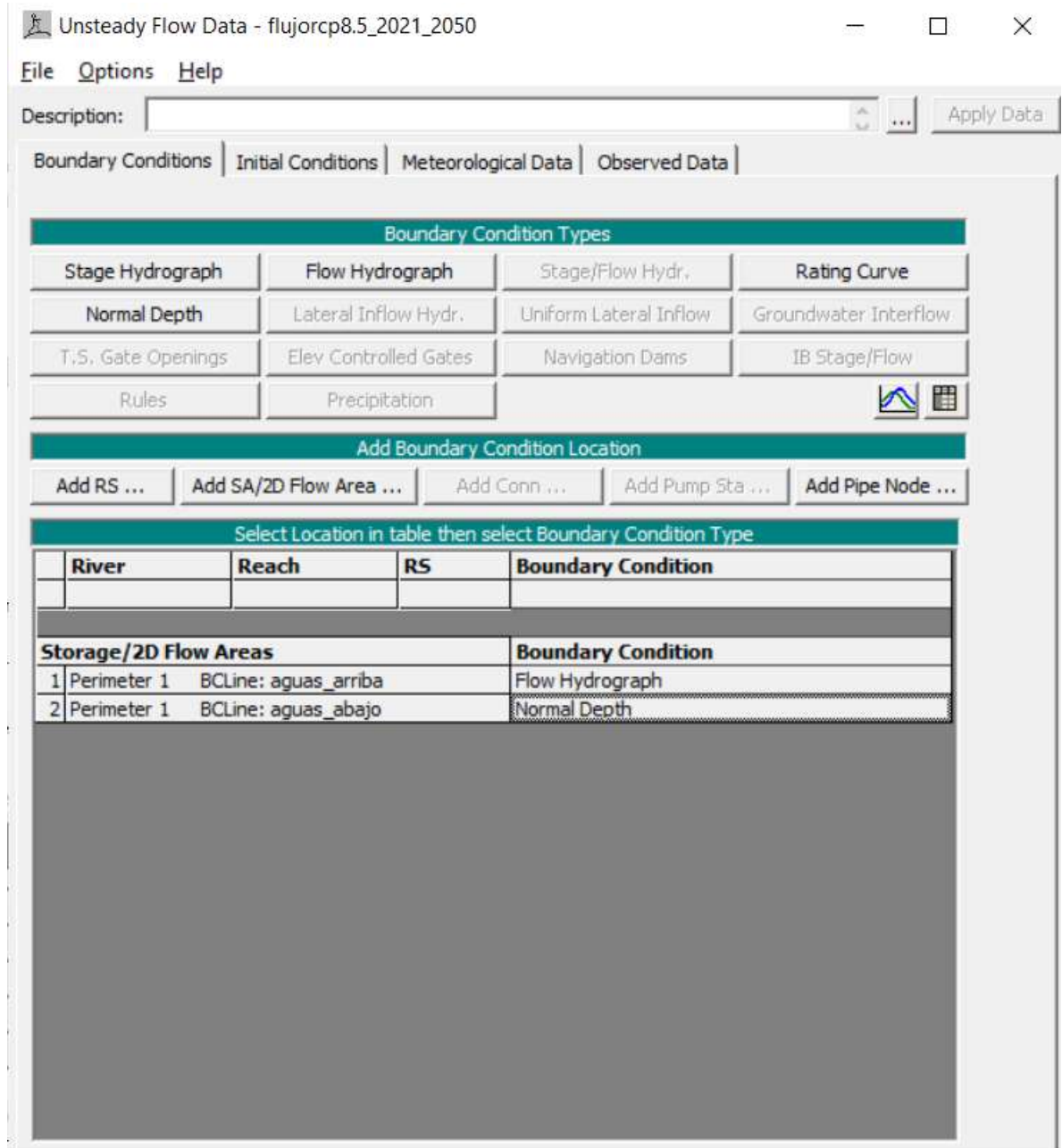
Min Flow: Multiplier: EG Slope for distributing flow along BC Line: 0.04 TW C

Nota: Se aprecia el hidrograma ingresado, asimismo, se necesita ingresar el tiempo de la simulación, finalmente se necesita colocar una pendiente "Slope" de manera representativa para la simulación del programa.

Luego, nos dirigimos a "BC lines" y seleccionamos "Aguas abajo", colocaremos la opción Normal Depth con una pendiente de 0.01% como se muestra en la Figura 49.

Figura 49

Definición de “BC lines” en la salida del modelo en HEC RAS.



Nota: Se aprecia las “BC lines” y la información ingresada.

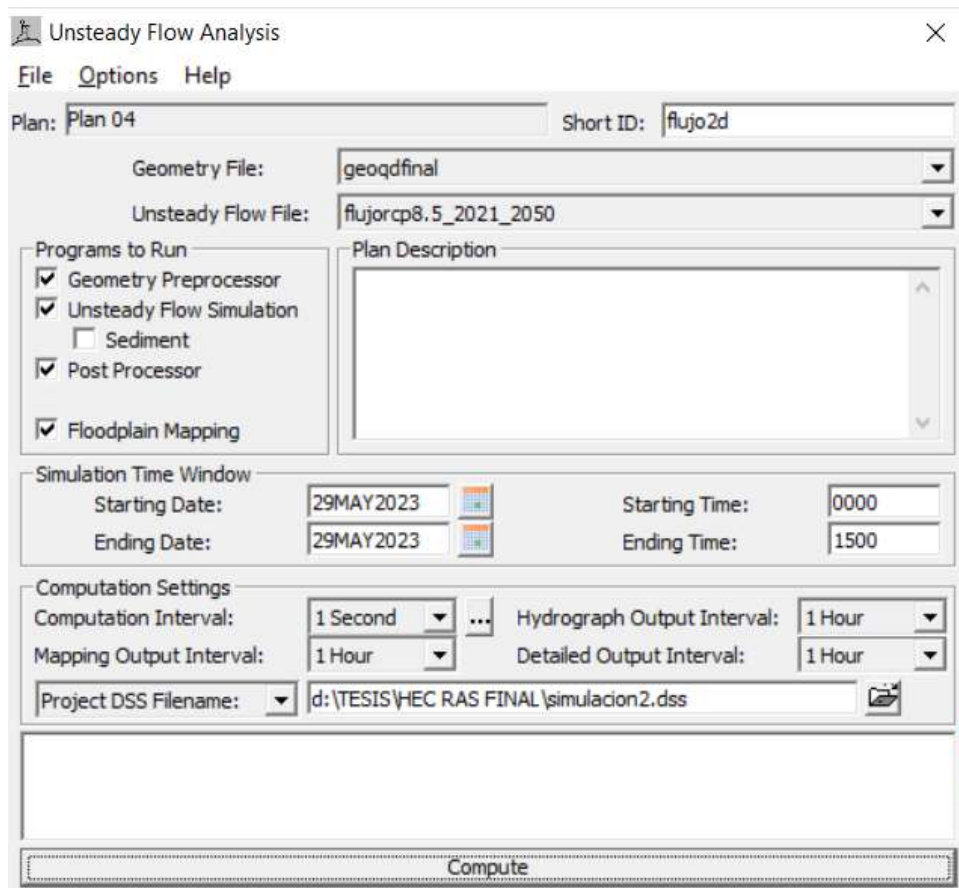
Posteriormente, guardamos la información y generamos el análisis de simulación.

Para ello, nos dirigimos a la herramienta “perform an unsteady form simulation”, se genera

una ventana la cual guardamos en nuestra carpeta de trabajo. Continuando, verificamos los datos que hemos ingresado y seleccionamos los análisis que necesitamos realizar como “Geometry pre processor”, “Unsteady flow simulation”, “Post Processor” y “Floodplain Mapping”. También, colocamos los datos del tiempo de la simulación los cuales dejamos según nuestro hidrograma, en el caso de estudio se presenta un hidrograma de 15 horas, por lo tanto, se coloca 1500 como nomenclatura del programa. Finalmente, nos dirigimos a “Computation Settings” en el cual definimos el intervalo de cómputo a 1 segundo y los demás intervalos a 1 hora, como se ve en la Figura 50, esto debido a que nuestro hidrograma se encuentra en horas y necesitamos definir el intervalo en las mismas unidades que el software IBER.

Figura 50

Definición de la herramienta “Unsteady Flow Analysis”

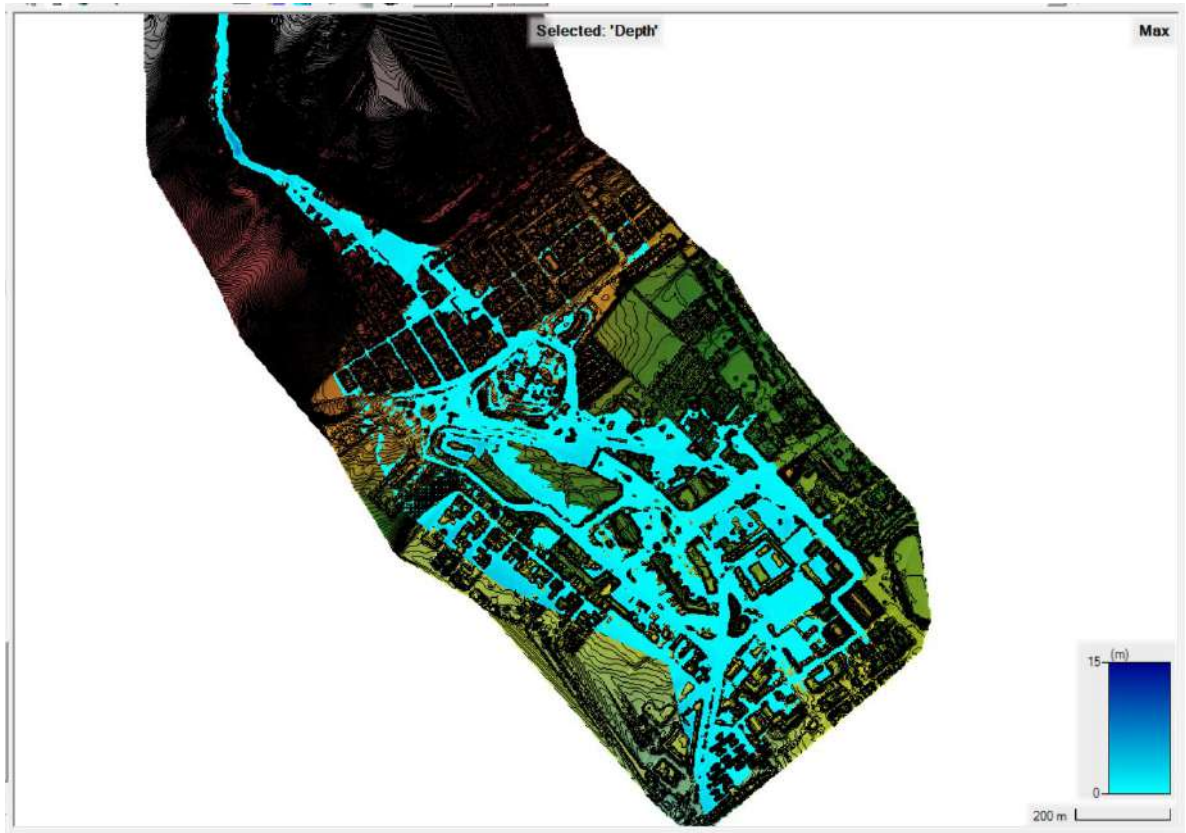


Nota: Se puede apreciar todos los parámetros que se tienen en cuenta para el análisis en las mismas condiciones que el software IBER.

Finalmente, realizamos el computo de la simulación y observamos los resultados en RAS MAPPER. Como se muestra en la Figura 51, se puede apreciar el calado en metros, la velocidad en m/s y la cota de agua en m como capas las cuales se pueden exportar y visualizar como ráster. En la Figura 52 se muestra también, un modelo en 3D que permite ver las elevaciones topográficas en la herramienta RAS MAPPER.

Figura 51

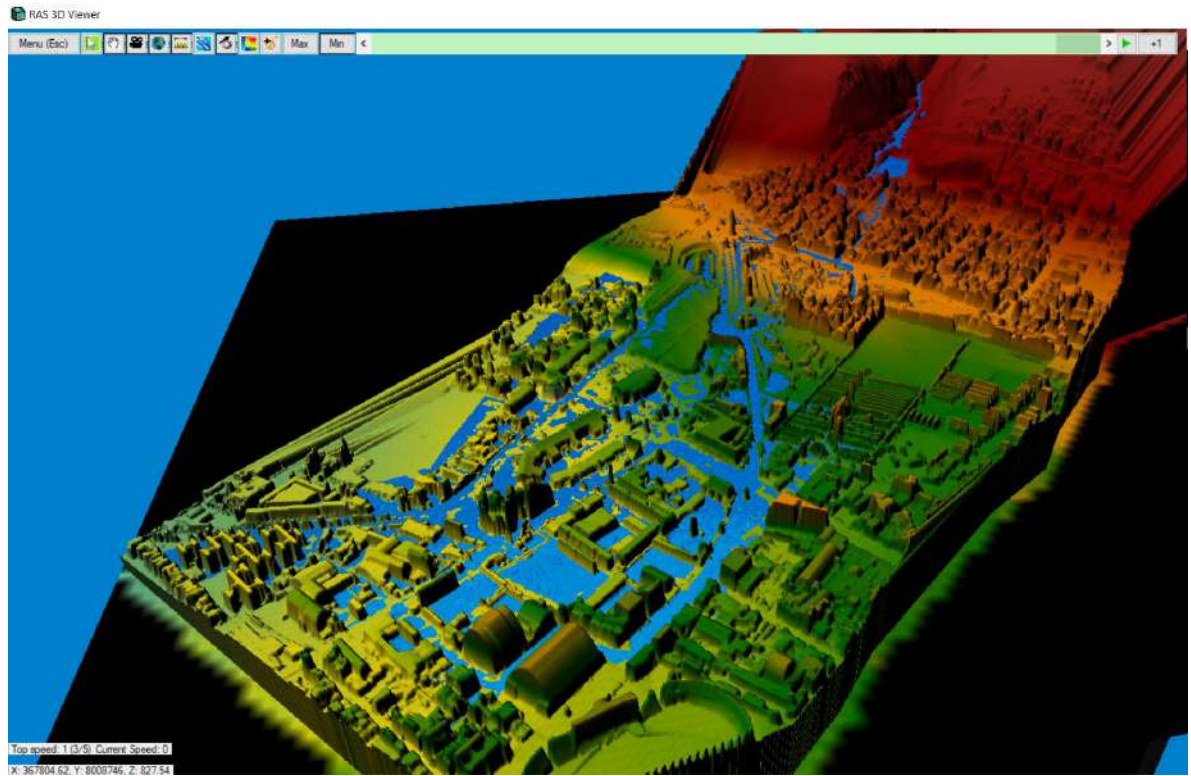
Zonas inundables en la herramienta RAS MAPPER de HEC RAS



Nota: Se puede apreciar las zonas inundables de color turquesa.

Figura 52

Modelo 3D de las zonas inundables en HEC RAS



Nota: Se puede apreciar las zonas inundables de color azul.

4.2.2 Resultados HEC RAS

Como parte del modelamiento, se realiza el cálculo con los caudales máximos y en los diferentes escenarios especificados en el punto 3.4.4., los resultados se muestran en la Tabla 5, Tabla 6 y Tabla 7 para lo cual se ha considerado representar los resultados máximos debido que en la variable “Calado” la expresión mínima es 0.01 para todos los escenarios, para la variable “velocidad” la expresión mínima es 0.01 para todos los escenarios y para la variable “Cota de Agua” la expresión máxima es descartada debido a la diferencia de procesos que se realiza en el modelamiento.

Tabla 5

Resultados máximos de la variable "Calado" en HEC RAS

HEC RAS	Calado (m)			
	2021-2050 RCP4.5	2021-2050 RCP8.5	2051-2080 RCP4.5	2051-2080 RCP8.5
Máx	2.92	3.08	2.41	3.699

Nota: Se puede apreciar la variable “Calado” en los diferentes escenarios.

Tabla 6

Resultados máximos de la variable “Velocidad” en HEC RAS

HEC RAS	Velocidad (m/s)			
	2021-2050 RCP4.5	2021-2050 RCP8.5	2051-2080 RCP4.5	2051-2080 RCP8.5
Máx	3.65	3.83	2.85	4.92

Nota: Se puede apreciar la variable “Velocidad” en los diferentes escenarios.

Tabla 7

Resultados mínimos de la variable “Cota de Agua” en HEC RAS

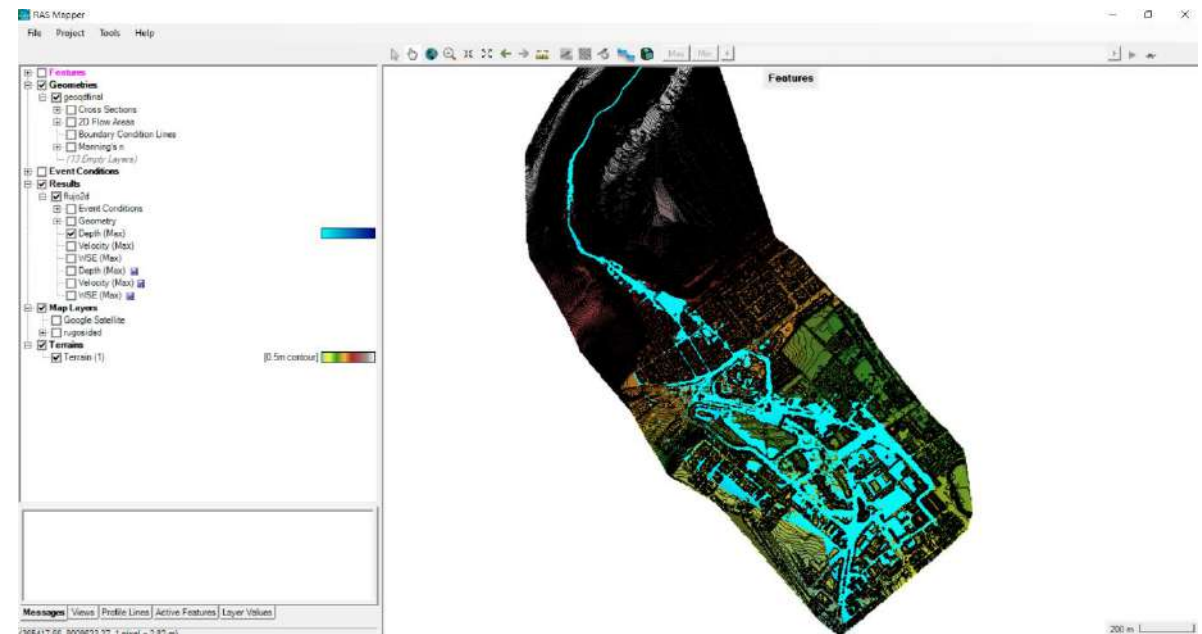
HEC RAS	Cota de Agua (m.s.n.m)			
	2021-2050 RCP4.5	2021-2050 RCP8.5	2051-2080 RCP4.5	2051-2080 RCP8.5
Min	587.34	587.38	587.1	587.99

Nota: Se puede apreciar la variable “Cota de Agua” en los diferentes escenarios.

Finalmente, se presenta las zonas inundables en los diversos escenarios como se muestra en la Figura 53, Figura 54, Figura 55 y Figura 56.

Figura 53

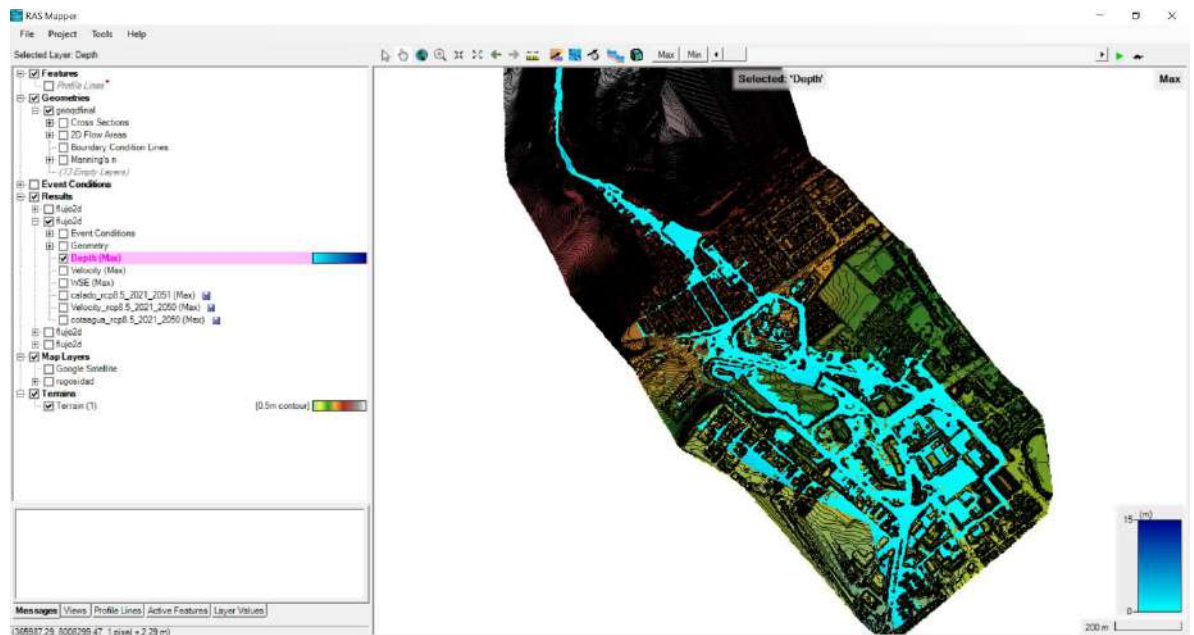
Zonas inundables según escenario RCP4.5 2021-2050



Nota: Se muestra el mapa de máximos, en el paso 900 (s) según el hidrograma del escenario RCP4.5 2021-2050.

Figura 54

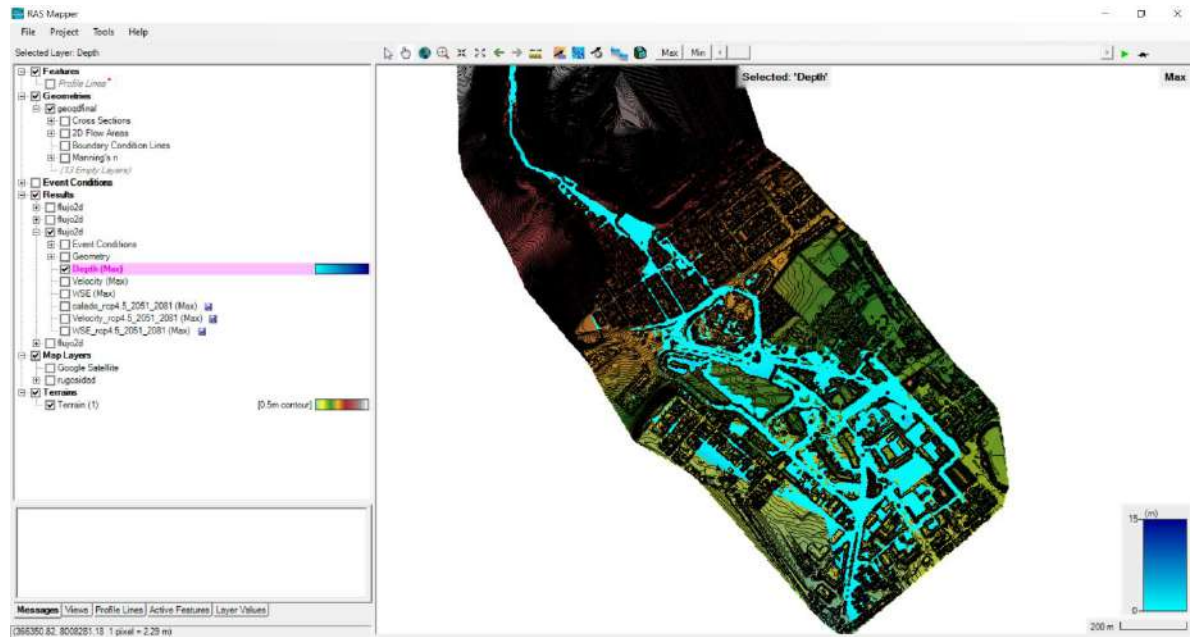
Zonas inundables según escenario RCP8.5 2021-2050



Nota: Se muestra el mapa de máximos, en el paso 900 (s) según el hidrograma del escenario RCP8.5 2021-2050.

Figura 55

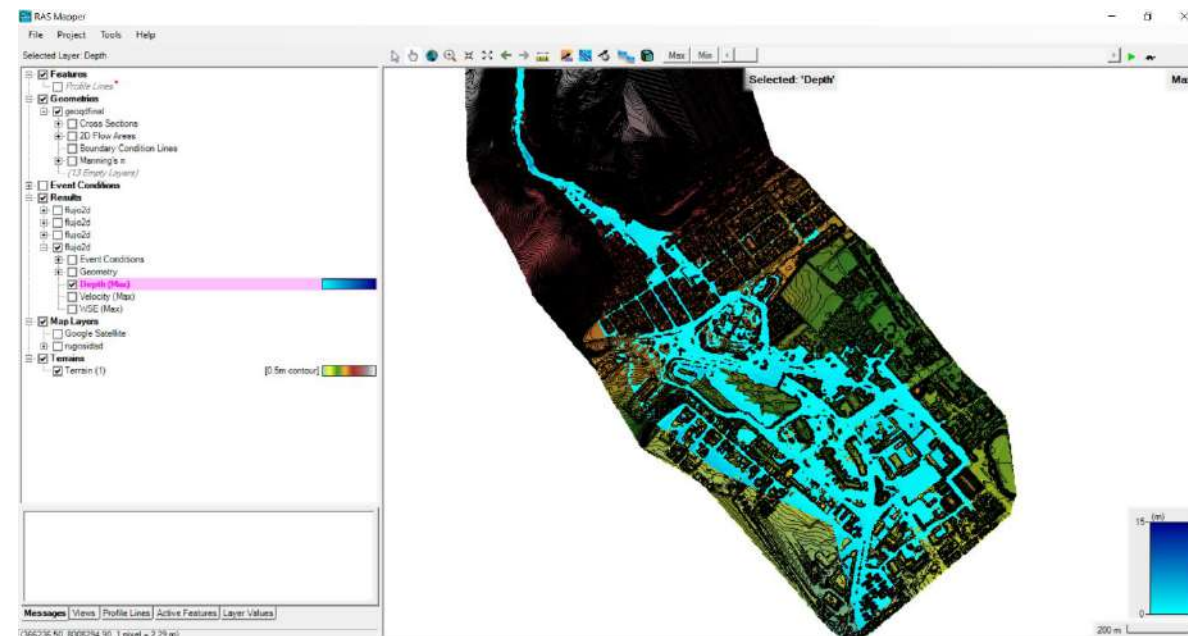
Zonas inundables según escenario RCP4.5 2051-2080



Nota: Se muestra el mapa de máximos, en el paso 900 (s) según el hidrograma del escenario RCP4.5 2051-2080.

Figura 56

Zonas inundables según escenario RCP8.5 2051-2080

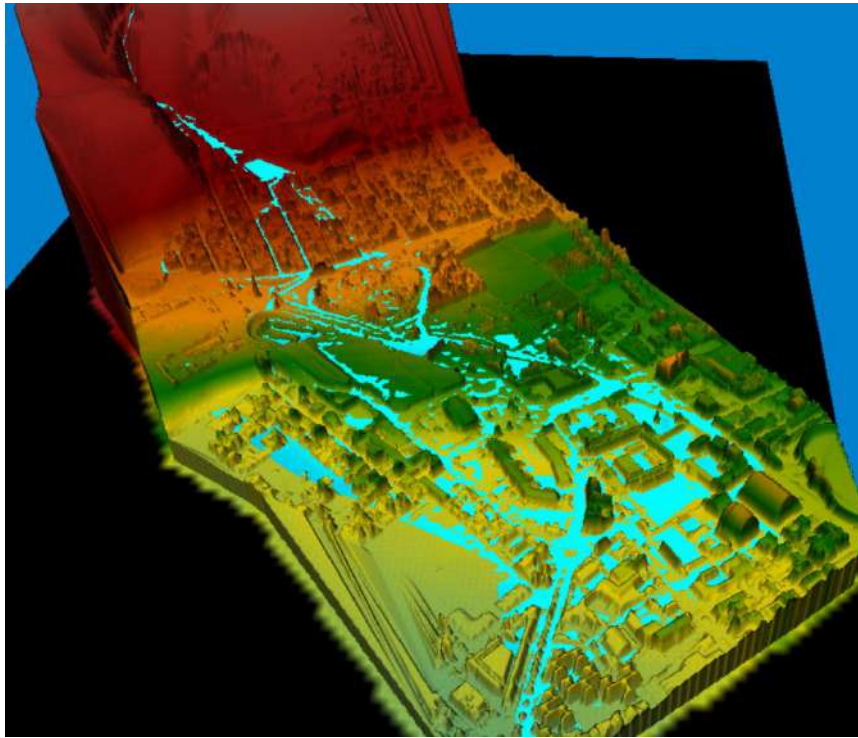


Nota: Se muestra el mapa de máximos, en el paso 900 (s) según el hidrograma del escenario RCP8.5 2051-2080.

Así mismo, se realizó el modelo en 3D para verificar e inspeccionar el modelo como se muestra en la Figura 57, Figura 58, Figura 59 y Figura 60.

Figura 57

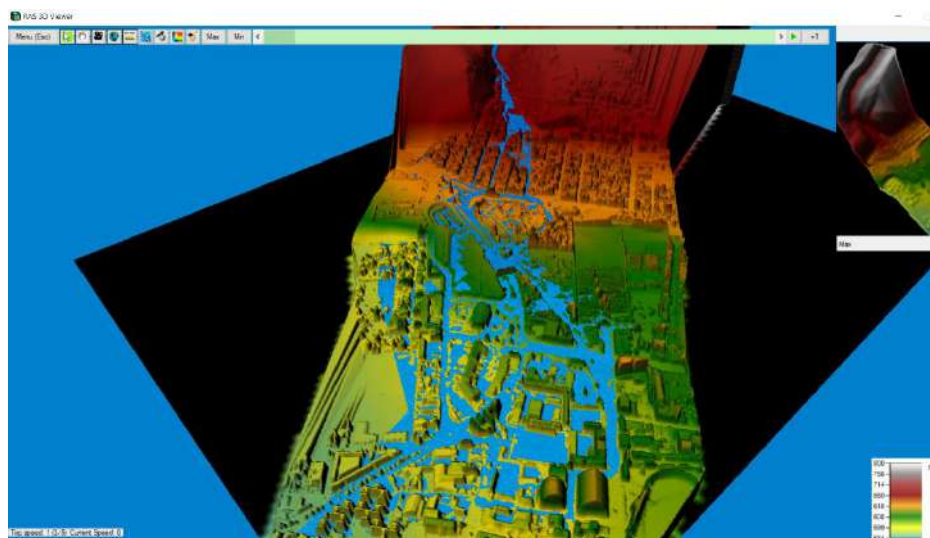
Simulación 3D de zonas inundables en HEC RAS escenario RCP 4.5 2021-2050



Nota: Se puede apreciar la zona inundable de color celeste y el terreno de color rojo, verde y amarillo según la topografía.

Figura 58

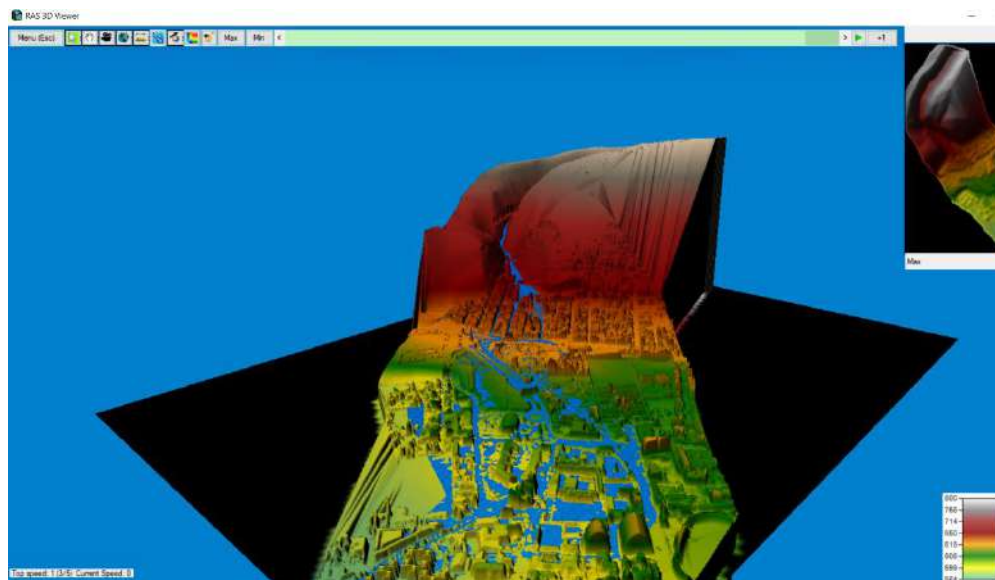
Simulación 3D de zonas inundables en HEC RAS escenario RCP 8.5 2021-2050



Nota: Se puede apreciar la zona inundable de color celeste y el terreno de color rojo, verde y amarillo según la topografía.

Figura 59

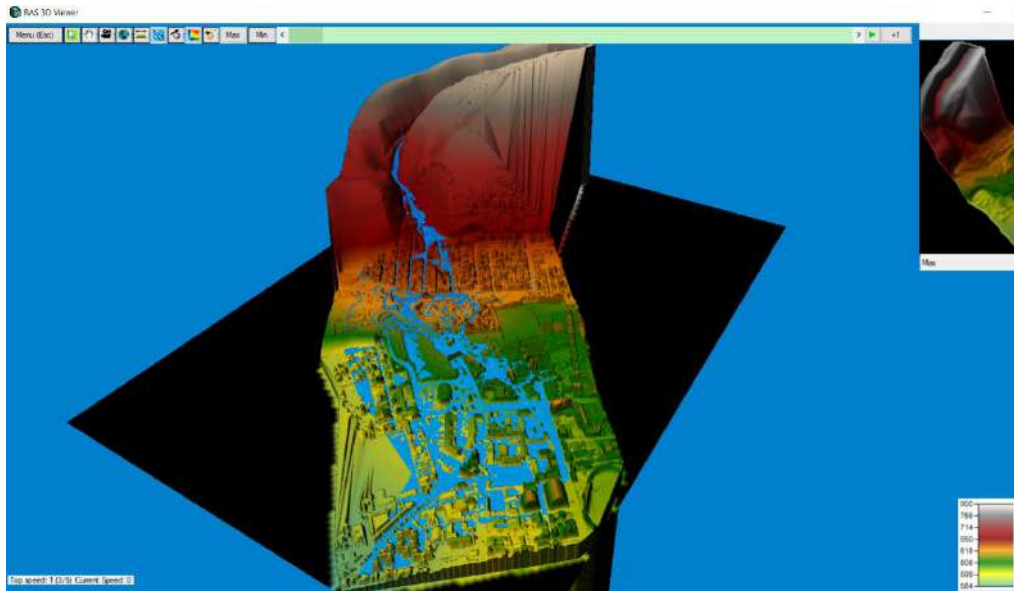
Simulación 3D de zonas inundables en HEC RAS escenario RCP 4.5 2051-2080



Nota: Se puede apreciar la zona inundable de color celeste y el terreno de color rojo, verde y amarillo según la topografía.

Figura 60

Simulación 3D de zonas inundables en HEC RAS escenario RCP 8.5 2051-2080



Nota: Se puede apreciar la zona inundable de color celeste y el terreno de color rojo, verde y amarillo según la topografía.

CAPITULO V

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En la presente investigación se ha desarrollado los procedimientos de recolección necesarios para lograr el modelamiento hidráulico de la Quebrada del Diablo utilizando los softwares IBER y HEC RAS, para ello, se ha hecho uso de la topografía del terreno teniendo como base un modelo de elevación digital de tamaño de celda de 1 x 1 m, lo cual nos asegura la precisión necesaria para el modelamiento del terreno en los programas IBER y HEC RAS, luego se ha trazado la geometría de la zona de estudio realizando una sección de toda la microcuenca, esto con el fin de utilizar menos recursos computacionales haciendo la simulación más eficiente y rápida. Continuamos, con la evaluación de las rugosidades de la zona, encontrando arcilla y grava en su mayoría a diferencia de la zona urbana la cual se le asignó otro coeficiente de rugosidad, se realizó un mapa de rugosidades el cual se cargó con éxito a los softwares IBER y HEC RAS teniendo ambos modelos los mismos coeficientes de rugosidad. Finalmente, se realizó la definición de los caudales máximos de entrada teniendo 4 escenarios de evaluación según modelos de cambio climático RCP4.5 y RCP8.5 en períodos 2021 – 2050 y 2051-2080, luego se representó los hidrogramas que se ingresaron a los modelos hidráulicos estando definidos por intervalos de 1 hora y los caudales teniendo como unidad m³/s. Todo ello con el fin de representar un análisis comparativo de ambos programas en condiciones establecidas para observar las

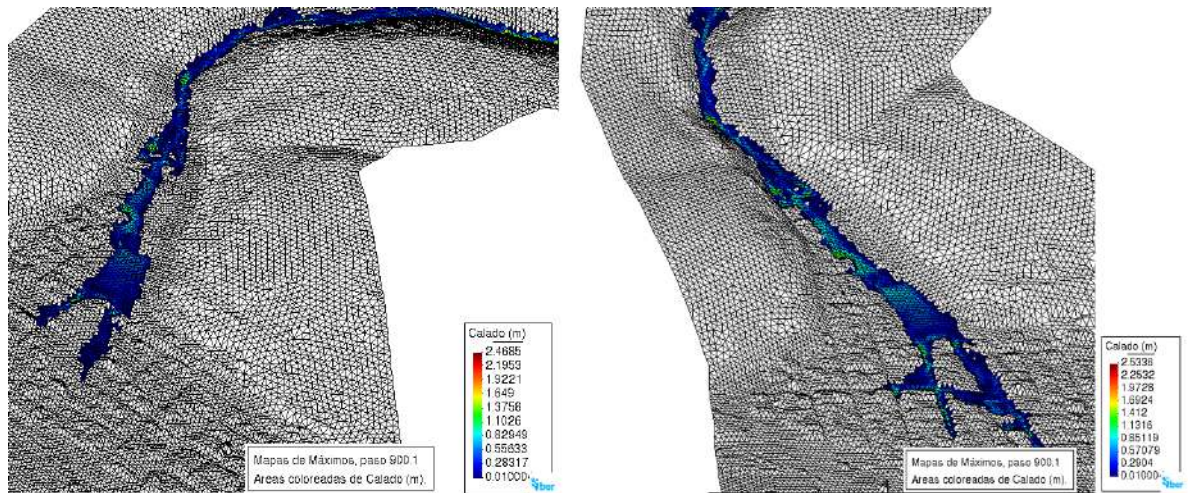
similitudes y diferencias que tiene cada modelo según los resultados encontrados en las simulaciones que se realizaron según los escenarios RCP 4.5 y RCP8.5 de los períodos 2021-2050 y 2051-2080.

Posteriormente, se realizó el modelamiento en IBER, utilizando la misma geometría y una malla no estructurada de tamaño de celdas de 8 x 8m en las zonas donde no se hizo el modelamiento debido a zonas consideradas como no inundables (cerros y demás), luego, se estableció una malla no estructurada de 6 x 6 m para la zona del cauce de la Quebrada del Diablo con el fin de poder apreciar mayor detalle en la simulación de inundación y no realizar un gasto de recursos computacionales innecesarios. Finalmente, se realizó la definición de las condiciones iniciales como el módulo de hidrodinámica, la rugosidad y los datos computacionales para iniciar con la simulación de los diferentes escenarios.

Viendo los resultados de la simulación se puede apreciar las zonas afectadas de color azul, las velocidades máximas, el calado máximo y las cotas de agua, las cuales serán comparadas con los demás modelos. Asimismo, se aprecia variación evidente en las zonas de inundación que concuerdan con los diferentes escenarios introducidos, esto debido a que según los escenarios RCP4.5 y RCP 8.5 existe un mayor caudal máximo mientras más período o tiempo exista. Es decir, que en particular en el escenario RCP4.5 2051-2080 se registró una zona de inundación menor a los demás escenarios y esto debido a que el hidrograma cuenta con un registro de caudales máximos menores a los demás escenarios como se muestra en la Figura 61 y Figura 62.

Figura 61

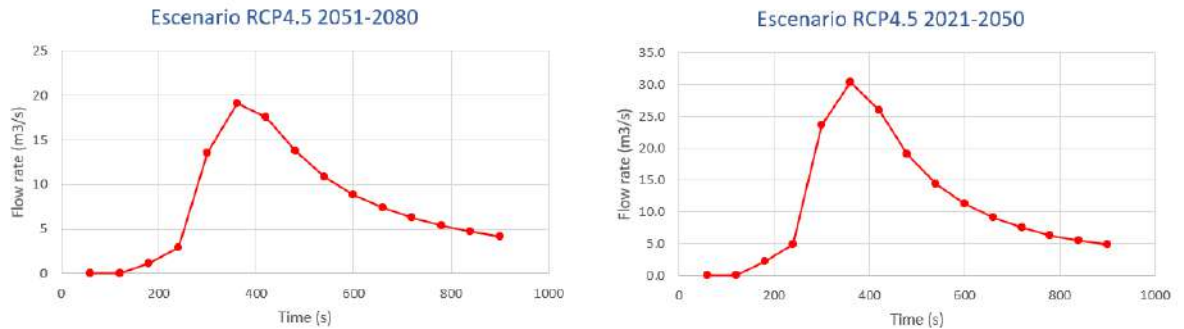
Simulación de los escenarios RCP4.5 2021-2050 y RCP4.5 2051-2080 en IBER



Nota: A la izquierda se aprecia el escenario RCP4.5 2051-2080 y a la derecha el escenario RCP4.5 2021-2050.

Figura 62

Hidrogramas de los escenarios RCP4.5 2021-2050 y RCP4.5 2051-2080

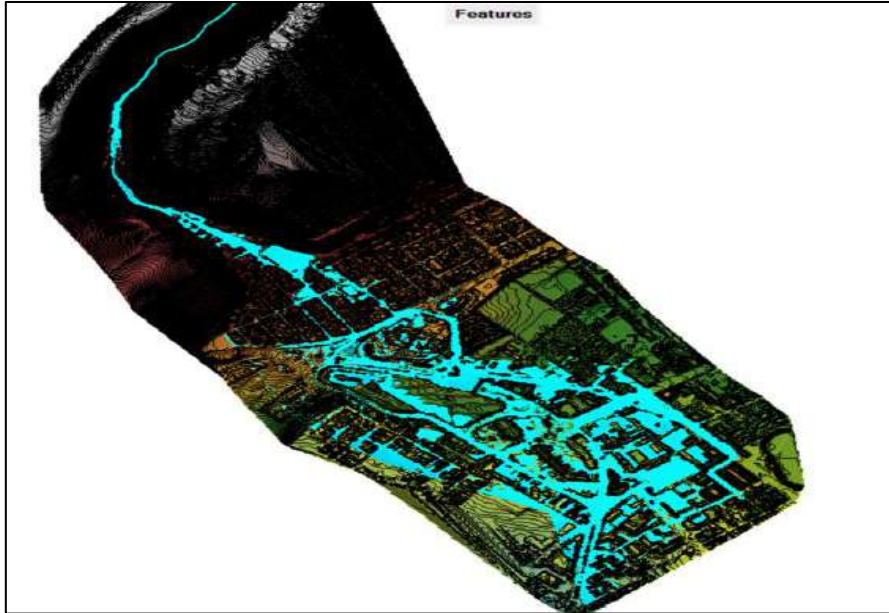


Nota: En los caudales máximos graficados se muestra una clara diferencia entre el caudal ingresado lo corrobora la diferencia en las zonas inundables entre los escenarios.

Asimismo, realizando el compute de la simulación en el programa HEC RAS, nos muestra una zona de inundación mayor al que se encuentra en IBER como se muestra en la Figura 63 y Figura 64.

Figura 63

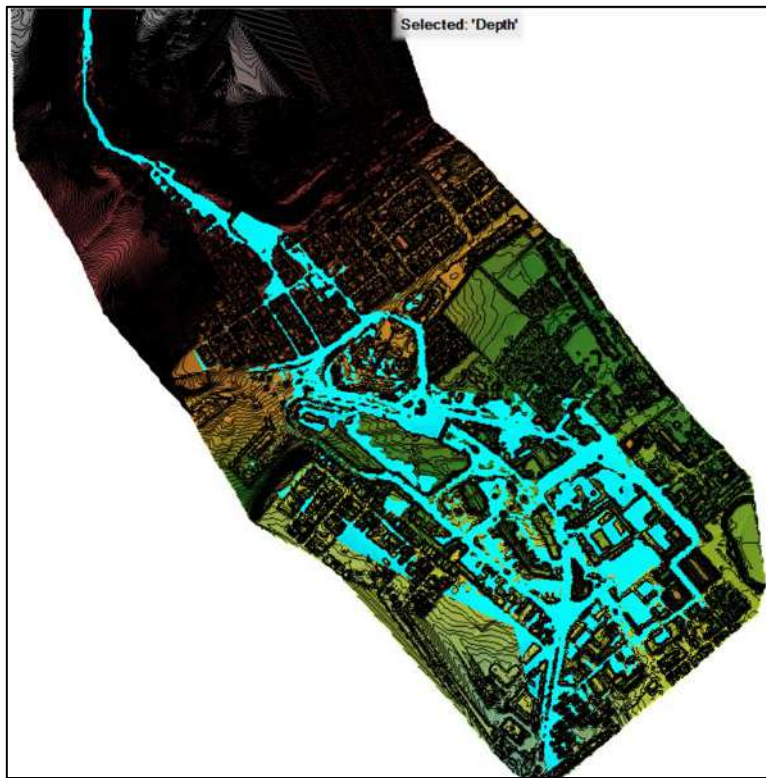
Simulación del escenario RCP4.5 2021-2050 en HEC RAS



Nota: Se puede apreciar las zonas inundables de color turquesa.

Figura 64

Simulación del escenario RCP4.5 2051-2080 en HEC RAS



Nota: Se puede apreciar las zonas inundables de color turquesa.

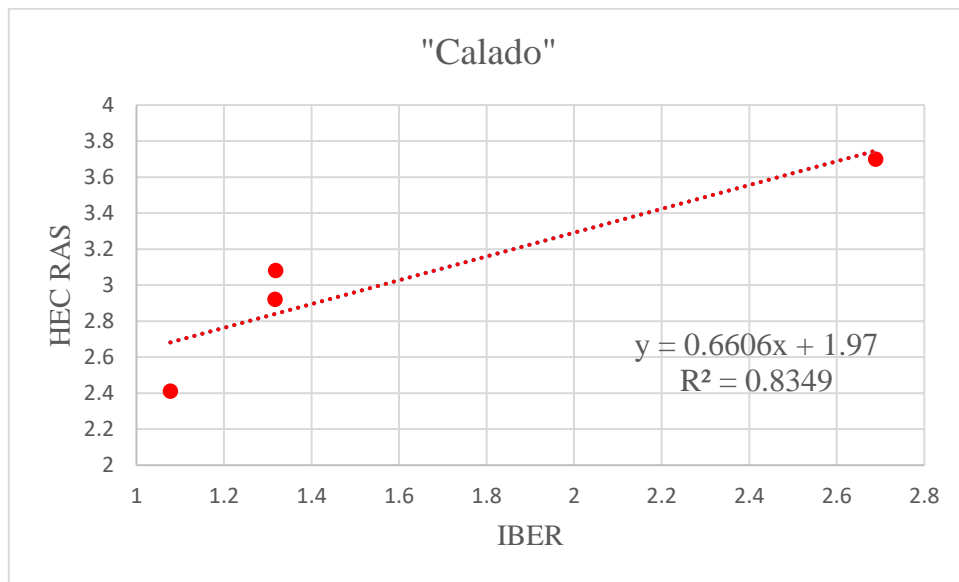
Como se aprecia en la Figura 63 y en la Figura 64 se muestra una zona de inundación mayor a la encontrada en el software IBER. Teniendo en cuenta que ambos modelos han tenido los mismos datos de entrada, sin embargo, la malla no estructurada generada es diferente, ya que en IBER se realiza una malla triangulada, por otro lado, en HEC RAS se realizan polígonos de hasta 8 lados. Esto significa que hay una diferencia en el uso de recursos computacionales. Se ha encontrado que al realizar iteraciones con menores segundos en el programa HEC RAS, mejora el análisis de la simulación, pero realiza un mayor gasto computacional.

Posteriormente, se realizó el análisis de correlación entre los datos obtenidos con respecto al “calado”, “velocidad” y “cota de agua” para verificar si hay diferencias

significativas en los modelos hidráulicos generados, para lo cual, en la Figura 65, Figura 66 y Figura 67 se muestran los gráficos de dispersión y en la Figura 68 se muestra el coeficiente de correlación de los resultados en los programas IBER y HEC RAS.

Figura 65

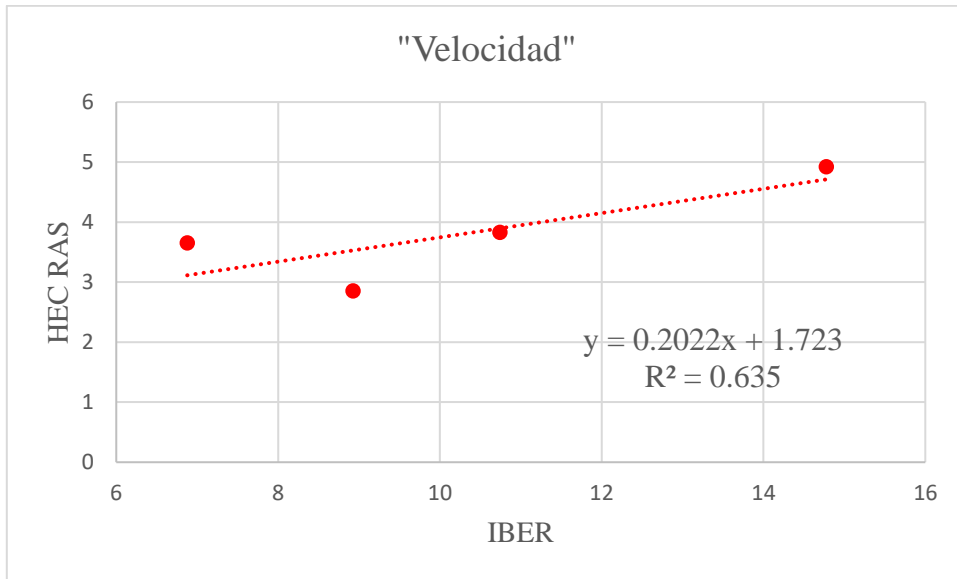
Gráfico de dispersión del “Calado” entre IBER y HEC RAS



Nota: Se puede apreciar la línea de tendencia en color rojo ya la derecha la ecuación y su valor R cuadrado.

Figura 66

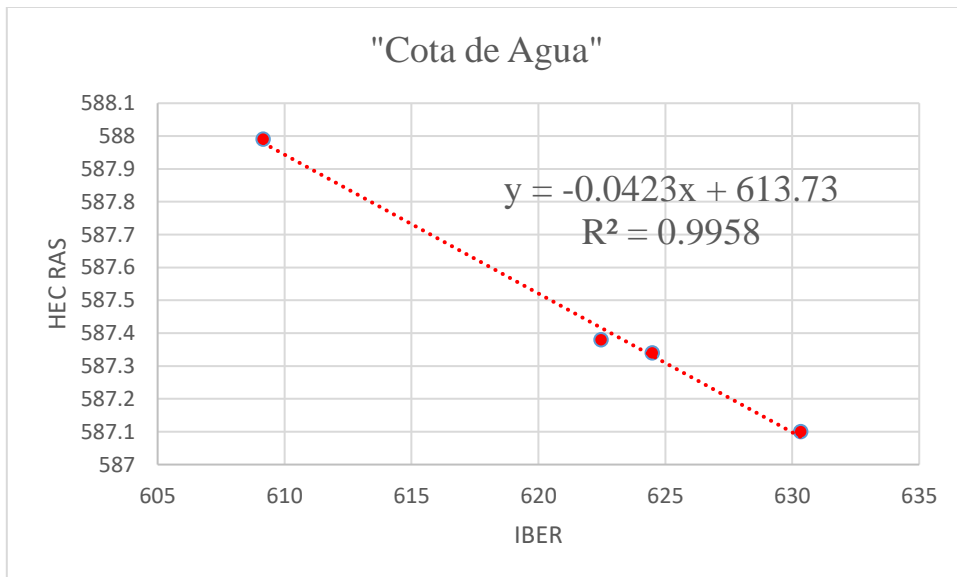
Gráfico de dispersión del “Velocidad” entre IBER y HEC RAS



Nota: Se puede apreciar la línea de tendencia en color rojo ya la derecha la ecuación y su valor R cuadrado.

Figura 67

Gráfico de dispersión del "Cota de Agua" entre IBER y HEC RAS



Nota: Se puede apreciar la línea de tendencia en color rojo ya la derecha la ecuación y su valor R cuadrado.

Tabla 8

Coefficientes de Correlación del “Calado”, “Velocidad” y “Cota de Agua”

	Calado	Velocidad	Cota de Agua
Coefficientes de correlación	0.914	0.797	-0.998

Nota: Se puede apreciar los coeficientes de los resultados de las simulaciones.

Se puede apreciar en la Figura 68 el coeficiente de correlación del “Calado” el cual tiene un valor de 0.914, lo cual nos indica que hay una fuerte relación entre los resultados de los programas IBER y HEC RAS y por tanto existe asociación entre los resultados de ambos programas. Por otro lado, el coeficiente de correlación de la “Velocidad” es 0.797 lo que indica que existe una relación entre las velocidades obtenidas en el programa IBER y HEC RAS, por tanto, existe una razonable asociación entre los resultados de ambos programas. Finalmente, tenemos un coeficiente de correlación de -0.998 lo cual nos indica que existe una relación muy fuerte entre los resultados obtenidos con los programas IBER y HEC RAS obteniendo una buena asociación.

CAPITULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES

- Se realizó el modelamiento hidráulico utilizando IBER y HEC RAS para determinar zonas inundables en la Quebrada del Diablo, región Tacna. Obteniendo zonas inundables en los distintos escenarios RCP4.5 2021-2050, RCP8.5 2021-2050, RCP4.5 2051-2080 y RCP8.5 2051-2080. Asimismo, se realizó el análisis comparativo de los modelos generados con los programas IBER y HEC RAS teniendo como resultado que ambos modelos muestran zonas de inundación de acuerdo a la gestión de los recursos computacionales, ya que en el modelo HEC RAS se demostró que necesita un mayor uso de recursos computacionales para obtener mejores resultados, por otro lado, con el programa IBER se generó la zona de inundación sin el uso de los mismos recursos computacional que HEC RAS.
- Se determinó la velocidad máxima con los escenarios RCP4.5 2021-2050, RCP8.5 2021-2050, RCP4.5 2051-2080 y RCP8.5 2051-2080 introducidos a los modelos hidráulicos utilizando IBER y HEC RAS encontrando una correlación de 0.797 lo cual muestra que existe una buena asociación entre

los resultados de ambos programas concluyendo que tanto en IBER como en HEC RAS se obtienen velocidades confiables.

- Se determinó el calado máximo con los escenarios RCP4.5 2021-2050, RCP8.5 2021-2050, RCP4.5 2051-2080 y RCP8.5 2051-2080 introducidos a los modelos hidráulicos utilizando IBER y HEC RAS encontrando una correlación de 0.914 lo cual muestra que existe una fuerte asociación entre los resultados de ambos programas concluyendo que tanto en IBER como en HEC RAS se obtienen resultados confiables.
- Se determinó la Cota de Agua mínima con los escenarios RCP4.5 2021-2050, RCP8.5 2021-2050, RCP4.5 2051-2080 y RCP8.5 2051-2080 introducidos a los modelos hidráulicos utilizando IBER y HEC RAS encontrando una correlación de -0.998 lo cual muestra que existe una fuerte asociación entre los resultados de ambos programas concluyendo que tanto en IBER como en HEC RAS se obtienen resultados confiables.
- Se concluye que ambos modelos muestran zonas inundables en la Quebrada del Diablo con resultados confiables, sin embargo, existe una diferencia en el uso de recurso computacionales que le da una ventaja al programa IBER sobre el software HEC RAS.


6.2 RECOMENDACIONES

- Para el modelado se recomienda usar la malla no estructurada de tamaño de celda regular, considerando que a mayor refino en el tamaño de celdas, mayor será el uso de recursos computacionales. Esto debido a que en ambos

programas usan una malla no estructurada diferente y puede ser un factor determinante con la búsqueda de resultados confiables.

- Se recomienda tener una topografía completa en la zona de estudio ya que resulta determinante al realizar la zonificación de rugosidades y en la forma de la geometría del proyecto. Sumado a esto es necesario considerar que un modelo de elevación producto de una topografía de intervalo menor a 1 es más precisa y otorga un mejor resultado en la simulación de escenarios de inundación.
- Para la zona de estudio de la Quebrada del Diablo se recomienda usar el software IBER ya que la malla no estructurada que se genera posibilita la una simulación más rápida que HEC RAS, sin embargo, ambos programas muestran resultados confiables teniendo como diferencia el uso de recursos computacionales. Es decir, ambos modelos son efectivos al mostrar zonas inundables y la precisión de los resultados dependerá de los recursos computacionales que se le asignen.
- Se propone realizar más escenarios RCP para comprobar la correlación de resultados con otros programas de simulación de caudales máximos ya que mejoraría la elección de software específico en zonas como la Quebrada del Diablo considerada no activa.

BIBLIOGRAFÍA

- Azouagh, A., Bardai, R., Hilal, I., & Messari, J. (2018). Integration of GIS and HEC-RAS in Floods Modeling of Martil River (Northern Morocco). *European Scientific Journal*, 14. <https://doi.org/10.19044/esj.2018.v14n12p130>
- Bladé, E., Cea, L., Corestein, G., Escolano, E., Puertas, J., Vázquez-Cendón, E., Dolz, J., & Coll, A. (2014). Iber: Herramienta de simulación numérica del flujo en ríos. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, 30(1), 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.rimni.2012.07.004>
- Bolivar Bello, G. E. (2020). *Modelamiento hidrológico e hidráulico bidimensional del Río Marañon sector Puente Tingo Chico. Carretera Huánuco—Conococha*. <https://renati.sunedu.gob.pe/handle/sunedu/3013894>
- Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1994).  Libro: Hidrología Aplicada - Ven Te Chow. *Hidro SM*. <https://www.hidrosm.com/2021/01/libro-hidrologia-aplicada-ven-te-chow.html>
- Escarcena Quiza, F. Y. (2014). Determinación de áreas inundables de la parte media de la microcuenca del Río Zapatilla – Centro Poblado de Ancoamaya—Ilave. *Universidad Nacional del Altiplano*. <https://renati.sunedu.gob.pe/handle/sunedu/3220811>

- García Aquino, M. M. (2022). *Simulación de máximas avenidas de la Quebrada del Diablo con fines de protección de la ciudad de Tacna, Perú*.
<http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/20.500.12996/5592>
- García Tocto, D. Y. (2019). Modelado Hidráulico del Río Amojú Aplicando el Software Iber para Zonificar Áreas Inundables en la Ciudad de Jaén, Perú. *Universidad Nacional de Jaén*. <http://localhost/jspui/handle/UNJ/228>
- Gonzales, G. F., Zevallos, A., Gonzales-Castañeda, C., Nuñez, D., Gastañaga, C., Cabezas, C., Naeher, L., Levy, K., & Steenland, K. (2014). Contaminación ambiental, variabilidad climática y cambio climático: Una revisión del impacto en la salud de la población peruana. *Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Pública*, 31(3), 547-556.
- Grimaldi, S., Petroselli, A., Arcangeletti, E., & Nardi, F. (2013). Flood mapping in ungauged basins using fully continuous hydrologic–hydraulic modeling. *Journal of Hydrology*, 487, 39-47. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.02.023>
- Howard, D. A., Luzzadder-Beach, S., & Beach, T. (2012). Field evidence and hydraulic modeling of a large Holocene jökulhlaup at Jökulsá á Fjöllum channel, Iceland. *Geomorphology*, 147-148, 73-85. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.07.031>
- IPCC. (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* ([Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]; p. 151 pp.).
- Jara Oncebay, G. G., & Ramos Cunurana, G. 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. *Universidad Privada de Tacna*.
<http://repositorio.upt.edu.pe/handle/20.500.12969/1745>
- Juculaca Incacutipa, L. C. (2021). Identificación de zonas vulnerables mediante el modelamiento hidráulico en el cauce de la Quebrada Del Diablo, Provincia de Tacna. *Repositorio Institucional - UCV*.
<https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/59814>
- Kumar, N., Kumar, M., Sherring, A., Suryavanshi, S., Ahmad, A., & Lal, D. (2020). Applicability of HEC-RAS 2D and GFMS for flood extent mapping: A case study of Sangam area, Prayagraj, India. *Modeling Earth Systems and Environment*, 6(1), 397-405. <https://doi.org/10.1007/s40808-019-00687-8>
- Laura Quispe, R. E. (2019). Determinación del nivel de riesgo por desborde e inundación aplicando un modelo numérico de flujo de escombros FLO-2D para la Mina Karla de Tacna – Tacna. *Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann*.
<http://repositorio.unjbg.edu.pe/handle/UNJBG/3833>
- 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>
- Mejía-Marcacuzco, J., Pino-Vargas, E., Guevara-Pérez, E., Olivos-Alvites, V., & Condori-Ventura, M. (2021). *Spatial prediction of soil erosion in arid areas by remote sensing. A case study: Quebrada del Diablo, Tacna, Perú*. 2.
- Menéndez Pidal, I., Hinojal Martín, J. A., Mora Alonso-Muñoyerro, J., & Sanz Pérez, E. (2020). Real-Time Data and Flood Forecasting in Tagus Basin. A Case Study:

- Rosarito and El Burguillo Reservoirs from 8th to 12th March, 2018. *Water*, 12(4), Article 4. <https://doi.org/10.3390/w12041004>
- Morales Chiara, A. G. (2011). Determinación de áreas de inundación del río Cabanillas para la delimitación de la faja marginal. *Universidad Nacional del Altiplano*. <https://renati.sunedu.gob.pe/handle/sunedu/3226057>
- Muñoz, M. J. N., Bustos, C. M., Arcentales, A. V., & Córdova, F. (2022). Evaluación de modelos hidráulicos unidimensionales y bidimensionales para la generación de mapas de inundaciones en un río de montaña. *AlfaPublicaciones*, 4(1), Article 1. <https://doi.org/10.33262/ap.v4i1.181>
- Murillo, J., Brufau, P., & Garcia-Navarro, P. (2008). *APLICACIÓN DEL MODELO BIDIMENSIONAL GUAD-2D PARA LA DETERMINACIÓN DE ZONAS INUNDABLES EN EL T.M. DE FRAGA (HUESCA)*.
- Ortiz, J. C. R., Pérez, M., Delfín, G., Freitez, C., & Martínez, F. (2017). Análisis comparativo entre los modelos HEC-RAS e IBER en la evaluación hidráulica de puentes. *Gaceta Técnica*, 17(1), Article 1. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.18178.68809>
- Panca Cruz, Y. G., & Belizario Quispe, M. (2020). Comparativo del comportamiento hidráulico de zonas inundables con el software IBER y HEC-RAS del río Coata C.P. Almosanche. *Repositorio Institucional - UNAP*. <https://renati.sunedu.gob.pe/handle/sunedu/3218802>
- Pérez Pérez-Olaya, N. (2015). *Estudio hidráulico para la determinación de zonas inundables y análisis valorado de soluciones de protección en el municipio de*

Balmaseda, Vizcaya, Comunidad Autónoma del País Vasco.

<http://rua.ua.es/dspace/handle/10045/47515>

Pinedo Aguilar, A. M., & Garcia Iquise, A. L. (2022). Diseño de un dique y mitigación de daños mediante modelación hidráulica en la Quebrada del Diablo, Tacna 2022. *Universidad Privada de Tacna.*

<http://repositorio.upt.edu.pe/handle/20.500.12969/2350>

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), Article 1.

<https://doi.org/10.3390/hydrology9010010>

Pino-Vargas, E., Montalvan-Díaz, I., & Avendaño-Jihuallanga, C. (2019). *La disponibilidad hídrica futura en los ecosistemas de zonas áridas en el Sur de Perú y Norte de Chile.* Universidad Nacional de Trujillo.

<https://revistas.unitru.edu.pe/index.php/agroindscience/article/view/2708>

Talledo Walde, R. A., & Cardoso CusiHuallpa, S. I. (2021). Generación de mapa de amenaza para disminuir el impacto de daños ocasionados por flujos hiperconcentrados en la quebrada del Diablo, distrito Alto de la Alianza, haciendo uso de FLO-2D. *Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC).*

<https://repositorioacademico.upc.edu.pe/handle/10757/655742>

Trigoso Marín, B. G. (2018). Modelamiento hidráulico de la quebrada Calispuquio—Tramo ciudad de Cajamarca—Ciudad Universitaria, con fines de prevención de inundaciones. *Universidad Nacional de Cajamarca.*

<http://repositorio.unc.edu.pe/handle/20.500.14074/2049>

Volonté, A., & Gil, V. (2019). Aportes de la hidrogeomorfología histórica en la determinación de áreas inundables a partir de eventos extremos de crecidas.

Huellas, 23(1), 11-26.

Zabaleta Castro, Y., & Espejo Mariño, O. K. (2021). Comparación del modelamiento hidráulico de una poza disipadora inclinada mediante el uso de los modelos IBER y

HEC-RAS. *Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC)*.

<https://renati.sunedu.gob.pe/handle/sunedu/3093172>

ANEXOS

Anexo 1: Artículo científico “Impacts of Climate Change and Variability on Precipitation and Maximum Flows in Devil’s Creek, Tacna, Peru.”

Article

Impacts of Climate Change and Variability on Precipitation and Maximum Flows in Devil's Creek, Tacna, Peru

Edwin Pino-Vargas ¹, Eduardo Chávarri-Velarde ^{2,*}, Eusebio Ingol-Blanco ^{2,*}, Fabricio Mejía ¹, Ana Cruz ¹ and Alissa Vera ¹

¹ Department of Civil Engineering, Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, Tacna 23000, Peru; epinov@unjbg.edu.pe (E.P.-V.); 20210308@lamolina.edu.pe (F.M.); acruz@unjbg.edu.pe (A.C.); averam@unjbg.edu.pe (A.V.)

² Department of Water Resources, Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima 15024, Peru

* Correspondence: echavarri@lamolina.edu.pe (E.C.-V.); eingol@lamolina.edu.pe (E.I.-B.)

Abstract: Global projections of climate change indicate negative impacts on hydrological systems, with significant changes in precipitation and temperature in many parts of the world. As a result, floods and droughts are expected. This article discusses the potential effects of climate change and variability on the maximum precipitation, temperature, and hydrological regime in Devil's Creek, Tacna, Peru. The outputs of precipitation and daily temperature of fifteen regional climate models were used for the RCP4.5 and RCP8.5 emission scenarios. The methodology used includes the bias correction and downscaling of meteorological variables using the quintiles mapping technique, hydrological modeling, the evaluation of two emission scenarios, and its effect on the maximum flows of the stream. The results of the multi-model ensemble show that the maximum annual precipitation will probably increase by more than 30% for the RCP4.5 and RCP8.5 scenarios for the 2021–2050 period relative to the 1981–2005 period. Likewise, as expected, the maximum flows could increase by 220% and 154% for the RCP4.5 scenarios for the 2021–2050 and 2051–2080 terms, respectively, and 234% and 484% for the RCP8.5 scenarios and for the 2021–2050 and 2051–2080 terms, respectively, concerning the recorded historical value, increasing the probability of flood events and damage in populations located downstream.

Keywords: maximum precipitation; maximum flow; climate change; hydrological modeling



Citation: Pino-Vargas, E.; Chávarri-Velarde, E.; Ingol-Blanco, E.; Mejía, F.; Cruz, A.; Vera, A. Impacts of Climate Change and Variability on Precipitation and Maximum Flows in Devil's Creek, Tacna, Peru. *Hydrology* **2022**, *9*, 10. <https://doi.org/10.3390/hydrology9010010>

Academic Editors:
Carmelina Costanzo,
Tommaso Caloiero
and Roberta Padulano

Received: 23 November 2021

Accepted: 30 December 2021

Published: 5 January 2022

Publisher's Note: MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



Copyright: © 2022 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

Changes in temperature and precipitation patterns, due to the increase in greenhouse gas concentrations, affect hydrological processes. Consequently, negative impacts are expected on water resources for agriculture, urban uses, mining, industry, aquatic life in rivers and lakes, and hydroelectric power production. Similarly, spatial changes in the intensity and frequency of precipitation can affect the magnitude and frequency of flows, increasing the intensity of floods and droughts, with important impacts on economic activities at the local and regional levels [1,2].

On the other hand, on a global scale, studies show that the temperature increases by more than 3.5 °C, under the RCP8.5 emission scenario. By the end of the 21st century, precipitation is projected to reduce by more than 20% for medium and low latitudes [3]. Similarly, an increase in evaporation and a decrease in soil moisture content and groundwater recharge are expected. Consequently, drought conditions and increased evapotranspiration rates are projected for summer in subtropical regions, as well as medium and low latitudes [3].

In Peru, a national evaluation of climate scenarios carried out by the Peruvian National Meteorological and Hydrological Service (SENAMHI), estimated a progressive increase in the maximum and minimum temperature, by 2.8 °C on average by the end of the 21st century. Similarly, a reduction in precipitation of 40% is projected for winter, and an average increase of 20% during summer and spring [4].

An increase in temperature with a decrease in precipitation will produce a drastic decrease in water availability in rivers and other natural sources, as well as a substantial increase in evapotranspiration rates, meaning greater water consumption, affecting agricultural and municipal uses, and the production of electrical and industrial energy. Additionally, a slow but sustained reduction in glaciers in Peru is expected, which plays an important role in the supply of water to the water systems of communities in the Andean regions.

On the other hand, many regions of the north, center, and south of Peru are frequently seriously affected by floods and huaycos (debris flow and mudslides) as a result of high-intensity precipitation which occurs in the basins, influenced by the El Niño phenomenon. It is estimated that 26 El Niño events have occurred during the 20th century. The most severe events occurred in 1924–1925, 1982–1983, 1997–1998 [5], and most recently in 2016–2017. These events have generated great damages and economic losses in the social, productive, and infrastructure sectors. The total sectoral damages caused by the El Niño phenomena 1982–1983 and 1997–1998 were around USD 3200 million and USD 3500 million, respectively, including direct and indirect damages [6]. In the latest 2016–2017 event, total damages were estimated to be around USD 4 billion [7].

Similarly, at the JORGE BASADRE rain gauge, located in the city of Tacna, precipitation of 5.1 mm was recorded in 24 h in 2017, constituting one of the highest values ever recorded for November. The intensities were variable and covered a large part of the coastal zone of the Tacna region [8].

On the other hand, extreme precipitation events are commonly represented using IDF precipitation curves. Extreme weather events are becoming more severe and frequent, which leads to uncertainties as to how prepared the infrastructure is to face these changes. Infrastructure designs are based on the IDF precipitation curves with the assumption of stationarity, which means that the statistical properties of future events will be similar to those of the past [9,10]. However, climate change is expected to alter climate extremes, a concept called non-stationarity [11].

The main objective of this research is to evaluate the potential impacts of climate change and variability on precipitation and maximum flows in the Devil's Creek, located in the Tacna region, Peru. The Tacna region is located in the northern region of the Atacama Desert. The Atacama Desert is one of the largest hyper-arid deserts in the world [12].

For this purpose, the outputs of the meteorological variables of fifteen regional climate models of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 [13] were used as inputs for the hydrological model. A bias correction was applied for temperature and precipitation using the quantile mapping method [14–17], which enables bias correction of the regional climate model simulations in comparison with the data observed in rain gauges. The changes in precipitation and maximum flow were evaluated for the period 2021–2050 and the RCP4.5 (intermediate) and RCP8.5 (high) emission scenarios.

The results, in combination with the evaluation of the maximum precipitation and temperature, the analysis of frequencies, and hydrological modeling, will help to answer the research questions such as: What would be the changes of the maximum precipitation and temperature in the sub-basin of the Devil's Creek under historical conditions and climate change scenarios? What changes would the frequency of maximum flows experience in the study area under scenarios of variability and climate change? What are the differences between historical conditions and climate change?

2. Materials and Methods

2.1. Precipitation Data and Historical Temperature

Historical data of daily precipitation and temperature of five (5) rain gauges near the study basin (Figure 1) were collected and analyzed for the period 1966–2020. The completion and extension of information were carried out with the Climatol software, which uses an approach based on the method used by Paulhus and Kohler [16] to complete the missing daily precipitation data. This consists of spatial interpolation of the normal

precipitation rate of neighboring rain gauges. This proportion method is extended in the Climatol package with options to use differences and full standardization to normalize the data [18]. However, because the JORGE BASADRE rain gauge only had daily precipitation data since 1993 (Table 1), and because a minimum period of 30 years is necessary, for analysis of the frequency of maximum precipitation, it was considered appropriate to evaluate information from the product named PISCO (Peruvian Interpolated data of the SENAMHI Climatological and hydrological Observations. Precipitation v2.0) [19], available from SENAMHI (National Service of Meteorology and Hydrology of Peru). To use these data, they had to be corrected using the quantile mapping technique and validated for the Devil’s Creek area using local rain gauges (JORGE BASADRE, Calana, Calientes, Sama Grande, and Palca) as reference rainfall or observed values. These data have made it possible to complete the daily precipitation dataset for the JORGE BASADRE rain gauge, from 1981–1992.

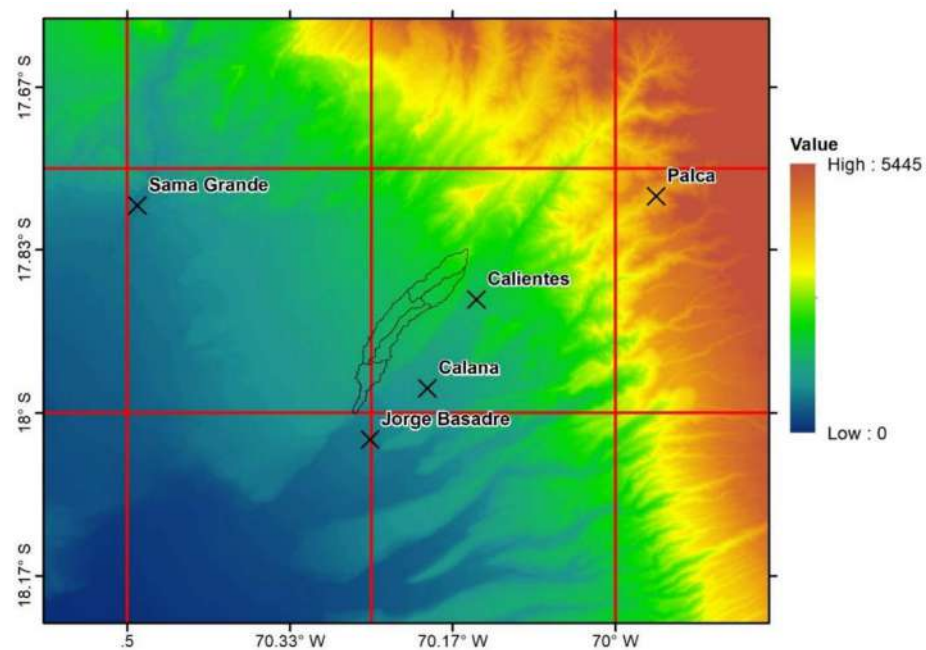


Figure 1. Location of the Devil’s Creek with the meteorological rain gauges selected for the down-scaling and cells of the general circulation models (GCMs).

Table 1. Availability of precipitation data.

Rain Gauge	No. Values	Start Date	Final Date	% Gaps	Duration (Years)
Calana	19,704	1 January 1966	31 December 2020	2	55
JORGE BASADRE	9952	1 January 1993	31 December 2020	3	28
Calientes	19,298	1 January 1966	31 December 2020	4	55
Sama Grande	19,789	1 January 1966	31 December 2020	1	55
Palca	15,866	1 July 1966	31 December 2020	20	55

2.2. General Circulation Models and Scenarios

When considering climate change, one of the challenges water resource managers often face is deciding which general circulation models (GCMs) should be used to assess the impacts of climate change on water resource systems. This is a puzzling question because all GCMs demonstrate uncertainty in the prediction of historical climate variables [20,21]. However, some criteria, such as spatial resolution, the degree of atmospheric–ocean coupling, and the availability of multiple realizations, can be taken into account when selecting

a set of GCMs to reduce uncertainties in the predictions of maximum precipitation and floods based on any individual GCM [2,22,23]. Considering the high degree of uncertainty that climate models present in the projection of precipitation, fifteen regional climate models have been deemed convenient to be evaluated in this research.

Currently, there are regionally scaled models (25 km × 25 km) whose outputs still need bias correction and spatial downscaling to improve their performance in a particular region. This research uses 15 general circulation models of the CMIP5 project (the NASA NEX-GDDP dataset–Coupled Model Intercomparison Project Phase 5): ACCESS1-0, bcc-csm1-1, CanESM2, CCSM4, CESM1-BGC, CNRM-CM5, CSIRO-Mk3-6-0, GFDL -CM3, GFDL-ESM2G, GFDL-ESM2M, IPSL-CM5A-LR, MIROC-ESM, MIROC-ESM-CHEM, MIROC5, MPI-ESM-LR, MPI-ESM-MR [24].

On the other hand, climate data from the downscaled emission scenarios RCP4.5 (intermediate emission) and RCP8.5 (high emissions) are used. These scenarios have been selected based on their emission trajectories; medium and high, respectively, for the period 2021–2080.

2.3. Bias Correction and Downscaling

Downscaling can be defined as a technique that increases the resolution of GCMs to obtain the climate at a local scale. There are two fundamental methods for downscaling large-scale data from GCM results: statistical and dynamic downscaling. Their concepts have been discussed in various articles [25–28]. This research uses a statistical downscaling of the outputs of the previously described regional models. Quantile mapping is applied to perform bias correction in regional climate model simulations compared to observed data. This method is designed to fit the distribution of the modeled data, so that they match observed climate data [29,30]; in this case, precipitation and temperature. The following expression was applied and resolved in Rstudio to find the corrected future value:

$$y_{corr,i}^f = F_y^{-1} \left(F_x \left(x_i^f \right) \right) \quad (1)$$

where $y_{corr,i}^f$ is the future value corrected at time i , and $F_x(x)$, $F_y(y)$ represent the empirical cumulative distribution functions of the model (x) and observations (y). To perform bias correction and the downscaling, this study uses a historical period and a base period simulated by climate models, both from January 1981 to December 2005. With this, the correction for the future period 2021–2080 is applied.

2.4. Climate Model Ensembles

The evaluation of the capacity of a climate model to simulate trends in extreme events is complex due to internal climate variability, whose simulated phases are unique for the realization of each model [31]. On the other hand, we know that, currently, the models have improved a lot in projecting the future climate. However, a high degree of uncertainty still persists, showing great variability between models in mainly projecting precipitation. In this sense, the multi-model ensembles highlight the uncertainty in climate predictions that result from structural differences in global climate models, as well as the uncertainty due to variations in the initial conditions or parameterizations of the model [32]. Similarly, several investigations have shown that a weighted ensemble method, based on the simulation performance of the models, may have better projection abilities than the equal-weighted ensembles [33–36].

In this study, the ensemble of downscaled climate scenarios of the 14 global circulation models (GCMs) applied to the Devil's Creek is given by the weighted average whose weights are determined according to the performance of each model concerning the historical period 1981–2005. The determination of the weights of each GCM is determined by the genetic algorithm [37], whose objective function is to minimize:

$$F_{obj} = \min \sum_{j=1981}^{2005} \left(P_{hist,j} - \sum_{i=1}^{14} (w_i * P_{GCM,j}) \right)^2 \quad (2)$$

where P_{hist} is the historical maximum annual precipitation for the Devil's Creek, for the year j , P_{GCM} is the maximum annual precipitation of the GCM of the Devil's Creek, and w is the weight of each GCM. The objective is to minimize the error between the observed value and the simulated value, optimizing the weights that each model would have based on its performance with the history.

The proposed objective function is interpreted as the ensemble of the 14 GCMs in the Devil's Creek for the period 1981–2005 to be identical to the maximum annual precipitation generated in the creek.

The genetic algorithm begins with an initial population subjected to the selection process of the objective function evaluation to later apply the genetic crossing and mutation operators. These are responsible for diversifying the individuals of the initial population [37,38]. A simple ensemble with equal weighting is used for the minimum and maximum temperatures.

2.5. Hydrological Modeling

2.5.1. Frequency Analysis of Total Daily Precipitation for the Northern Area of the City of Tacna

In the Caplina river basin, there are five rain gauges: two main climate rain gauges (La Yarada and Calana), two ordinary rain gauges (Calientes and Palca), and a main agricultural climate rain gauge (JORGE BASADRE) [39]. Due to its proximity to the city of Tacna, the total daily precipitation recorded at the JORGE BASADRE rain gauge was considered representative of the northern area of the city of Tacna. This rain gauge has a continuous record of 28 years (1993 to 2020) (Figure 2). The frequency analysis was performed from the partial duration series, which was adjusted to the Gumbel distribution.

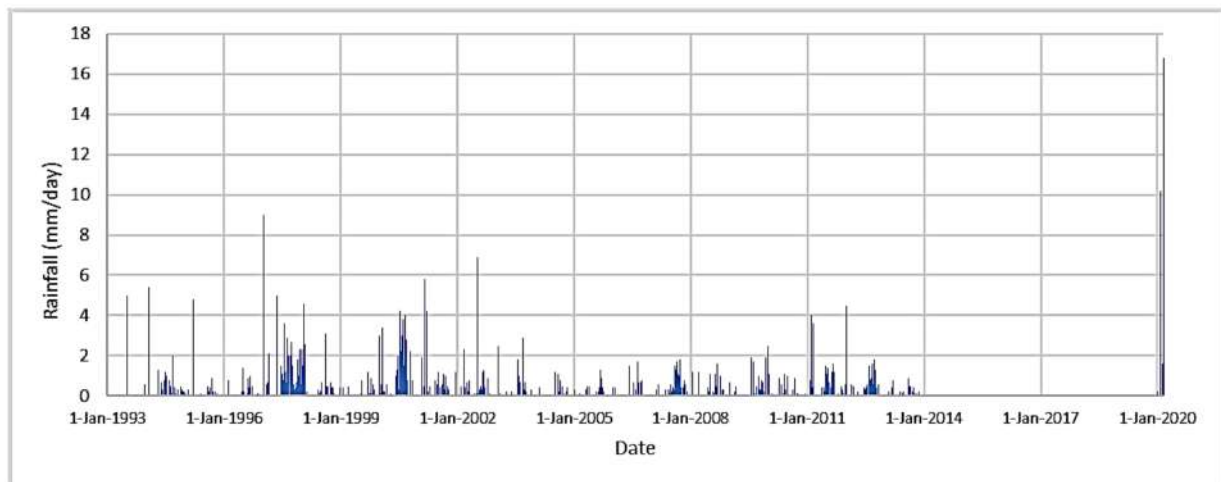


Figure 2. Total daily precipitation—JORGE BASADRE rain gauge.

Figure 3 shows that the precipitation event recorded on 21 February 2020 has a return period of 255.8 years.

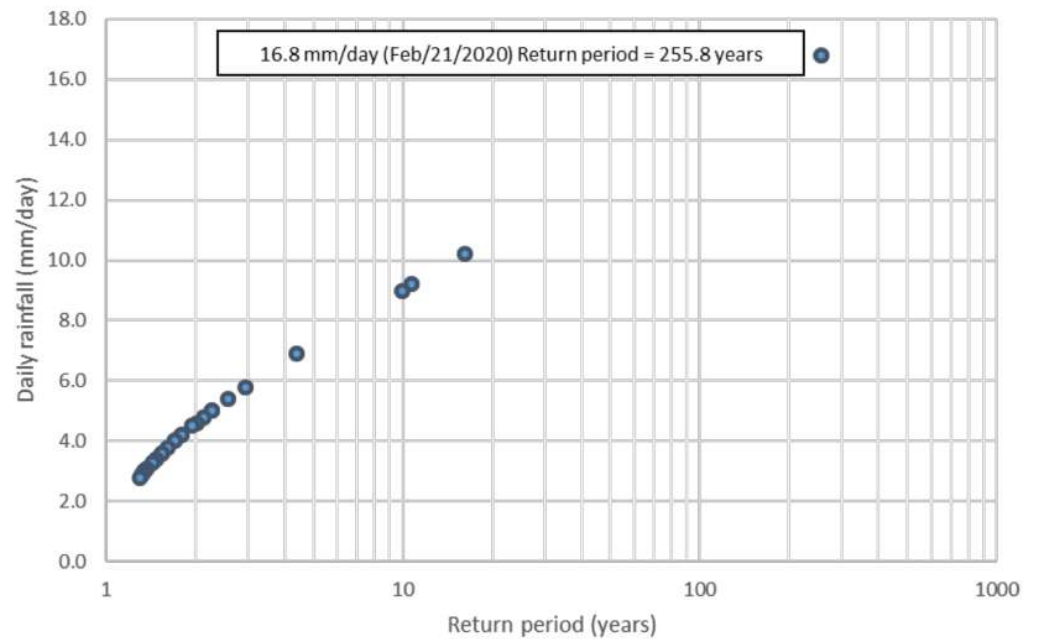


Figure 3. Frequency analysis of the partial series of total daily precipitation at JORGE BASADRE rain gauge (from 1993 to 2020).

2.5.2. Estimated Precipitation Events for the Devil's Creek

Figure 4 shows the comparison of the total daily rainfall discharged from the PISCO product for the coordinates of the JORGE BASADRE rain gauge and the total daily rainfall from the JORGE BASADRE rain gauge, during the period 1 January 1993 to 21 April 2014.

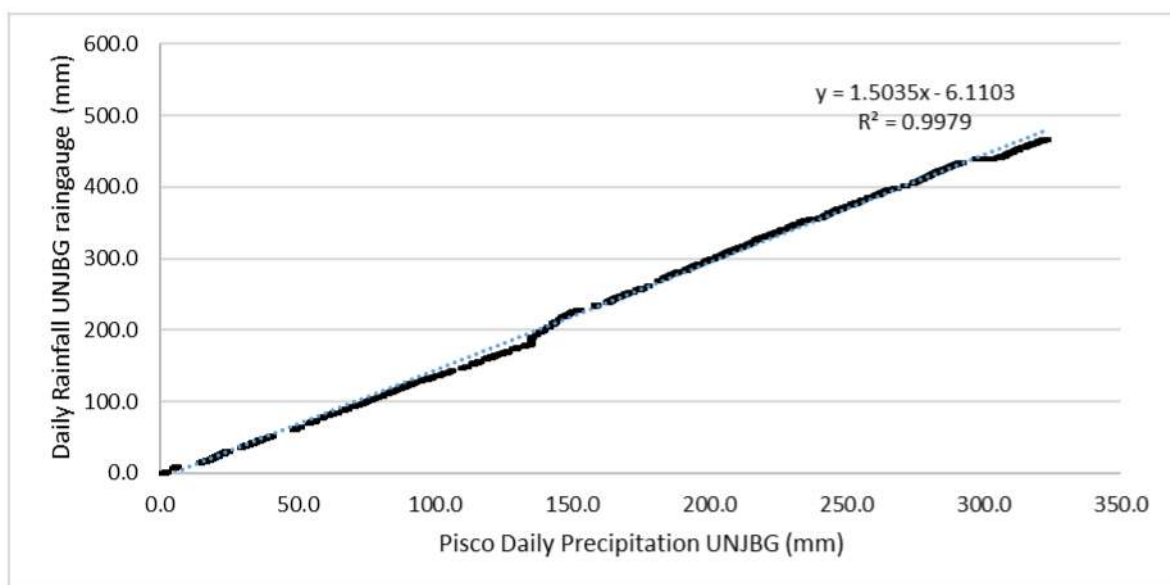


Figure 4. Comparison double-mass between the precipitation data of the PISCO product in JORGE BASADRE rain gauge and the rainfall of the JORGE BASADRE rain gauge, during 7780 days (1 January 1993–21 April 2014).

The efficiency criterion used to evaluate the similarity of the daily rainfall at the JORGE BASADRE rain gauge and the PISCO daily precipitation was the Nash–Sutcliffe model. The efficiency criterion of Nash and Sutcliffe efficiency (E) is defined by the following equation [40].

$$E = 1 - \frac{\sum_1^N (O_i - P_i)^2}{\sum_1^N (O_i - \bar{O})^2} \quad (3)$$

where O_i is the daily rainfall recorded, P_i is the PISCO daily precipitation, \bar{O} is the mean daily rainfall recorded, and N is the number of observations. The ranges of E lay between 0.75 and 1.0 (Very good), 0.65 and 0.75 (Good), 0.5 and 0.65 (Satisfactory), and ≤ 0.5 (Unsatisfactory).

The Nash–Sutcliffe efficiency index of the PISCO product was 0.83, which shows a very good correspondence between the series indicated above [41]. Likewise, it was found that the difference between the total daily precipitation depth discharged from the PISCO product for the coordinates of the JORGE BASADRE rain gauge with respect to the total daily rainfall (depth) from the JORGE BASADRE rain gauge was -31% . Similarly, it was found that the difference between the total daily precipitation depth discharged from the PISCO product for the coordinates of the middle and upper parts of the Devil’s Creek with respect to the total daily precipitation depth discharged from the PISCO product for the JORGE BASADRE rain gauge was -6% . Figure 5 shows a comparison of the total daily rainfall discharged from the PISCO product for the coordinates of the middle and upper parts of the Devil’s Creek and the total daily rainfall from the JORGE BASADRE rain gauge discharged from the PISCO product, during the period 01 January 1993 to 21 April 2014.

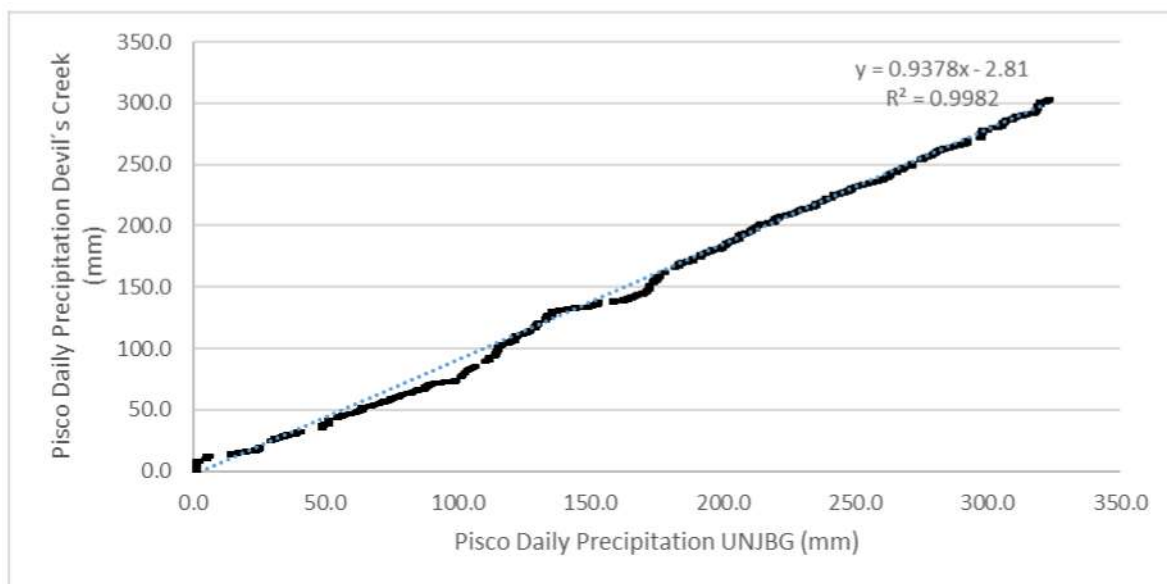


Figure 5. Comparison double-mass between the precipitation data of the PISCO product in the JORGE BASADRE rain gauge versus the precipitation data of the PISCO product in Devil’s Creek over 7780 days (1 January 1993–21 April 2014).

On the other hand, the FIAG UNJBG automatic rain gauge has continuously recorded precipitation every 30 min from 7 December 2019 to the present (7 May 2021). Given that the FIAG UNJBG automatic rain gauge is located near the JORGE BASADRE rain gauge, it was assumed that the precipitation which falls every 30 min in the middle and upper parts of the Devil’s Creek differed by -38% with respect to FIAG UNJBG automatic rain gauge. The calculations are as follows:

- JORGE BASAGRE rain gauge = $1.31 \times$ PISCO precipitation in JORGE BASADRE;
- PISCO precipitation for the coordinates of the middle and upper parts of the Devil's Creek $\times 1.06$ = PISCO precipitation in JORGE BASADRE;
- The FIAG UNJBG automatic rain gauge is located near the JORGE BASADRE rain gauge; therefore, we assumed that the rainfall data of the FIAG UNJBG automatic rain gauge were the same that the rainfall data of the JORGE BASADRE rain gauge;
- Then, PISCO precipitation for the coordinates of the middle and upper parts of the Devil's Creek $\times 1.38$ = Rainfall data of the FIAG UNJBG automatic rain gauge. The value 1.38 is a result of 1.31×1.06 .

Considering this, the estimated precipitation for the middle and upper parts of the Devil's Creek for the period 7 December 2019 to 7 May 2021 is shown in Figure 6. In that period, three main events have been identified.

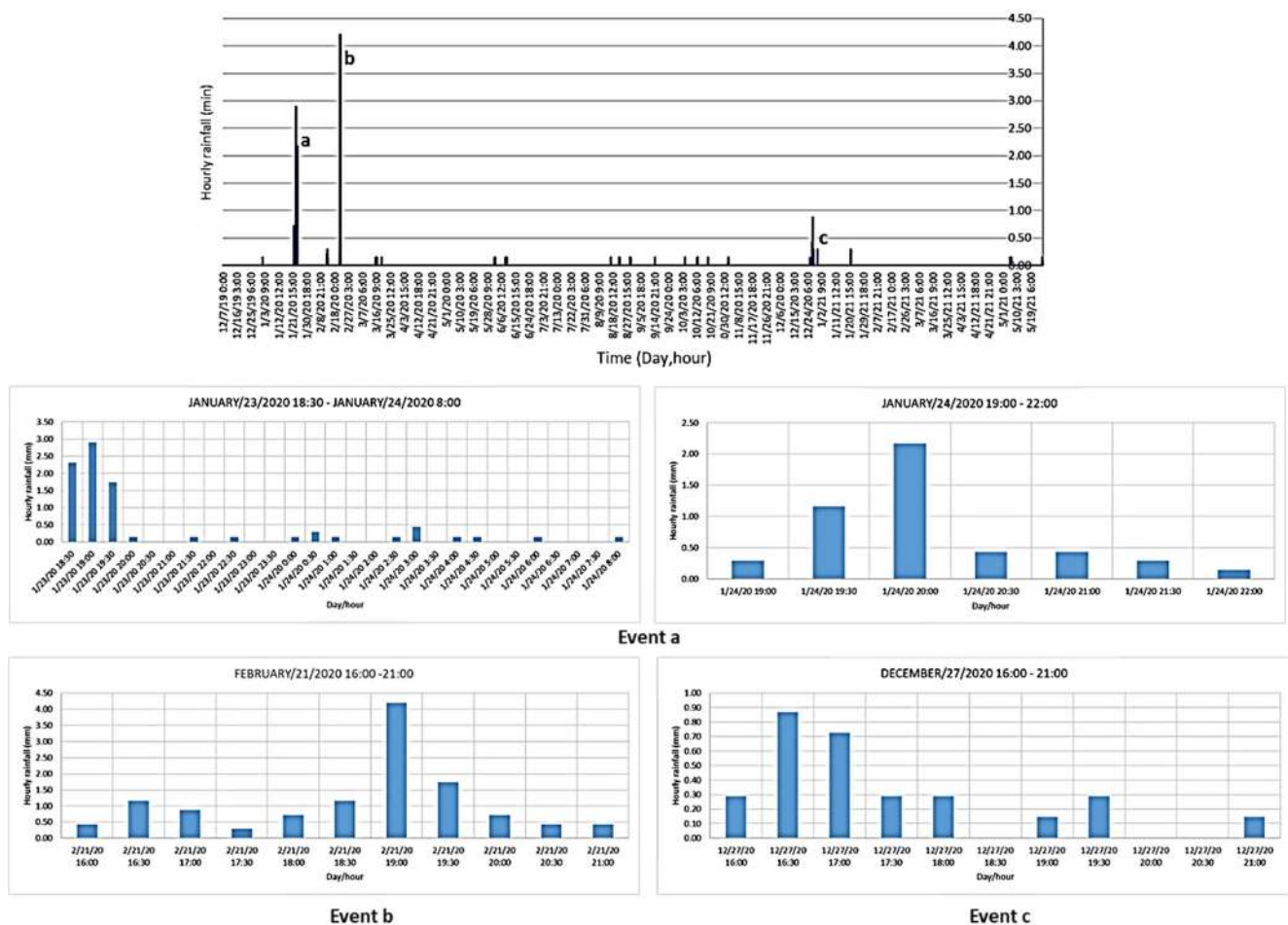


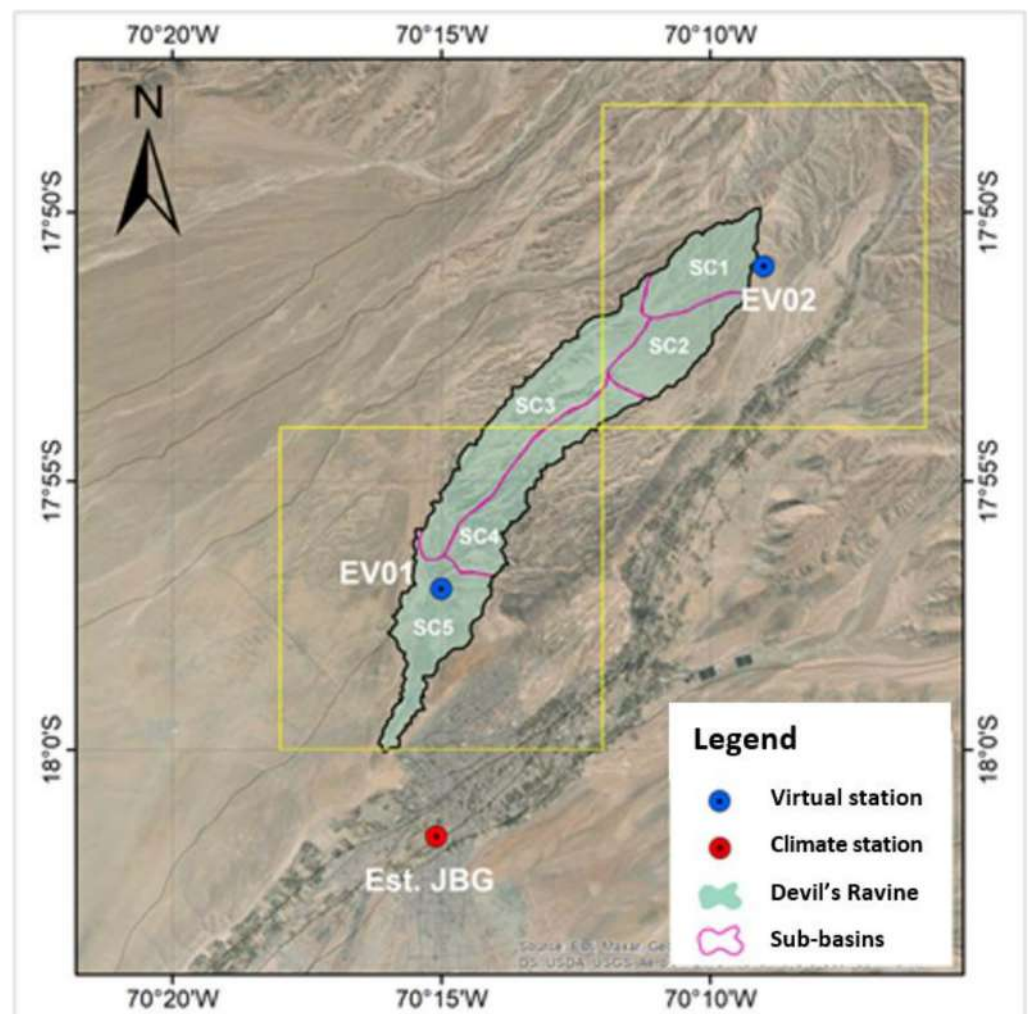
Figure 6. Estimated hourly rainfall for the Devil's Creek. (a) Event on 23–24 January 2020; (b) event on 21 February 2020; and (c) event on 27 December 2020.

In order to corroborate the lower amount of precipitation in the Devil's Creek concerning the FIAG UNJBG automatic rain gauge, a space–time analysis of the information recorded at the JORGE BASADRE rain gauge was carried out with other daily satellite products, such as IMERG and CHIRPS. To do this, two virtual rain gauges were defined to be compared with the JORGE BASADRE rain gauge. Table 2 shows the location of each of the aforementioned rain gauges.

Table 2. Virtual rain gauges and JORGE BASADRE rain gauge.

No	Rain Gauge	Length	Latitude	Elevation (masl)	Source	Record
1	Jorge Basadre G.	−70.2515°	−18.0268°	552	UNJBG	1993–2014, 2017–2021
2	EV01	−70.25°	−17.95°	941	-	-
5	EV02	−70.15°	−17.85°	1560	-	-

Additionally, Figure 7 shows the location of the aforementioned rain gauges. The two virtual rain gauges are located in the lower and upper parts of the basin. It should be noted that the quadrants correspond to the available satellite information.

**Figure 7.** Location of virtual rain gauges and the JORGE BASADRE rain gauge.

For the spatial analysis of precipitation, three satellite products were used, as shown in Table 3. Similarly, for the IMERG product, the early and final versions were used. The information for each product was the total daily precipitation.

In the case of the IMERG product, the information was available from 2000 to date, and in the case of CHIRPS, the information was complete for the entire analysis period.

Figure 8 shows the series of total daily precipitation data from the JORGE BASADRE rain gauge and the series of each satellite product downloaded for the same coordinate from the JORGE BASADRE rain gauge. It can be seen that the data downloaded for the total daily precipitation of the IMERG Early product slightly overestimated the precipitation, and the IMERG Final product underestimated the precipitation information at the JORGE

BASADRE rain gauge. In contrast, the data downloaded for the total daily precipitation of the CHIRPS product were greater than the data for the total daily precipitation of the JORGE BASADRE rain gauge.

Table 3. Satellite and data base products analyzed.

Product	Version	Abbreviation	Source	Resolution	Frequency	Term
Peruvian Interpolated data of SENAMHI's Climatological and Hydrological Observations	V. 2.1	PISCO	SENAMHI	$0.1^\circ \times 0.1^\circ$	Daily	1981–2016
Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM	Early V06B	IMERG-F	NASA	$0.1^\circ \times 0.1^\circ$	Daily and 30 min	2000–2021
Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM	Final V06B	IMERG-E	NASA	$0.1^\circ \times 0.1^\circ$	Daily and 30 min	2000–2021
Climate Hazards group Infrared Precipitation with Rain gauges	V. 2.0	CHIRPS	UCSB (*)	$0.05^\circ \times 0.05^\circ$	Daily	1981–2021

(*) University of California Santa Bárbara.

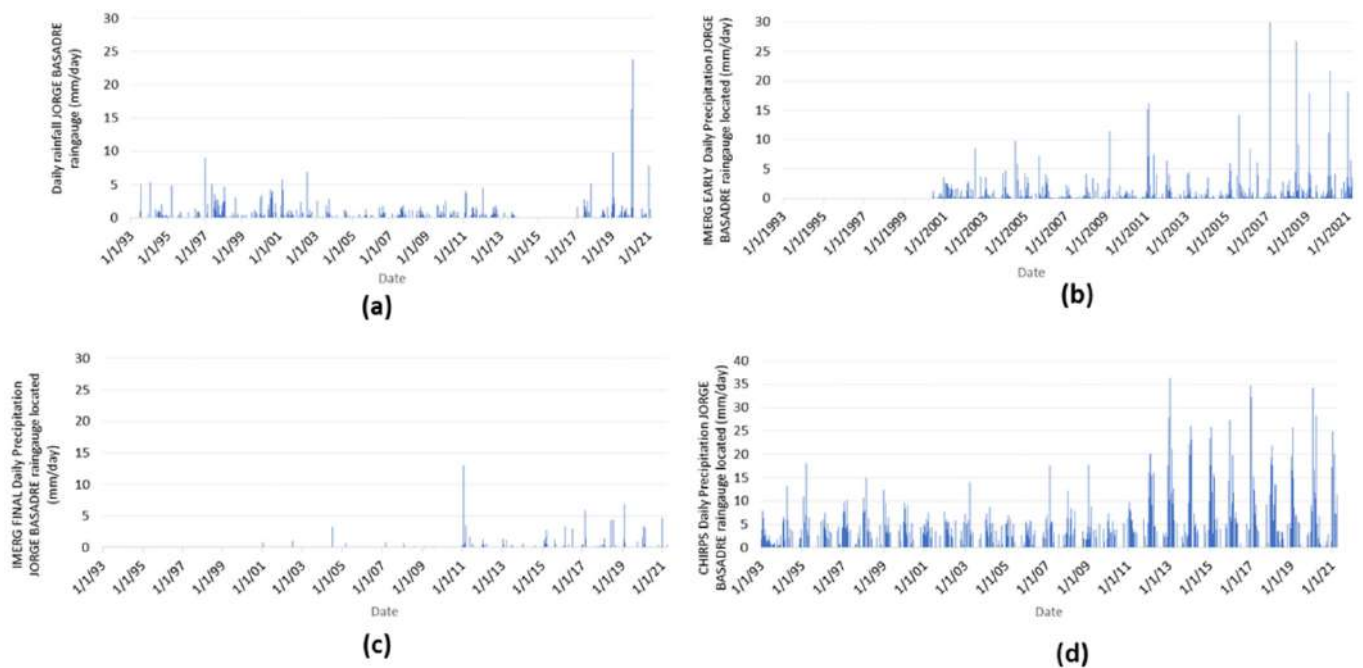


Figure 8. Comparison between (a) daily rainfall in JORGE BASADRE rain gauge and daily precipitation from satellite products: (b) IMERG Early, (c) IMERG Final, and (d) CHIRPS.

Although the information from the satellite products used does not have a good correlation with the data observed from the JORGE BASADRE rain gauge, a spatial correlation between them can be determined to establish indicators of spatial variation. The spatial correlation was carried out between the three established rain gauges: JORGE BASADRE rain gauge, Virtual Rain Gauge 01 (lower part of the Creek), and Virtual Rain Gauge 2 (upper part of the creek).

Figure 9 shows the results of the correlations made concerning the JORGE BASADRE rain gauge and the virtual rain gauges EV01 and EV02. With the IMERG Early product, the results obtained were that the precipitation in the EV01 area was 40% lower than the precipitation in the JORGE BASADRE rain gauge, whereas the EV02 rain gauge area had 41% less precipitation than the JORGE BASADRE rain gauge area. Similarly, with the IMERG Final product, the results obtained were that the precipitation in the EV01 area was

33% lower than the precipitation in the JORGE BASADRE rain gauge, whereas the EV02 rain gauge area had 71% less precipitation than the zone of JORGE BASADRE rain gauge.

Concerning the CHIRPS product, the precipitation in the EV01 and EV02 zones was lower by 27% and 45%, respectively, in comparison to the JORGE BASADRE rain gauge. In summary, the previous results corroborate that the amount of precipitation in the Devil’s Creek was less than the amount of precipitation in the city of Tacna, during the period of common observation between them.

Table 4 shows a summary table of the linear regression coefficients obtained in the comparison of the data series. It is observed that the area of the EV01 virtual rain gauge, on average, would have 31% less precipitation than the JORGE BASADRE rain gauge, whereas the area of the EV02 virtual rain gauge would have 51.7% less precipitation than the JORGE BASADRE rain gauge.

Table 4. Summary of the regression coefficients and percentage between the JORGE BASADRE rain gauge and the virtual rain gauge (EV01 and EV02).

Virtual Rain Gauge	PISCO JB Rain Gauge	IMERG Early JB Rain Gauge	IMERG Final JB Rain Gauge	CHIRPS JB Rain Gauge	Mean	EV01 and EV02 Have Less Precipitation than JORGE BASADRE Rain Gauge (%)
EV01	0.76	0.60	0.67	0.73	0.69	100% – 69% = 31.0%
EV02	0.51	0.59	0.29	0.54	0.483	100% – 48.3% = 51.7%

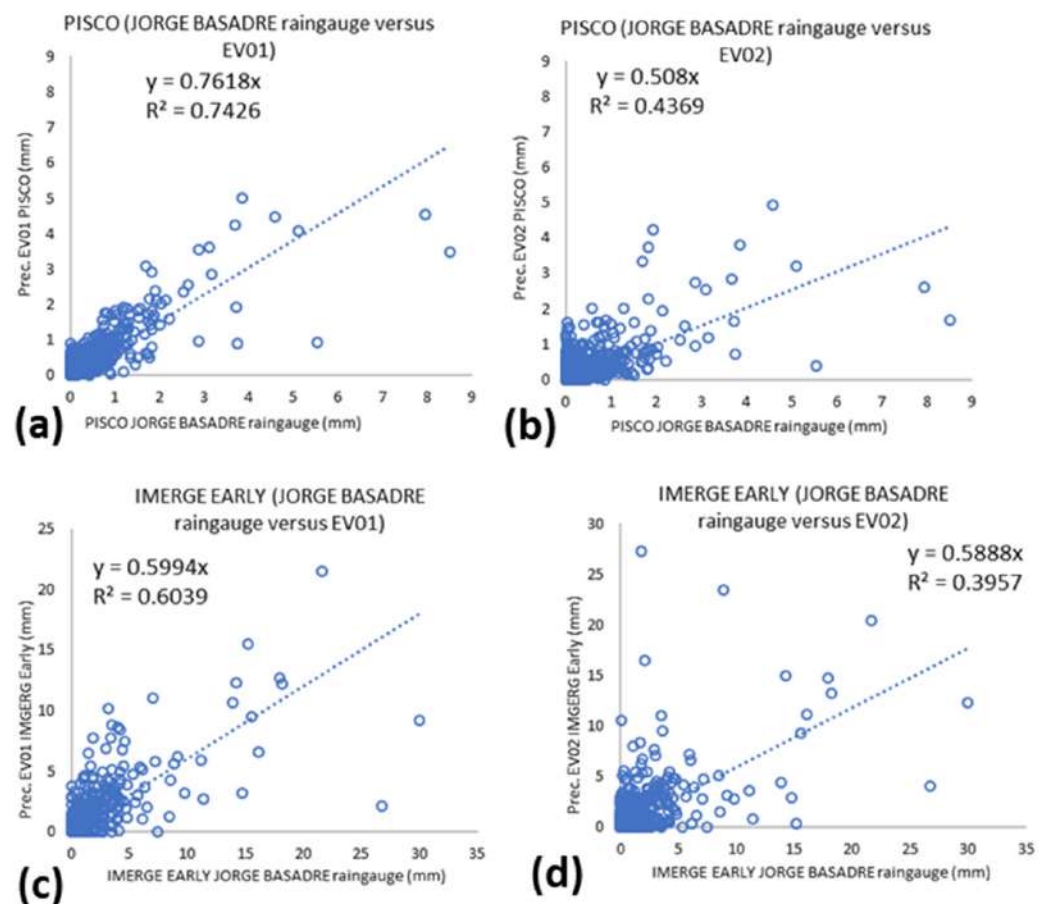


Figure 9. Cont.

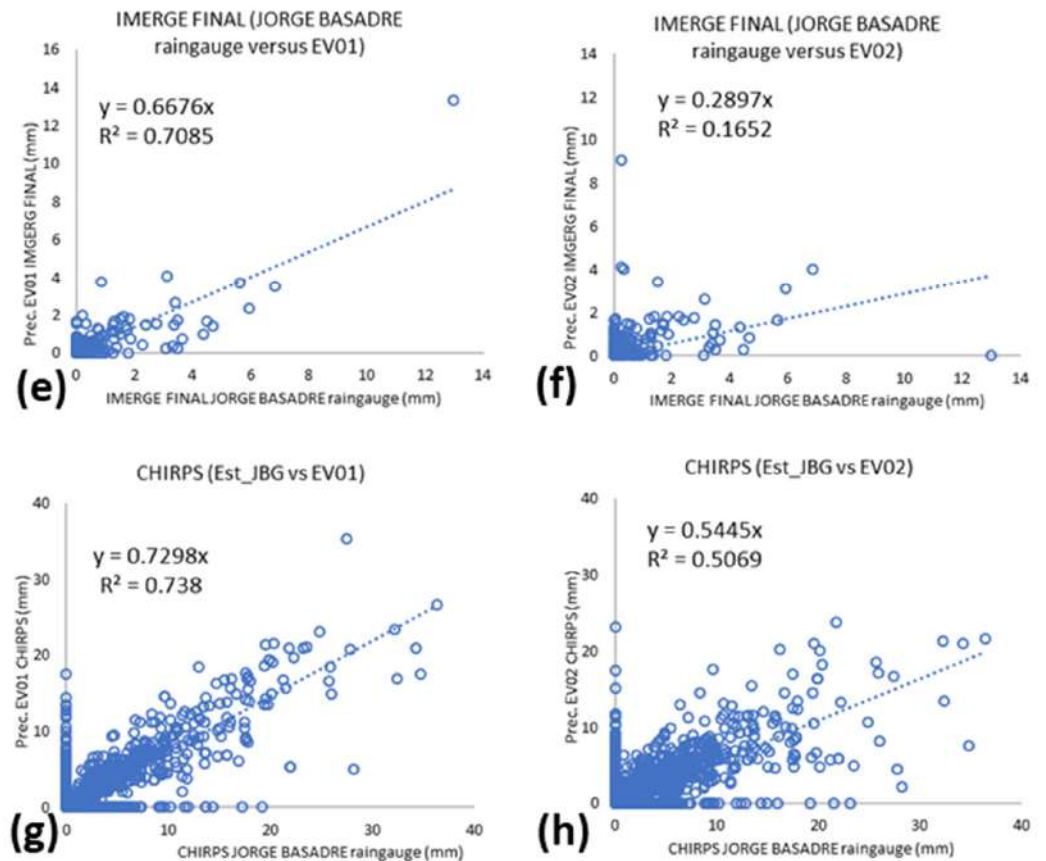


Figure 9. Correlations were made between the total daily precipitation data between the JORGE BASADRE rain gauge and the virtual rain gauges, (EV01 and EV02) using the products: (a,b) PISCO, (c,d) IMERGE Early, (e,f) IMERGE Final, and (g,h) CHIRPS.

2.5.3. Types of Soils and Infiltration Capacity in the Devil's Creek

Characterization of the soil type was carried out through field samplings conducted on 22 July 2020. Figure 10 shows the places where three soil samplings and the corresponding infiltration tests were carried out. The information on the infiltration tests is presented in Table 5.

Table 5. Location of sampling points, texture, infiltration equation, and hydraulic conductivity at saturation (Ks).

Sampling	UTM Coordinates	Texture	Infiltration Equation F (mm), t (min)	Ks (mm/min)
1	368477E, 8019016N	Clayey silt	$F = 4.0 t^{0.81}$	0.872
2	368477E, 8019035N	Sandy silt with gravel and clay	$F = 3.67 t^{0.87}$	1311
3	368328E, 8018959N	Sandy silt with gravels	$F = 7.2 t^{0.72}$	0.749

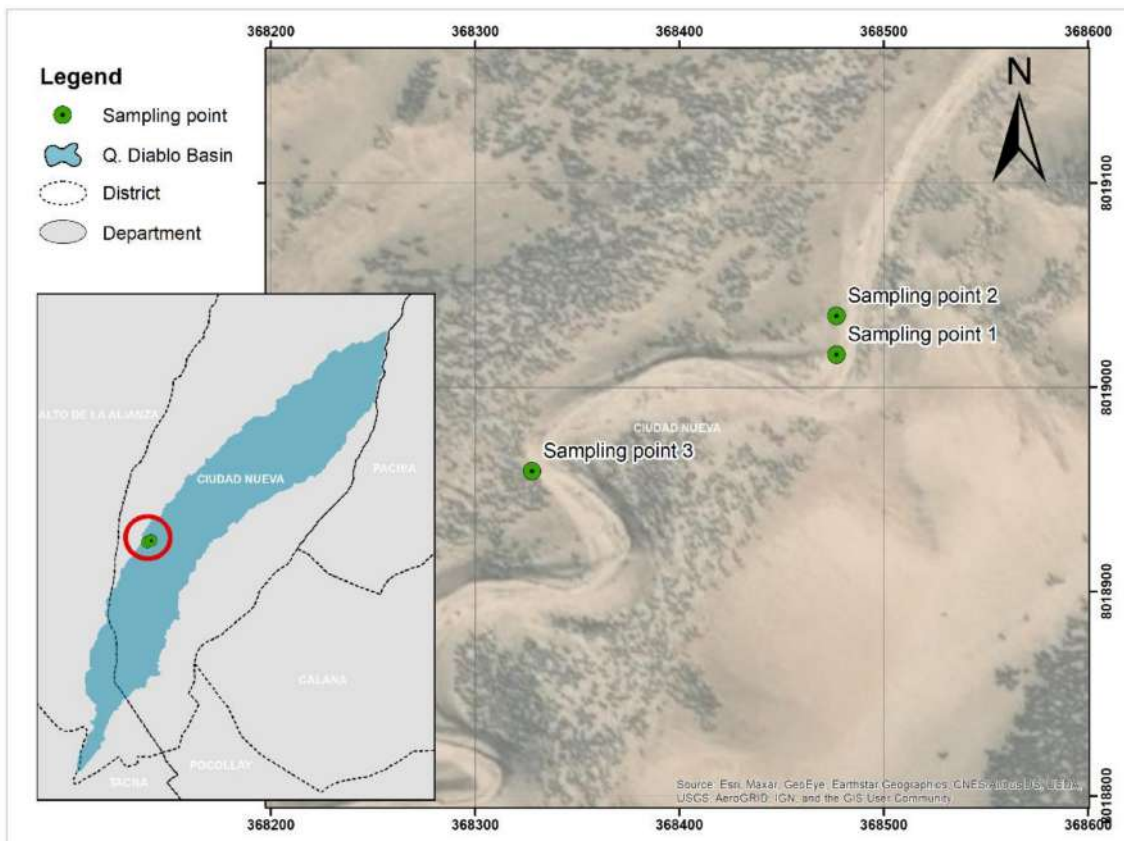


Figure 10. Location of soil sampling points.

2.5.4. Hydrological Model of the Devil's Creek

Hydrological modeling of the maximum flow produced in the Devil's Creek was carried out using the RS MINERVE program.

The RS MINERVE program is open access and widely used in Peru and national institutions such as the National Water Authority (ANA, by its abbreviation in Spanish) and the Potable Water and Sewerage Service of Lima (SENAMHI, by its abbreviation in Spanish) [42].

The RS MINERVE program is a flow simulation program which allows the modeling of complex hydraulic and hydrological networks following a semi-distributed approach. The program is capable of representing not only the main hydrological processes such as snow and glacier melting, surface and sub-surface runoff, but also regulatory infrastructure such as retention dams, spillways, water intakes, turbines, and pumps, among others.

RS MINERVE integrates different hydrological precipitation-runoff models such as GSM, SOCONT, SAC-SMA, GR4J, and HBV. Likewise, it allows the inclusion of hydraulic structures through different models (reservoirs, turbines, spillways, etc.) [43].

The model used for the hydrological modeling of the Devil's Creek was the SOCONT (Soil CONTRibution model). The SOCONT and GR4J models are more sensitive in extreme event modeling than the HBV and SAC models [44]. As shown in Figure 11, the SOCONT model procedure consists of the Snow-SD model simulating the evolution of the glacial layer (melting and accumulation) as a function of temperature (T) and precipitation (P), and calculating the equivalent precipitation (Peq). In the case of Devil's Creek, and because it is not a glacial stream, the equivalent precipitation constituted the precipitation. This equivalent precipitation was used as input to the GR3 model that takes into account the potential evapotranspiration (ETP) and generates the net intensity of rainfall for the SWMM model.

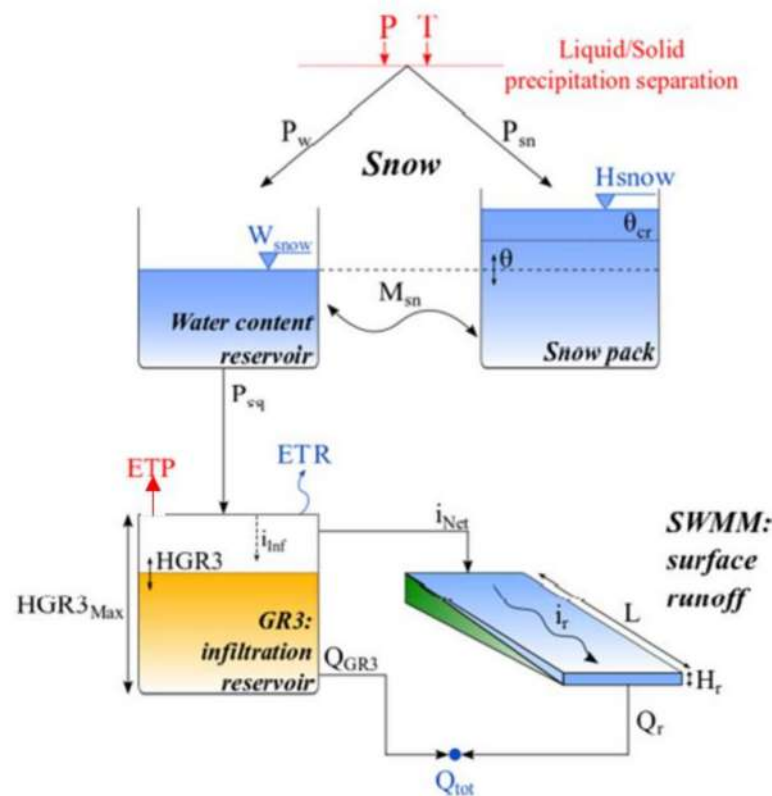


Figure 11. Composition of the SOCONT model.

The flow components of the SOCONT model are explained below:

- P: precipitation (L/T);
- T: Temperature ($^{\circ}\text{C}$);
- P_w : Liquid precipitation (L/T);
- P_{sn} : Solid precipitation (L/T);
- P_{eq} : Equivalent precipitation (L/T) equal P_w (L/T), because there is no glacial area in the basin;
- i_{inf} : Infiltration intensity (L/T)
 - $i_{inf} = P_{eq} (1 - (H_{GR3}/H_{GR3Max})^2)$, If $H_{GR3} \leq H_{GR3Max}$, where H_{GR3} (L) is the actual capacity of infiltration reservoir (L), and H_{GR3Max} (L) is the maximum capacity of the infiltration reservoir.
 - $i_{inf} = 0$, if $H_{GR3} > H_{GR3Max}$;
- ETR: Real evapotranspiration (L/T)
 - $ETR = ETP \sqrt{H_{GR3}/H_{GR3Max}}$, If $H_{GR3} \leq H_{GR3Max}$
 - $ETR = ETP$, If $H_{GR3} > H_{GR3Max}$;
- i_{Net} : Net intensity (L/T), $i_{Net} = P_{eq} - i_{inf}$;
- Q_{GR3} : Base discharge (L^3/T)
 - $Q_{GR3} = K_{GR3} \cdot H_{GR3} \cdot A$, If $H_{GR3} \leq H_{GR3Max}$, where K_{GR3} is the release coefficient of the infiltration reservoir (1/T) and A is the surface (L^2).
 - $Q_{GR3} = K_{GR3} \cdot H_{GR3Max} \cdot A$, if $H_{GR3} > H_{GR3Max}$;
- I_r : Runoff intensity (L/T), $I_r = K_r \sqrt{J_0} H_r^{5/3} \cdot 1/L$, where K_r is the Strickler coefficient ($\text{L}^{1/3}/\text{T}$), J_0 is the average slope of the plane, H_r is the runoff water level downstream of the surface (L), and L is the length of the plane (L);
- Q_r : Surface runoff (L^3/T), $Q_r = I_r \cdot A$;
- Q_{tot} : Total runoff (L^3/T), $Q_{tot} = Q_{GR3} + Q_r$.

According to Table 6, the total number of parameters necessary for hydrological modeling is 16, of which 7 parameters are typical of the SOCONT model and also take into account 4 initial conditions.

Table 6. SOCONT model parameters and plugins [45].

Object	Name	Units	Description	Regular Range
SOCONT	A	m ²	Surface	>0
	S	mm/°C/d	Reference degree-day snowmelt coefficient	0.5 to 20
	SInt	mm/°C/d	Degree-day snowmelt coefficient	0 to 4
	Smin	mm/°C/d	Minimal degree-day snowmelt coefficient	≥0
	SPh	d	Phase shift of the sinusoidal function	1 to 365
	ThetaCri	-	Critical relative water content of the snow pack	0.1
	bp	d/mm	Melt coefficient due to liquid precipitation	0.0125
	Tcp1	°C	Minimum critical temperature for liquid precipitation	0
	Tcp2	°C	Maximum critical temperature for solid precipitation	4
	Tcf	°C	Critical snowmelt temperature	0
	HGR3Max	m	Maximum height of infiltration reservoir	0 to 2
	KGR3	1/s	Release coefficient of infiltration reservoir	0.00025 to 0.1
	L	m	Length of the plane	>0
	J0	-	Runoff slope	>0
	Kr	m ^{1/3} /s	Strickler coefficient	0.1 to 90
	CFR	-	Refreezing coefficient	0 to 1
SWEIni	m	Initial snow water equivalent height	-	
HGR3Ini	m	Initial level in infiltration reservoir	-	
HrIni	m	Initial runoff water level downstream of the surface	-	
ThetaIni	-	Initial relative water content in the snow pack	-	

3. Results

3.1. Projected Maximum Annual Precipitation

3.1.1. Period 2021–2050

- RCP4.5 scenario

The maximum annual precipitation projected for the period 2021–2050 under the RCP4.5 emission scenario in the Devil’s Creek is presented in Figure 12. The results show a variation range from 0.79 mm to 283 mm with an average of 5.64 mm and a standard deviation of 12.65 mm. The maximum value was projected by the model MPI_ESM_LR (the coupled Max Planck Institute Earth System Model). Likewise, the models bcc_csm1_1, CanESM2, CCSM4, GFDL_ESM2G, GFDL_ESM2M, MPI_ESM_LR projected maximum annual precipitation in a range of 27 mm to 283 mm. The bcc_csm1_1 and GFDL_ESM2M models predicted around 46 mm by 2034.

On the other hand, given the uncertainty in the projections, an arithmetic average of all models has been estimated, as well as an ensemble (dashed blue line) which has been calculated, assigning a greater weight to the model that has better performance concerning the maximum annual rainfall observed (see Equation (2)). The Access1-0 model was discarded from the analysis of maximum annual precipitation because it projected high values greater than 500 mm. The results of the assembly of the models indicate variation in the annual maximum daily precipitation from 2.77 mm to 24.70 mm, with an average of 5.70 mm for the period 2021–2050. The range of uncertainty in the predictions is shown in Figure 13, in which the linear extensions represent the highest and lowest values; the upper, central, and lower limits of the box represent the percentiles of 75%, 50%, and 25%, respectively; and the solid circles represent the outliers, which correspond to the maximum values predicted by each model.

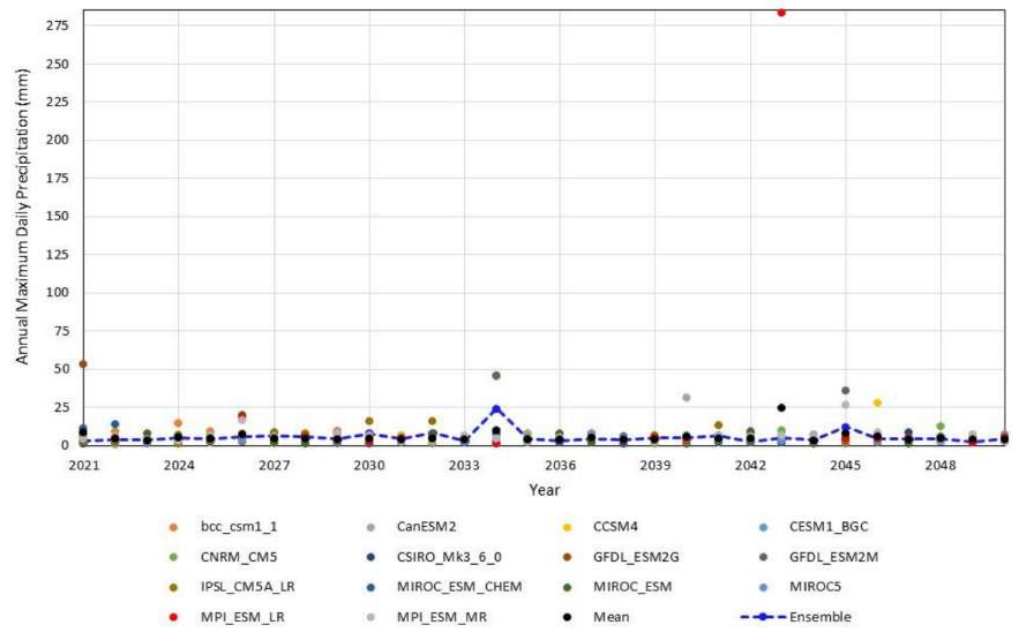


Figure 12. Annual maximum daily precipitation projected by 14 climate models under the RCP4.5 scenario for the Devil’s Creek. The dashed blue line corresponds to the ensemble. Period: 2021–2050.

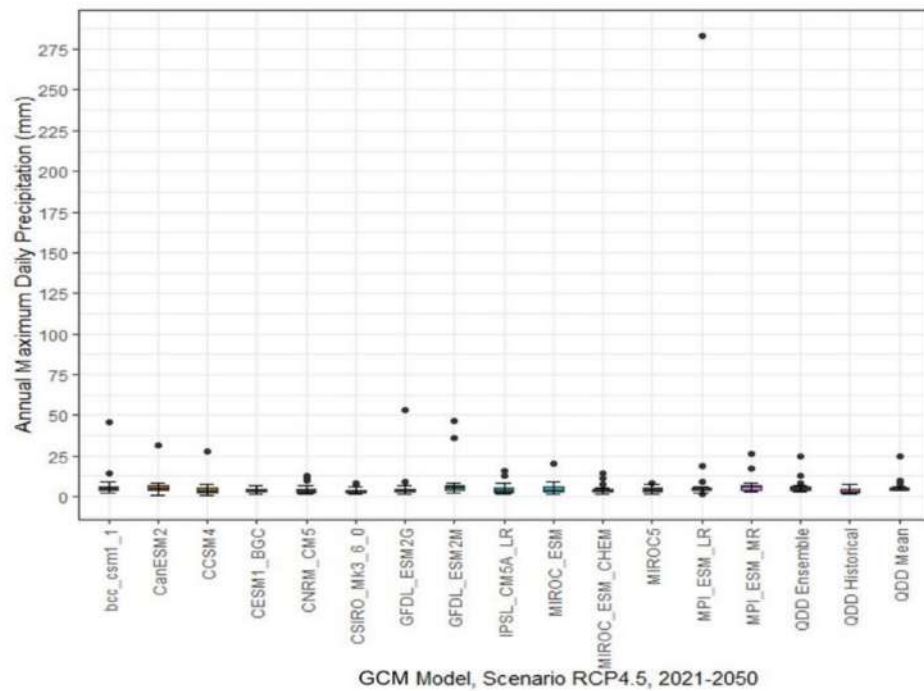


Figure 13. Boxplot for future projections of the annual maximum daily precipitation of 14 GCMs under the RCP4.5 scenario in the Devil’s Creek, period 2021–2050. The linear extensions represent the highest and lowest values; the upper, middle and lower limits of the box represent the percentiles of 75%, 50%, and 25%, respectively; and the solid circles represent the outliers.

- RCP8.5 Scenario

The annual maximum daily precipitation projected for the 2021–2050 term under the RCP8.5 emission scenario in the Devil’s Creek is shown in Figure 14. A varied range of 1.70 mm to 75.7 mm is evidenced with an average of 5.24 mm and a standard deviation of 3.29 mm for all models, indicating a low dispersion concerning the mean. The maximum

value was projected by the GFDL_ESM2M (Fluid Dynamics Laboratory (GFDL) GFDL-ESM2M model).

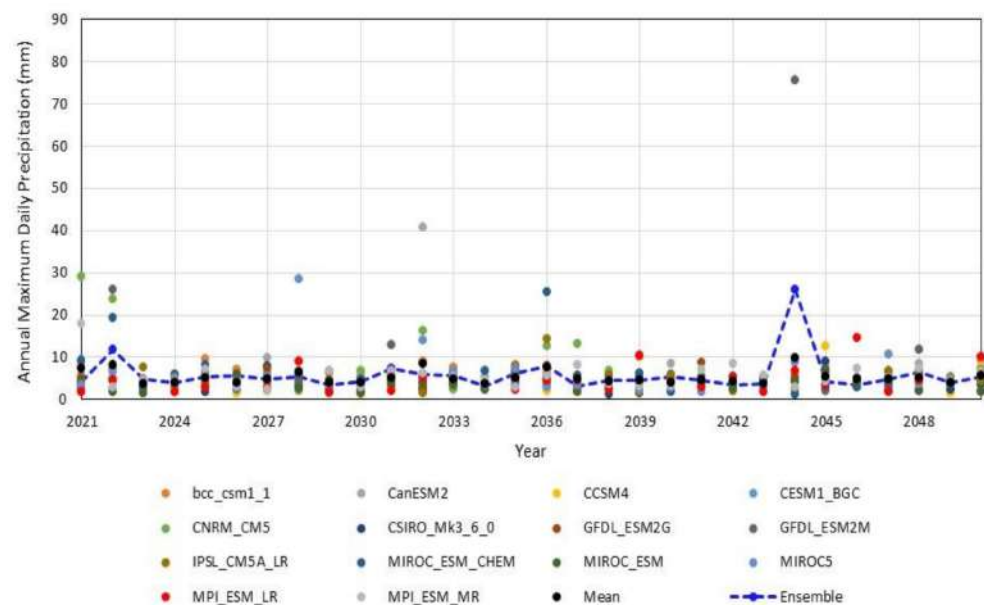


Figure 14. Annual maximum daily precipitation projected by 14 climate models under the RCP8.5 scenario for the Devil’s Creek. The dashed blue line corresponds to the ensemble. Period: 2021–2050.

Likewise, the CanESM2, CNRM_CM5, GFDL_ESM2M, MIROC_ESM_CHEM, MIROC5 models projected the highest annual maximum precipitation values in a range of 25.5 mm to 75.7 mm, indicating that, in this period of analysis, heavy precipitation could occur in the Devil’s Creek.

On the other hand, the results of the model ensemble indicate a variation in the maximum annual precipitation from 3.14 mm to 25.96 mm, with an average of 5.80 mm for the 2021–2050 term under the RCP8.5 scenario.

The range of uncertainty in the predictions is shown in Figure 15. Similarly, the linear extensions represent the highest and lowest values; the upper, central, and lower limits of the box represent the percentiles of 75%, 50%, and 25%, respectively; and the solid circles represent the outliers, which correspond to the maximum values predicted by each model.

3.1.2. Period 2051–2080

- RCP4.5 Scenario

The maximum annual precipitation projected for the period 2051–2080 under the RCP4.5 emission scenario in the Devil’s Creek is shown in Figure 16. The results indicate a variation range from 0.86 mm to 95.46 mm with an average of 5.55 mm and a standard deviation of 5.20 mm for all models, indicating a low dispersion concerning the mean. The maximum value was projected by the CCSM4 model (The Community Climate System Model Version 4). Likewise, of the 14 models evaluated, 7 of them CCSM4, CNRM_CM5, GFDL_ESM2M, IPSL_CM5A_LR, MIROC_ESM_CHEM, MIROC5, MPI_ESM_LR projected the highest annual maximum precipitation values in a range of 21 mm to 96 mm, indicating that heavy precipitation could occur in the Devil’s Creek during the analysis period under this emission scenario.

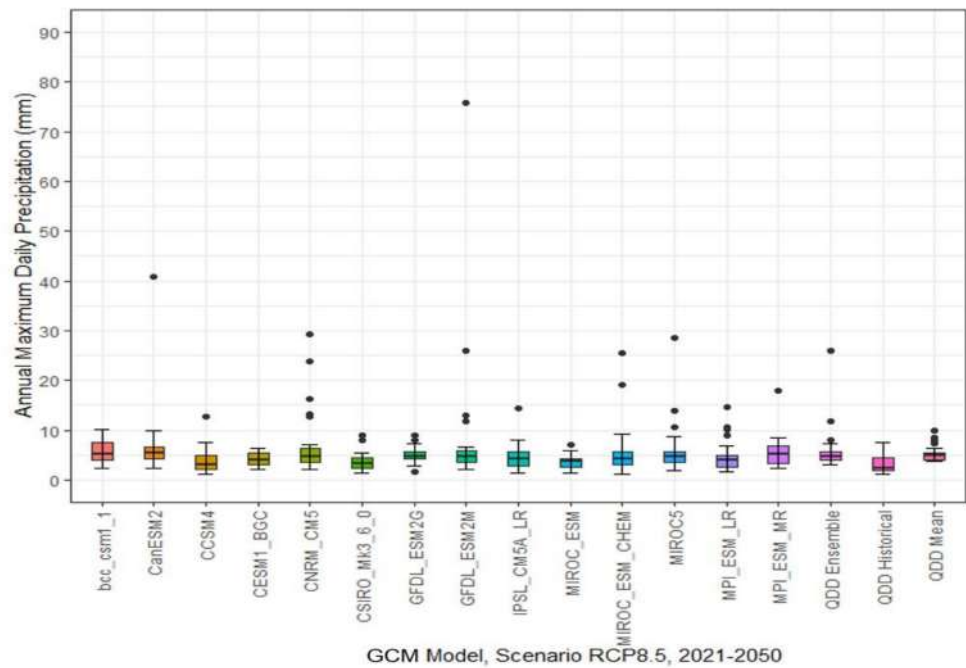


Figure 15. Boxplot for future projections of the annual maximum daily precipitation of 14 GCMs under the RCP8.5 scenario in the Devil’s Creek, period 2021–2050. The linear extensions represent the highest and lowest values; the upper, middle and lower limits of the box represent the percentiles of 75%, 50%, and 25%, respectively; and the solid circles represent the outliers.

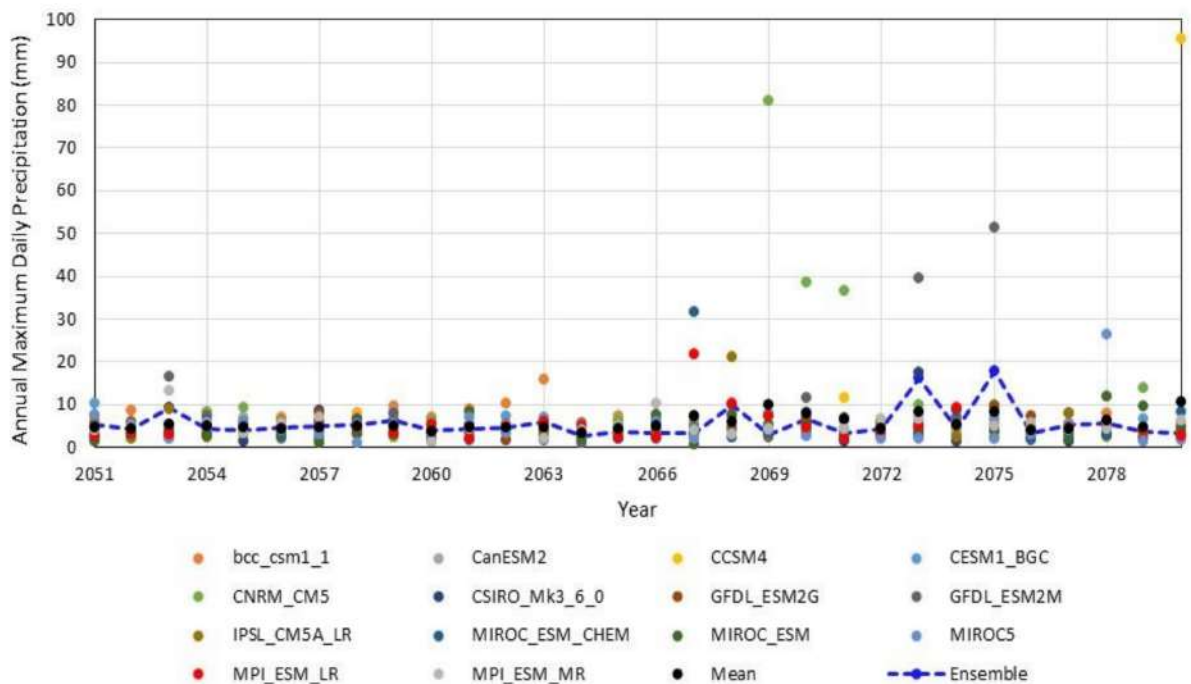


Figure 16. Annual maximum daily precipitation projected by 14 climate models under the RCP4.5 scenario for Devil’s Creek. The dashed blue line corresponds to the ensemble. Period: 2051–2080.

On the other hand, the results of the model ensemble indicate a variation in the maximum annual precipitation from 2.77 mm to 17.86 mm, with an average of 5.60 mm for the 2051–2080 term under the RCP4.5 scenario. The range of uncertainty in the predictions is presented in Figure 17.

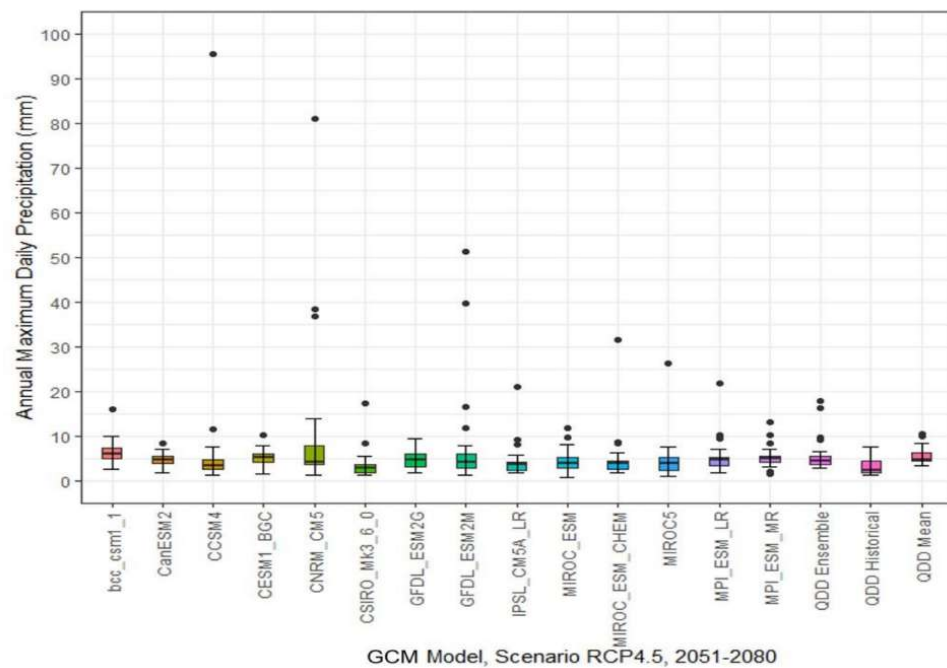


Figure 17. Boxplot for future projections of the annual maximum daily precipitation of 14 GCMs under the RCP4.5 scenario in the Devil’s Creek, period 2051–2080. The linear extensions represent the highest and lowest values; the upper, middle and lower limits of the box represent the percentiles of 75%, 50%, and 25%, respectively; and the solid circles represent the outliers.

- RCP8.5 Scenario

The maximum annual precipitation projected for the period 2051–2080 under the RCP8.5 emission scenario in the Devil’s Creek is shown in Figure 18. The results indicate a variation range from 0.62 mm to 224.65 mm with an average of 6.0 mm and a standard deviation of 10.50 mm for all models, indicating a high dispersion concerning the mean. The maximum value is projected by the bcc_csm1_1 (the Beijing Climate Center Climate System Model). Likewise, of the 14 models evaluated, 6 of them bcc_csm1_1, CanESM2, CNRM_CM5, GFDL_ESM2G, IPSL_CM5A_LR, MIROC5 projected the highest annual maximum precipitation values in a range from 19.28 mm to 224.65 mm, indicating that heavy rainfall could occur in the stream of the river. Diablo during the analysis period under this broadcast scenario.

On the other hand, the results of the model ensemble indicate a variation in the maximum annual precipitation from 2.92 mm to 49.74 mm, with an average of 7.21 mm for the 2051–2080 term under the RCP8.5 scenario. The range of uncertainty in the predictions is presented in Figure 19. Similarly, the linear extensions represent the highest and lowest values; the upper, middle, and lower limits of the box represent the percentiles of 75%, 50%, and 25%, respectively.

On the other hand, a relative change has been calculated in relation to the historical average for the period 1981–2005, simulated by the corrected and scaled GCM for the Devil’s Creek. Under the RCP4.5 scenario, the annual maximum daily precipitation could increase by 32.44%, on average; with a range from −35.80% to +470.77%. Under the RCP8.5 scenario, the maximum annual precipitation will probably increase by 34.64%, on average, during the 2021–2050 term. Values range from −27.24% to 502.37%. Positive and negative values indicate a probable increase and decrease in the annual maximum daily precipitation, respectively. For the 2021–2050 period, under the RCP4.5 scenario, the maximum annual precipitation could increase by 29.79%, on average; the range is from −35.66% to +314.45%. On the other hand, under the RCP8.5 scenario, the maximum annual precipitation could increase by 67.23%, on average. For this scenario, the values range from

–32.24% to 1053.97%. The maximum percentage value corresponds to a positive anomaly of 45.43 mm concerning the historical average simulated by the GCM.

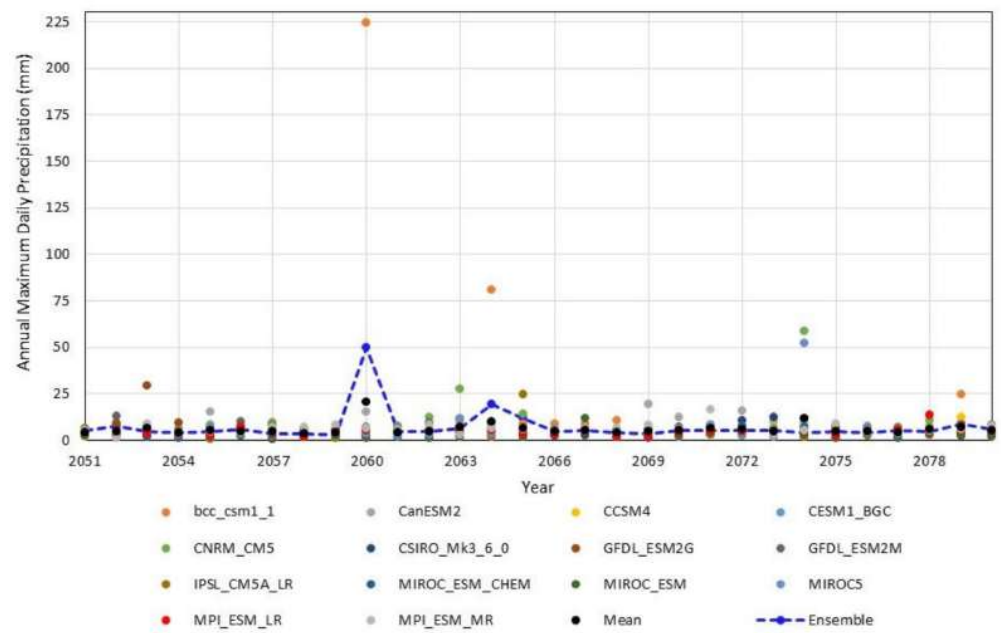


Figure 18. Annual maximum daily precipitation projected by 14 climate models under the RCP8.5 scenario for the Devil’s Creek. The dashed blue line corresponds to the ensemble. Period: 2051–2080.

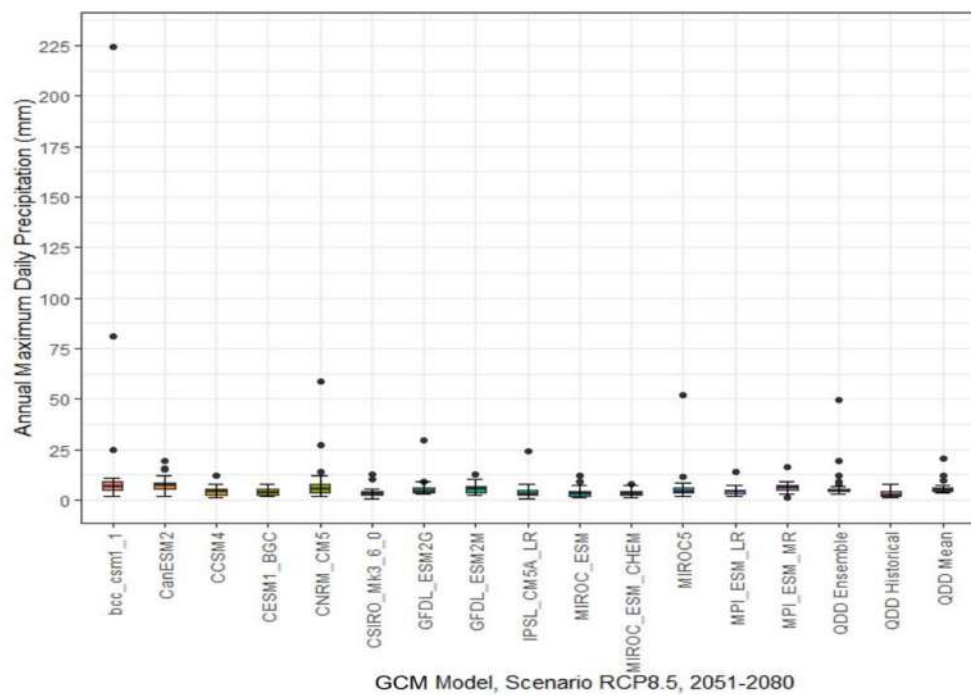


Figure 19. Boxplot for future projections of the annual maximum daily precipitation of 14 GCMs under the RCP8.5 scenario in the Devil’s Creek, 2051–2080 term. The linear extensions represent the highest and lowest values; the upper, middle, and lower limits of the box represent the percentiles of 75%, 50%, and 25%, respectively; and the solid circles represent the outliers.

3.2. Projected Temperature

3.2.1. Annual Average Temperature

The temperature under climate change is another important variable that needs to be evaluated and projected to determine the potential impact on the hydrological response of the basin under study. Figures 20 and 21 present the minimum average annual temperature simulated by regional climate models, after bias correction and scaling for the study area, under RCP4.5 and RCP8.5 scenarios, for the 1981–2100 term. The black line corresponds to the averaged time series of all models evaluated. Similarly, as evidenced by other researchers, climate models agree in projecting a positive trend in temperature. However, from 2050 onwards, greater variability and a decrease in the trend are observed under the RCP4.5 scenario. On the other hand, as expected, the RCP8.5 high-emissions scenario projected the highest values. In both scenarios, the MIRO-ESM-CHEM model projects the highest minimum temperature values. Figures 22 and 23 show the average annual maximum temperature projected by the regional climate models for the study area, under the RCP4.5 and RCP8.5 scenarios, 1981–2100 term. Similarly, the black line corresponds to the averaged time series of all the evaluated models and for both scenarios, the MIRO-ESM-CHEM model projects the highest values of maximum temperature.

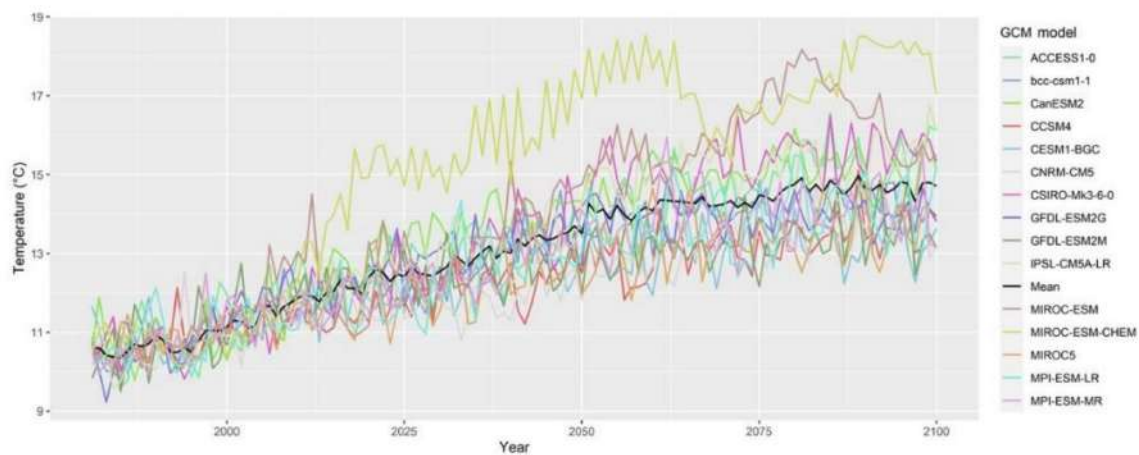


Figure 20. Minimum annual average temperature simulated by climate models, corrected and scaled for the Devil’s Creek, 1981–2100 term, RCP4.5 emission scenario. The black line represents the averaged ensemble of 15 GCMs.

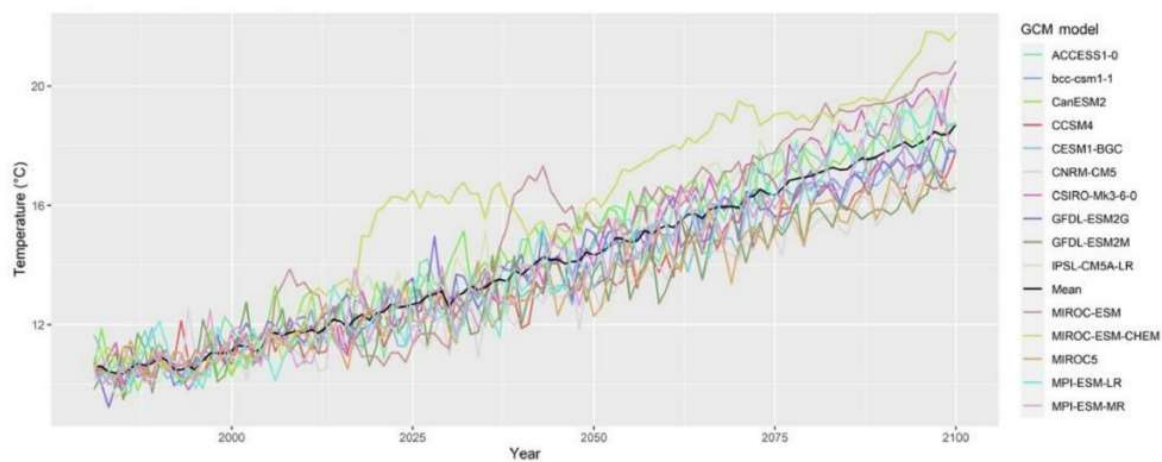


Figure 21. Minimum annual average temperature simulated by climate models, corrected and scaled for the Devil’s Creek, 1981–2100 term, RCP8.5 emission scenario. The black line represents the averaged ensemble of the 15 GCMs.

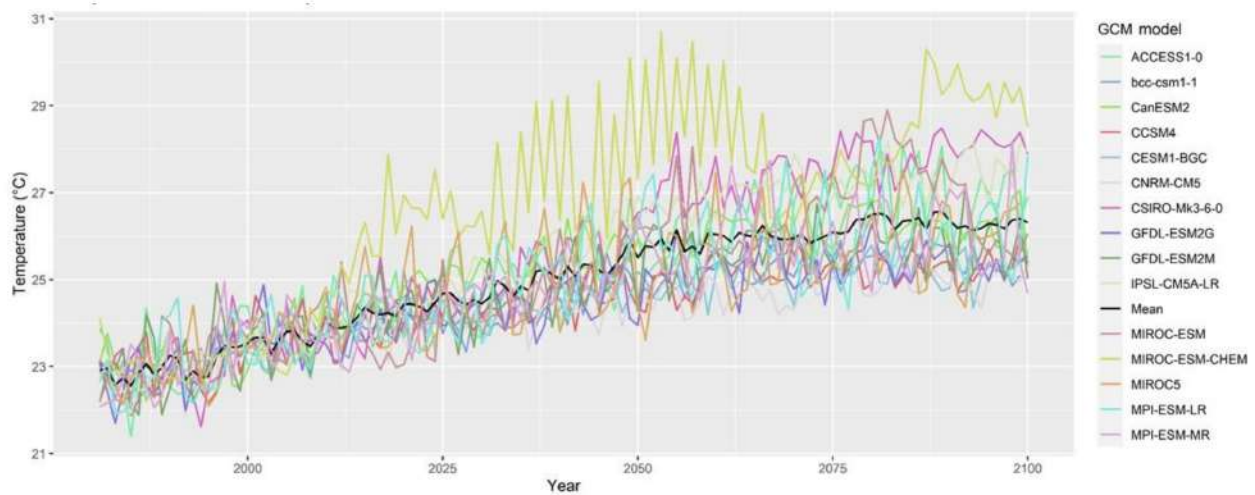


Figure 22. Maximum annual average temperature simulated by climate models, corrected and scaled for the Devil's Creek, 1981–2100 term, RCP4.5 emission scenario. The black line represents the averaged ensemble of 15 GCMs.

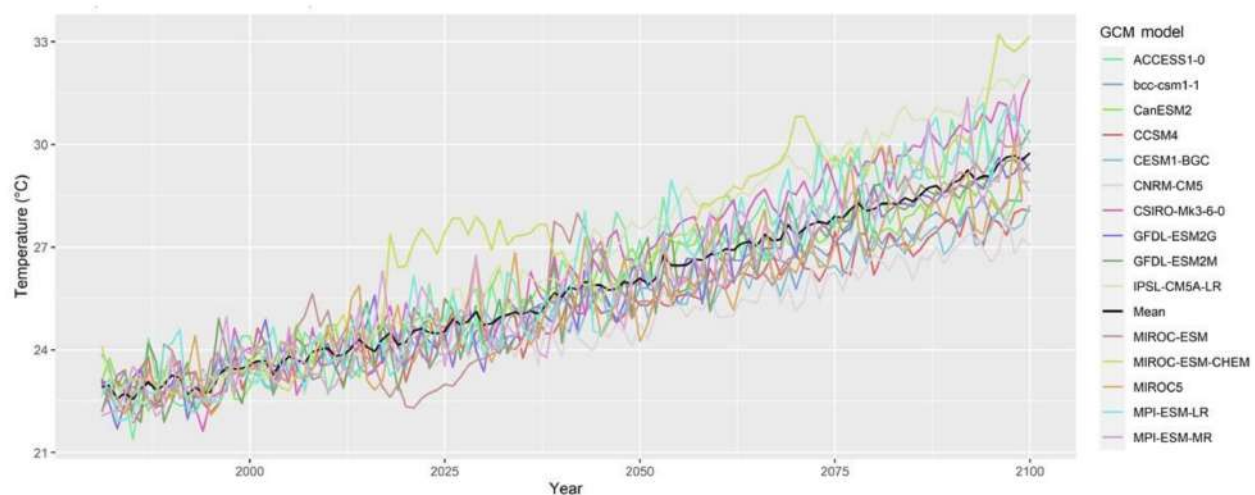


Figure 23. Maximum annual average temperature simulated by regional climate models, corrected and scaled for the Devil's Creek, 1981–2100 term, RCP8.5 emission scenario. The black line represents the averaged ensemble of 15 GCMs.

3.2.2. Average Monthly Temperature

Figure 24 presents the minimum monthly average temperature under the RCP4.5 and RCP8.5 scenarios for the Devil's Creek, 2021–2050 and 2051–2080 periods for the average multi-model ensemble of 15 regional climate models. Likewise, the historical period of 1981–2005 simulated by the GCM is observed. Monthly increases of 2.13 °C and 3.45 °C on average are projected for the minimum temperature under the RCP4.5 scenario, and of 2.62 °C and 4.90 °C under the RCP8.5 scenario, for the 2021–2050 and 2051–2080 terms, respectively. All of them corresponded with the 1981–2005 term. Likewise, the months of May, June, July, and August, as well as the period from January to March, project the largest increases in the minimum temperature for both scenarios. Figure 25 presents the maximum monthly average temperatures for the RCP4.5 and RCP8.5 scenarios. The results indicate an increase in the monthly average maximum temperature of 1.79 and 2.85 °C under the RCP4.5 scenario for the 2021–2050 and 2051–2080 terms, both relative to the 1985–2005 term. On the other hand, under the RCP8.5 scenario, the average increase is 2.12 °C and 4.06 °C for the periods previously described. For both scenarios, June, July, and August show the

largest increases, meaning that there will probably be greater warming during winter in the coming decades. Likewise, the minimum temperatures tend to increase slightly in relation to the maximum temperatures.

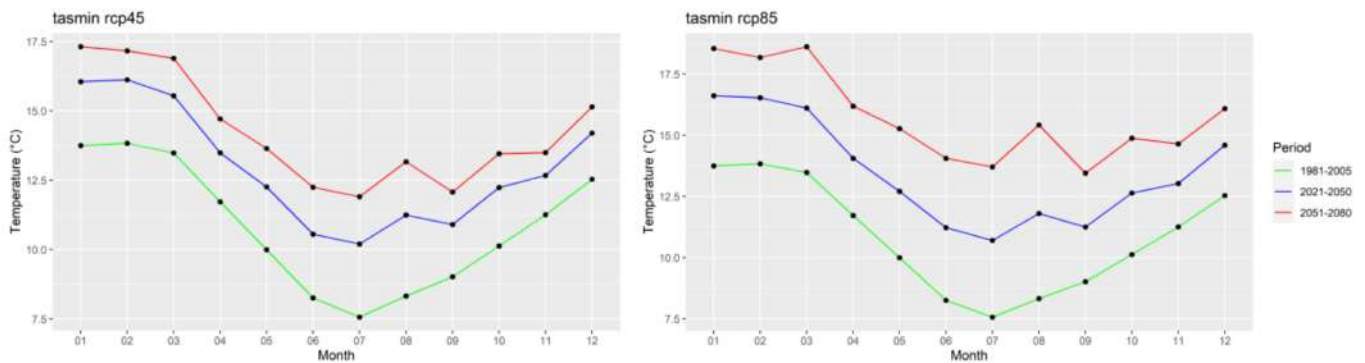


Figure 24. Average monthly temperature (minimum) under RCP4.5 and RCP8.5 scenarios for the Devil's Creek, 2021–2050 and 2051–2080 periods. The multi-model ensemble average of 15 GCMs.

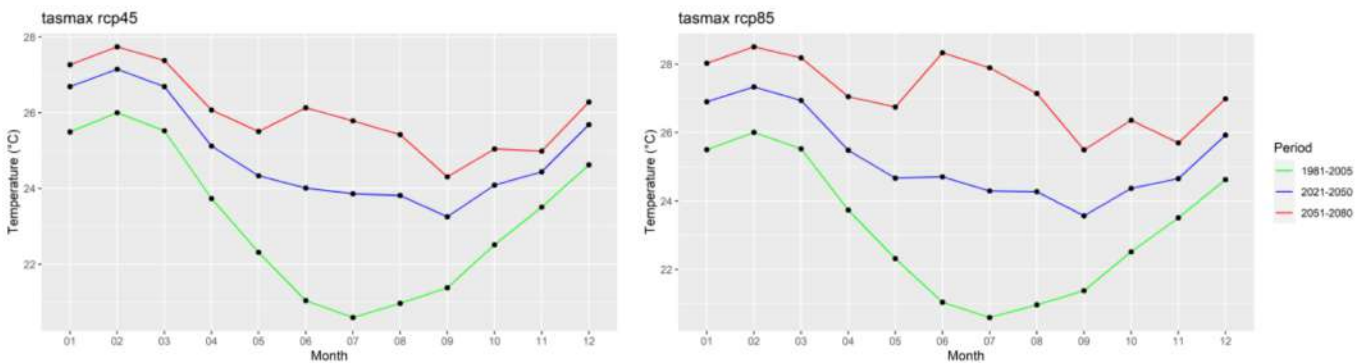


Figure 25. Average monthly temperature (maximum) under RCP4.5 and RCP8.5 scenarios for the Devil's Creek, 2021–2050 and 2051–2080 periods. The multi-model ensemble average of 15 GCMs.

3.2.3. Monthly Changes

In this study, we have provided average temperature changes for two periods: 2020–2050 and 2051–2080, relative to the period 1981–2005. Figure 26 shows the monthly average temperature changes (minimum) under RCP4.5 and RCP8.5 scenarios for the Devil's Creek, for the multi-model average ensemble of 15 GCMs corrected and downscaled. For both scenarios and the two study periods, changes are positives; consequently, minimum temperature would increase in the next decades under climate change. Under the RCP4.5 scenario, the largest positive changes are projected in July and August: 2.7 °C on average for the period 2021–2050. Additionally, this is a change of 4.4 °C, on average, for winter (JJA) during the period 2051–2080. The lowest minimum temperature changes are projected for spring (SON) with 1.8 °C and 2.9 °C for both periods, respectively. On the other hand, under the RCP8.5 scenario, the highest values of increase in the minimum temperature are projected for winter (JJA), more than 3.2 °C and 6.3 °C for both periods.

Figure 27 shows the monthly average temperature change (maximum) under the RCP4.5 and RCP8.5 scenarios. Under the RCP4.5 scenario, it is evident that the greatest positive change in the maximum temperature would occur in winter (JJA), more than 3.0 °C and 4.9 °C for both periods. Similarly, for the RCP8.5 high-emissions scenario, in winter, the highest increases are projected, ranging from 3.5 to 6.9 °C, on average, for the periods 2021–2050 and 2051–2080, respectively.

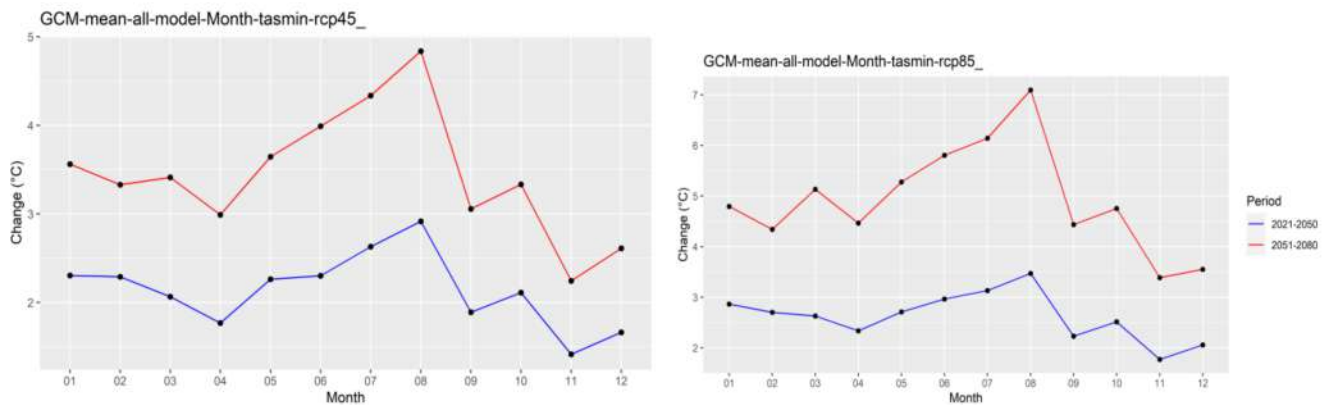


Figure 26. Average monthly temperature change (minimum) under RCP4.5 and RCP8.5 scenarios for the Devil's Creek, 2021–2050 and 2051–2080 periods. The multi-model ensemble average of 15 GCMs.

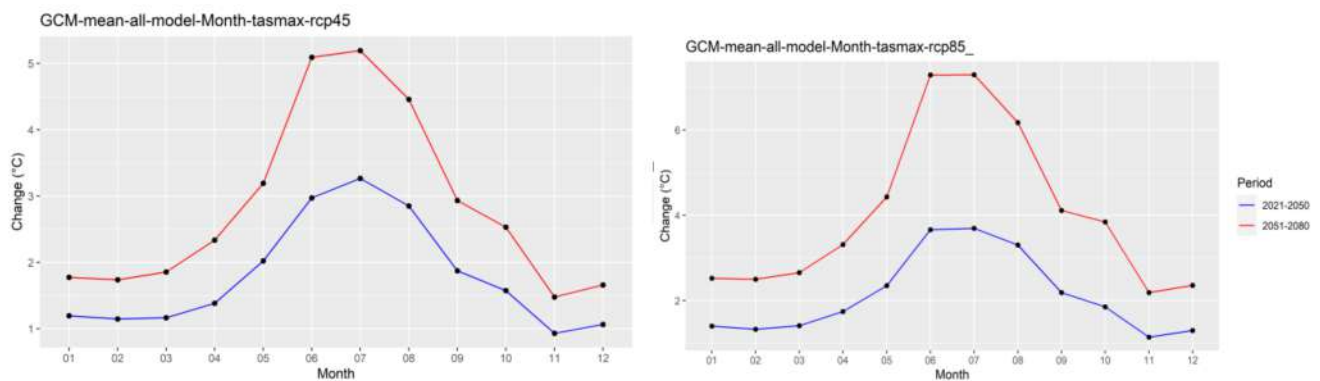


Figure 27. Average monthly temperature change (maximum) under RCP4.5 and RCP8.5 scenarios for the Devil's Creek, 2021–2050 and 2051–2080 periods. The multi-model ensemble average of 15 GCMs.

3.3. Calibration and Generation of Maximum Flows in the Devil's Creek

3.3.1. Under Historical Conditions

As a precedent to the generation of the maximum flows produced in the Devil's Creek, it should be mentioned that the channel of this creek was interrupted by an informal embankment used as a trail to access farms in the area of the Alto de la Alianza hill. The collapse of this embankment, located 2.0 km from the town of La Florida (City of Tacna), caused the debris flow on 21 February 2020. Figure 28 shows the site before and after the collapse of the informal embankment called Paso Camiara.

The calibration of the hydrological model was carried out by modeling the maximum flow produced in the Devil's Creek, dated 21 February 2020, as a result of the event of maximum rain and rupture of the Paso Camiara informal embankment. Figure 29 shows the topology of the Devil's Creek, generated in the RS Minerve model.

As seen in Figure 7, the Devil's Creek was subdivided into five sub-basins: two in the upper part (SC1 and SC2), two in the middle part (SC3 and SC4), and one in the lower part (SC5). Each of the sub-basins is linked to a virtual precipitation rain gauge. The precipitation events for each sub-basin are shown in Table 7.

The rain event of 21 February 2020, attributable to the positive anomaly of the sea surface temperature between +1 °C and +2 °C, produced off the coast of Tacna between 22 January 2020 and 22 February 2020 (Figure 30) [12].



Riverbed of the Devil’s Creek obstructed by an informal em- The place of the informal embankment collapsed by the
bankment as an access trail to farms on the Alto de la Alianza flood of 22 February 2020 and that caused the flood to-
wards the city of Tacna. Source INGEMMET (2016). wards the city of Tacna.

Figure 28. Before and after the Devil’s Creek channel was obstructed by an informal embankment as an access trail to farms in the Alto de la Alianza hill.

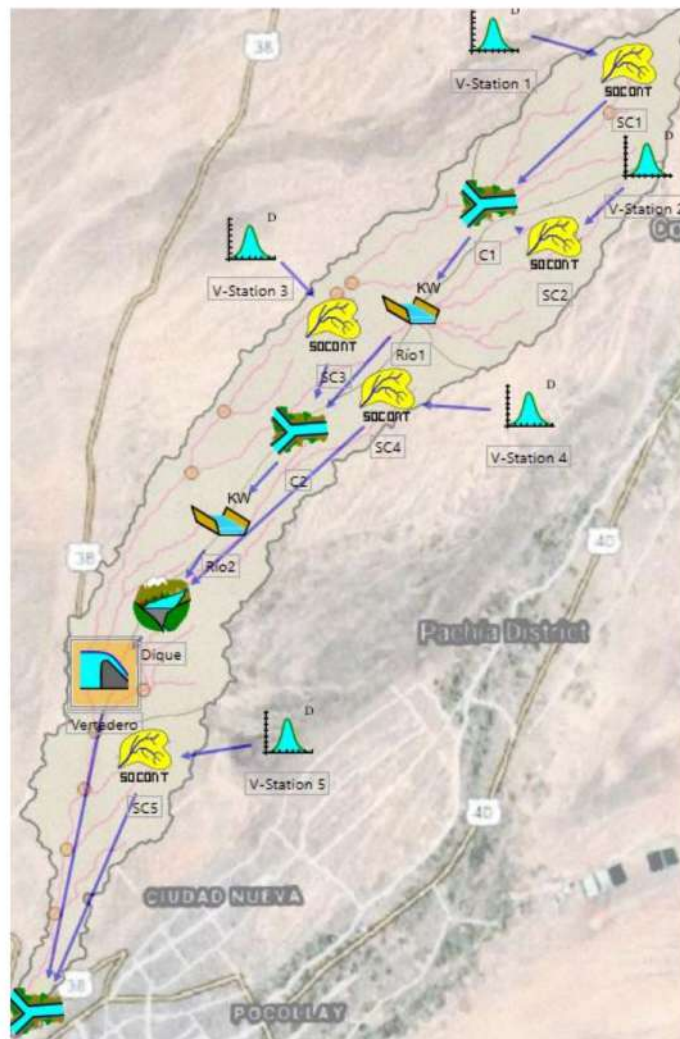
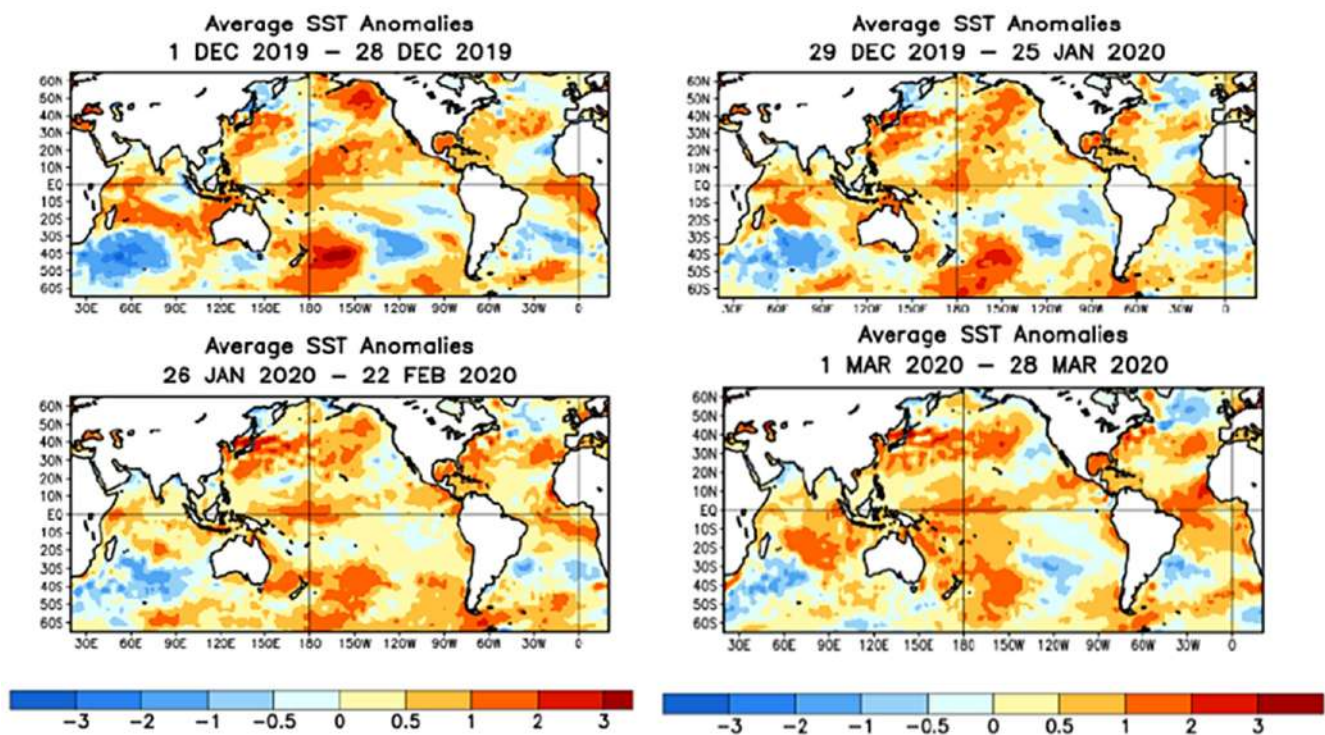


Figure 29. Structure of the RS Minerve Model for simulation of the 21 February 2020 event.

Table 7. The intensity of precipitation over each sub-basin (mm/h).

Date Hour	SC5	SC4 and SC3	SC2 and SC1
21 February 2020 15:00	0.00	0.00	0.00
21 February 2020 16:00	0.43	0.39	0.34
21 February 2020 17:00	2.03	1.83	1.62
21 February 2020 18:00	1.01	0.91	0.81
21 February 2020 19:00	5.36	4.82	4.29
21 February 2020 20:00	2.46	2.21	1.97
21 February 2020 21:00	0.86	0.77	0.69
21 February 2020 22:00	0.00	0.00	0.00

**Figure 30.** Sea surface temperature anomalies between 1 December 2019 and 28 March 2020.

Sub-basins 1 and 2 discharge their waters to River 1, and this flow joins the runoff produced by Sub-basin 3. This discharge feeds River 2, which joins the production of run-off from Sub-basin 4, before entering the informal Paso Camiara embankment. This structure served to model the dam break effect. Finally, the abrupt discharge from the dam break joins the runoff produced in Sub-basin 5. The parameters and initial conditions for each of the sub-basins are shown in Table 8. Likewise, the parameters and initial conditions for each river, are shown in Table 9.

In order to enter the RS Minerve, utilizing the bathymetry information of the Paso Camiara informal embankment (height vs. volume), the calculations were made using information from the topographic survey (Figure 31).

To simulate the dam break effect, it was assumed that this would occur when the dam's maximum height of 13.0 m was reached.

A necessary aspect to carry out the calculation of the dam break is the determination of the width of the breach.

To calculate the width of the rectangular breach (b), the formula proposed by Froehlich (2008) can be used, obtained by processing 69 cases of dam failures [46]:

$$b = 0.27 k_0 V^{0.32} H_b^{0.040} \quad (4)$$

where b (m) is the width of the breach, k_0 (Adim) is 1.3 (Overflow failures) and 1.0 (For other cases), V (m³) is the volume of water stored above the bottom of the breach, and H_b (m) is the height of the breach.

Table 8. SOCONT model parameters for each sub-basin.

Sub-Basins		SC1	SC2	SC3	SC4	SC5
SOCONT Model Parameters						
A	m ²	8,446,871	7,775,105	16,991,236	8,542,694	11,086,674
bp	d/mm	0.0125	0.0125	0.0125	0.0125	0.0125
CFR	-	1	1	1	1	1
HGR3Max	m ²	0.1	0.1	0.1	0.2	0.5
J0	-	0.102	0.060	0.028	0.036	0.047
KGR3	1/s	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
Kr	m ^{1/3} /s	2	2	2	2	2
L	m	1489.2	1301.7	1514.2	1008.1	1613.8
S	mm/°C/d	5	5	5	5	5
Sint	mm/°C/d	0	0	0	0	0
Smin	mm/°C/d	0	0	0	0	0
SPh	d	80	80	80	80	80
Tcf	°C	0	0	0	0	0
Tcp1	°C	0	0	0	0	0
Tcp2	°C	4	4	4	4	4
ThetaCri	-	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Initial conditions						
SWEIni	m	0	0	0	0	0
ThetaIni	-	0	0	0	0	0
HGR3Ini	m	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
HrIni	m	0	0	0	0	0

Table 9. Riverbed model parameters by cinematic approximation.

Riverbed		River 1	River 2
Parameters			
L	m	12,541.4	8622.1
B0	m	5	12
m	-	1	1
J0	-	0.03	0.0335
K	m ^{1/3} /s	30	30
N	-	1	1
Initial conditions			
Qini	m ³ /s	0	0

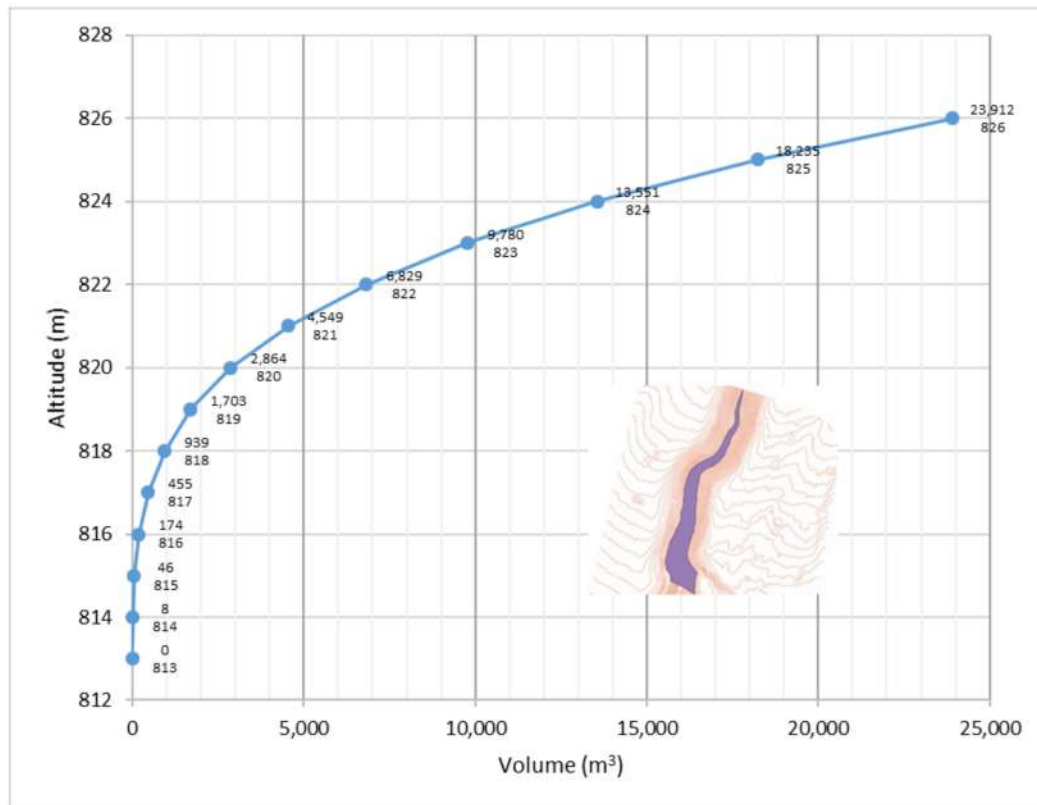


Figure 31. Bathymetry of the informal Paso Camiara embankment.

If we consider $k_0 = 1.3$, the volume of water stored before the dam break was $23,911.5 \text{ m}^3$, and if the total water height above the breach is 13.0 m , there will be a breach width of 9.8 m .

Likewise, if the breach is considered as a spillway, with a coefficient of 1.5 , the discharge flow at the instant of the total rupture of the dam would be $688.7 \text{ m}^3/\text{s}$.

$$Q = 1.5 \times b \times H_{\max}^{1.5} = 1.5 \times 9.8 \times 13^{1.5} = 688.7 \text{ m}^3/\text{s}$$

The results of these calculations are shown in Table 10.

Table 10. Instantaneous discharge flow due to breach of the Paso Camiara informal embankment.

Paso Camiara Dam	Hc (m)	V (Hm ³)	b (m)	Qp (m ³ /s)
	13	0.0239115	9.8	688.7

The simulated hydrographs produced by each of the sub-basins are shown in Figure 32.

The entrance hydrograph to the Paso Camiara informal embankment is shown in Figure 33. A maximum inflow flow of $10.72 \text{ m}^3/\text{s}$ produced at 22:00 h was calculated. It should be mentioned that the Devil's Creek does not have a gauging station. The maximum flow of $10.72 \text{ m}^3/\text{s}$ was contrasted with the water footprints left by the event in the riverbed of the Devil's Creek.

Figure 34 shows the height and flow hydrographs in the Paso Camiara dam. The results of the simulation show that from 4:00 p.m. on 21 February 2020, the filling of the Paso Camiara informal embankment began, breaking at a maximum water height of 15.7 m and discharging a maximum flow of $2550.8 \text{ m}^3/\text{s}$. Figure 35 shows the debris flow which produced floods that caused the loss of three human lives as well as great economic losses in Tacna city.

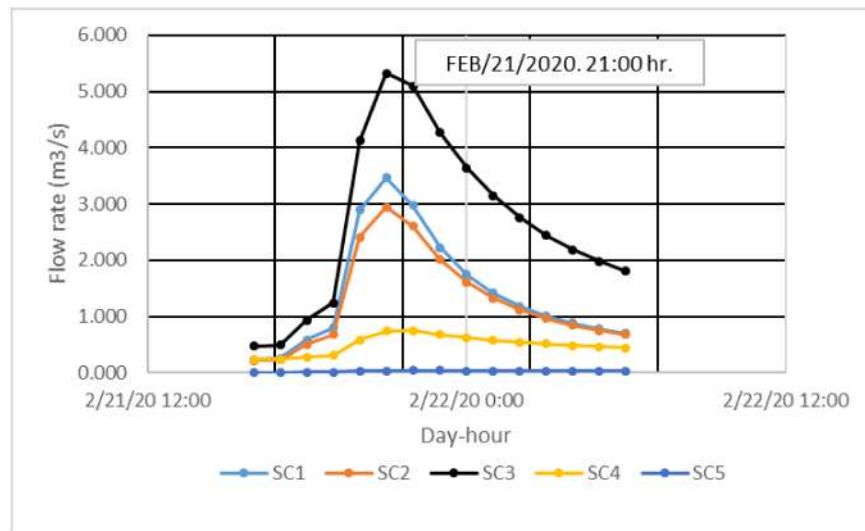


Figure 32. Hydrographs generated by the sub-basins.

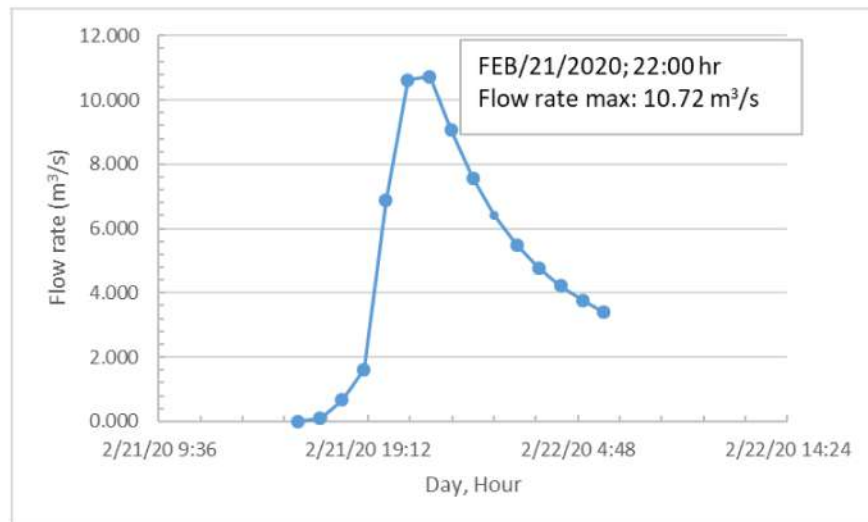


Figure 33. Hydrograph of entry to the Paso Camiara informal embankment.

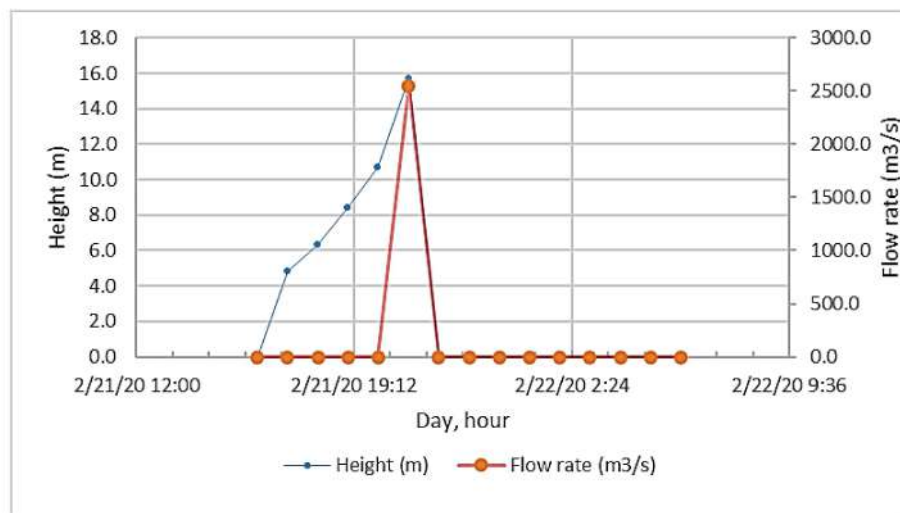


Figure 34. Hydrographs of water height in the dam and flow discharged due to the collapse of the Paso Camiara dam.



Figure 35. Gestion newspaper reports: debris flow in Tacna left three people dead, 22 February 2020.

3.3.2. Under Climate Change Conditions

To carry out the hydrological modeling of the maximum flow in the Devil's Creek, produced by maximum rainfall events generated by climate change models, a topology was used without considering the Paso Camiara informal embankment. Therefore, Sub-basins 1 and 2 discharge their waters to River 1, and this flow joins the runoff produced by Sub-basin 3. This discharge feeds River 2, which joins the production of run-off from Sub-basin 4, which joins the runoff produced in Sub-basin 5. Likewise, the parameters and initial conditions for each of the sub-basins were maintained. Figure 36 shows the structure of the RS Minerve model.

The modeling of the maximum flow product of precipitation intensities over each sub-basin (mm/h) for the RCP4.5 and 8.5 scenarios, and for 2021–2050 and 2051–2080 terms (Table 11), are shown in Table 12 and Figure 37, respectively.

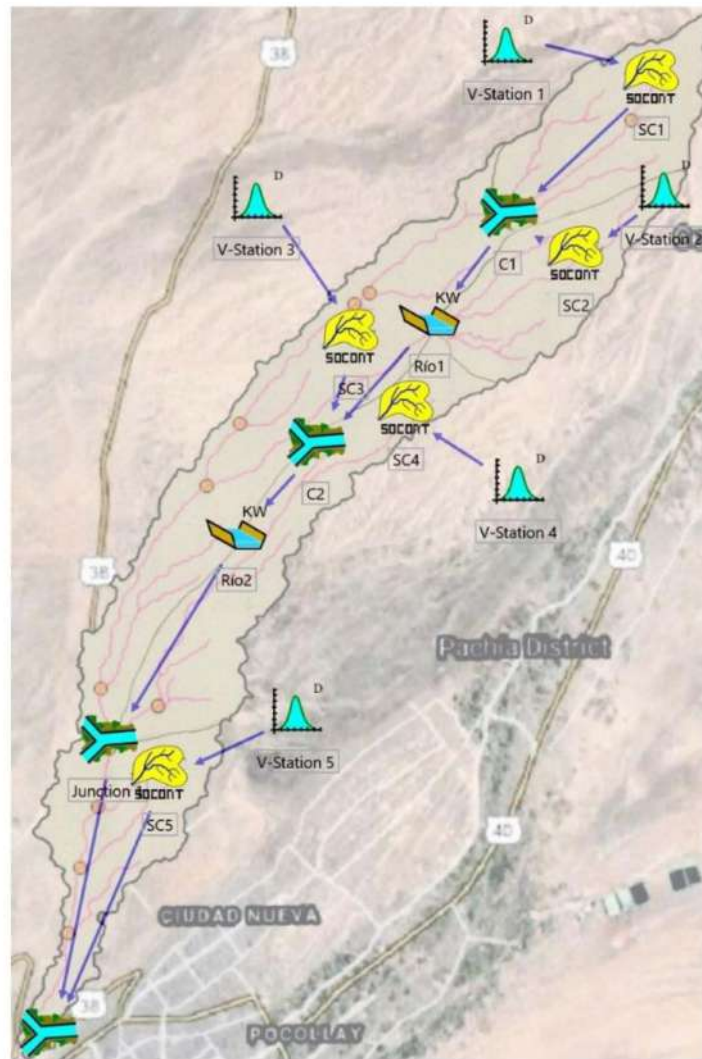


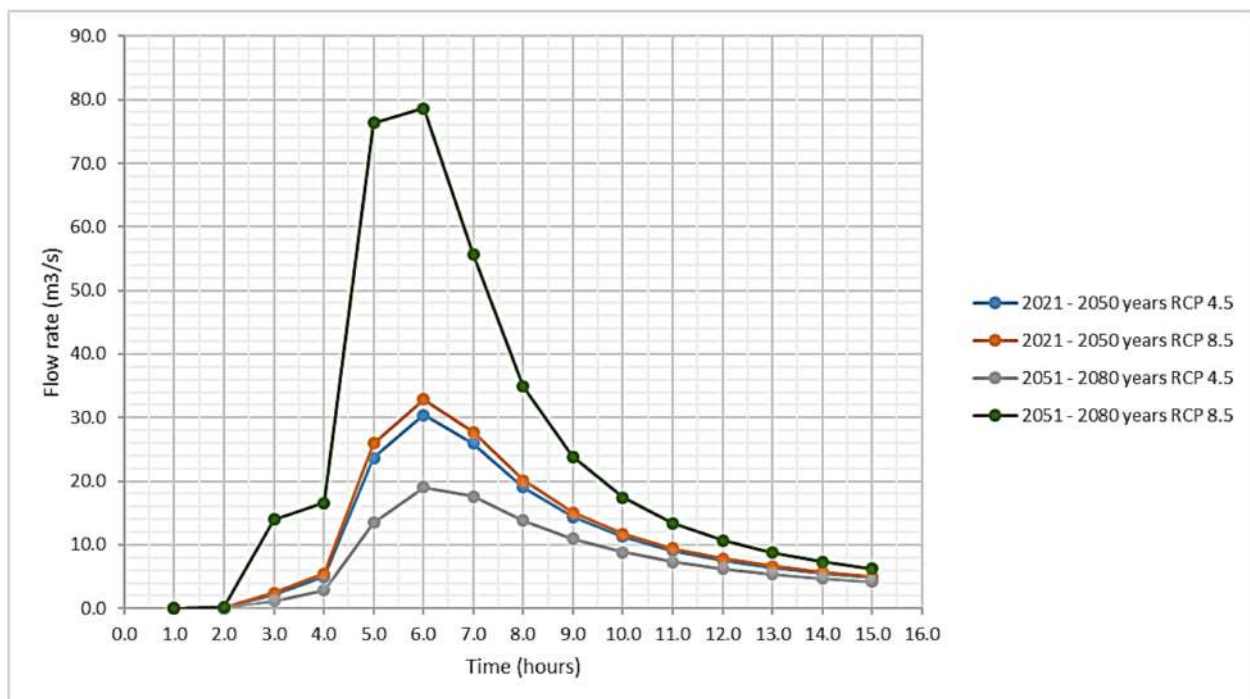
Figure 36. Structure of the RS Minerve Model for the simulations of events with different climate change scenarios.

Table 11. Precipitation intensity over each sub-basin (mm/h) for RCP4.5 and 8.5 scenarios, from 2021 to 2050 and from 2051 to 2080.

Hours	2021–2050 (RCP4.5)			2051–2080 (RCP4.5)			2021–2050 (RCP8.5)			2051–2080 (RCP8.5)		
	SC5	SC4 and SC3	SC2 and SC1	SC5	SC4 and SC3	SC2 and SC1	SC5	SC4 and SC3	SC2 and SC1	SC5	SC4 and SC3	SC2 and SC1
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	0.87	0.78	0.70	0.63	0.57	0.51	0.92	0.83	0.73	1.76	1.58	1.41
2	4.11	3.70	3.29	2.98	2.69	2.39	4.34	3.90	3.47	8.31	7.48	6.65
3	2.04	1.84	1.64	1.48	1.34	1.19	2.16	1.94	1.73	4.13	3.72	3.31
4	10.85	9.77	8.68	7.88	7.09	6.30	11.45	10.31	9.16	21.94	19.75	17.55
5	4.98	4.48	3.98	3.62	3.25	2.89	5.26	4.73	4.20	10.07	9.06	8.06
6	1.74	1.57	1.39	1.26	1.14	1.01	1.84	1.65	1.47	3.52	3.17	2.82
7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total in 6 h	24.60	22.14	19.68	17.86	16.07	14.29	25.96	23.36	20.77	49.74	44.77	39.79

Table 12. Flood hydrographs for RCP4.5 and RCP8.5 scenarios from 2021 to 2050 and from 2051 to 2080.

Time (Hour)	Years 2021–2050 RCP4.5	Years 2021–2050 RCP8.5	Years 2051–2080 RCP4.5	Years 2051–2080 RCP8.5
1.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2.0	0.1	0.1	0.1	0.2
3.0	2.2	2.5	1.2	14.0
4.0	4.9	5.5	2.9	16.6
5.0	23.7	26.0	13.5	76.4
6.0	30.4	32.9	19.1	78.6
7.0	26.0	27.7	17.6	55.7
8.0	19.1	20.1	13.8	34.9
9.0	14.4	15.1	10.9	23.9
10.0	11.3	11.7	8.9	17.5
11.0	9.1	9.5	7.4	13.4
12.0	7.6	7.8	6.3	10.7
13.0	6.4	6.6	5.4	8.7
14.0	5.5	5.7	4.7	7.3
15.0	4.9	5.0	4.2	6.3

**Figure 37.** Flood hydrographs for RCP4.5 and RCP8.5 scenarios for 2021–2050 and 2051–2080 terms.

4. Discussion

This research addressed the impacts of natural variability and climate change on the maximum precipitation and maximum flows in the Devil's Creek, Tacna, Peru. For the projection of the future maximum annual precipitation, maximum temperature, and minimum temperature, the analysis is based on the daily output of 15 general circulation models (GCMs) of the CMIP5 project (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5) and

considers two emission scenarios: RCP4.5 and RCP8.5. The Access1-0 model projection was discarded due to a high overestimation of maximum precipitation. Furthermore, given the uncertainty in the projections by the GCMs [31], an ensemble of 14 GCMs was assessed. In general, although most models do not agree in projecting similar trends in precipitation as evidenced in other investigations [21,45,46], the projections indicate that the future pattern of maximum annual precipitation will experience significant changes, with increases for the two periods evaluated and for both scenarios.

Compared with historical conditions, heavy precipitation events are intensified, especially for the high-emissions scenario, according to the multi-model ensemble of 14 GCMs. Under the RCP4.5 scenario, the maximum annual precipitation could increase by more than 32%, on average, whereas under the RCP8.5 scenario, it could increase by 35%, on average, during the 2021–2050 period relative to the historical period of 1981–2005. On the other hand, for the 2051–2080 period, the maximum annual precipitation projected for the RCP4.5 scenario tends to decrease slightly. However, significant positive change is projected under the RCP8.5 scenario relative to the 1981–2005 period.

Regarding future temperature changes, as evidenced in other investigations, the GCMs agree in projecting a positive temperature trend [47,48]. However, as of 2050, greater variability and a decrease in the low trend are observed under the RCP4.5 scenario for the Devil's Creek area. Additionally, as expected, the RCP8.5 scenario projected the highest temperature values. For both scenarios, the values in June, July, and August denote a high range of positive changes of the minimum temperature. The behavior is similar for the monthly average maximum temperature during the 2021–2050 term for both scenarios. In contrast, it occurs during the 2050–2080 term under the RCP8.5 scenario that indicates significant warming during June, July, and August; similarly, it happens for January, February, and March.

Regarding the historical rainfall event of 21 February 2020, in the Devil's Creek, it can be affirmed that this is attributable to the positive anomaly of the sea surface temperature off the coast of Tacna during the days before that date.

Likewise, the lowest estimated rainfall sheet for the event of 21 February 2020, in the Devil's Creek, concerning the rainfall sheet recorded in the city of Tacna, is attributed to the shorter distance from the city of Tacna to the coastal area. This was demonstrated, in the absence of registered information on rainfall on the Devil's Creek, through the spatio-temporal analysis of the information registered in the city of Tacna (JORGE BASADRE rain gauge) and satellite products such as IMERG and CHIRPS.

Regarding the debris flow produced as a result of the rainfall event of 21 February 2020, which caused a loss of human lives, this was the consequence of the collapse of an informal embankment built as a trail, located 2.0 km upstream from the town center named La Florida (City of Tacna).

Regarding the historical and future hydrological modeling, these were carried out through the RS Minerve program. The historical hydrological modeling was calibrated by estimating the footprints of maximum flows produced in the middle section of the Devil's Creek and the evidence and testimonies recorded in videos of the magnitude of the disaster caused by the debris flow of 21 February 2020. The future hydrological modeling was carried out for two time periods: 2021 to 2050 and 2051 to 2080, for RCP4.5 and RCP8.5 scenarios, respectively. The results will be used for the design of studies and alternatives for the protection of the population in the area of influence of the Devil's Creek.

5. Conclusions

Climate models agree in projecting a positive trend in surface temperature. However, from 2050 onwards, greater variability and a decrease in the trend were observed under the RCP4.5 scenario. On the other hand, as expected, the RCP8.5 high-emissions scenario projected the highest values. For both scenarios and for both periods, minimum and maximum temperature would increase under climate change. Higher positive monthly changes are projected in June, July, and August, meaning that winters would be warmer.

The result of the model ensemble, under the RCP4.5 scenario, indicated a variation in the maximum annual precipitation from 2.77 mm to 24.70 mm, with an average of 5.70 mm for the 2021–2050 term. Additionally, this was from 3.14 mm to 25.96 mm, with an average of 5.80 mm under the RCP8.5 scenario. For the 2051–2080 term, the multi-model ensemble of 14 GCMs indicated a variation in the maximum annual precipitation from 2.77 mm to 17.86 mm, with an average of 5.60 mm under the RCP4.5 scenario and from 2.92 mm to 49.74 mm, averaging 7.21 mm under the RCP8.5 scenario.

Regarding the relative change, under the RCP4.5 scenario, the maximum annual precipitation could increase by 32%, on average. Under the RCP8.5 scenario, it would probably increase by 35%, on average, during the 2021–2050 term. On the other hand, for the 2050–2080 term, the maximum annual precipitation could increase by 30% under the RCP4.5 scenario and 65% under the RCP8.5 scenario.

The rainfall event of 21 February 2020, in the Devil's Creek, is attributable to the positive anomaly of the sea surface temperature between +1 °C and +2 °C, produced off the coast of Tacna between 22 January 2020, and 22 February 2020.

The debris flow produced as a result of the rainfall event of 21 February 2020 was the consequence of the collapse of an informal embankment built as a trail, located 2.0 km upstream from the town of La Florida (City of Tacna).

Historical hydrological modeling using the RS Minerve model was calibrated by estimating the footprints of maximum flows produced in the middle section of the Devil's Creek and the evidence and testimonies recorded in videos of the magnitude of the disaster caused by the debris flow of 21 February 2020.

The maximum flood volume in the Devil's Creek could increase by 220% and 154% for the RCP4.5 scenario, for the 2021–2050 and 2051–2080 terms, respectively.

The maximum flood volume in the Devil's Creek could increase by 234% and 484% for the RCP8.5 scenario for the 2021–2050 and 2051–2080 terms, respectively.

Author Contributions: E.I.-B. designed, collected observed data, wrote the first draft, and edited the document. E.C.-V. designed, collected observed data, wrote the first draft, and edited the document. E.P.-V. guided writing and review. F.M., A.C. and A.V. collected and processed information. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, Tacna, Perú.

Institutional Review Board Statement: Not applicable.

Informed Consent Statement: Not applicable.

Data Availability Statement: Not applicable. The data corresponds to reports from Peruvian public institution that under agreement provided such information with academic purposes.

Acknowledgments: The authors would like to thank the National Water Authority (ANA) and the National Meteorology and Hydrology Service (SENAMHI) for providing the valuable information used in this work.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

1. Ingol, E.M.; McKinney, D.C. *Modeling Climate Change Impacts on Hydrology and Water Resources: Case Study Rio Conchos Basin*; Center for Research in Water Resources Bureau of Engineering Research, The University of Texas at Austin: Austin, TX, USA, 2011.
2. Stagl, J.; Mayr, E.; Koch, H.; Hattermann, F.; Huang, S.; Judith, S. *Managing Protected Areas in Central and Eastern Europe Under Climate Change, Effects of Climate Change on the Hydrological Cycle in Central and Eastern Europe*; Springer Open: Berlin/Heidelberg, Germany, 2013; pp. 31–43.
3. IPCC. *Climate Change and Water. Contribution to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*; Bates, B.C., Kundzewicz, Z.W., Wu, S., Palutikof, J.P., Eds.; IPCC Technical Paper VI; IPCC: Geneva, Switzerland, 2008.
4. SENAMHI. Escenarios Climáticos en el Perú para el Año 2030. 2009. Available online: https://idesep.senamhi.gob.pe/portalidesep/files/tematica/cambio_climatico/Escenarios_climaticos_en_el_Peru_para_el_ano_2030.pdf (accessed on 21 November 2021).

5. Changnon, S.A. *El Niño 1997–1998: The Climate Event of the Century*; Oxford University Press: New York, NY, USA, 2000; p. 36. ISBN 978-0-19-803096-6. Available online: <https://oxford.universitypressscholarship.com/view/10.1093/oso/9780195135510.001.0001/isbn-9780195135510> (accessed on 21 November 2021).
6. Comunidad Andina de Fomento (CAF). *El Fenomeno El Niño 1997–1998 Memoria; Retos Y Soluciones*. 2000. Available online: <https://scioteca.caf.com/bitstream/handle/123456789/676/Las%20lecciones%20de%20El%20Ni%C3%B1o.Per%C3%BA.pdf> (accessed on 21 November 2021).
7. El Niño Costero. *Las Inundaciones de 2017 en el Perú*; ISET-International, Soluciones Prácticas y el Programa de Resiliencia a las Inundaciones de Zúrich: La Paz, Bolivia, 2017.
8. Pino, E.; Ramos, L.; Avalos, O.; Tacora, P.; Chávarri, E.; Angulo, O.; Ascencios, D.; Mejía, J. Effect of Environmental and Geological Characteristics on Water Quality in the Caplina River Basin, Tacna, Peru. *Tecnol. Cienc. Agua* **2017**, *8*, 77–99. [[CrossRef](#)]
9. Cheng, L.; AghaKouchak, A. Nonstationary Precipitation Intensity-Duration-Frequency Curves for Infrastructure Design in a Changing Climate. *Sci. Rep.* **2014**, *4*, 7093. [[CrossRef](#)]
10. Sarhadi, A.; Soulis, E.D. Time-varying extreme rainfall intensity-duration-frequency curves in a changing climate. *Geophys. Res. Lett.* **2017**, *44*, 2454–2463. [[CrossRef](#)]
11. Hu, H.; Ayyub, B. Extreme Precipitation Analysis and Prediction for a Changing Climate. *ASCE-ASME J. Risk Uncertain. Eng. Syst. Part A Civ. Eng.* **2018**, *4*, 04018029. [[CrossRef](#)]
12. Pino, E.; Chávarri, E. Evidence of climate change in the hyper-arid region of the southern coast of Peru, head of the Atacama Desert. *Tecnol. Cienc. Agua* **2022**, *3*, 1. [[CrossRef](#)]
13. CMIP5. Coupled Model Intercomparison Project Phase 5. 2013. Available online: <https://pcmdi.llnl.gov/mips/cmip5/> (accessed on 21 November 2021).
14. Han, Z.Y.; Tong, Y.; Gao, X.J. Correction based on quantile mapping for temperature simulated by the RegCM4. *Clim. Change Res.* **2018**, *14*, 331–340.
15. Yang, X.; Wood, E.F.; Sheffield, J.; Ren, L.; Zhang, M.; Wang, Y. Bias correction of historical and future simulations of precipitation and temperature for china from CMIP5 models. *J. Hydrometeorol.* **2018**, *19*, 609–623. [[CrossRef](#)]
16. Tong, Y.; Gao, X.; Han, Z.; Xu, Y.; Xu, Y.; Giorgi, F. Bias correction of temperature and precipitation over China for RCM simulations using the QM and QDM methods. *Clim. Dyn.* **2021**, *57*, 1425–1443. [[CrossRef](#)]
17. Paulhus, J.L.H.; Kohler, M.A. Interpolation of missing precipitation records. *Mon. Weather. Rev.* **1952**, *80*, 129–133. [[CrossRef](#)]
18. Guijarro, J.A. Homogenization of climatic series with Climatol. In *Reporte Técnico State Meteorological Agency (AEMET)*; Balearic Islands Office: Madrid, Spain, 2018.
19. Aybar, C.; Lavado-Casimiro, W.; Huerta, A.; Fernández, C.; Vega, F.; Sabino, E.; Felipe-Obando, O. Uso del Producto Grillado “PISCO” de Precipitación en Estudios, Investigaciones y Sisistemas Operacionales de Monitoreo y Pronóstico Hidrometeorológico. 2017. Available online: <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/01402SENA-8.pdf> (accessed on 21 November 2021).
20. Warren, W.; Parkinson, C. *An Introduction to Three-Dimensional Climate Modeling*, 2nd ed.; University Science Books; National Center for Atmospheric Research and NASA Goddard Space Flight Center: California, VA, USA, 2005; p. 368.
21. IPCC. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*; Stocker, T.F.D., Qin, G.-K., Plattner, M., Tignor, S.K., Allen, J., Boschung, A., Nauels, Y., Xia, V.B., Midgley, P.M., Eds.; Cambridge University Press: Cambridge, UK, 2013; p. 1535.
22. Flato, G.J.; Marotzke, B.; Abiodun, P.; Braconnot, S.C.; Chou, W.; Collins, P.; Cox, F.; Driouech, S.; Emori, V.; Eyring, C.; et al. Evaluation of climate models. In *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*; Cambridge University Press: Cambridge, UK.
23. Overland, J.E.; Wang, M.; Bond, N.A.; Walsh, J.E.; Kattsov, V.M.; Chapman, W.L. Considerations in the Selection of Global Climate Models for Regional Climate Projections: The Arctic as a Case Study. *J. Clim.* **2011**, *24*, 1583–1597. [[CrossRef](#)]
24. NASA. NEX-GDDP: NASA Earth Exchange Global Daily Downscaled Climate Projections, the Coupled Model Intercomparison Project Phase 5. 2012. Available online: https://www.nccs.nasa.gov/sites/default/files/NEX-GDDP-CMIP6-Tech_Note.pdf (accessed on 21 November 2021).
25. Wilby, R.L.; Wigley, T.M.L. Downscaling General Circulation Model Output: Review of Methods and Limitations. *Prog. Phys. Geogr.* **1997**, *21*, 530–548. [[CrossRef](#)]
26. Chong-Yu, X. From GCMs to River Flow: A Review of Downscaling Methods and Hydrologic Modeling Approach. *Prog. Phys. Geogr.* **1999**, *23*, 229–249.
27. Wilby, R.L.; Charles, S.P.; Zorita, E.; Timbal, B.; Whetton, P.; Mearns, L.O. Guidelines for Use of Climate Scenarios Developed From Statistical Downscaling Methods. 2004. Available online: https://www.ipcc-data.org/guidelines/dgm_no2_v1_09_2004.pdf (accessed on 21 November 2021).
28. Fowler, H.J.; Blenkinsop, S.; Tebaldi, C. Linking climate change modeling to impacts studies: Recent advances in downscaling techniques for hydrological modeling. *Int. J. Clim.* **2007**, *27*, 1547–1578. [[CrossRef](#)]
29. Teutschbein, C.; Seiber, J. Bias correction of regional climate model simulations for hydrological climate-change impact studies: Review and evaluation of different methods. *J. Hydrol.* **2012**, *456–457*, 12–29. [[CrossRef](#)]
30. Maraun, G. Bias Correction, Quantile Mapping, and Downscaling: Revisiting the Inflation Issue, Helmholtz Centre for Ocean Research Kiel, Kiel, Germany. *J. Clim.* **2013**, *26*, 2137–2143. [[CrossRef](#)]

31. Perkins, S.E.; Fischer, E.M. The usefulness of different realizations for the model evaluation of regional trends in heat waves. *Geophys. Res. Lett.* **2013**, *40*, 5793–5797. [[CrossRef](#)]
32. Semenov, M.; Stratonovitch, P. Use of multi-model ensembles from global climate models for assessment of climate change impacts. *Clim. Res.* **2010**, *41*, 1–14. [[CrossRef](#)]
33. Bishop, C.H.; Abramowitz, G. Climate model dependence and the replicate Earth paradigm. *Clim. Dyn.* **2013**, *41*, 885–900. [[CrossRef](#)]
34. LeDuc, M.; Mailhot, A.; Frigon, A.; Martel, J.-L.; Ludwig, R.; Brietzke, G.B.; Giguère, M.; Brissette, F.; Turcotte, R.; Braun, M.; et al. The ClimEx Project: A 50-Member Ensemble of Climate Change Projections at 12-km Resolution over Europe and Northeastern North America with the Canadian Regional Climate Model (CRCM5). *J. Appl. Meteorol. Clim.* **2019**, *58*, 663–693. [[CrossRef](#)]
35. Annan, J.D.; Hargreaves, J.C. On the meaning of independence in climate science. *Earth Syst. Dyn.* **2017**, *8*, 211–224. [[CrossRef](#)]
36. Wang, B.; Zheng, L.; Liu, D.L.; Ji, F.; Clark, A.; Yu, Q. Using multi-model ensembles of CMIP5 global climate models to reproduce observed monthly rainfall and temperature with machine learning methods in Australia. *Int. J. Clim.* **2018**, *38*, 4891–4902. [[CrossRef](#)]
37. Holland, J.H. Genetic algorithms. *Sci. Am.* **1992**, *267*, 44–50. [[CrossRef](#)]
38. Kramer, O. Genetic algorithms. In *Genetic Algorithm Essentials*; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2017; pp. 11–19.
39. SENAMHI. Boletín Hidroclimático Mensual Dirección Zonal 7. 2021. Available online: <https://repositorio.senamhi.gob.pe/handle/20.500.12542/1209> (accessed on 21 November 2021).
40. Krause, P.; Boyle, D.P.; Båse, F. Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. *Adv. Geosci.* **2005**, *5*, 89–97. [[CrossRef](#)]
41. Moriasi, D.N.; Gitau, M.W.; Pai, N.; Daggupati, P. Hydrologic and Water Quality Models: Performance Measures and Evaluation Criteria. *Trans. ASABE* **2015**, *58*, 1763–1785. [[CrossRef](#)]
42. Muñoz, R.; Huggel, C.; Drenkhan, F.; Vis, M.; Viviroli, D. Comparing model complexity for glacio-hydrological simulation in the data-scarce Peruvian Andes. *J. Hydrol. Reg. Stud.* **2021**, *37*, 100932. [[CrossRef](#)]
43. Hidalgo, I.G.; Paredes-Arquiola, J.; Andreu, J.; Lerma-Elvira, N.; Lopes, J.E.G.; Cioffi, F. Hydropower generation in future climate scenarios. *Energy Sustain. Dev.* **2020**, *59*, 180–188. [[CrossRef](#)]
44. Astorayme, M.; García, J.; Suarez, W.; Felipe, O.; Huggel, C.; Molina, W. Modelización hidrológica con un enfoque semidistribuido en la cuenca del río Chillón, Perú. *Rev. Peru. Geo Atmosférica RGPA* **2015**, *4*, 109–124. Available online: http://www.senamhi.gob.pe/rpga/pdf/2015_vol04/paper8.pdf (accessed on 21 November 2021).
45. García, J.; Foehn, A.; Fluixa, J.; Roquire, B.; Brauchli, T.; Paredes, J.; Cesare, G.; Minerve, R.S. *Technical Manual*; Centre de Recherche sur l'Environnement Alpin: Sion, Switzerland, 2020.
46. Campos, D. Modelado empírico simple del rompimiento de presas pequeñas de tierra (hidrograma de salida). *Ing. Investig. Tecnol.* **2013**, *14*, 377–388. [[CrossRef](#)]
47. Dosio, A.; Jones, R.G.; Jack, C.; Lennard, C.; Nikulin, G.; Hewitson, B. What can we know about future precipitation in Africa? Robustness, significance and added value of projections from a large ensemble of regional climate models. *Clim. Dyn.* **2019**, *53*, 5833–5858. [[CrossRef](#)]
48. Ortega, G.; Arias, P.A.; Villegas, J.C.; Marquet, P.A.; Nobre, P. Present-day and future climate over central and South America according to CMIP5/CMIP6 models. *Int. J. Clim.* **2021**, *41*, 6713–6735. [[CrossRef](#)]