

UNIVERSIDAD PRIVADA ANTENOR ORREGO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL



**ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO HIDRODINÁMICO DEL PUENTE DEL RIO MOCHE
Y EVALUACIÓN FRENTE A LOS EFECTOS DE EROSIÓN Y SOCAVACIÓN EN LOS
PILARES, LA LIBERTAD, TRUJILLO 2019”**

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: HIDRAULICA

AUTORES:

BR. BRICEÑO LOPEZ FRANCISCO RENE

BR. SIFUENTES CABALLERO HENRY PAUL

ASESOR:

ING. SAGASTEGUI PLASENCIA FIDEL GERMAN

TRUJILLO - PERÚ

2019

APROBACIÓN DE TESIS

El asesor y los miembros del jurado evaluador asignados, APRUEBAN la tesis desarrollado por los bachilleres Francisco Rene Briceño Lopez y Henry Paul Sifuentes Caballero, denominado: **“ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO HIDRODINAMICO DEL PUENTE DEL RIO MOCHE Y EVALUACION FRENTE A LOS EFECTOS DE EROSION Y SOCAVACION EN LOS PILARES, LA LIBERTAD, TRUJILLO 2019”**

ING.RICARDO ANDRES NARVAEZ ARANDA

PRESIDENTE

CIP: 58776

ING.ALVARO FERNANDO SALAZAR PERALES

SECRETARIO

CIP: 97281

ING.SEGUNDO ALFREDO VARGAS LOPEZ

VOCAL

CIP: 18687

Mg. Ing. FIDEL GERMAN SAGASTEGUI PLASENCIA

ASESOR DE TESIS

CIP: 32720

DEDICATORIA

A MI MAMA Y ABUELA, QUIENES
CON SUS CONSEJOS Y APOYO
TOTAL HICIERON REALIDAD
MI META.

A MIS FAMILIARES Y AMIGOS QUE
CON SU APOYO Y ALIENTO HICIERON
QUE ESTO SEA POSIBLE

FRANCISCO RENE

DEDICATORIA

A MIS PADRES, QUIENES CON
SUS SABIOS CONSEJOS Y APOYO
HICIERON REALIZADAD MI SUEÑO.

A MIS ABUELITOS QUE SUS CONSEJOS
SON LUZ PARA MI CAMINO EN LA
HONRADEZ Y RESPONSABILIDAD

HENRY PAUL

AGRADECIMIENTOS

Agradecer a Dios, a nuestras familias y a todos los docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil de la Universidad Privada Antenor Orrego de Trujillo, en especial a nuestro asesor, quien en forma permanente y oportuna nos asesoró desde el inicio hasta la culminación de la presente tesis.

LOS AUTORES

RESUMEN

La importancia de un estudio sobre los efectos de la erosión y socavación frente a cargas de agua provenientes de máximas avenidas conlleva a la investigación de las condiciones hidrodinámicas desarrolladas en el entorno de la estructura, Puesto que existe la necesidad de conocer la respuesta del cauce frente al emplazamiento de una estructura en él y cómo ésta es, así poder determinar si es vulnerable o no al efecto de socavación.

Mediante la creación de modelos de dinámica de fluidos computacional, se construyó 2 modelos, un modelo en 2 dimensiones empleando IBER 2.3.4 y un modelo numérico en 3 dimensiones utilizando la interfaz del software FLOW3D, con el cual se compiló la versión digital tanto del terreno como del puente creando una simulación a detalle del entorno donde se desarrolla la realidad problemática, también determinados los parámetros hidrodinámicos del puente y por ende su comportamiento frente a las cargas dinámicas de agua, apoyándonos de los estudios de topografía, hidrología y mecánica de suelos obteniendo así la pendiente del terreno, caudal circundante en el cauce y la clasificación del suelo respectivamente. Así poder evaluar los resultados obtenidos de los parámetros hidrodinámicos existente en el emplazamiento de los puentes en el cauce obteniendo los siguientes resultados: Bidimensional - Tirante: 4.12 - 4.95m; velocidad: 7.98 – 8.88 m/s; erosión 1.02 – 1.93; acumulación de sedimentos: 2.16 – 0.79 m; transporte de sedimentos: 0.096 – 0.064 m²/s; Régimen de flujo: Supercrítico predominante, Tridimensional – Tirante máximo en el cauce: 3.84m; velocidad 11.435 – 22.87 m/s; Froude: supercrítico Predominante, riberas $f = 0.83 - 0.67$.

ABSTRACT

The importance of a study on the effects of erosion and scouring against water loads from maximum floods leads to the investigation of the hydrodynamic conditions developed in the environment of the structure, since there is a need to know the response of the riverbed in front of to the location of a structure in it and how it is, in order to determine if it is vulnerable or not to the effect of undermining.

Through the creation of computational fluid dynamics models, 2 models were built, a 2-dimensional model using IBER 2.3.4 and a numerical model in 3 dimensions using the FLOW3D software interface, with which the digital version of the model was compiled. ground as of the bridge creating a simulation to detail the environment where the problematic reality is developed, also determined the hydrodynamic parameters of the bridge and therefore its behavior in front of the dynamic loads of water, supported by the studies of topography, hydrology and soil mechanics thus obtaining the slope of the terrain, the surrounding flow in the channel and the classification of the soil respectively. Thus, we can evaluate the results obtained from the hydrodynamic parameters existing at the site of the bridges in the channel, obtaining the following results: Bidimensional - Strut: 4.12 - 4.95m; speed: 7.98 - 8.88 m / s; erosion 1.02 - 1.93; sediment accumulation: 2.16 - 0.79 m; sediment transport: 0.096 - 0.064 m² / s; Flow regime: Supercritical predominant, Three-dimensional - Maximum tension in the channel: 3.84m; speed 11.435 - 22.87 m / s; Froude: Supercritical predominant, banks $f = 0.83 - 0.67$

INDICE

I. INTRODUCCIÓN	1
1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	2
1.1. REALIDAD PROBLEMÁTICA	2
1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	15
1.2.1. PROBLEMA GENERAL	15
1.3. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	15
1.3.1. OBJETIVO GENERAL	15
1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
1.4. JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO	16
II. MARCO DE REFERENCIA	17
2.1. ANTECEDENTES DEL ESTUDIO	18
2.2. MARCO TEÓRICO	19
2.2.1. TRANSPORTE Y ARRASTRE DE SEDIMENTOS	19
2.2.2. MÉTODO PARA LA SOCAVACIÓN SEGÚN LISCHTVAN Y LEBEDIEV	19
2.3. MARCO CONCEPTUAL	23
2.4. HIPÓTESIS	24
2.4.1. HIPÓTESIS GENERAL	24
2.5. VARIABLES: OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES	24
2.5.1. VARIABLES DEPENDIENTES:	24
2.5.2. VARIABLE DEPENDIENTE:	24
III. METODOLOGÍA	25
3.1. TIPO Y NIVEL DE INVESTIGACIÓN	26
3.1.1. POR EL PROPÓSITO	26
3.1.2. POR LA CLASE DE MEDIOS UTILIZADOS PARA OBTENER LOS DATOS	26
3.1.3. POR EL NIVEL DE CONOCIMIENTOS QUE SE ADQUIEREN	26
3.2. POBLACIÓN Y MUESTRA	26
3.2.1. POBLACIÓN	26
3.2.2. MUESTRA	26
3.3. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE INVESTIGACIÓN	26
3.3.1. TÉCNICAS	26
3.3.2. INSTRUMENTOS	27
3.3.2. PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS	27

<u>IV. RESULTADOS</u>	<u>29</u>
4.1. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	30
4.1.1. TOPOGRAFÍA DEL CAUCE	30
4.1.2. ESTUDIO DE MECÁNICA DE SUELOS	31
4.1.3. ESTUDIO DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA	37
4.1.4. ESTIMACIÓN DE CAUDAL	47
4.1.5. TRANSFORMACIÓN DE LLUVIA A ESCORRENTÍA	51
4.1.6. MODELAMIENTO NUMÉRICO BIDIMENSIONAL	57
4.1.6.1. CREACIÓN DEL MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES (DEM)	57
4.1.6.2. CREACIÓN DEL MALLADO EN IBER 2.3.4	59
4.1.6.3. ASIGNACIÓN DE LA RUGOSIDAD DE SUPERFICIE	62
4.1.6.4. RESULTADOS	68
4.1.7. MODELAMIENTO NUMÉRICO TRIDIMENSIONAL	71
4.2. PRUEBA DE HIPÓTESIS	78
<u>V. INTERPRETACION DE RESULTADOS</u>	<u>79</u>
<u>VI. CONCLUSIONES</u>	<u>83</u>
<u>VII. RECOMENDACIONES</u>	<u>86</u>
<u>VIII. REFERENCIAS</u>	<u>88</u>
<u>IX. ANEXOS</u>	<u>91</u>

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 - Puente Arkadico	2
FIGURA 2 - Puente Romano Alcantara.....	3
FIGURA 3 - Erosión y socavación en Pilares - Puente Alcántara	4
FIGURA 4 - Puente en Paucartambo - Cusco.....	5
FIGURA 5 - Puente Inca - Huarautambo, Yanahuanca, Pasco.....	6
FIGURA 6 - Esquema de Ubicación - La Libertad... ..	8
FIGURA 7 - Esquema de Ubicación - Provincia Trujillo.....	9
FIGURA 8 - Esquema de Ubicación - Provincia Moche.....	9
FIGURA 9 - Esquema de ubicación – Puente Moche.....	10
FIGURA 10 - Esquema de ubicación – Puente Moche.....	10
FIGURA 11 - Esquema de ubicación – Puente Moche.....	11
FIGURA 12 - Fotografía en perspectiva – Puente Moche	111
FIGURA 13 - Fotografía de Sub estructura – Puente Moche	12
FIGURA 14 - Fotografía del pilar del puente – Puente Moche	122
FIGURA 15 - Esquema del pilar del Puente - Puente Moche	13
FIGURA 16 - Fotografía en perspectiva– Pilares del Puente Moche	144
FIGURA 17 - Planta Topográfica.....	30
FIGURA 18 - Peso de la muestra.....	31
FIGURA 19 - Llevar la muestra	31
FIGURA 20 - Llevar la muestra Seca.....	32
FIGURA 21 - Tamizado de las muestras.....	32
FIGURA 22 - Peso de muestra retenida.....	33
FIGURA 23 - Peso de muestra retenida.....	33
FIGURA 24 - Ensayo para Peso específico	34
FIGURA 25 - Peso de la muestra para peso específico.....	34
FIGURA 26 - Ingreso de la muestra en el Picnómetro	35
FIGURA 27 - Muestra puesta a fuego moderado por 20 minutos	35
FIGURA 28 - Selección de la data satelital	37
FIGURA 29 - Información correspondiente al sector elegido	38
FIGURA 30 - Creación del raster mediante ArcGIS	38
FIGURA 31 - Creación del raster mediante ArcGIS	39
FIGURA 32 - Creación del raster de pendientes.....	39
FIGURA 33 - Creación de la superficie de acumulación de flujo.....	40
FIGURA 34 - Establecimiento del punto de interés.....	40
FIGURA 35 - Asignación del punto de entrega de caudal / salida de la cuenca ..	41
FIGURA 36 - Delimitación de la cuenca hidrográfica.....	41
FIGURA 37 - Cuenca hidrográfica delimitada.....	42
FIGURA 38 - Terrset.....	42
FIGURA 39 - Importación del DEM a Terrset.....	43
FIGURA 40 - Superposición de la cuenca en DEM.....	43
FIGURA 41 - Creación del raster Runoff.....	44
FIGURA 42 - Perfil longitudinal del cauce principal.....	44

FIGURA 43 - Curva Hipsométrica.....	45
FIGURA 44 - Cuadro resumen de los parámetros morfométricos.....	46
FIGURA 45 - Mapa de zonificación IILA.....	48
FIGURA 46 - Descripción de Variables.....	48
FIGURA 47 - Interfaz de usuario.....	49
FIGURA 48 - Hietograma.....	50
FIGURA 49 - CURVAS IDF.....	50
FIGURA 50 - Interfaz del HEC-HMS.....	52
FIGURA 51 - Ingreso del área de la cuenca.....	52
FIGURA 52 - Tipo de suelo según las condiciones de humedad para la Cuenca.....	53
FIGURA 53 - Grupo hidrológico en función a la permeabilidad y uso.....	53
FIGURA 54 - Ingreso del parámetro de la curva Número.....	54
FIGURA 55 - Hietograma.....	54
FIGURA 56 - Ingreso del hietograma.....	55
FIGURA 57 - Hidrograma de entrada y salida para un periodo de retorno de 500 años.....	55
FIGURA 58- Resumen de resultados para la cuenca en análisis.....	56
FIGURA 59 - Creación del DEM.....	57
FIGURA 60 - Creación del raster topográfico.....	58
FIGURA 61 - Exportación del DEM en formato ASCII.....	58
FIGURA 62 - Creación de la malla.....	59
FIGURA 63- Asignación de tiempo de simulación.....	59
FIGURA 64 - Configuración de resultados.....	60
FIGURA 65 - Transporte de sedimentos.....	60
FIGURA 66 - Asignación de la entrada de Caudal.....	61
FIGURA 67 - Asignación de condición de salida.....	61
FIGURA 68 - Asignación de uso de suelos.....	62
FIGURA 69- Rugosidad del asfalto.....	63
FIGURA 70 - Rugosidad del asfalto.....	63
FIGURA 71 - Rugosidad mediante ecuación 5-12.....	64
FIGURA 72 - Sectorización de la rugosidad según el uso de suelo.....	66
FIGURA 73 - Sectorización de la rugosidad según el uso de suelo.....	66
FIGURA 74 - Cálculo del modelo hidráulico.....	67
FIGURA 75 - Altura de agua o tirante para el instante T=160.....	68
FIGURA 76 - Velocidad del flujo de agua para el instante T=160.....	68
FIGURA 77 - Erosión en el cauce del rio moche para el instante T=160.....	69
FIGURA 78 - Transporte de sedimentos en el cauce para el instante T=160.....	69
FIGURA 79 - Régimen de flujo para el instante T=160.....	70
FIGURA 80 - Construcción del modelo 3D para los puentes del rio Moche.....	71
FIGURA 81 - Emplazamiento del modelo digital del puente en el cauce del rio Moche.....	72
FIGURA 82 - Creación del modelo CDF – Flow3D.....	73
FIGURA 83 - Cálculo del modelo hidráulico 3D.....	74

FIGURA 84 - Profundidad del tirante en el cauce para $t = 4.09s$	74
FIGURA 85 - Daños a la sub y superestructura del puente para $t = 4.09s$	75
FIGURA 86 - Análisis de la Velocidad en el punto de interés – Perspectiva.....	76
FIGURA 87 - Análisis de la Velocidad en el punto de interés – Perspectiva 02...	76
FIGURA 88 - Régimen de flujo en el punto de interés $t= 7.50 s$ -Perspectiva 01.	77
FIGURA 89 - Régimen de flujo en el punto de interés $t= 10.09 s$ –Perspectiva 02	78

ANEXO

FIGURA 1- Reconocimiento de campo de estudio.....	92
FIGURA 2 - Medición de los puentes con la ayuda del distanciometro.....	92
FIGURA 3- Identificación del terreno para extracción de muestra	93
FIGURA 4 - Identificación de nudo rígido de la losa con los pilares.	93
FIGURA 5 - Identificación de dos tipos de pilares.	94
FIGURA 6 - Toma de Muestra.....	94
FIGURA 7 - Peso de la muestras obtenidas del puente moche.	95
FIGURA 8 - Muestra puesta al horno a una temperatura de $200\text{ }^{\circ}\text{C}$, en un tiempo estimado de 18 a 24 horas.....	95
FIGURA 9- Ensayo para obtener el peso específico del material.....	96
FIGURA 10 - Ensayo para obtener la granulometría del material.	96
FIGURA 11 - Análisis granulométrico.	97
FIGURA 12 - Curva Granulométrica	97

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 – Operacionalización de las Variables.....	24
Tabla 2 - Cuadro de analisis granulometrico por tamizado.....	36
Tabla 3 - Rugosidad del cauce empleando ecuación 5-12.....	65
Tabla 4 - Rugosidad de la trocha empleando ecuación 5-12	65
Tabla 5 - Rugosidad del sector vivienda empleando ecuación 5-12	65

I. INTRODUCCIÓN

1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. Realidad Problemática

Desde que la humanidad apareció en el planeta, empezó la gran odisea a través del mundo como un ser nómada, entonces se vio obligado a cruzar grandes y extensos cauces de ríos, para lo cual empleaba diferentes técnicas desarrolladas de manera empírica e instintiva, entre las cuales la más común era formar una fila y tomarse todos de la mano para no perderse en las caudalosas aguas, sin embargo con el paso de los siglos el ser humano agudizó su ingenio, y vio que era más seguro colocar rocas de gran tamaño en el cauce que atravesando de lado a lado la sección de tal forma que se podía pasar por encima de éstas, la condición era que debían estar separadas unas de otras para que el agua pueda pasar entre ellas sin ser arrastradas por la corriente; sin embargo no es hasta que el ser humano se establece como sedentario que empieza construir los primeros puentes de la historia, entre los colgantes que empleaban cuerdas, hasta los de pilares que consistían en grandes rocas emplazadas en los cauces con troncos de árboles encima que servían de soporte o tablero para transitar a través de ellos, unos de los primeros puentes de la historia cuya estructura se basaba en pilares o rocas de gran tamaño apiladas unas encima de otras, fue el puente Arkádico, localizado en Argólida, en el Peloponeso.



FIGURA 1- Puente Arkadico.

Fuente: (Martinez Cutillas, 2011 pag. 4)

Como se puede apreciar en la imagen superior, este puente está estructurado en forma de arco, de tal manera que la escorrentía o cauce pase por un agujero de regular magnitud en el centro tangente al cauce, no obstante, si existe hasta el día de hoy es porque probablemente se ha iterado su construcción hasta que se ha encontrado la manera adecuada en la cual pueda interactuar con el cauce sin ser arrastrado por éste.

En aquellas épocas la construcción de cualquier estructura podría realizarse sin escatimar recursos, ya que no había fórmulas matemáticas ni consideraciones hidráulicas, por lo que los gobernantes y soberanos de aquellas épocas destinaban personal obrero y recursos de manera constante en este tipo de obras hasta que la construcción quedaba de manera permanente.

Años más tarde aparecieron las civilizaciones en el ahora llamado viejo mundo, una de las más relevantes y con grandes aportaciones en el desarrollo de infraestructura en el campo de la hidráulica y la construcción en general fue la cultura romana, el desarrollo de este imperio hizo importantes aportaciones en el manejo de estructuras hidráulicas, una de ellas es el puente de Alcántara.



FIGURA 2- Puente Romano Alcántara.
Fuente: (Pizzo, 2016 pág. 8)

El cuál consta de 06 pilares continuos, de los cuales 03 se encuentran sumergidos en el lecho del cauce que no han arrastrados por el caudal que transita de manera constante a través del rio Tajo, el puente tiene un largo de aproximadamente de 800 metros lineales, aunque aparentemente no se haya tenido ningún tipo de criterio para su diseño, el hecho de que el puente permanezca hasta nuestros días refleja el trabajo de los ingenieros y arquitectos de la época.

Queda claro que la idea de pasar de un lado hacia otro de un cauce ha quedado reflejada por la aplicación de diferentes técnicas constructivas, muchas de ellas consistían en probar una y otra vez con dimensiones y características diferentes hasta encontrar una que se acople o acomode a las características de la zona de emplazamiento.



FIGURA 3- Erosión y socavación en Pilares - Puente Alcántara.

Fuente: (Bardales Salazar, 2013 pág. 62)

En el puente se empezaron a mostrar los efectos de la erosión y socavación, que se ha ido haciendo notorio con el paso de los siglos, puesto que en la época no existían métodos avanzados para la creación de material ligante que unía a los bloques uno a uno formando los gigantescos pilares, sin embargo no se perdió la estabilidad del pilar y el puente siguió en operación, en lo que respecta, se iniciaron procesos para la restauración y reparación de las zonas afectadas en los pilares.

Sin embargo no fue hasta el siglo XVIII, que se desarrollaron de manera experimental construcciones con la finalidad de investigar el comportamiento hidráulico y la interacción de los puentes con el lecho de los ríos, de manera que se plantearon diferentes tipologías que se plasmaron en hojas de cálculo para definir las primeras fórmulas que harían reflejo del nacimiento de la hidráulica como ciencia, uno de los pioneros fue Henry de Pitot que nació en el suroeste de Francia y realizó investigaciones sobre la hidráulica de puentes, para finalmente llegar a diseñar y materializar sus ideas en diferentes ocasiones.

Inclusive desarrolló una máquina para medir la velocidad del flujo en el agua de los ríos para lo cual dijo: “La idea de esta máquina es tan simple y natural que en el momento en que la concebí corrí inmediatamente al río para hacer el primer experimento con un tubo de vidrio y resultó confirmada completamente mi suposición. Después de este primer experimento yo no podía imaginar que algo tan simple y a la vez tan útil podría escapar de tanta gente capacitada que han escrito y trabajado en el movimiento del agua” (Riaño Valle, 2016, pág. 115)



FIGURA 4 - Puente en Paucartambo - Cusco.

Fuente: (Bardales Salazar, 2013 pág. 62)

En el Perú, también se desarrollaron construcciones de puentes a base de piedra, sin embargo, han sido construidos a mediados del siglo XVI y suponemos que, a base de criterio empírico e iterativo, puesto que no existe un trazo o plano que demuestre la aplicación de ingeniería en su construcción, mucho menos en la evaluación de su interacción con el caudal del lecho del río y su sustente su emplazamiento.



FIGURA 5 - Puente Inca - Huarautambo, Yanahuanca, Pasco.
Fuente: (Bardales Salazar, 2013 pág. 72)

La metodología de construcción de puentes a base de unidades de piedra con bóvedas y arcos en el Perú fue introducida por los españoles cuando éstos llegaron al Perú en el siglo XVI.

Cabe recalcar que, al ser una técnica extranjera y no oriunda del Perú antiguo, pues no se le ha prestado la importancia debida, aunque hay que tener en cuenta que nuestros antepasados han puesto mucho de su esfuerzo y dedicación en su diseño y construcción lo cual los hace parte de nuestro patrimonio cultural y de nuestra historia.

Nuestra preocupación yace en nuestros días, la falta de investigación a fondo sobre la socavación de los pilares en los puentes se ha convertido en unos de los principales problemas que aqueja a numerosos proyectos ya ejecutados, quienes en su mayoría han sido idealizados bajo los parámetros que establece el manual de hidrología, hidráulica y drenaje.

De este manual se rescata: “Se recomienda un período de retorno T de 500 años para el cálculo de socavación” (Ministerio de Transportes y comunicaciones, 2012, pág. 25), lo cual mediante el método de Lischtván y Lebediev el cual no se establece en el manual, se emplea a criterio del proyectista.

Sin embargo, la socavación determinada mediante este método requiere del empleo de diferentes fórmulas empíricas y además éstas a su vez están en función al tipo de suelo predominante según la estratigrafía del lecho del río

La importancia de un estudio sobre los efectos de la erosión y socavación frente a cargas de agua provenientes de máximas avenidas radica en que dicho estudio además de realizarse con mucho criterio, teniendo en cuenta las condiciones hidrodinámicas desarrolladas en el entorno en el que se desempeña la estructura, se debe evaluar mediante la recreación de todas estas condiciones mediante una maqueta en escala adecuada o en todo caso el planteamiento de un modelo numérico tridimensional que nos permita no solamente evaluar los resultados, si no también visualizarlos y esto a su vez ayude a tomar decisiones que establecerán una solución permanente al problema que se descubre al realizar la simulación.



FIGURA 6 - Esquema de ubicación - La libertad

Fuente: Own Work – Locator Image Maps

Nos trasladamos al departamento de la libertad, lugar en donde se encuentra el problema que merece nuestra atención y preocupación por tratarse su localización en la intersección de una vía principal que recorre todo el país de norte a sur la cual es la panamericana, el puente del rio Moche.

El departamento de la libertad está ubicado en la parte Nor Occidental del Perú, para ser exactos en la costa norte del país, la cual colinda por el sur con el departamento de Ancash, por el norte con el departamento de Lambayeque, por el este con el departamento de Cajamarca y por el oeste con el océano pacífico.



FIGURA 7 - Esquema de ubicación – Provincia de Trujillo

Fuente: Own Work – Locator Image Maps

La provincia de Trujillo se encuentra ubicada en la parte central, occidental del departamento de La Libertad, limitado por el norte con la Provincia de Ascope, por el sur con la provincia de Virú, por el este con la Provincia de Otuzco y Julcán, y finalmente por el este se encuentra limitada por el océano pacífico.



FIGURA 8 - Esquema de ubicación – Distrito de Moche

Fuente: Google Maps

El distrito de Moche, el cual se encuentra ubicado en la parte sur Oriental de la Provincia de Trujillo, que a su vez colinda por el norte con el distrito de Trujillo y el distrito de Laredo, por el sur con el distrito de Salaverry y el océano pacífico, Por el este también con el distrito de Laredo y finalmente por el Oeste con el Distrito de Vico Larco Herrera y el océano pacífico.



FIGURA 9 - Esquema de ubicación – Puente Moche

Fuente: Google Earth

Finalmente tenemos el esquema de ubicación del puente del rio moche, el cual forma parte de la carretera Panamericana Norte, una de las vías más importantes del país.



FIGURA 10 - Esquema de ubicación – Puente Moche

Fuente: Google Earth – Imagen 18-11-2018

Empezamos describiendo el estado actual del cauce desde el punto de vista satelital, como se puede apreciar en la vista más actual el cauce se encuentra parcialmente lleno y se ve que partes de él se encuentran con acumulación de sedimentos producto del arrastre de fondo.



FIGURA11 - Esquema de ubicación – Puente Moche

Fuente: Google Earth – Imagen 18-09-2018

Sin embargo, si revisamos las imágenes satelitales correspondientes al mes de septiembre de 2018, encontramos que el cauce se encuentra casi lleno en su totalidad lo que nos da una idea de lo impredecible y nada constante que es el caudal que circunda por el cauce del rio moche.



FIGURA 12 - Fotografía en perspectiva – Puente Moche

Fuente: Autoría Propia

“El puente del rio moche” lo denominamos así pues es una sola vía que forma parte de la avenida panamericana Norte, sin embargo, se encuentra formado por dos estructuras similares, es decir dos (02) puentes que están trabajando a la misma vez.



FIGURA 13 - Fotografía de Sub estructura – Puente Moche

Fuente: Autoría Propia

Como se mencionó anteriormente, en el lugar existen dos estructuras trabajando conjuntamente en lo que llamamos “Puente del rio moche”, esto formó parte de la ampliación que se le hizo al puente por motivo de crecimiento y ensanchamiento de la vía panamericana lo cual corresponde a otro tema a tratar. A estos puentes los cuales uno es de pilares esbeltos y el otro de pilares a manera de muros de concreto armado a los cuales denominaremos Puente 01 y puente 02 respectivamente.



FIGURA 14 - Fotografía del pilar del puente – Puente Moche

Fuente: Autoría Propia

Nuestra preocupación recae sobre los pilares de los puentes, especialmente los mostrados en la fotografía superior; tenemos entendido que todo proyecto de ingeniería se elabora en función a cálculos matemáticos y empleo de fórmulas empíricas, sin embargo, no se tiene cuidado en elaborar un estudio dedicado únicamente a la erosión y socavación del material del lecho del río que rodea los pilares, lo cual puede llevar a la falla de la estructura del puente, puesto que eliminará los empotramientos de los pilares y esto le llevará al posterior colapso.

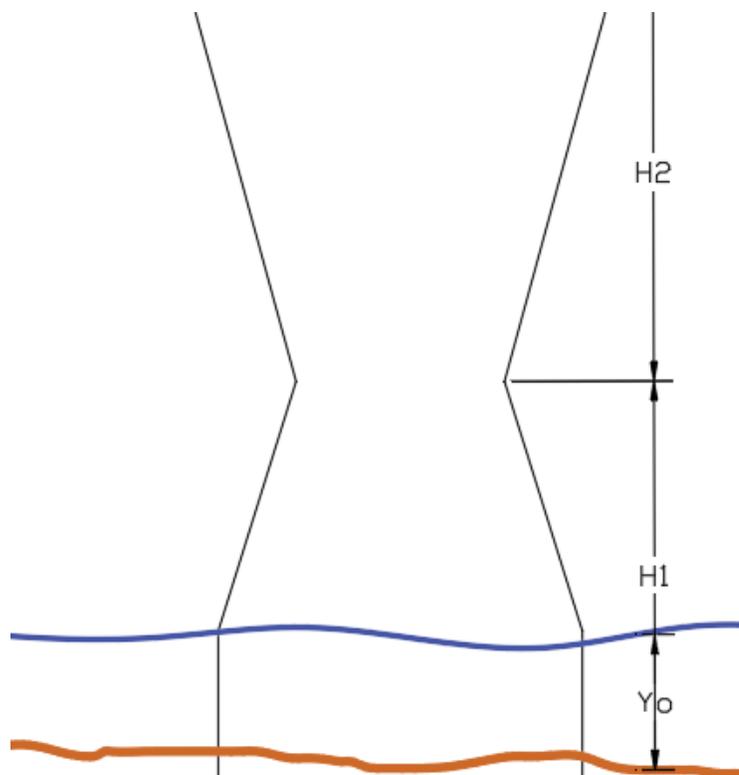


FIGURA 15- Esquema del pilar del puente – Puente Moche

Fuente: Autoría Propia

El lecho del río en el cual se emplazan los pilares de un puente siempre será vulnerable a la erosión producto del paso del agua, y posteriormente a la socavación con el paso del tiempo, por lo que en los mantenimientos rutinarios de puentes normalmente se sugiere la partida denominada

comprobación de socavación en pilares, que consiste en revisar que tanto se han erosionado en el lecho y cubrir esa falta de material con otro extraído de canteras cercanas, pero no siempre se considera, y muchas veces se omite por falta de información ya que se confía en que los cálculos están bien elaborados, cosa que la naturaleza nos ha demostrado que es erróneo en numerosas ocasiones, sin embargo esta socavación no es más que algo contemplado de manera superflua, puesto que no se sabe el a ciencia cierta el comportamiento del lecho frente a máximas avenidas, por lo que nosotros consideramos que esto se debe evaluar y contemplar dentro de la elaboración de futuros proyectos similares, incluso se puede contemplar en proyectos ya elaborados y ejecutados para así verificarlos y en caso sean vulnerables pensar en una solución permanente.



FIGURA 16 - Fotografía en perspectiva– Pilares del Puente Moche
Fuente: Autoría Propia

Actualmente está circundando caudal en el cauce del río Moche, y tenemos como antecedente lo sucedido en el río Virú en el año 2017, que, con la máxima avenida en el cauce, el puente fue arrastrado y arrancado del emplazamiento para el cual fue idealizado, esta avenida suscitada fue una de las peores que azotó la región de la Libertad en los últimos 20 años, todo esto quedó demostrado tras observar los estragos que dejó y la destrucción que causó su paso, dato que no necesita referencia ya que todos los noticieros de esa fecha hablan de ello y todo el pueblo liberteño fue testigo de lo ocurrido.

En vista a lo contemplado en el desarrollo del fenómeno del Niño de los meses de febrero – abril de 2017, creemos relevante establecer criterios y metodologías para el cálculo de socavación mediante la realización de modelos numéricos computacionales de dinámica de fluidos y recreación del entorno descrito en el cual se desempeñan las estructuras de los puentes.

1.2. Formulación del problema

1.2.1. Problema general

- ¿Cómo influye el comportamiento hidrodinámico del puente del río Moche en la evaluación frente a los efectos de erosión y socavación en los pilares?

1.3. Objetivos de la investigación

1.3.1. Objetivo general

- Evaluar el comportamiento hidrodinámico del puente del río Moche frente a los efectos de erosión y socavación en los pilares

1.3.2. Objetivos específicos

- Realizar el levantamiento topográfico de la zona de intervención
- Realizar el estudio de mecánica de suelos y hallar los parámetros necesarios para la recreación de las características del cauce en el modelo numérico computacional
- Tomar las medidas de la sub estructura (pilares) de los puentes 01 y 02.

- Estimar el caudal circundante a través del cauce del río moche para un periodo de retorno de 500 años.
- Construir un modelo numérico de dinámica de fluidos computacional y recrear las condiciones del entorno en estudio.
- Evaluar los parámetros hidrodinámicos del sector de los puentes del río moche.
- Establecer las características de erosión y socavación en el lecho del río que compromete a los pilares de ambos puentes.

1.4. Justificación del estudio

- Puesto que existe la necesidad de conocer la respuesta del cauce frente al emplazamiento de una estructura en él y cómo ésta es o no vulnerable a la socavación producto del paso del caudal circundante entonces yace la necesidad de conocer la profundidad que tendrá dicha socavación, es por esto que consideramos imprescindible la realización de un modelo matemático mediante el empleo de dinámica de fluidos computacional para así conocer, y observar de manera directa las consecuencias de una avenida a través del cauce y el comportamiento de los pilares emplazados con respecto al material que conforma el lecho del río, esto nos ayudará a tomar decisiones que prevengan o retarden los efectos de erosión y socavación del cauce del lecho del río en el sector propuesto, en este caso, se trata del puente del río moche, lo cual requerirá de la toma de medidas de la estructura, levantamiento de topografía y estudio de mecánica de suelos para su respectiva representación mediante un modelo numérico tridimensional.

II. MARCO DE REFERENCIA

2.1. Antecedentes del estudio

- Tesis: (Bedoya Cristancho, 2015): “Modelación numérica de la socavación local en los estribos del puente sobre el Río Sunuba según las características hidrodinámicas de la zona” El objetivo de esta investigación fue evaluar mediante un modelo numérico el fenómeno de socavación local en los estribos del puente sobre el Río Sunuba teniendo en cuenta las características hidrodinámicas de la zona, los resultados obtenidos para el cálculo de la profundidad de socavación bajo el estribo derecho del puente sobre el río Sunuba no se pueden comparar, debido a que cada una de las metodologías utilizadas se basa en diferentes principios.
- Tesis: (Elbio Felipe, 2016) “Socavación producida por el río Huallaga al puente colpa alta en la provincia de Huánuco, utilizando los métodos de artamanov, straub y maza, en el HEC-RAS” El objetivo de este tesis fue Conocer los resultados obtenidos en los cálculos de socavación transversal, general y de estribos del río Huallaga en el puente Colpa Alta en la provincia Huánuco en el año 2015; aplicando los Métodos de Artamonov, Straub y Maza utilizando los parámetros hidráulicos del programa HEC-RAS
- Tesis: (Enciso Navarro, 2015) “Estudio Hidráulico y Estimación de Socavación en el Puente Interconexión Muyurina- Ayacucho” Esta tesis tuvo como objetivo Fijar y Desarrollar los fundamentos para la estimación de socavación máxima, estimada a partir del desarrollo de modelos determinísticos para el puente Muyurina para lo cual al determinar y comparar los resultados de la sección del puente con el caudal del "Expediente Técnico", presenta una inundación y por lo tanto el sobre dimensionamiento del caudal que es de 460m³/s que se muestra en la figura 3.17, A comparación del resultado del presente estudio que presenta un valor acorde a las sección del puente la cual se muestra en el la figura 3.18.

- Tesis: (Cotrina Cano & Henrandez Genovez, 2017) “Estudio de la socavación del proyecto del puente el inca ubicado en el rio Chorobal del distrito de chao mediante simulación numérica unidimensional” Esta tesis tuvo como objetivo realizar el estudio de la socavación del proyecto del puente el Inca ubicado en el rio Chorobal del distrito de chao mediante simulación numérica unidimensional para lo cual se determinaron las profundidades de socavación de 1.88 m como general y local 7.41 y 7.93 para cada estribo y en los pilares de 5.32 y 5.89 respectivamente.

2.2. Marco Teórico

2.2.1. Transporte y arrastre de sedimentos

La erosión generalizada de un tramo de río, producto del incremento de la capacidad de transporte de la corriente durante el pasaje de una crecida prolongada, puede ser determinante de la puesta en riesgo, y aun del colapso, de estructuras fluviales tales como puentes, defensas de márgenes, conductos enterrados, etcétera. En aquellas circunstancias en las que se requiera una determinación expeditiva, o en las que falte la información apropiada para el uso de modelos matemáticos a fondo móvil, resulta aconsejable el uso de formulaciones semiempíricas que evalúen el estado final de equilibrio de una sección representativa de un tramo de río para determinadas condiciones de la corriente. La aplicabilidad de una u otra fórmula de cálculo se sustenta en el grado de validación de que hayan sido objeto, y en un conocimiento apropiado de los fundamentos teóricos y experimentales que les dieron origen (Juárez Badillo & Rico Rodriguez, 1974)

2.2.2. Método para la socavación según Lischtvan y Lebediev

El criterio propuesto por Lischtvan y Lebediev para la determinación de las profundidades de erosión general establece que el mecanismo de erosión se detendrá cuando la velocidad del escurrimiento (V_r) se reduzca hasta un punto tal en que iguale a la velocidad mínima o de equilibrio (U_e). La hipótesis fundamental sobre la cual se funda el método establece que la distribución

transversal de caudales de una sección se mantiene invariable durante todo el desarrollo del proceso erosivo. (Franco & Scacchi, 2001)

La velocidad media de la corriente en función de la profundidad, para cada punto de la sección, es considerada por esta teoría a partir de la ecuación de Manning, del siguiente modo:

$$V_{ri} = \alpha * \frac{h_{oi}^{5/3}}{h_{si}} \quad \alpha = \frac{Qd}{h_m^{5/3} * B_e} \quad (1)$$

donde:

V_{ri} = velocidad media de la corriente luego de la erosión en la vertical i de la sección (m/s).

h_{oi} = profundidad antes de la erosión en la vertical i de la sección (m).

h_{si} = profundidad luego de la erosión en la vertical i de la sección (m)

Qd = caudal de diseño total (m³/s).

h_m = profundidad media de la sección antes de la erosión (m)

B_e = ancho superficial efectivo asociado con Qd (m).

Si se considera que la ecuación se obtiene de igualar el caudal en una subárea perteneciente a una sección transversal, con ancho altura inicial h_{si} y final h_{ai} mediante el empleo de las ecuaciones de cantidad de movimiento y de continuidad, la velocidad V_{ri} puede expresarse entonces de modo más general:

$$V_{ri} = \frac{q_i}{h_{si}} \quad (2)$$

donde:

q_i : caudal por unidad de ancho asociado con la franja de ancho B_i

Para evaluar la velocidad mínima o de equilibrio, esta teoría propone una expresión que depende fundamentalmente del diámetro de las partículas que

componen el fondo, la que fue propuesta por Maza Álvarez (Franco & Scacchi, 2001) del siguiente modo:

$$U_e = 4.7 * \beta * h_{si} \left[\frac{0.322}{d^{0.03}} \right] * d^{0.28} \quad (\text{unidades métricas}) \quad (3)$$

donde:

d = diámetro característico de las partículas que componen el fondo (m).

B= coeficiente en función del periodo de retorno (T), asociado con el caudal de diseño, cuya expresión fue expuesta para T entre y años como:

$$B=0.8416+0.03342 \ln T.$$

Debido a que el exponente que afecta a la profundidad h, en la ecuación de la velocidad de equilibrio experimenta variaciones poco significativas para el rango de tamaños de sedimentos de arenas finas y medias (0.19 mm<d<1mm), en adelante será considerado con un valor único e igual a 0.41 (Moreno, Fuentes, & López, 1998) Por lo tanto, la expresión de la velocidad de equilibrio a que se hace referencia será:

$$U_e = 4.7 * \beta * h_{si}^{0.41} * d^{0.28} \quad (\text{unidades métricas}) \quad (4)$$

De igualar Vri de la ecuación con la U, de la ecuación se tiene h, en la forma que fuera presentado originalmente por el método (Juárez Badillo & Rico Rodriguez, 1974)

$$h_s = \left[\frac{\alpha * h_{oi}^{5/3}}{4.7 * d^{0.28}} \right]^{0.71} \quad (\text{unidades métricas}) \quad (5)$$

En la ecuación se ha considerado B=1 el cual se corresponde con una recurrencia de años aproximadamente.

Debe quedar claro que el coeficiente “a” representa la conductancia de la sección de escurrimiento, consecuencia de la pendiente de energía y coeficiente de rugosidad asociados con la misma, la que en la metodología es considerada constante para toda la sección transversal. Por lo tanto, la expresión de Vri propuesta lleva implícita una distribución de caudales en la sección que da más peso a las zonas inicialmente más profundas, puesto que directamente depende de esta situación se traduce en el hecho de que al aplicar la ecuación las secciones producto del cálculo copian la forma de la sección original.

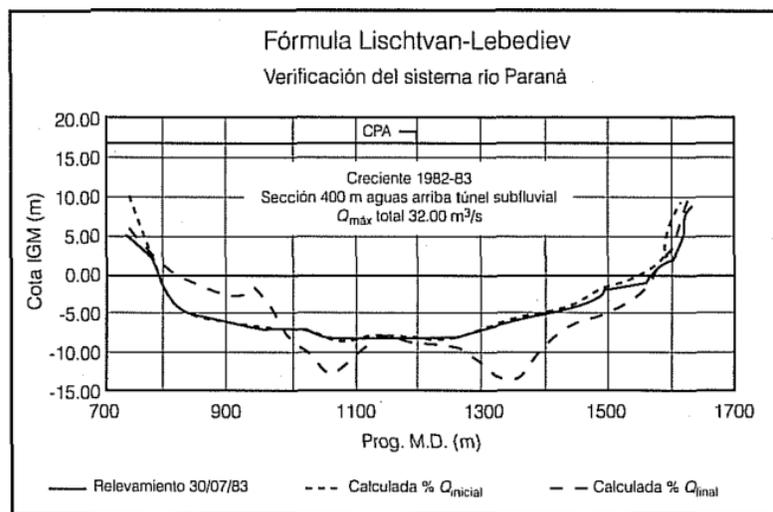


Gráfico 01 –Verificación de la fórmula de Lischtvan Lebediev– Río Paraná

Fuente: (Franco & Scacchi, 2001)

En la ilustración se presenta una verificación de la metodología de Lischtvan y Lebediev en una sección del tramo medio del río Paraná, Argentina, para la crecida extraordinaria de De la ilustración se desprende la diferencia encontrada en las secciones calculadas, ya sea que se considere la distribución de caudales medidos previamente al inicio de la crecida o durante su desarrollo, presentando esta última una notable concordancia con la sección relevada. Ello ratifica las expresiones del párrafo anterior respecto de la importancia de poder conocer o estimar correctamente la distribución de caudales que se verificaría durante la crecida considerada para el cálculo (Franco & Scacchi, 2001).

2.3. Marco Conceptual

- Sedimentos: Material de fondo o suspensión acarreado por el caudal circundante en una determinada sección del cauce.
- Presión: El agua ejerce un empuje o presión sobre la pared del tubo o depósito que la contiene, y se expresa en kilogramos por centímetro cuadrado - atmósferas - metros por columna de agua. (Usal, 2012)
- Área hidráulica, A , se refiere siempre a la de la sección transversal ocupada por el flujo en un canal natural o artificial, m^2 . (Estrada Gutierrez, 2014)
- Perímetro mojado, P , es la longitud de la línea de contacto entre el agua y la superficie mojada del canal, m .
- Profundidad del flujo o Tirante hidráulico, y , es la distancia vertical a la plantilla, medida desde la superficie libre del agua al punto más bajo de la sección transversal. Ocasionalmente se le confunde con el tirante normal de la sección (d), el cual se mide en forma perpendicular al fondo del canal. Cuando el ángulo θ , que forma la pendiente longitudinal del canal con respecto al plano horizontal de referencia es muy pequeño, el tirante hidráulico y se puede considerar igual al tirante normal, d , m . La relación entre ambos tirantes es: $d=y\cos\sigma$ (Estrada Gutierrez, 2014)
- Ancho de la superficie libre o Espejo, T , es el ancho de la sección del canal, medido al nivel de la superficie libre, m . (Estrada Gutierrez, 2014)
Profundidad hidráulica o Tirante medio, D , es la relación entre el área hidráulica y el ancho de la superficie libre, m . (Estrada Gutierrez, 2014)

2.4. Hipótesis

2.4.1. Hipótesis general

- El comportamiento hidrodinámico del puente del río Moche influye en la evaluación frente a los efectos de erosión y socavación en los pilares dando como resultado una socavación no uniforme de hasta 1.2 m

2.5. Variables: Operacionalización de las variables

VARIABLE	DEFINICION CONCEPTUAL	DIMENSIONES	INDICADORES	UNIDAD DE MEDIDA
Comportamiento Hidrodinámico del Puente del río Moche	Dinámica de Fluidos computacional mediante el empleo de modelos matemáticos	Características Hidrodinámicas	Tirante	m
			Espejo	m
			Velocidad	m/s
			Caudal	m ³ /s
Evaluación frente a los efectos de Erosión y Socavación	Transporte de sedimentos de fondo	Carga de Sedimentos en el río	Beload Transport	m ² /s
			Erosión	m
			Socavación	m
Caudal de Diseño	Obtención del caudal	Exactitud	Cálculo del caudal	m ³
			Medición del caudal	m ³

TABLA 1 – Operacionalización de las variables

FUENTE: Auditoria propia

2.5.1. Variables dependientes:

Y1=Comportamiento hidrodinámico del puente del río Moche.

Y2=Evaluación frente a los efectos de erosión y socavación.

2.5.2. Variable dependiente:

X1=Caudal de diseño.

III. METODOLOGÍA

3.1. Tipo y nivel de investigación

3.1.1. Por el Propósito

Investigación Aplicada: Debido a que utiliza conocimientos adquiridos que dependen de los resultados y avances aplicados de un marco teórico.

3.1.2. Por la clase de medios utilizados para obtener los datos

Investigación de Campo: Se apoya en informaciones provenientes de entrevistas, noticieros e investigaciones, realizados para este estudio.

3.1.3. Por el nivel de conocimientos que se adquieren

Investigación Descriptiva y correlacional: Debido a que no altera la realidad solo la detalla y relaciona ambas variables.

3.2. Población y muestra

3.2.1. Población

- La población tomada para siguiente investigación son todos los puentes que abarcan el cauce del rio Moche.

3.2.2. Muestra

- La muestra de estudio es el puente del Rio Moche, ubicado en el Distrito de Moche, Provincia de Trujillo, departamento de La Libertad.

3.3. Técnicas e instrumentos de investigación

3.3.1. TECNICAS

- a) Topografía del área de intervención que consiste en la toma de datos de lo que conforma el relieve del terreno, representando mediante puntos ubicados de manera estratégica capaces de describir en conjunto las elevaciones y depresiones existentes en el sector de interés, todo ello se logrará mediante el empleo de estación total, teodolito azimutal, alfilerómetro o nivel de ingenieros.

- b) Estudio de mecánica de suelos, que consiste en la toma de muestras de 8.00 Kg, in situ del material que compone al cauce, lo cual posteriormente será llevado a laboratorio para determinar sus características físicas y mecánicas como granulometría, peso específico, entre otras.

- c) Levantamiento con distanciómetro, que consiste en tomar medidas de la estructura y sub estructura del puente, lo cual incluye los pilares, el gálibo, los estribos y las losas correspondientes a cada uno, todo ello nos servirá para crear un modelo tridimensional de manera digital asistida por ordenador y así representar dichos elementos mediante geometría sólida.

3.3.2. INSTRUMENTOS

- a) Estación Total
- b) Altimetro o nivel de ingenieros
- c) Distanciómetro digital
- d) Prisma o regla graduada.
- e) Wincha de mano
- f) Wincha topográfica de 50m.

3.3.2. PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS

- Para el procesamiento de la data topográfica emplearemos de primera mano el software Ms Excel, que es básicamente un programa de manejo de fórmulas matemáticas y archivos binarios, lo requerimos puesto que nos ayudará a concatenar la información proveniente de la estación total que estará en formato X; Y; Z y así poder trasladarla a AutoCAD CIVIL 3D, en donde realizaremos el análisis respectivo de la nube de puntos para la creación de la superficie de triangulación.

- Para el procesamiento de la data pluviométrica y estimación del caudal circundante bajo condiciones de máximas avenidas emplearemos igualmente el software Ms Excel con la finalidad de ordenar y hallar los parámetros requeridos, para posteriormente exportar la información y realizar el análisis de transformación de lluvia a esorrentía mediante la creación de un modelo matemático de lluvia HMS, para ello emplearemos el software HEC HMS
- Para el modelamiento numérico emplearemos un software con la capacidad de resolución de ecuaciones diferenciales en tres dimensiones.

IV. RESULTADOS

4.1. Análisis e interpretación de resultados

4.1.1. TOPOGRAFÍA DEL CAUCE

Se dio inicio a los estudios de topografía, resultado de ello se construyó la superficie requerida para el análisis y modelamiento hidráulico el cual es el objetivo principal de nuestra investigación, lo planteamos tomando 190 metros lineales aguas arriba del puente y 155 metros lineales aguas abajo, con un ancho marginal de 241 metros, lo cual también nos permitirá estimar las regiones con mayor tendencia a inundaciones debido al desbordamiento del cauce por máximas avenidas extraordinarias.

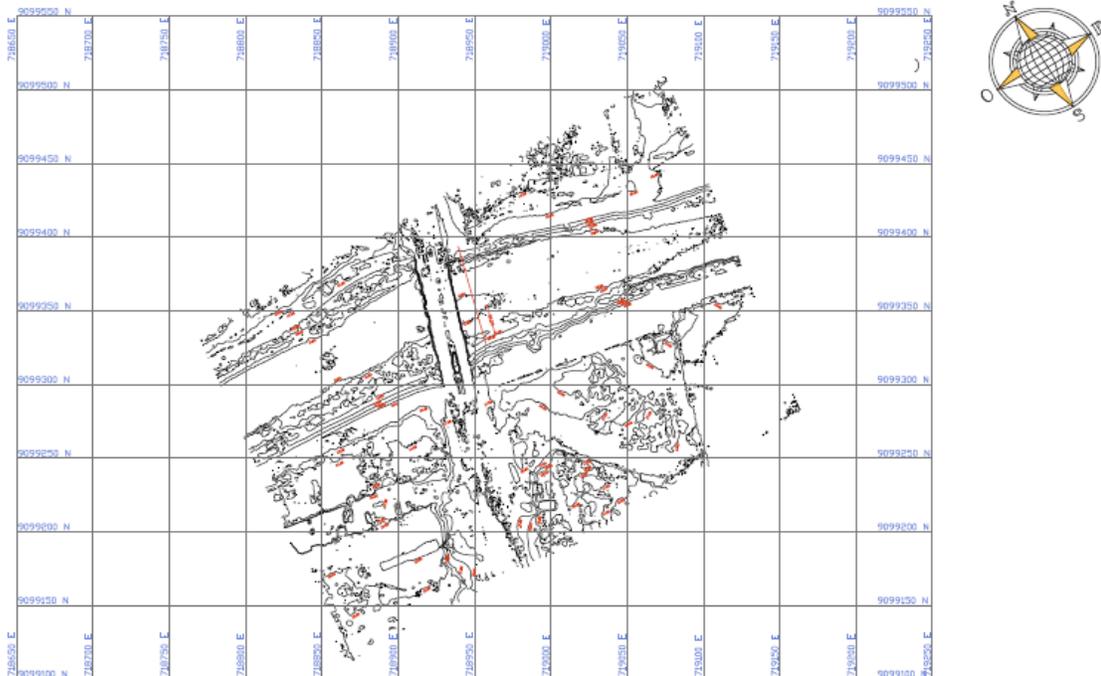


FIGURA 17 - Planta Topográfica

Fuente: Autoría Propia

De la topografía se puede observar que el terreno que contiene al cauce del río moche posee una orografía ondulada, con pendientes transversales de hasta 5%, casi imperceptibles en algunos puntos, las curvas de nivel están ubicadas a una equidistancia de 1.00 metro una de otras de manera vertical.

4.1.2. ESTUDIO DE MECÁNICA DE SUELOS



FIGURA 18 - Peso de la muestra

Fuente: Autoría Propia

Lo primero que hicimos fue establecer un muestreo y pesar la muestra requerida para elaborar el ensayo de mecánica de suelos, teniendo en consideración que la muestra debe tener un peso de 8.kg cada una.



FIGURA 19 - Llevar la muestra

Fuente: Autoría Propia

Una vez pesada y tarada la muestra, se procede a ingresar al horno a 200 C° donde permanecerá ahí durante 24 horas.



FIGURA 20 - Llevar la muestra Seca

Fuente: Autoría Propia

Posteriormente se pesa 1000 g del material para considerarlo como muestra en el análisis granulométrico, el cual consiste en pasar la muestra por diferentes tamices que comprenden desde el número 4 hasta el número 200.



FIGURA 21 - Tamizado de las muestras

Fuente: Autoría Propia

Después se colocan los tamices apilados uno encima de otro, de manera vertical de tal forma que el de mayor tamaño de malla va colocado en la parte superior y el más fino va hacia la parte inferior, de tal manera que en cada uno de los tamices se va reteniendo un porcentaje de la muestra y el resto sigue su camino hacia los tamices inferiores.



FIGURA 22- Peso de muestra retenida

Fuente: Autoría Propia

Cada una de las cantidades retenidas en los tamices se pesa para posteriormente tomar nota de cada una de ellas, esto se representará mediante una tabla de cantidades acumuladas y se fraccionará en porcentajes en función al peso total de la muestra tomada como referencia.



FIGURA 23 - Peso de muestra retenida

Fuente: Autoría Propia



FIGURA 24 - Ensayo para Peso específico

Fuente: Autoría Propia

Iniciamos el ensayo para el peso específico del material que hemos extraído, se hizo el muestreo respectivo mediante cuarteo del cual extraemos un total de 700 gramos.



FIGURA 25 – Peso de la muestra para peso específico

Fuente: Autoría Propia



FIGURA 26 – Ingreso de la muestra en el Picnómetro
Fuente: Autoría Propia

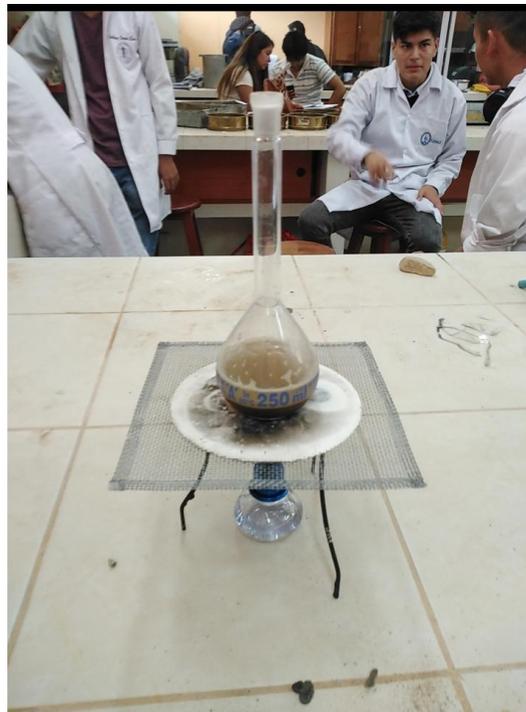


FIGURA 27 – Muestra puesta a fuego moderado por 20 minutos
Fuente: Autoría Propia

ANALISIS GRANULOMETRICO					
PROYECTO	TESIS		Fecha:		03/04/2019
MUESTRA:	1				
N TAMIZ"	FAC MALLA mm	PESO PARCIAL	% RETENIDO	% RETENIDO ACUMULADO	% PASANTE ACUMULADO
20	0.85	3.40	0.3400	0.3400	99.6600
30	0.6	3.40	0.3400	0.6800	99.3200
40	0.425	15.30	1.5300	2.2100	97.7900
50	0.3	92.20	9.2200	11.4300	88.5700
60	0.25	197.00	19.7000	31.1300	68.8700
80	0.18	427.30	42.7300	73.8600	26.1400
100	0.15	243.00	24.3000	98.1600	1.8400
200	0.075	14.20	1.4200	99.5800	0.4200
FONDO	0.0	4.20	0.4200	100.0000	0.0000
TOTAL		1000.00	100.0000		

Tabla 2 Cuadro de análisis granulométrico por tamizado.

Fuente: Autoría Propia

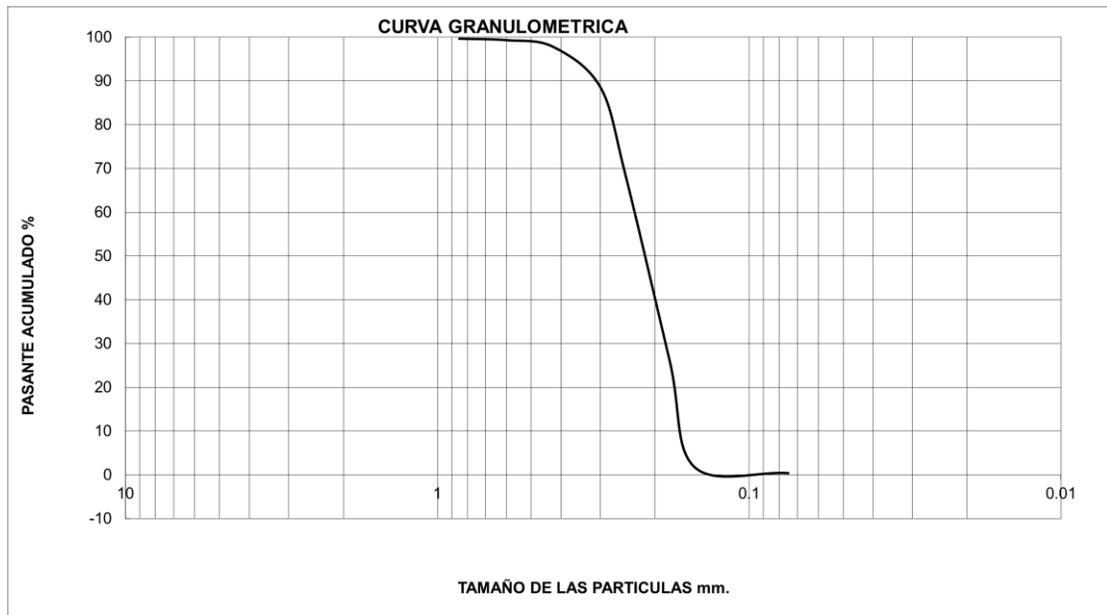


Gráfico 02 – Curva Granulométrica

Fuente: Autoría Propia

Resumen de los diámetros característicos

D10	10	0.016
D30	30	0.018
D50	50	0.023
D60	60	0.024

4.1.3. ESTUDIO DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA

En este apartado realizamos la estimación del caudal en el punto de interés correspondiente al inicio del sector aguas arriba del río, que es el límite ubicado al inicio, progresiva 0+000 de la topografía elaborada en el sector del puente del río moche, entre campiña alta y campiña baja, en este tópico evaluaremos desde el estudio de la cuenca correspondiente a la vertiente del río moche, hasta el análisis de tormenta y transformación de lluvia en escorrentía mediante el uso de Sistemas de Modelación hidrológica.

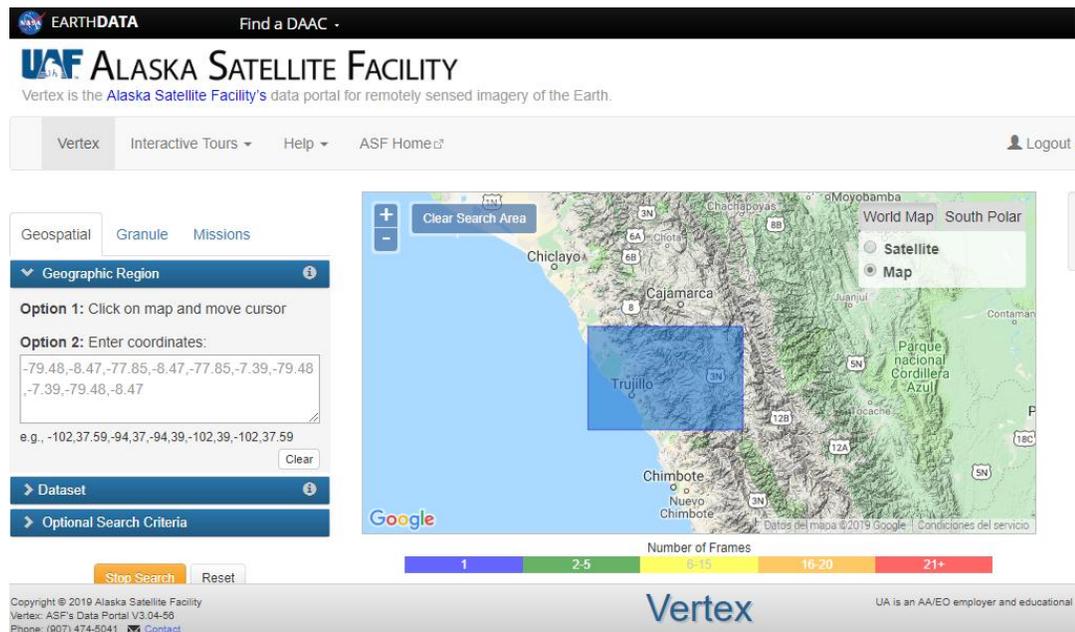


FIGURA 28 - Selección de la data satelital

Fuente: Autoría Propia

Procedemos a seleccionar la data satelital requerida para el análisis de la cuenca del río moche, esta información la extraemos de la base de datos del proyecto Geospacial Alaska Satellite Facility, y seleccionamos los satélites Sentinel 1A y 1B, que contienen información en formato raster de la topografía en el área seleccionada, la cual se encuentra en una resolución de 15x15m por recuadro.

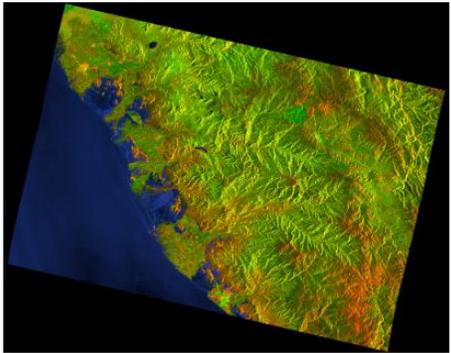
Granule Information
Data courtesy of ESA

Dataset: [Sentinel-1B](#)
Granule: [S1B_IW_RAW__0SDV_20190410T105344_20190410T105416_015743_01D8B7_C888](#)

Granule Details

- Acquisition Date: 2019-04-10
- Beam mode: IW
- Path: 142
- Frame: 615
- Ascending/Descending: Descending
- Polarization: VV+VH
- Absolute Orbit: 15743
- Frequency: C-Band

Products	Download
L1 Detected High-Res Dual-Pol (GRD-HD) (936.51 MB)	+ Queue Download
L2 Ocean (OCN) (6.23 MB)	+ Queue Download
L1 Single Look Complex (SLC) (4.19 GB)	+ Queue Download



Full Resolution Browse Image

FIGURA 29 - Información correspondiente al sector elegido
Fuente: Sentinel – Alaska Satellite Facility

En la ficha adjunta en la imagen superior se muestran diferentes datos correspondientes a la imagen raster las cuales están descritas en la parte lateral izquierda entre las cuales tenemos la fecha de captura de la imagen satelital: 10/04/2019; la cantidad de cuadros, la órbita, polarización, etc.

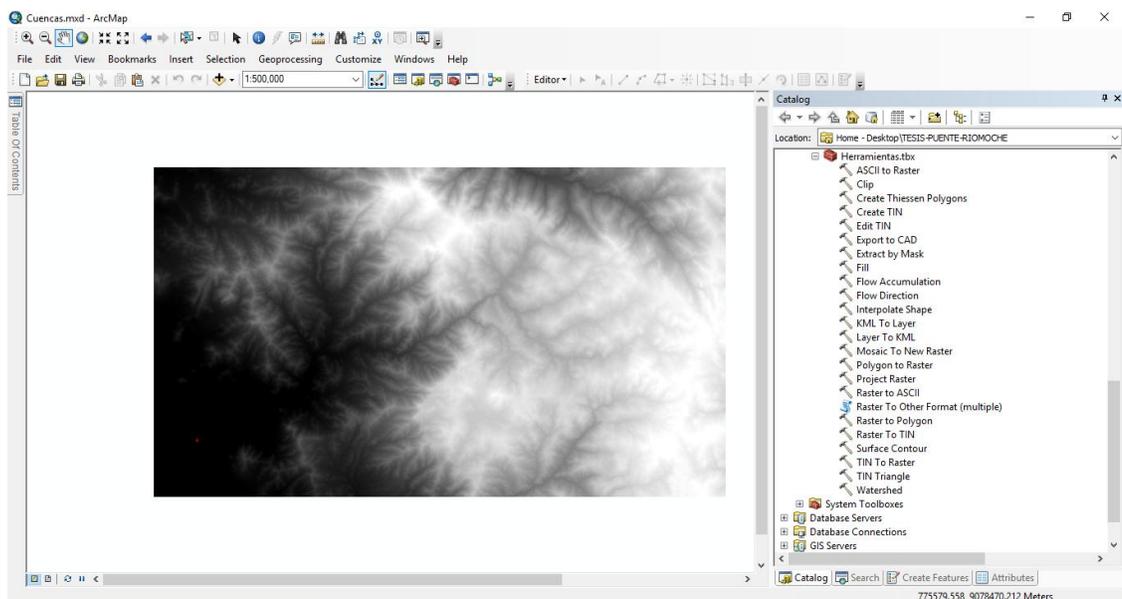
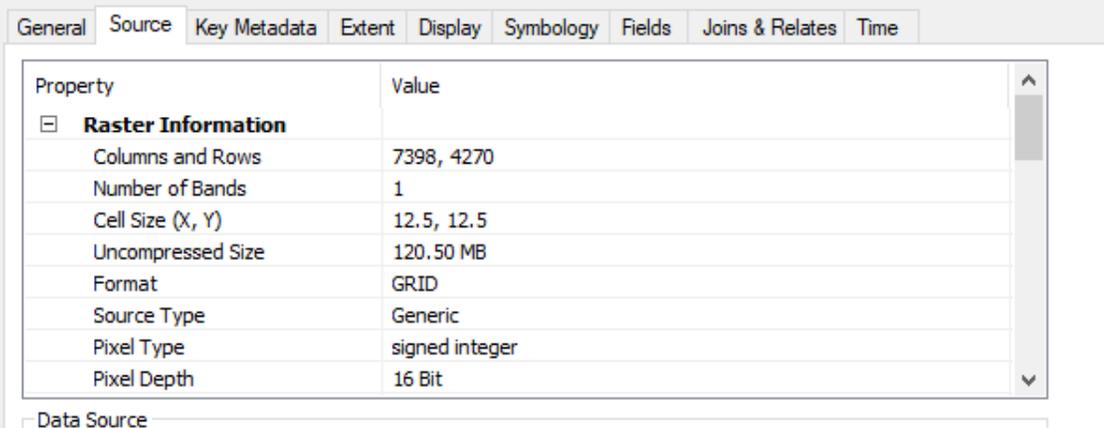


FIGURA 30 - Creación del raster mediante ArcGIS
Fuente: Autoría Propia

Mediante un software de manejo de sistemas de información geográfica, como en este caso es el ArcGIS, creamos una imagen rasterizada con la información descargada de la base de datos de Sentinel 1A y 1B, la cual nos servirá para delimitar el área ocupada por la cuenca del río moche.



Property	Value
Raster Information	
Columns and Rows	7398, 4270
Number of Bands	1
Cell Size (X, Y)	12.5, 12.5
Uncompressed Size	120.50 MB
Format	GRID
Source Type	Generic
Pixel Type	signed integer
Pixel Depth	16 Bit

FIGURA 31 - Creación del raster mediante ArcGIS

Fuente: Autoría Propia

Una vez creada el raster de la imagen satelital, se puede verificar que el raster cuya función es proporcionar una matriz de celdas con contenido de información topográfica tiene una resolución de cuadro de 12.5 x 12.5 m.

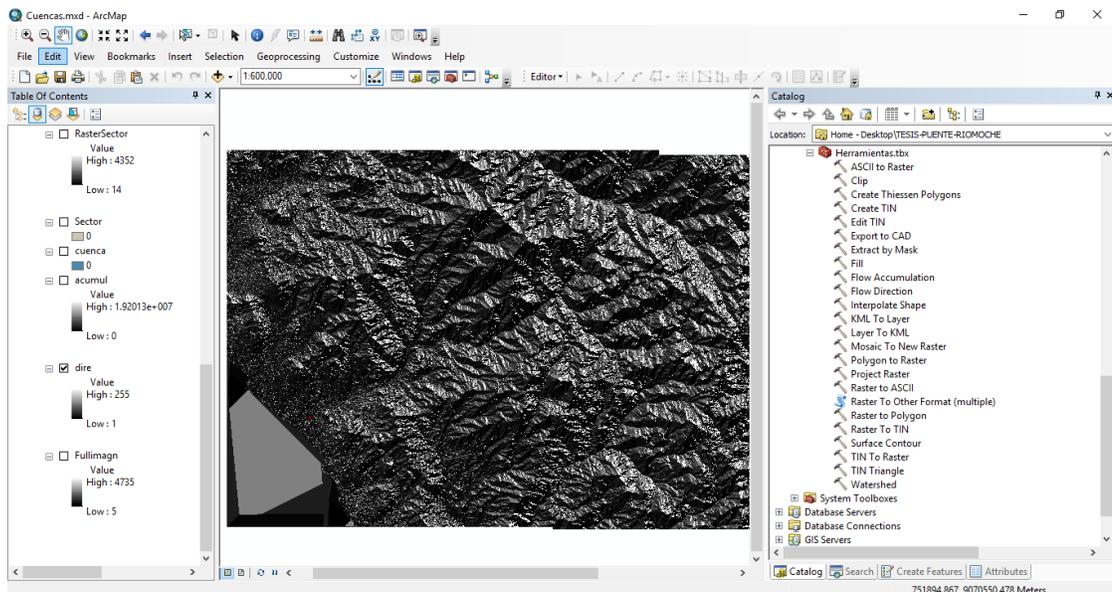


FIGURA 32 - Creación del raster de pendientes

Fuente: Autoría Propia

Después de la construcción del modelo digital de elevaciones, procedemos a crear un mapa de pendientes mediante la herramienta “Flow Direction” con la cual, el software mediante algoritmos definirá la dirección de desplazamiento del flujo de agua dentro de la cuenca.

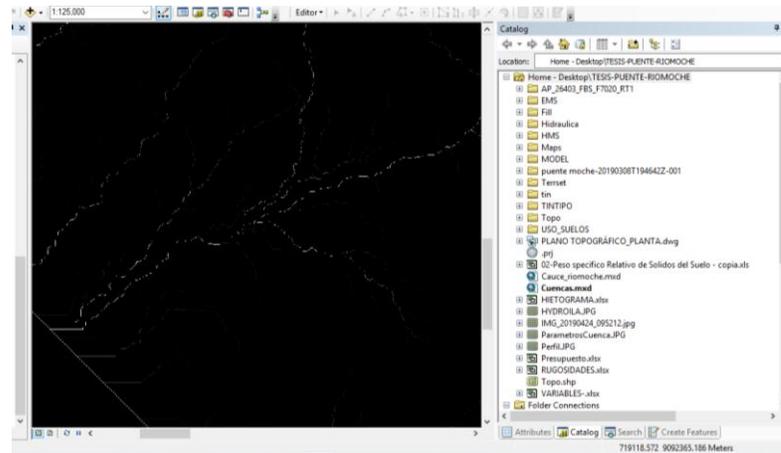


FIGURA 33 - Creación de la superficie de acumulación de flujo.

Fuente: Autoría Propia

Mediante el raster creado con anterioridad, correspondiente a la dirección de flujo en función a las pendientes del terreno en análisis, procedemos a crear una superficie también en formato raster, en la cual veremos la acumulación de flujo en el terreno que se encuentra en análisis, es decir las escorrentías que se forman dentro de la superficie topográfica.

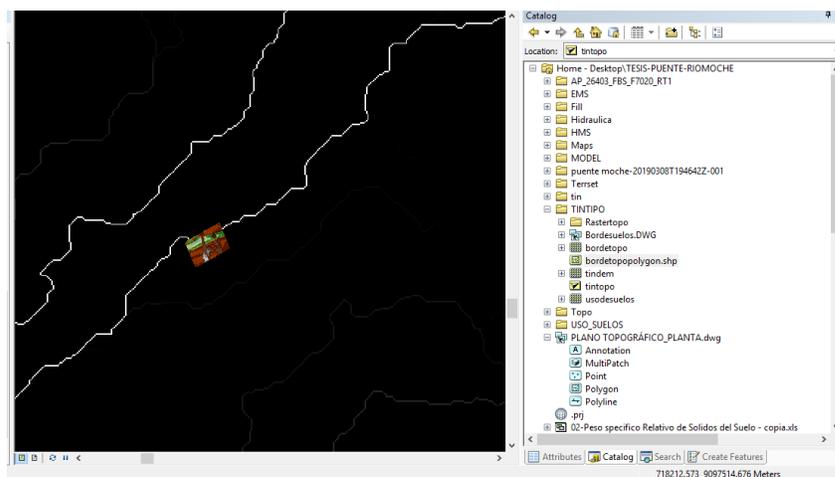


FIGURA 34 - Establecimiento del punto de interés.

Fuente: Autoría Propia

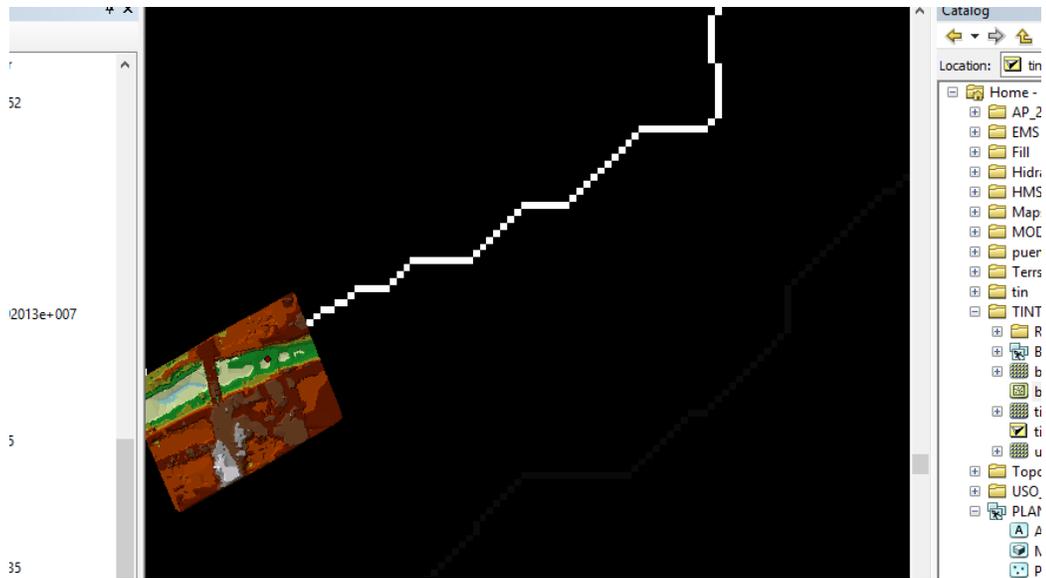


FIGURA 35 - Asignación del punto de entrega de caudal / salida de la cuenca.
Fuente: Autoría Propia

Utilizando como referencia la topografía del sector de emplazamiento del puente del río moche, establecemos el punto de interés o punto de salida de la cuenca para la entrega de caudal, lo que nos permitirá delimitar correctamente la cuenca para el estudio de cuencas y determinación de los parámetros morfométricos.

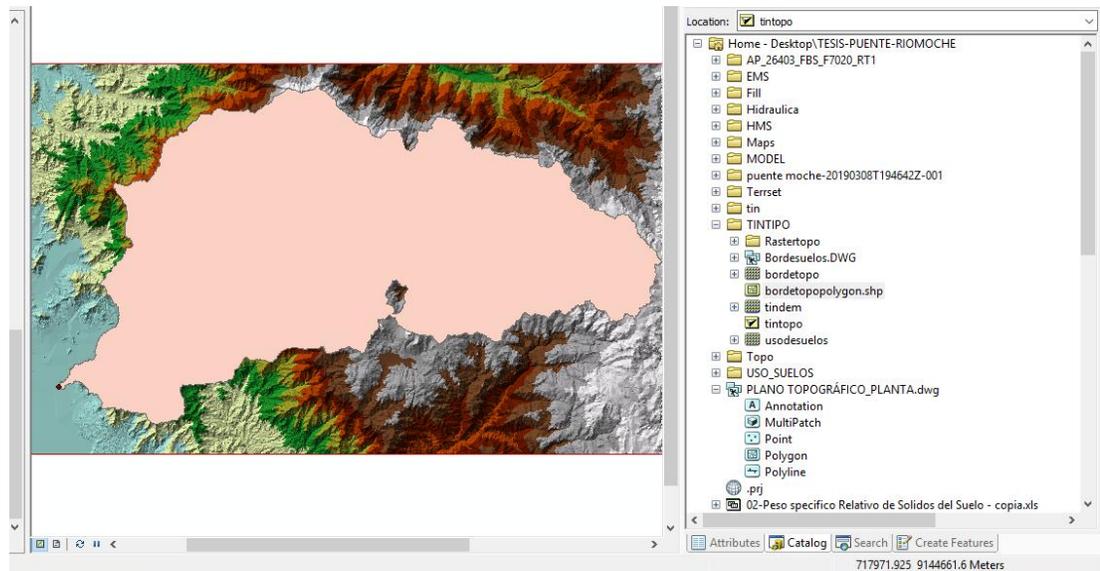


FIGURA 36 – Delimitación de la cuenca hidrográfica.
Fuente: Autoría Propia

Finalmente, con el punto de entrega, procedemos a delimitar la cuenca hidrográfica empleando el comando “watershed”, esta cuenca difiere de la cuenca del Rio moche, por ser delimitada para el punto de interés ubicado en el emplazamiento de puente que atraviesa el cauce del rio.

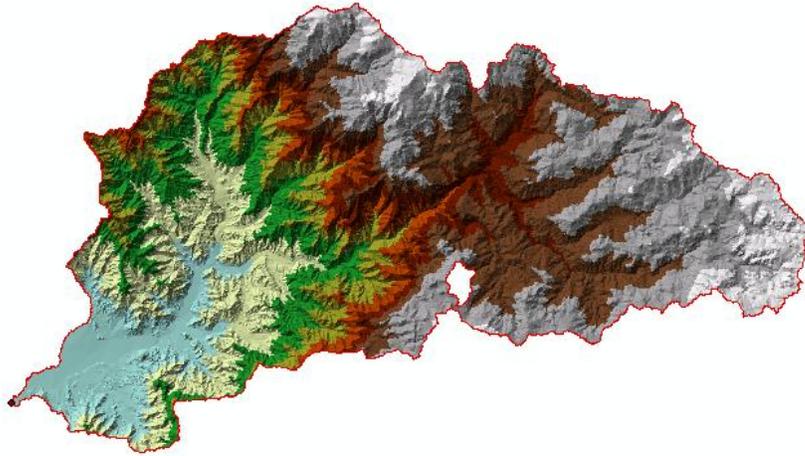


FIGURA 37 – Cuenca hidrográfica delimitada.

Fuente: Autoría Propia

En la imagen superior tenemos la representación de la cuenca delimitada mediante la superficie TIN, dicha superficie no es más que el resultado de la interpolación de los datos topográficos concernientes al raster descargado del Satélite Sentinel 1A.

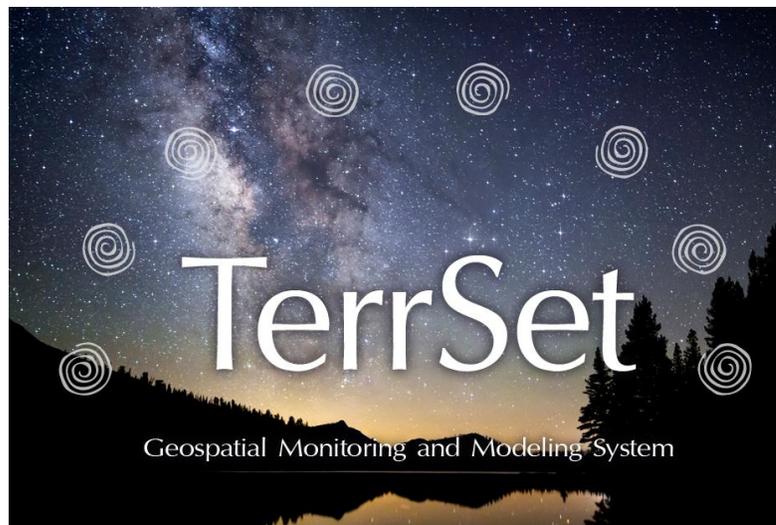


FIGURA 38 - Terrset.

Fuente: Autoría Propia

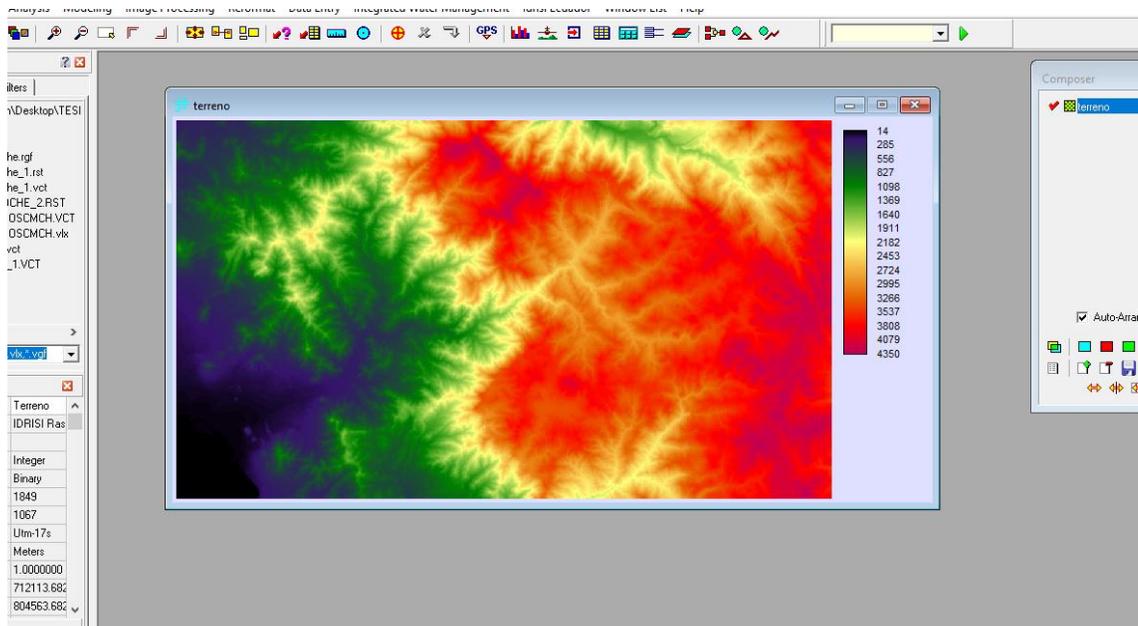


FIGURA 39 – Importación del DEM a Terrset.

Fuente: Autoría Propia

Desde ArcGIS se importa el DEM de la totalidad del terreno a TerrSet Geospacial con la finalidad de poder sobreponer la cuenca y posteriormente extraer los parámetros morfométricos.

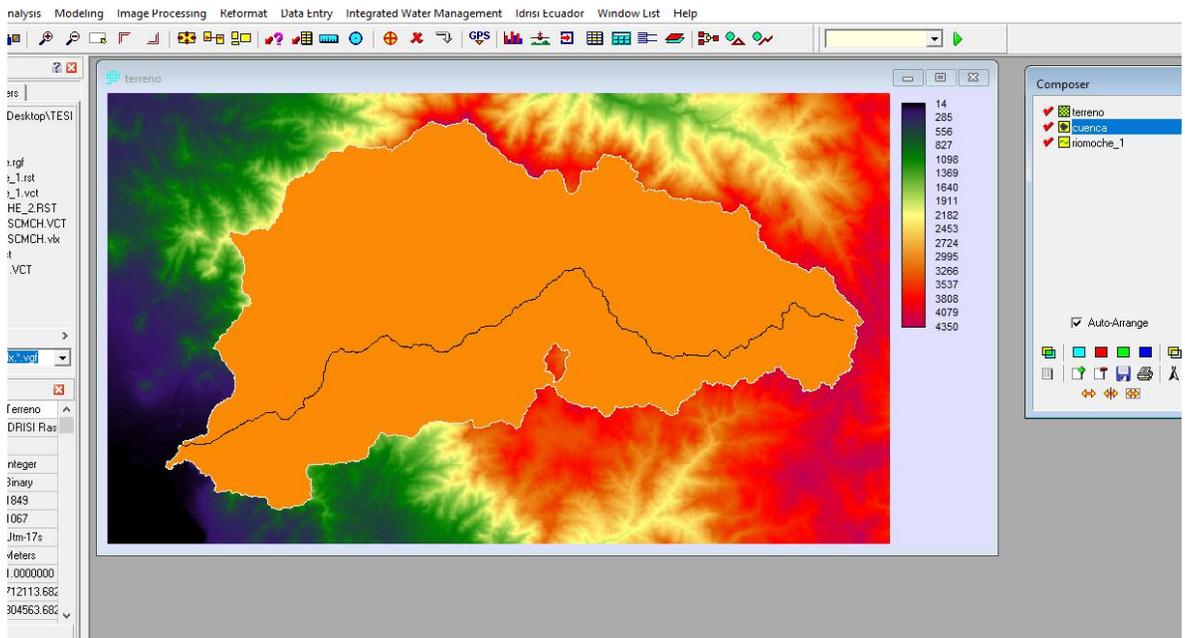


FIGURA 40 - Superposición de la cuenca en DEM.

Fuente: Autoría Propia

Una vez superpuesta la cuenca, el software nos determina el recorrido del cauce principal de la cuenca, con la finalidad de posteriormente representar este parámetro a través de un resultado numérico.

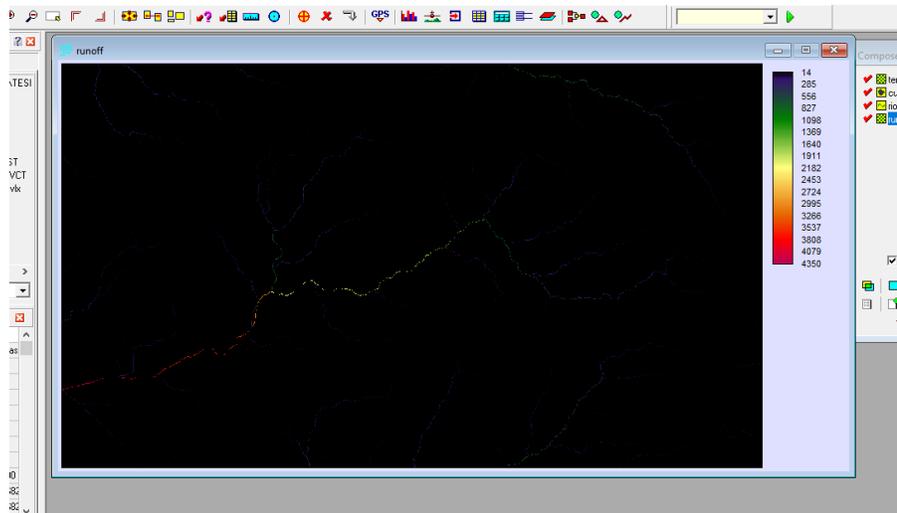


FIGURA 41 - Creación del Raster Runoff.

Fuente: Autoría Propia

Como se puede apreciar en la imagen superior, también se ha creado una red que representa la acumulación de flujo en los cauces que se desarrollan en el interior de la cuenca hidrográfica en estudio.



FIGURA 42 – Perfil longitudinal del cauce principal.

Fuente: Autoría Propia

Como resultado del procesamiento de las imágenes raster, el software nos devuelve el perfil longitudinal del cauce principal de la cuenca hidrográfica, el intervalo de cotas que comprende el cauce está entre 4000 y 30 metros sobre el nivel del mar.

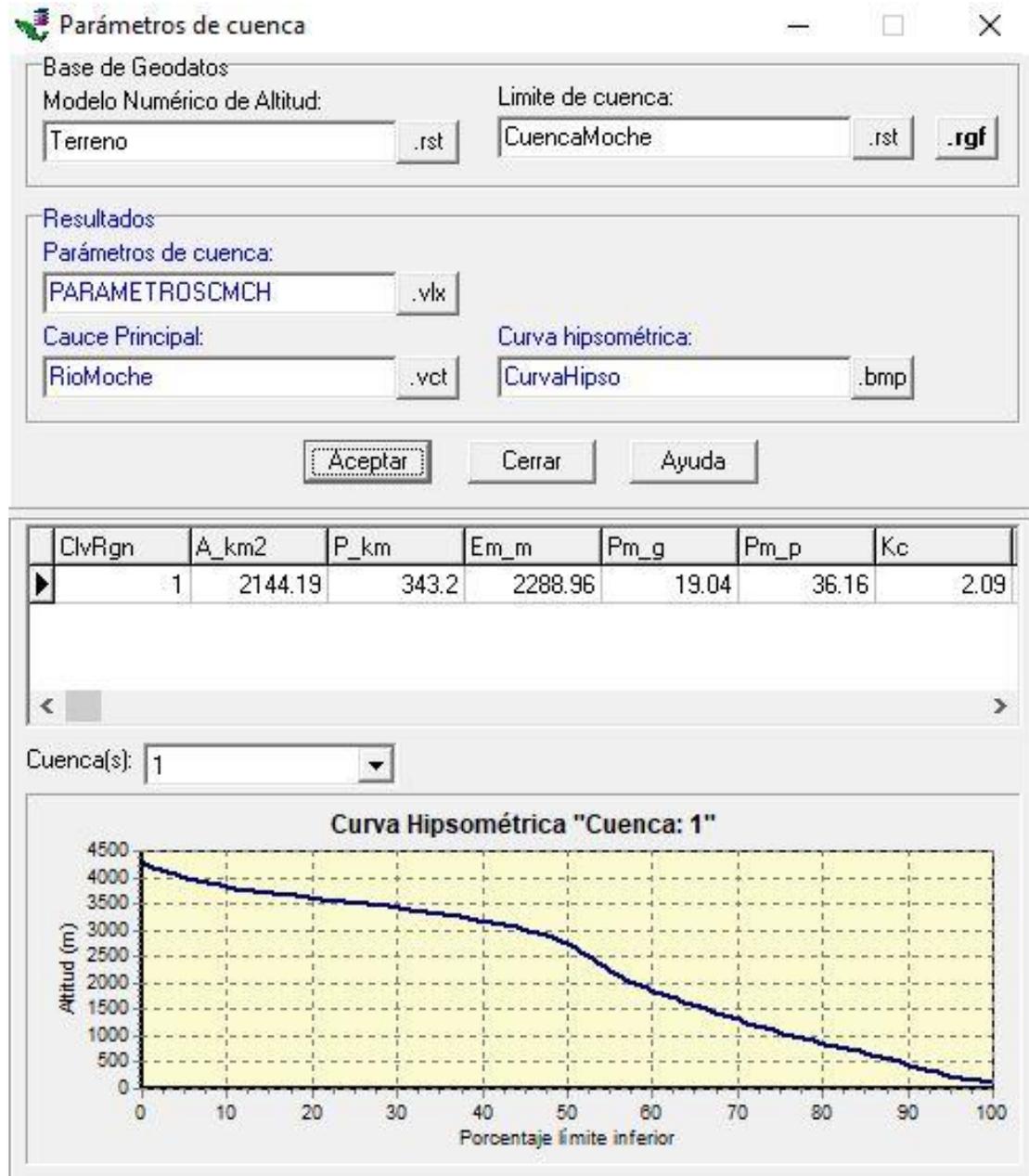


FIGURA 43 - Curva Hipsométrica.

Fuente: Autoría Propia

la curva hipsométrica nos muestra el porcentaje de área de la cuenca o porcentaje de la superficie de la cuenca que está por encima de cierta cota determinada, en consecuencia, de manera visual nos muestra de qué tipo de cuenca se trata, si es una cuenca joven, en equilibrio o una cuenca en fase de vejes, para nuestro caso se trata de una cuenca en equilibrio o fase de madurez.

Parámetro	Registro	Unidad	Descripción
ClvRgn	1.00		Cuenca Hirografica
A_km2	2144.19	km2	Superficie de la cuenca
P_km	343.20	km	Perimetro de la Cuenca
Em_m	2288.96	msnm	Elevacion Media
Pm_g	19.04	°	Pendiente media Grados
Pm_p	36.16	%	Pendiente media Porcentaje
Kc	2.09		Coeficiente de compacidad(Gravelious)
Rci	0.23		Relacion Circular
Rh	0.94		Relacion Hipsometrica
Lc_km	114.35	km	Longitud del eje del rio principal
La_km	81.66	km	Longitud directa del rio principal
Sh	1.40		Coeficiente de Sinuosidad Hidraulico
Emx_m	4005.00	msnm	Altitud Maxima
Emn_m	45.00	msnm	Altitud Minima
Sc_p	5.76	%	Pendiente Promedio del rio Principal
Tc_Kirpich_h	9.26	h	Tiempo de Concentracion kirpich
Tc_CHPW_h	9.31	h	Tiempo de concentracion de California Highways

FIGURA 44 – Cuadro resumen de los parámetros morfométricos.

Fuente: Autoría Propia

Además de ello nos devuelve un cuadro resumen de los parámetros morfométricos de la cuenca en estudio, entre los cuales se encuentran: Área, perímetro, elevación media, pendiente media de la cuenca, pendiente media del cauce principal, entre otras.

4.1.4. ESTIMACIÓN DE CAUDAL

Cuando se tiene datos de caudales y aforos en cantidad suficiente se realiza un análisis estadístico de toda la data de caudales máximos instantáneos anuales los cuales se establecen o eligen de la estación más cercana al sector de ubicación del proyecto, entonces se procede a calcular los caudales para los períodos de retorno contemplados empleando distribuciones estadísticas como distribución log normal, log Pearson, log gumbel, etc, sin embargo de acuerdo a lo especificado en el manual de Hidrología, hidráulica y drenaje, apartado 3.7 se establece que cuando no hay disponibilidad datos de aforo, se emplean los datos de precipitación como información de entrada a una cuenca y que estos a su vez producen un caudal, cuando ocurre la lluvia en consecuencia la cuenca se humedece de manera progresiva y una parte de esta humedad se filtra a través del subsuelo y lo restante escurre a lo largo y ancho de esta como flujo superficial.

Sin embargo, debido a la escasez de datos pluviométricos en las estaciones que ofrecen información automatizada, o simplemente indisponibilidad de las mismas estaciones en consecuencia no hay consistencia de datos en los registros pluviográficos, por lo que existe bastante irregularidad en la base de datos de los mismos y no se puede contar con dicha información; en base a este problema el Manual de hidrología, hidráulica y drenaje del MTC nos ofrece el método IILA, mediante el cual podemos llegar a estimar un hietograma sintético para poder posteriormente dar como resultado un caudal; el método evalúa la intensidad de lluvia que tiene una duración establecida en horas para un periodo de retorno determinado en años.

APLICACIÓN DEL MÉTODO IILA

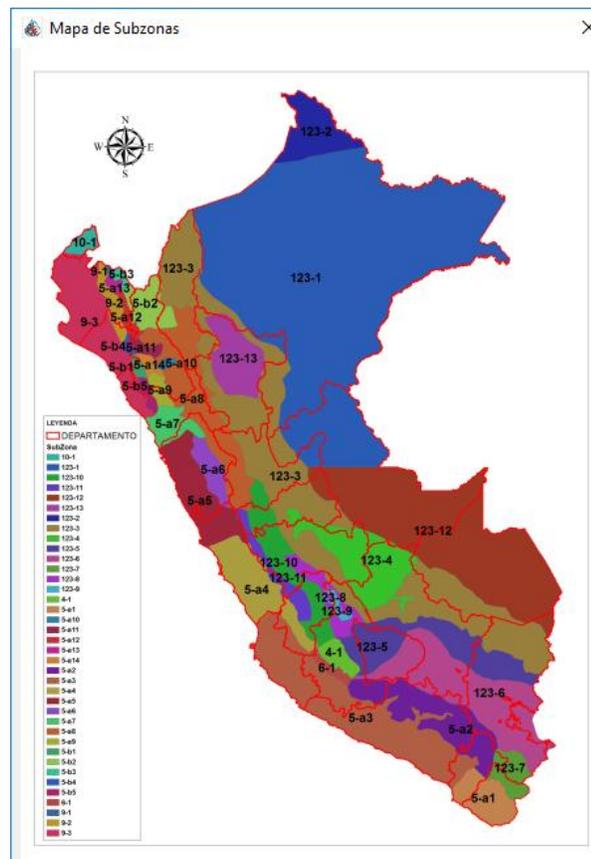


FIGURA 45– Mapa de zonificación IILA.

Fuente: Método IILA - convenio IILA-SENAMHI-UNI (Plano n.2-C), 1983

De acuerdo a la zonificación establecida por el método IILA, nuestra cuenca se encuentra ubicada en la Costa Norte, Sub zona 5a_7, con una elevación media de 2228.96 msnm.

Descripcion de Variables	
b,Eg,Kp,a y n	Factores de la zona y Sub zona en cota
cota	Elevacion sobre nivel del mar
Dc	Distancia a la cordillera (metros)
Dm	Distancia al mar (metros)
T	Periodo de Retorno (años)
t	Duracion de la tormenta (minutos)
Intervalo	Es el tiempo en que se dividira "t"

FIGURA 46 – Descripcion de Variables

Fuente: Software HYDROIILA – Método IILA

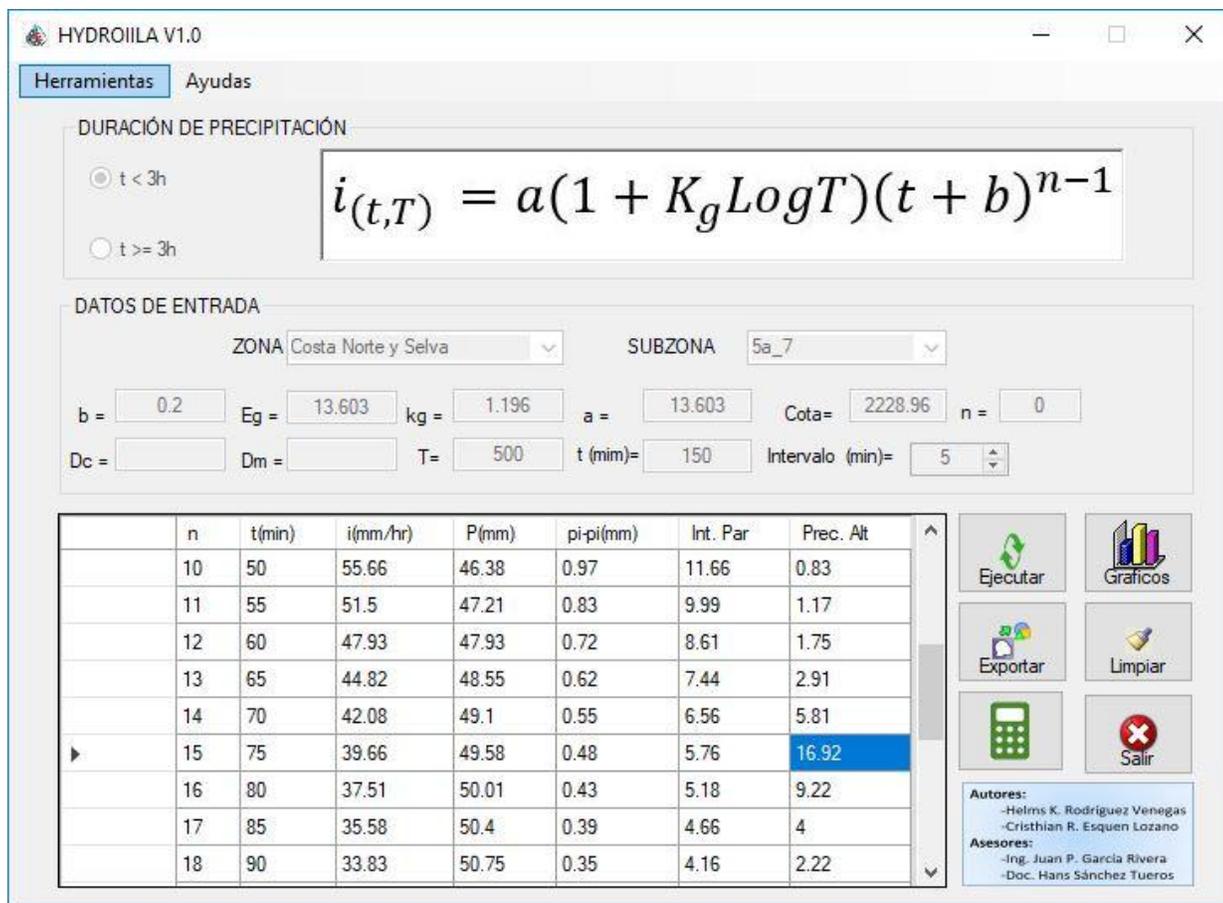


FIGURA 47 – Interfaz de usuario.

Fuente: Software HYDROIILA – Método IILA.

Para simplificar y automatizar la aplicación del método IILA, hemos optado por emplear el Software HydroIILA, cuyos autores son el Ing. Juan Pablo García Rivera y el Dr. Hans Sánchez Tueros, en este software hemos ingresado la información citada párrafos anteriores, incluyendo la cota media, el periodo de retorno (500 años) el cual ha sido establecido empleando los criterios considerados en el ITEM 4.1.1.5.2., en el apartado a.4) Avenida de Diseño o Caudal Máximo y Períodos de Retorno, el cual contempla un periodo de retorno de 500 años para estimar los efectos de la socavación en Puentes, también se ha indicado el intervalo de análisis de la tormenta el cual es de 5 minutos.

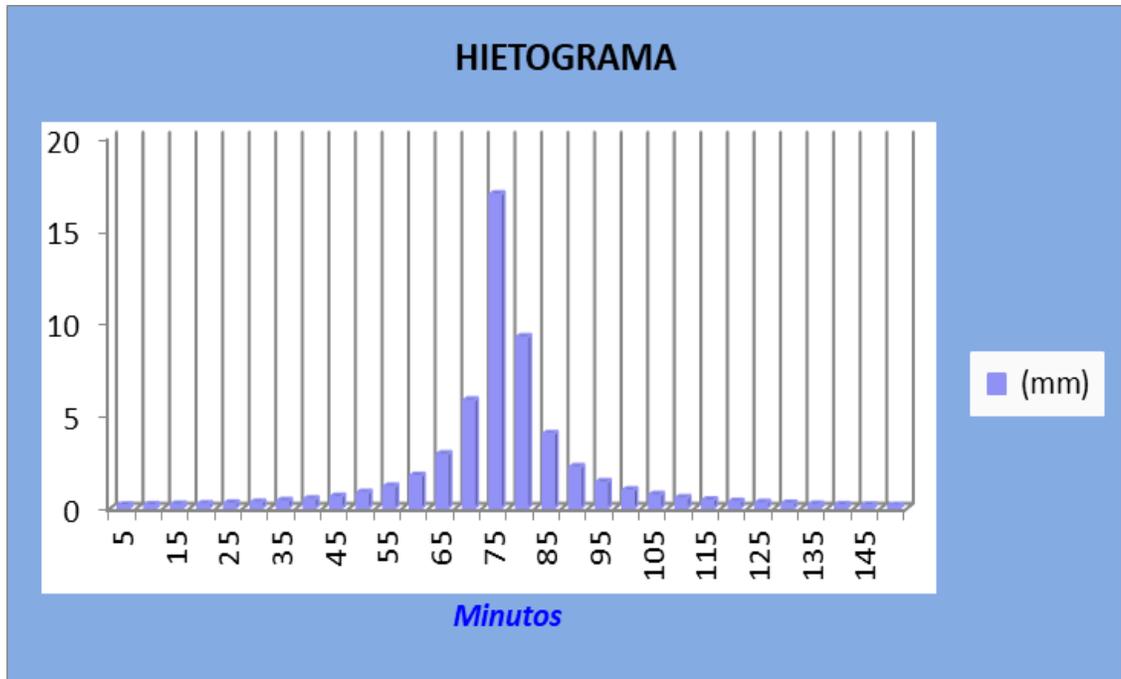


FIGURA 48 Hietograma.

Fuente: Software HYDROIILA – Método IILA.

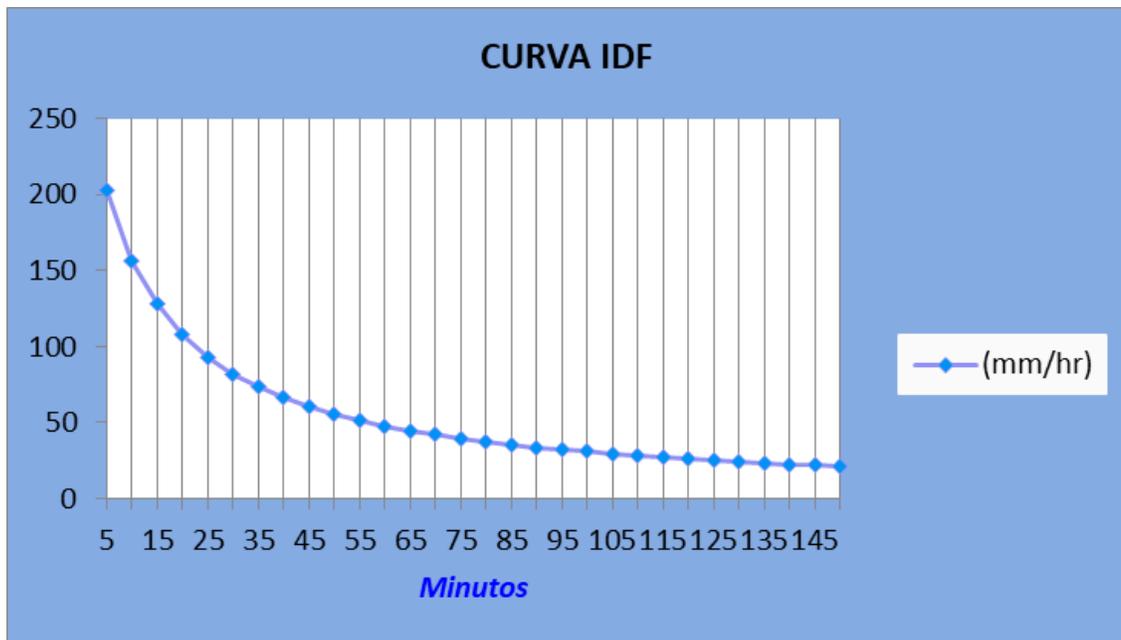


FIGURA 49 - CURVAS IDF.

Fuente: Software HYDROIILA – Método IILA.

Una vez obtenida esta información, entonces podemos recrear el entorno de la cuenca frente a condiciones de lluvia, estableciendo junto a los parámetros morfológicos una serie de datos correlacionados que en conjuntos nos permitirán encontrar un caudal de aporte de la cuenca en el punto de interés indicado, del hietograma se puede rescatar que la altura de precipitación máxima es 16.92 mm

4.1.5. TRANSFORMACIÓN DE LLUVIA A ESCORRENTÍA

Para la transformación del hietograma sintético en escorrentía emplearemos el sistema de modelamiento hidrológico, el cual es una aplicación desarrollada por el Centro de Ingeniería Hidrológica del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos, por lo que con el modelo HEC-HMS, se puede realizar la simulación y así evaluar la respuesta que tendrá la cuenca hidrográfica con respecto al cauce en su escurrimiento superficial, todo ello como producto de la lluvia o precipitación, todo esto se plantea mediante la representación del modelo de la cuenca como un sistema interconectado el cual consta de diferentes hidrológicos e hidráulicos, cada componente refleja una parte del proceso de escurrimiento por precipitaciones implícito de cada parte de la cuenca, un componente puede representar una entidad de escurrimiento superficial de la cuenca, un canal de flujo y algún dique o embalse (Ministerio de Transportes y comunicaciones, 2012)

Representar un elemento al interior de una cuenca requiere una serie de parámetros que puedan reflejar las características intrínsecas del componente y las relaciones matemáticas fundamentan y explican el proceso físico cuyo resultado es el cálculo de los pluviógrafos del flujo en sitios específicos de la cuenca del río.

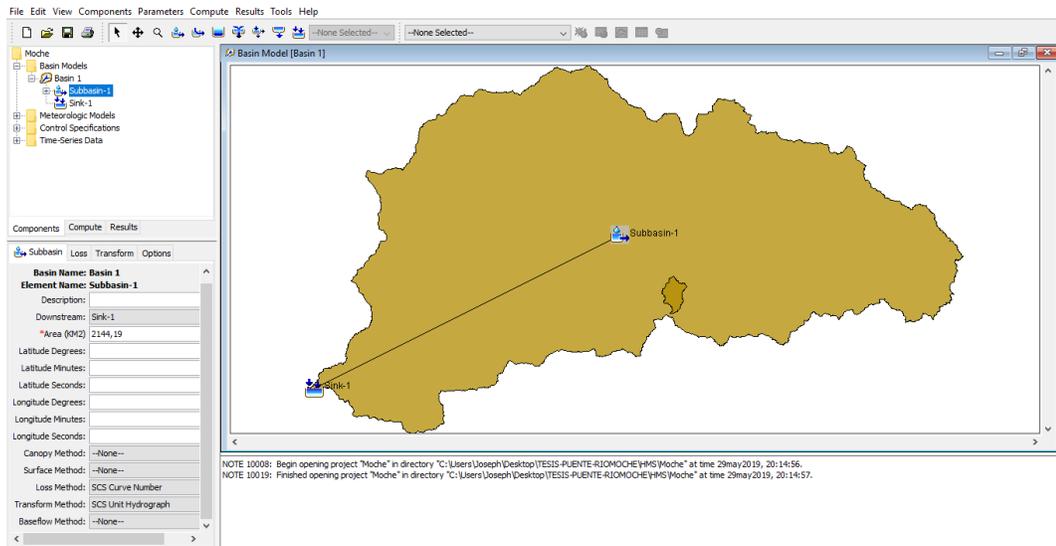


FIGURA 50 - Interfaz del HEC-HMS.

Fuente: Autoría Propia

Mediante la aplicación del software de modelo hidrológico HEC HMS, realizamos el modelamiento de la cuenca y la transformación de lluvia a escorrentía, con la finalidad de obtener el caudal circundante en el río, producto del aporte de la cuenca.

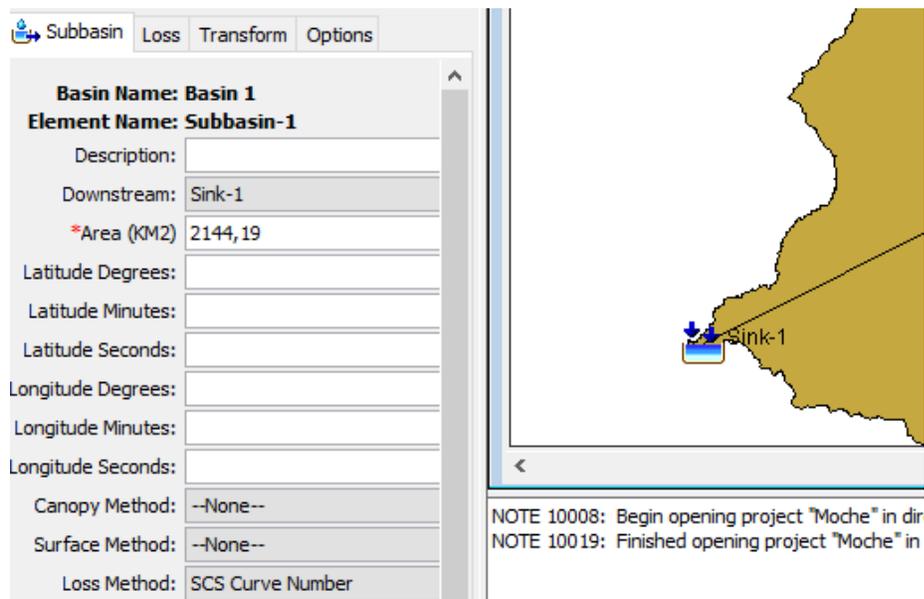


FIGURA 51 - Ingreso del área de la cuenca.

Fuente: Autoría Propia

Dentro de la cuenca tenemos que modelar parámetros denominados subbasin, los cuales representarán a dicha cuenca micro cuenca con la finalidad de compilar en este los parámetros requeridos para el análisis, uno de estos parámetros en el área de la cuenca de 2144.19 km².

En la tabla 5.5.1 se muestra el rango para las condiciones antecedentes de humedad para cada clase.

Los números de curva han sido tabulados por el Soil Conservation Service con base en el tipo de suelo y el uso de la tierra. Se definen cuatro grupos de suelos:

Grupo A: Arena profunda, suelos profundos depositados por el viento, limos agregados.

Grupo B: Suelos poco profundos depositados por el viento, marga arenosa.

Grupo C: Margas arcillosas, margas arenosas poco profundas, suelos con bajo contenido orgánico y suelos con altos contenidos de arcilla.

Grupo D: Suelos que se expanden significativamente cuando se mojan, arcillas altamente plásticas y ciertos suelos salinos.

Los valores de CN para varios tipos de uso de la tierra en estos tipos de suelos se dan en la tabla 5.5.2. Para una cuenca hecha de varios tipos de suelos y con diferentes usos de la tierra, se puede calcular un CN compuesto.

FIGURA 52 -Tipo de suelo según las condiciones de humedad para la cuenca.

Fuente: (Chow, Hidrología Aplicada, 2000, pág. 153)

De acuerdo a lo observado, se establece que el tipo de suelo predominante en la cuenca son tipo C margas arcillosas, arenosas poco profundas.

Descripcion del uso de la Tierra		Grupo hidrológico del Suelo			
		A	B	C	D
Tierra cultivada	sin tratamiento de conservación	72	81	88	91
	con tratamiento de conservación	62	71	78	81
Pastizales	condiciones pobres	68	79	86	89
	condiciones optimas	39	61	74	80
Vegas de ríos: condiciones optimas		30	58	71	78
Bosques	troncos delgados, cubierta pobre, sin hierba	45	66	77	83
	cubierta buena	25	55	70	77

FIGURA 53 - Grupo hidrológico en función a la permeabilidad y uso.

Fuente: (Chow, Hidrología Aplicada, 2000, pág. 154)

Finalmente seleccionamos el uso de suelo predominante en la cuenca, el cual es Pastizales en condiciones pobres, para lo que al intersectarlo con el

grupo hidrológico del suelo nos arroja como resultado un valor de 86 para la curva número.

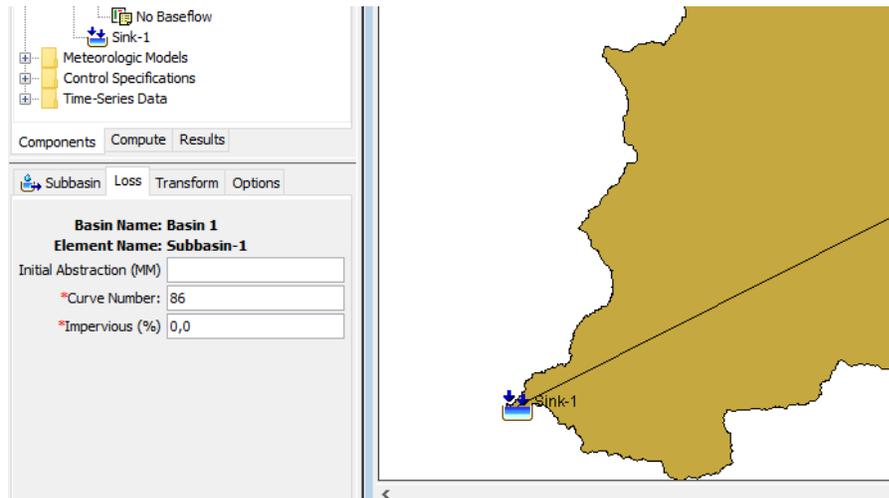


FIGURA 54 - Ingreso del parámetro de la curva Número.

Fuente: Autoría Propia

Luego, el valor obtenido con anterioridad se ingresa dentro del recuadro “Curve Number” asignando 86 como valor establecido.

n	t(min)	i(mm/hr)	P(mm)	pi-pi(mm)	Int. Par	Prec. Alt
1	5	202.99	16.92	16.92	202.99	0.15
2	10	156.85	26.14	9.22	110.67	0.17
3	15	127.81	31.95	5.81	69.74	0.2
4	20	107.84	35.95	4	47.95	0.22
5	25	93.26	38.86	2.91	34.92	0.26
6	30	82.16	41.08	2.22	26.65	0.31
7	35	73.42	42.83	1.75	20.99	0.39
8	40	66.36	44.24	1.41	16.93	0.48
9	45	60.54	45.41	1.17	13.98	0.62
10	50	55.66	46.38	0.97	11.66	0.83
11	55	51.5	47.21	0.83	9.99	1.17
12	60	47.93	47.93	0.72	8.61	1.75
13	65	44.82	48.55	0.62	7.44	2.91
14	70	42.08	49.1	0.55	6.56	5.81
15	75	39.66	49.58	0.48	5.76	16.92
16	80	37.51	50.01	0.43	5.18	9.22
17	85	35.58	50.4	0.39	4.66	4
18	90	33.83	50.75	0.35	4.16	2.22
19	95	32.25	51.06	0.31	3.76	1.41
20	100	30.81	51.35	0.29	3.49	0.97
21	105	29.49	51.61	0.26	3.17	0.72
22	110	28.29	51.86	0.25	2.95	0.55
23	115	27.17	52.08	0.22	2.62	0.43
24	120	26.14	52.28	0.2	2.46	0.35
25	125	25.19	52.48	0.2	2.34	0.29
26	130	24.3	52.65	0.17	2.07	0.25
27	135	23.47	52.82	0.17	2.02	0.2
28	140	22.7	52.97	0.15	1.83	0.17
29	145	21.98	53.12	0.15	1.77	0.15
30	150	21.3	53.25	0.13	1.59	0.13

FIGURA 55 - Hietograma

Fuente: Autoría Propia

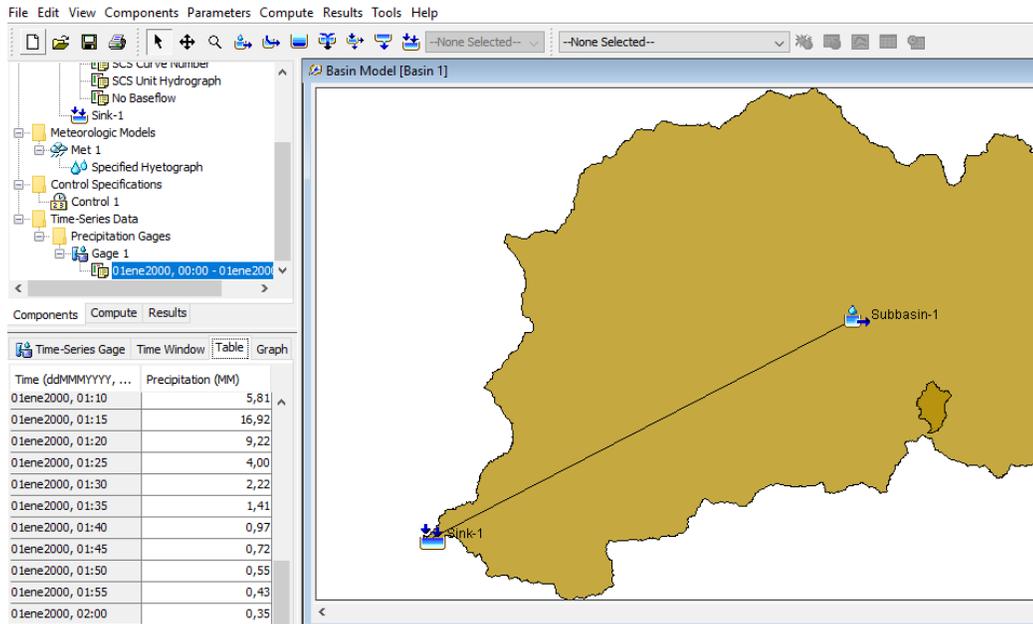


FIGURA 56 - Ingreso del hietograma.

Fuente: Autoría Propia

El hietograma se coloca de manera individual y manual en el software, el cual se ingresará en la pestaña "Time-Series Gage", en la sección "Table", después de ello se cargará dentro del archivo generado del software.

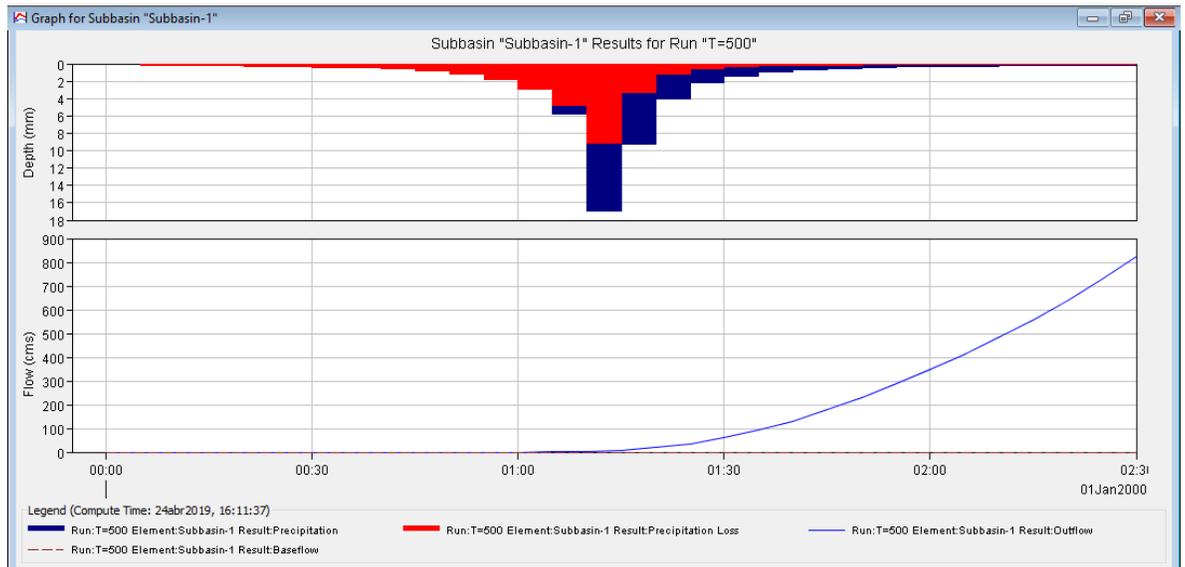


FIGURA 57 Hidrograma de entrada y salida para un periodo de retorno de 500 años.

Fuente: Autoría Propia



FIGURA 58 - Resumen de resultados para la cuenca en análisis.

Fuente: Autoría Propia

Finalmente se tiene una descarga de 823,6 m³/s, para un periodo de retorno de 500 años.

4.1.6. MODELAMIENTO NUMÉRICO BIDIMENSIONAL

De manera secuencial, hemos considerado evaluar los parámetros hidrodinámicos de nuestro cauce en estudio empleando la tecnología que ofrece la dinámica computacional de fluidos, la cual mediante la resolución matemática de ecuaciones diferenciales complejas que comprenden desde la ecuación de aguas someras, Saint Venant, Momentum hasta la ecuación de conservación de energía en la mecánica de fluidos.

Sin embargo, estas ecuaciones se resolverán a nivel de dos dimensiones para poder así explicar el comportamiento del sector del cauce en estudio y cómo éste interactúa con la subestructura del puente del río moche y en consecuencia los efectos que tendrá en la superestructura.

4.1.6.1. CREACIÓN DEL MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES (DEM)

Uno de los primeros pasos antes de aplicar un modelo numérico bidimensional, es trabajar la superficie topográfica con el formato adecuado, para ello emplearemos el software de manejo de sistemas de información geográfica.

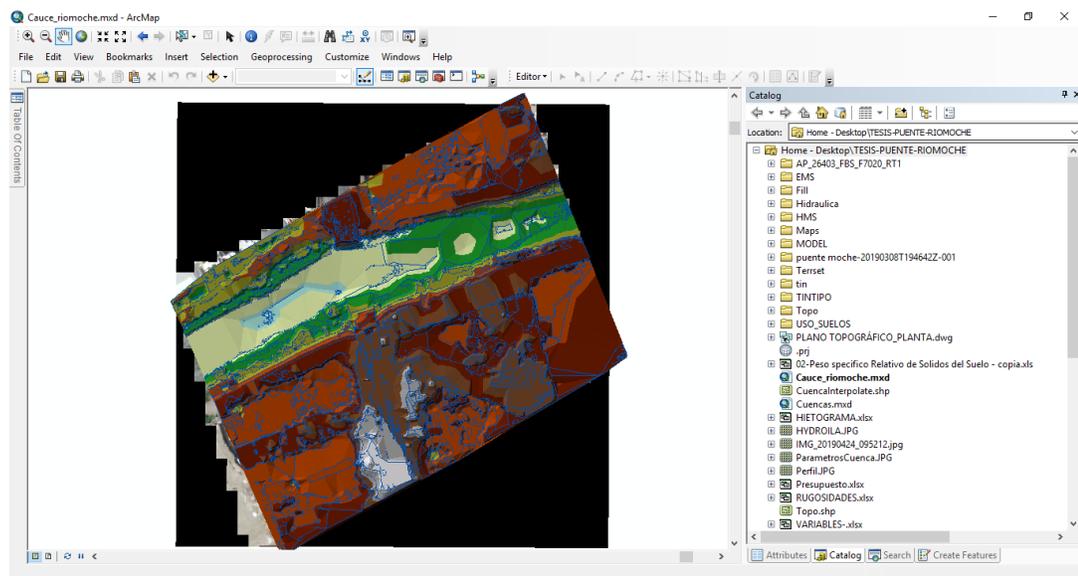


FIGURA 59 - Creación del DEM.

Fuente: Autoría Propia

Procedemos a crear una superficie TIN, en base a la topografía del cauce con la que contamos, mediante la herramienta “Create TIN” del software ArcGIS, finalmente tenemos un mapa de elevaciones como el de la imagen superior.

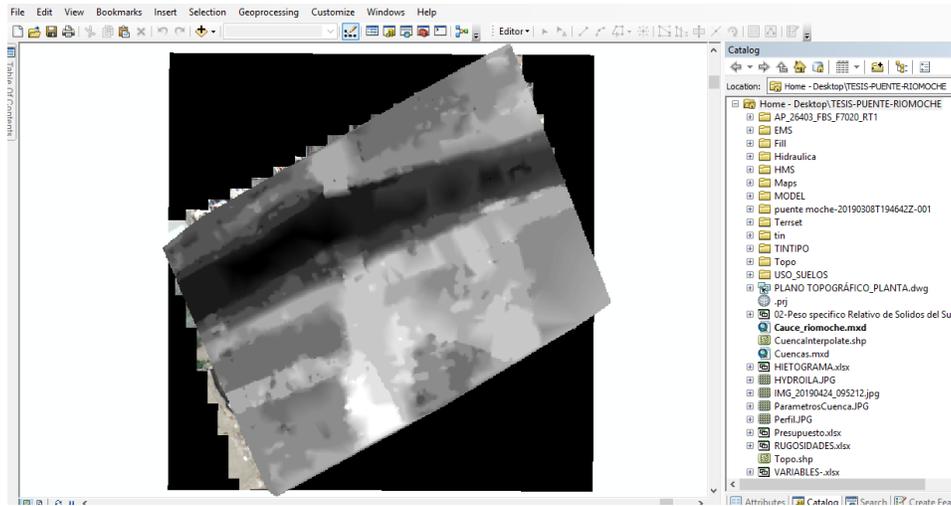


FIGURA 60 - Creación del raster topográfico.

Fuente: Autoría Propia

Una vez creada la superficie TIN procedemos a construir una imagen Raster, la cual represente todas las elevaciones y depresiones correspondientes a la información topográfica del cauce del río Moche, la cual servirá de base para el modelamiento hidráulico del sector contemplado.

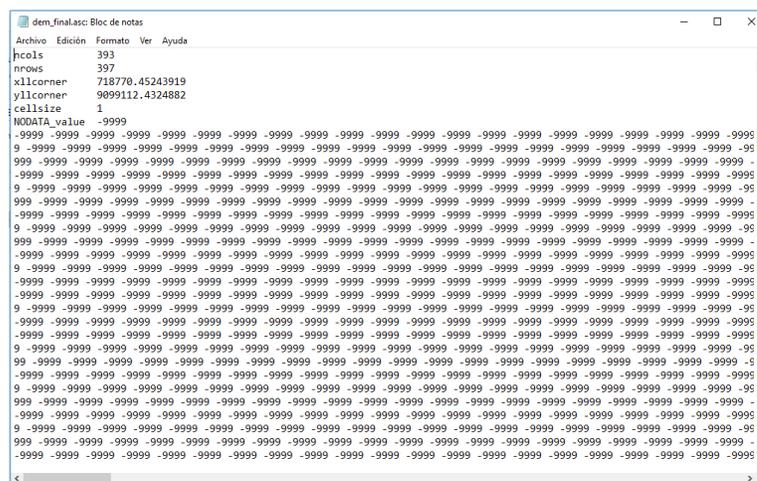


FIGURA 61 - Exportación del DEM en formato ASCII.

Fuente: Autoría Propia

Finalmente se obtiene el modelo DEM como una matriz de columnas y filas con información correspondiente a la superficie topográfica, los datos contemplados son número de columnas: 393, número de filas: 397 y tamaño de celda 1.00 m.

4.1.6.2. CREACIÓN DEL MALLADO EN IBER 2.3.4

Ingresamos a través de la interfaz de usuario de Iber 2.3.4, y empezamos a configurarlo en base a lo correspondiente al entorno en el que se desarrolla nuestro proyecto.

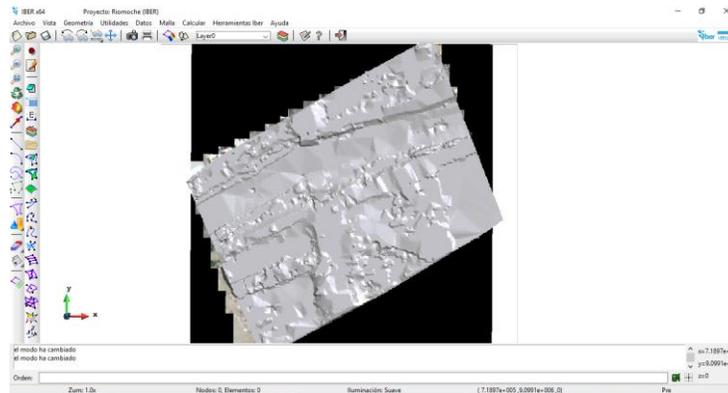


FIGURA 62 - Creación de la malla

Fuente: Autoría Propia

Procedemos a importar el archivo DEM (Modelo digital de elevaciones) desde el formato ASCII creado, con la intención de representar la superficie de interés en el software, tal como se puede apreciar en la imagen superior.

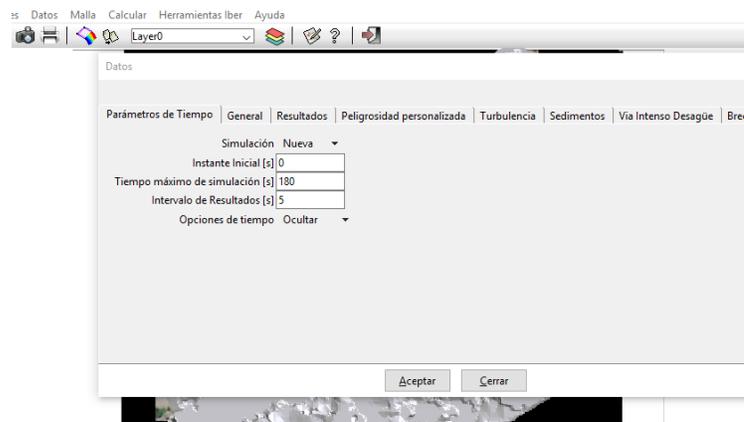


FIGURA 63- Asignación de tiempo de simulación

Fuente: Autoría Propia

Primero asignamos los parámetros de tiempo, entre ellos asignamos el instante inicial de análisis en 0 segundos, el tiempo máximo de simulación le hemos designado 180 segundos, y finalmente el intervalo de análisis para los resultados consideraremos 5 segundos.

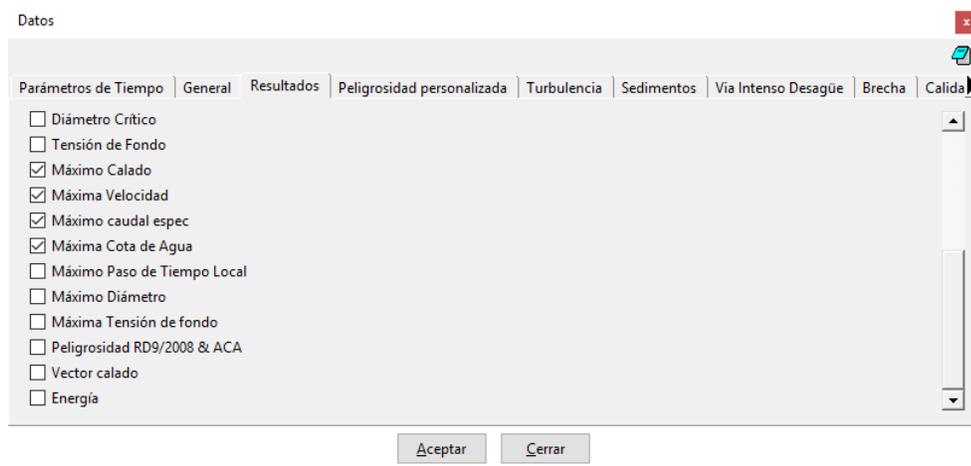


FIGURA 64 - Configuración de resultados

Fuente: Autoría Propia

Procedemos a configurar los parámetros que se contemplarán en los resultados, entre ellos seleccionamos que se nos muestre Máximo Calado, Máxima Velocidad, Máximo caudal específico, Máxima cota de gua, entre otros.

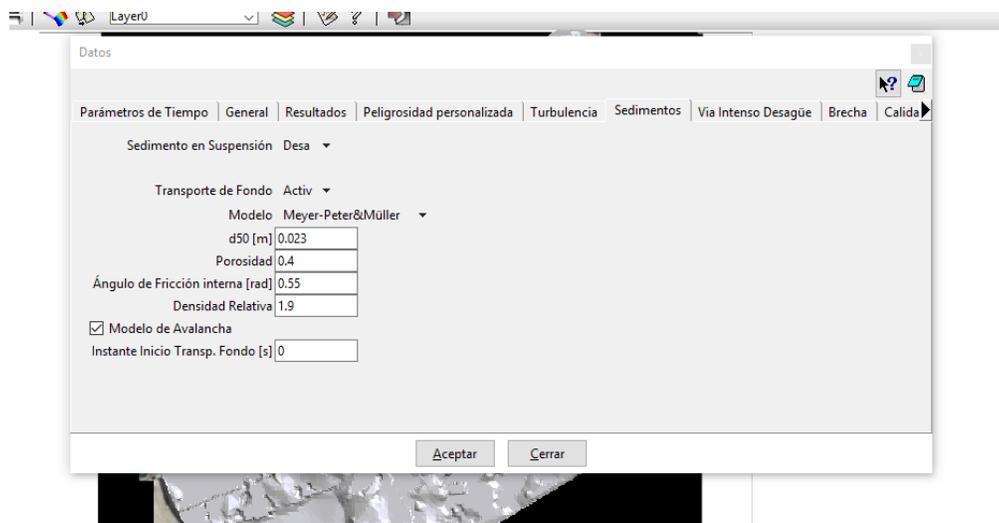


FIGURA 65- – Transporte de sedimentos

Fuente: Autoría Propia

Activamos el módulo de transporte de sedimentos, mediante el cual analizaremos los cambios que pueda sufrir el cauce en función al caudal circundante, en este acápite ingresamos el diámetro medio de partícula D50 que tiene un valor de 0.023m, el ángulo de fricción interna y la densidad relativa que tiene un valor de 1.90.

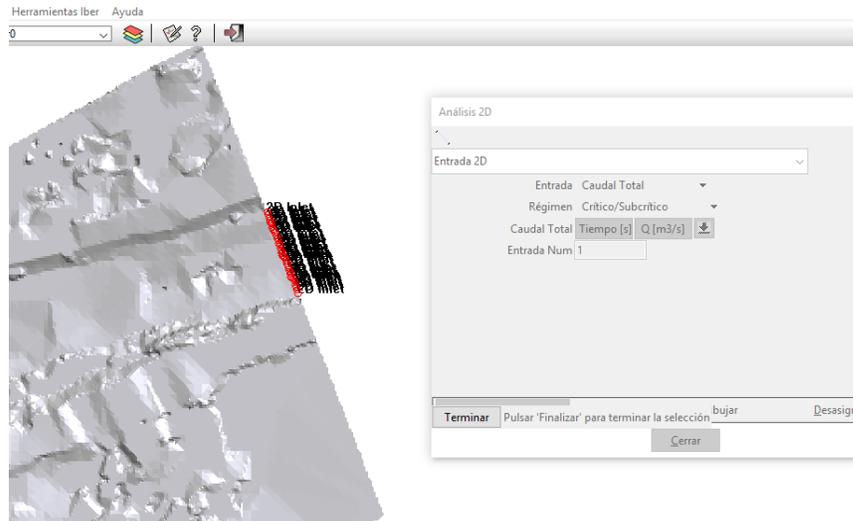


FIGURA 66 - Asignación de la entrada de Caudal

Fuente: Autoría Propia

Configuramos las condiciones de contorno de entrada de caudal, asignando un régimen de flujo Crítico/subcrítico y un caudal total de 823,6m³/s

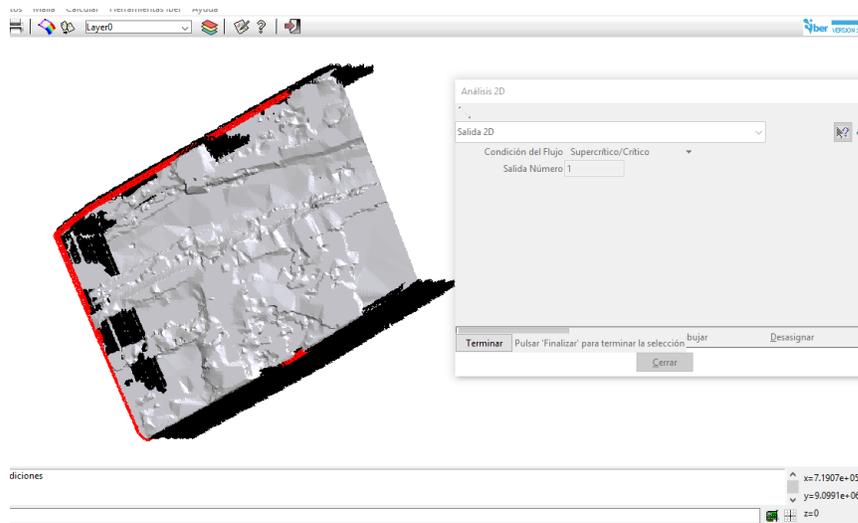


FIGURA 67 - Asignación de condición de salida.

Fuente: Autoría Propia

Luego de asignar las condiciones de entrada, procedemos a establecer las condiciones de contorno para la salida de flujo de agua, la condición de régimen de flujo subcrítico/supercrítico.

4.1.6.3. ASIGNACIÓN DE LA RUGOSIDAD DE SUPERFICIE

Cuando estamos frente a la definición de las condiciones hidráulicas de un modelo hidrodinámico, una de las variables que tienen más influencia en el comportamiento de la superficie modelada es el coeficiente de rugosidad. El parámetro de rugosidad de Manning el cual se consiguió definir e implementar en para la hidráulica de canales y así poder determinar la capacidad de transporte de una determinada sección, y que tiene como distintivo identificativo la variable n .

Cuando se idealizó por primera vez seguramente su autor no era consciente de la relevancia que dicho parámetro tomaría en los posteriores modelos computacionales hidráulicos que aparecieron mucho más tarde ahora en la actualidad, para lo cual de acuerdo al uso que tiene el terreno con el cual interactuará el flujo del agua supondrá un número de manning diferente.

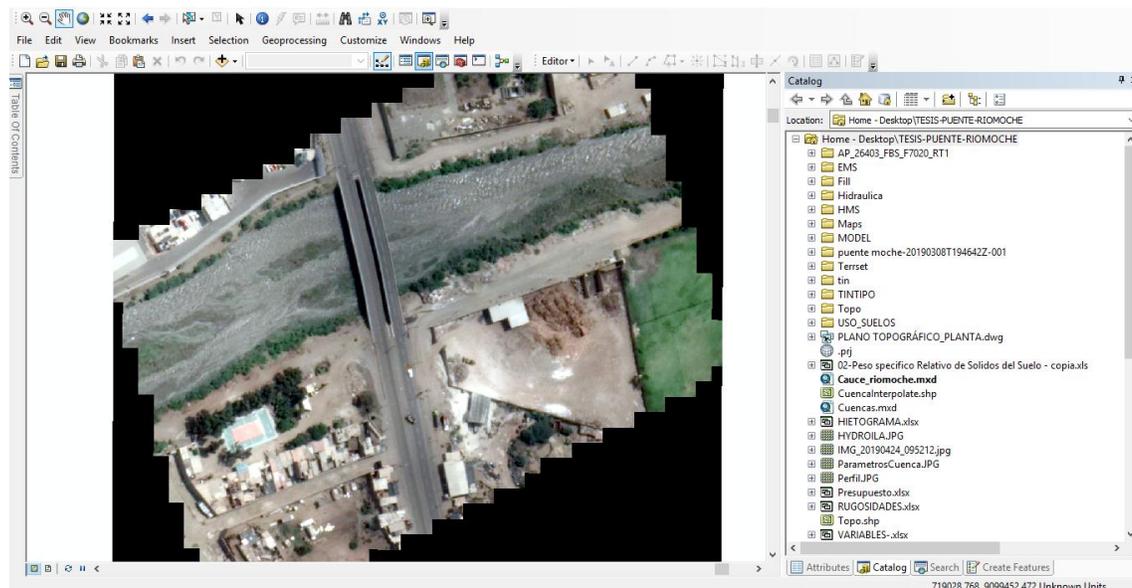


FIGURA 68 - Asignación de uso de suelos.

Fuente: Autoría Propia

Como se puede observar en la imagen superior identificamos sectores predominantes como: Cauce de rio, Asfalto, terrenos de cultivo, trocha y viviendas.

Tipo de canal y descripcion	mínimo	normal	maximo
2. Piedra sin seleccionar,sobre mortero	0.020	0.023	0.026
3. Piedra suelta o riprap	0.023	0.033	0.036
f.Ladrillo			
1. Barnizado o lacado	0.011	0.013	0.015
2. En momento de demento	0.012	0.015	0.018
g. Mampostería			
1.Piedra partida cementada	0.017	0.025	0.030
2.Piedra suelta	0.023	0.032	0.035
h,Bloques de piedra labrados	0.013	0.015	0.017
i.Asfalto			
1. Liso	0.013	0.013	
2.Rugoso	0.016	0.016	
j.Revestimiento vegetal	0.030	0.050

FIGURA 69- Rugosidad del asfalto.

Fuente: (Chow, Hdráulica de canales Abiertos, 1983, pág. 109) – Tabla 5-6

De la tabla 5-6 del libro de hidráulica de canales abiertos seleccionamos el material Asfalto bajo rugoso bajo condiciones normales al cual corresponde un coeficiente de manning igual a 0.016.

Tipo de Canal y descripcion	Mínimo	Normal	Máximo
b. corrientes montañosas, sin vegetacion en el canal, bancas usualmente empinadas, arboles y matorrales a lo largo de las bancas sumergidas en niveles altos			
1. Fondo: gravas, cantos rodados y algunas rocas	0.030	0.040	0.050
2. Fondo: gravas, cantos rodados con rocas grandes	0.040	0.050	0.070
D-2 Planicies de inundacion			
a. Pastizales, sin matorrales			
1. Pasto corto	0.025	0.030	0.035
2. Pasto alto	0.030	0.035	0.050
b. AreasCultivadas			
1. Sin Cultivo	0.02	0.03	0.04
2. Cultivos en Linea maduros	0.03	0.04	0.05
3. Campos de Cultivo maduros	0.03	0.04	0.05
c. Matorrales			
1.Matorrales dispersos, mucha maleza	0.035	0.050	0.070
2.Pocos matorrales y arboles, en invierno	0.035	0.050	0.060

FIGURA 70 - Rugosidad del asfalto.

Fuente: (Chow, Hdráulica de canales Abiertos, 1983, pág. 111) – Tabla 5-6

De la tabla 5-6 del libro de hidráulica de canales abiertos seleccionamos planicies de inundación, campos de cultivo maduros condiciones normales al cual corresponde un coeficiente de manning igual a 0.040.

Condiciones del canal		Valores	
Material Involucrado	Tierra	η_0	0.020
	Corte de roca		0.025
	Grava fina		0.024
	Grava Gruesa		0.028
Grado de Irregularidad	Suave	η_1	0.000
	menor		0.005
	Moderado		0.010
	Severo		0.020
Variaciones de la seccion transversal	Gradual	η_2	0.000
	Ocasionalmente alterante		0.005
	Frecuentemente alterante		0.010 - 0.015
Efecto relativo de las obstucciones	Insignificante	η_3	0.000
	Menor		0.010 - 0.015
	Apreciable		0.020 - 0.030
	Severo		0.040 - 0.060
Vegetacion	Baja	η_4	0.005 - 0.010
	Media		0.010 - 0.025
	Alta		0.025 - 0.050
	Muy alta		0.050 - 0.100
Gradi de los efectos por meandros	Menor	η_5	1.000
	Apreciable		1.150
	Severo		1.300

FIGURA 71- Rugosidad mediante ecuación 5-12.

Fuente: (Chow, Hdráulica de canales Abiertos, 1983, pág. 105) – Tabla 5-5

Para establecer los parámetros de rugosidad en los usos de suelos que no están determinados de manera experimental, por ejemplo, materiales mixtos o material aluvial en cauces meándricos se emplean las fórmulas contempladas en el acápite 5-12, que se complementan con la tabla 5-5, nosotros hemos despejado la rugosidad para el lecho del cauce, el sector ocupado por viviendas, y la trocha que está junto al cauce.

RUGOSIDAD	CAUCE
N0	0.020
N1	0.010
N2	0.005
N3	0.015
N4	0.005
N5	1.000
Nf	0.055

Tabla 3 - Rugosidad del cauce empleando ecuación 5-12.

Fuente: Autoría Propia

RUGOSIDAD	TROCHA
N0	0.028
N1	0.000
N2	0.000
N3	0.000
N4	0.005
N5	1.000
Nf	0.033

Tabla 4 - Rugosidad de la trocha empleando ecuación 5-12.

Fuente: Autoría Propia

RUGOSIDAD	VIVIENDA
N0	0.020
N1	0.000
N2	0.000
N3	0.020
N4	0.005
N5	1.000
Nf	0.045

Tabla 5 - Rugosidad del sector vivienda empleando ecuación 5-12.

Fuente: Autoría Propia

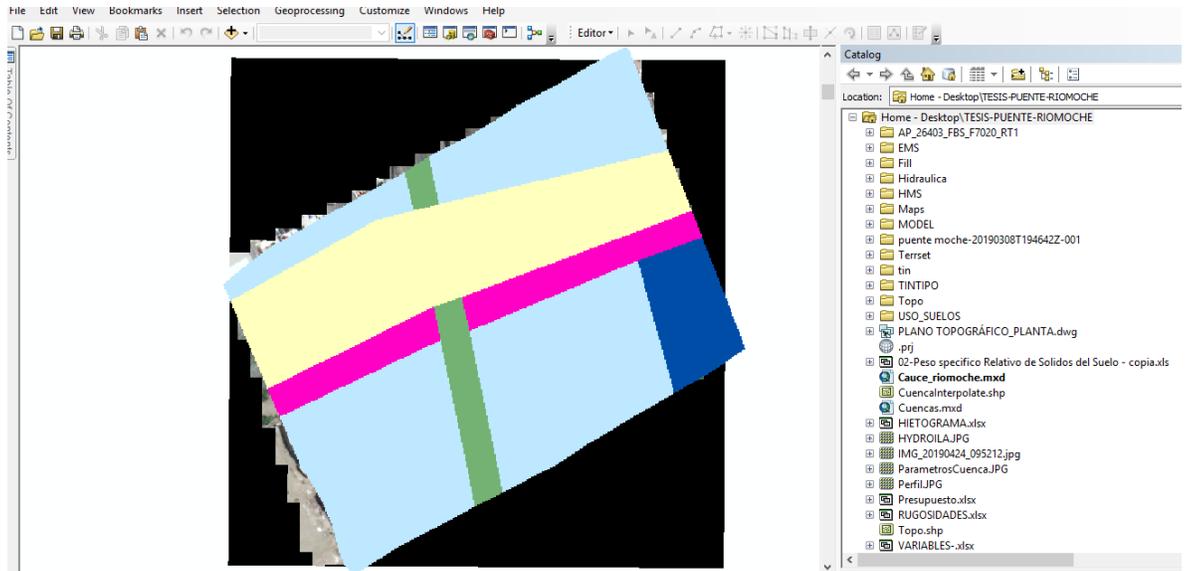


FIGURA 72 - Sectorización de la rugosidad según el uso de suelo.

Fuente: Autoría propia

Mediante el software de procesamiento de información geográfica ArcGIS, realizamos la creación de un archivo raster con la finalidad de establecer la sectorización del uso de suelos en función a lo auscultado para la posterior asignación de la rugosidad según manning.

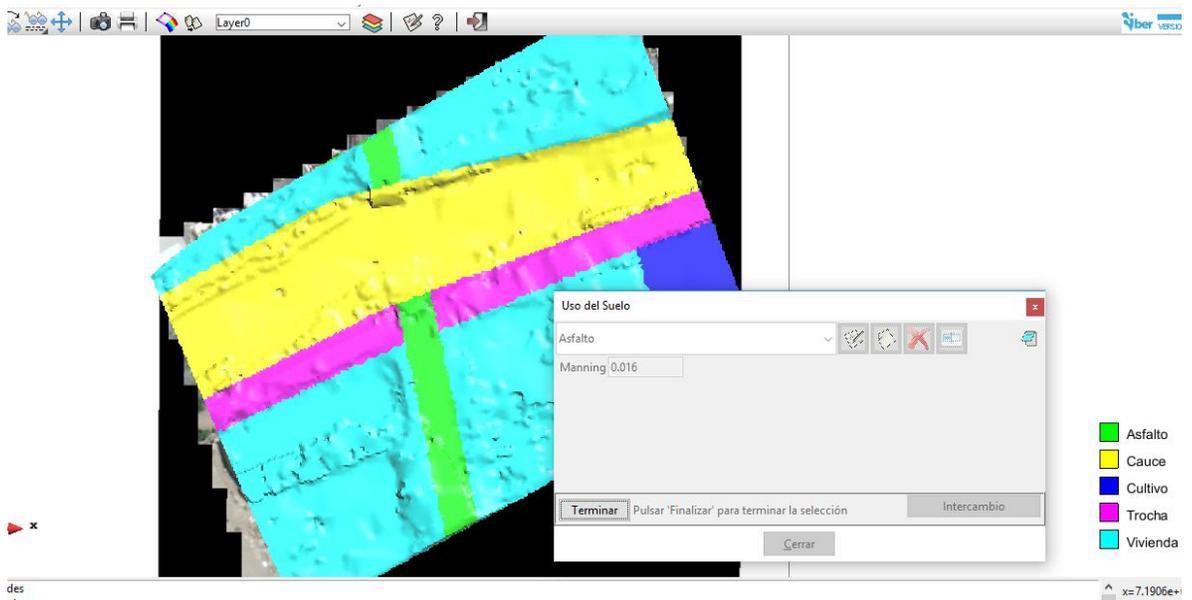


FIGURA 73 - Sectorización de la rugosidad según el uso de suelo.

Fuente: Autoría propia

Una vez definida la sectorización del uso de suelos en función a la ortofoto, se procede a asignar tanto el área abarcada por cada sector, así como los valores encontrados de cada uno de los parámetros consignados para los materiales de Asfalto, Cauce, Cultivo, Trocha y vivienda.

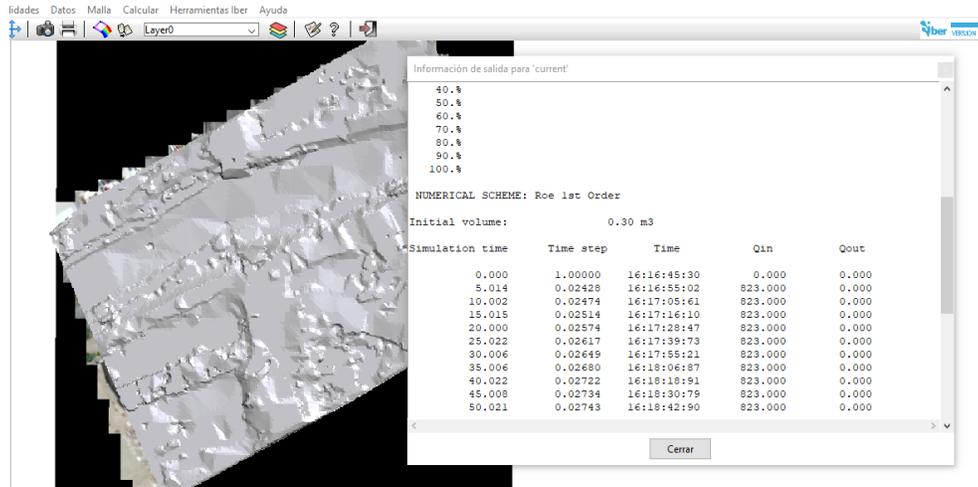


FIGURA 74 - Cálculo del modelo hidráulico.

Fuente: Autoría propia

Finalmente se procede al cálculo del modelo computacional, compilando todas las condiciones contempladas para la creación del mismo, desde la malla, hasta el tiempo máximo de simulación

4.1.6.4. RESULTADOS

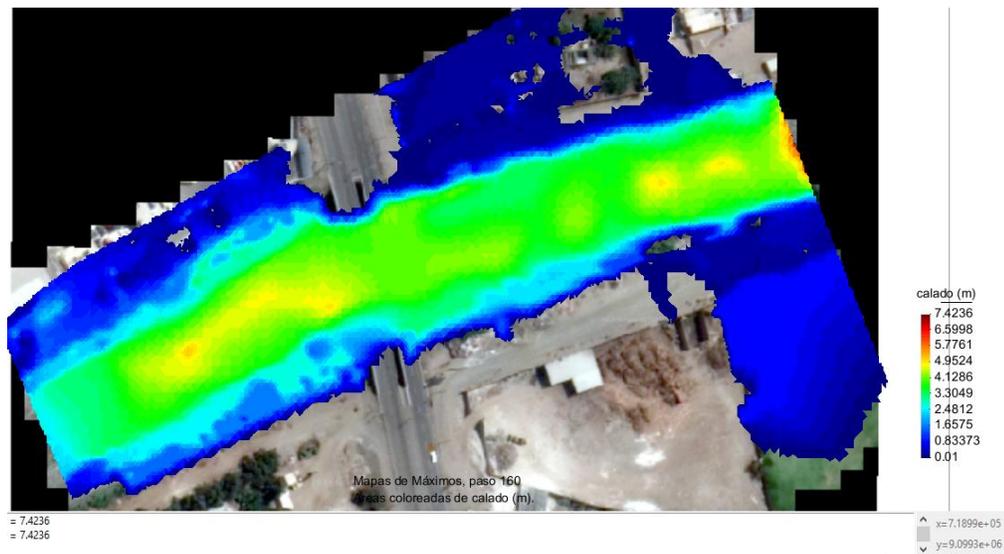


FIGURA 75 - Altura de agua o tirante para el instante T=160.

Fuente: Autoría propia

El tirante máximo contemplado de acuerdo al modelo para el instante $t=160s$ es de 4.95 m y se encuentra ubicado aproximadamente en el eje central del cauce, aguas abajo del puente, el mínimo es de 0.01m, además se puede visualizar de manera explícita que existe inundación de los terrenos de cultivo en la margen izquierda y del sector vivienda en la margen derecha.

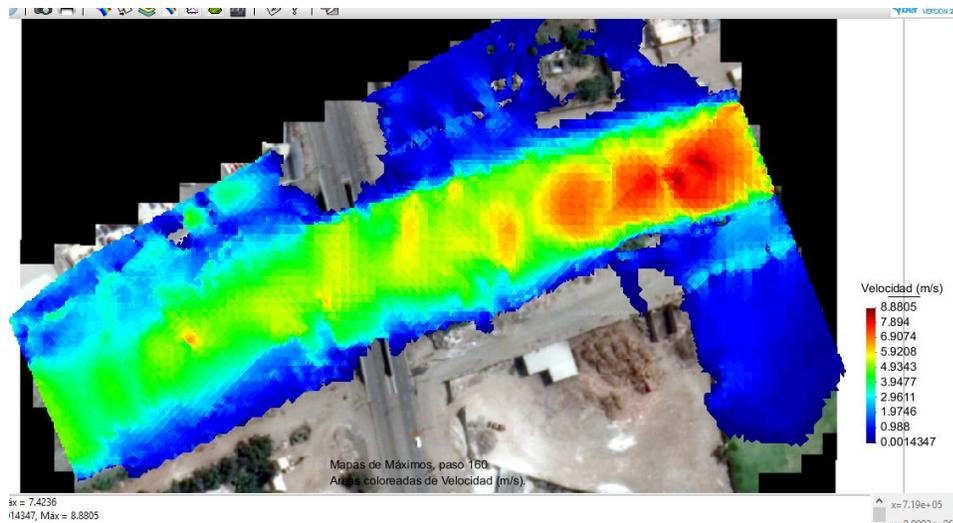


FIGURA 76 - Velocidad del flujo de agua para el instante T=160.

Fuente: Autoría propia

El intervalo predominante en el transporte de sedimentos de fondo del cauce en estudio está entre 0.064 y 0.096 m²/s, la región que contiene mayor movimiento de material está localizada aguas arriba del puente, esencialmente en el eje del río.

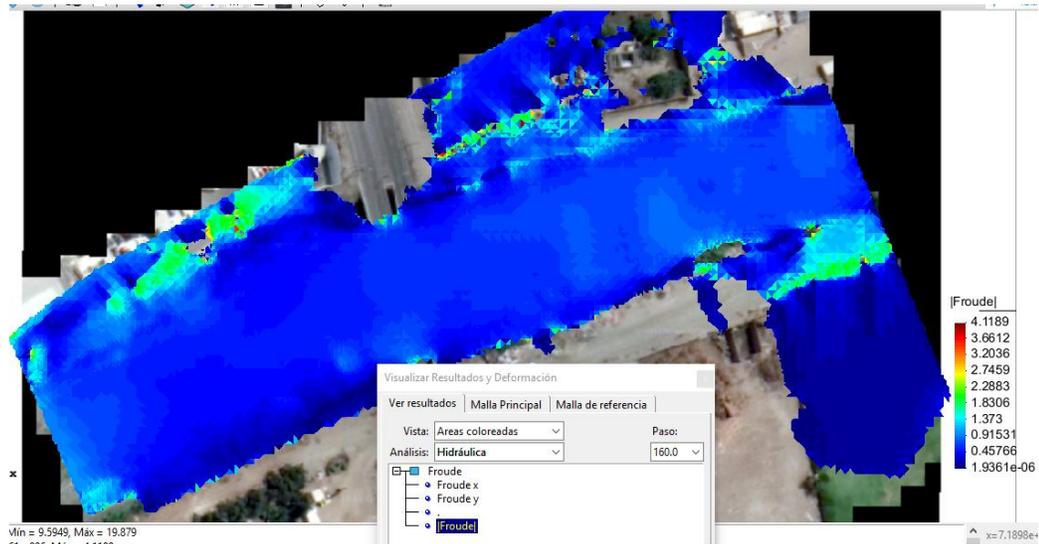


FIGURA 79 - Régimen de flujo para el instante T=160.

Fuente: Autoría propia

Finalmente verificamos el tipo de régimen de flujo que se da a lo largo del cauce, de acuerdo al número de froude podemos ver que es predominante el régimen de flujo súper crítico con valores por encima de la unidad.

4.1.7. MODELAMIENTO NUMÉRICO TRIDIMENSIONAL

Una vez planteado el entorno en el cual se desarrolla la realidad problemática, hemos podido determinar cambios importantes en la morfología del cauce mediante el modelo hidráulico bidimensional, ahora hemos considerado plantear una perspectiva mucho más precisa para describir el escenario que engloba el cauce del río, los puentes emplazados en el cauce y el flujo de agua producto de una máxima avenida, así mismo intentaremos explicar la interacción de todos estos componentes con el caudal circundante en el sector de dicho cauce, para ello contamos con el apoyo de un software de desarrollo de modelos numéricos tridimensionales, con el cual plantearemos todos los componentes que conforman nuestra realidad problemática y como resultado obtendremos una simulación, finalmente a través de ella contemplaremos el post proceso de la resolución de diferentes ecuaciones diferenciales implícitas en el código del software que como resultado nos mostrarán la participación del caudal en el cauce y sus parámetros hidrodinámicos en consecuencia de la interacción de todos ellos con el flujo de agua.

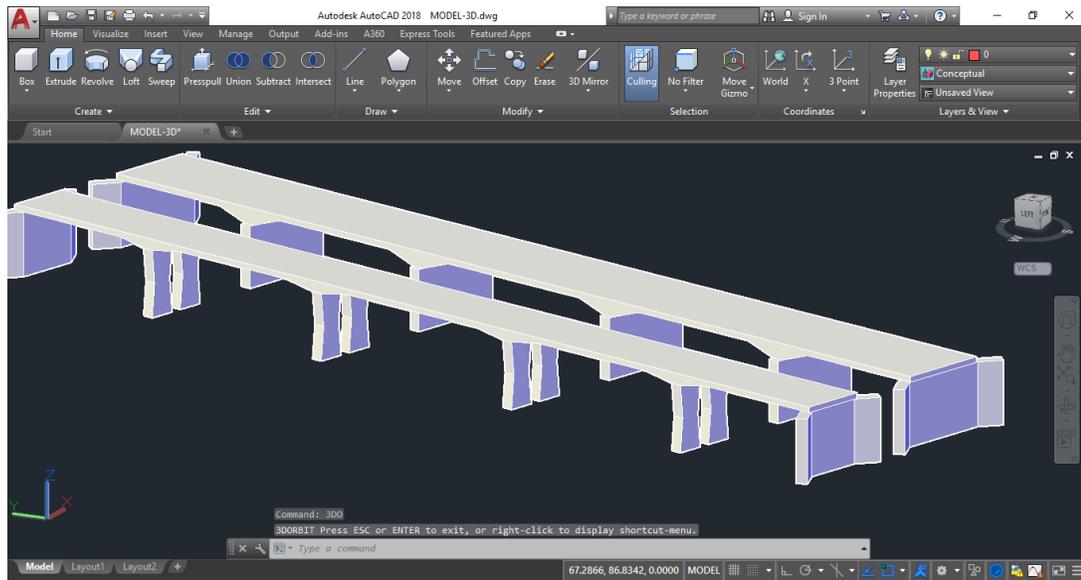


FIGURA 80 - Construcción del modelo 3D para los puentes del río Moche.

Fuente: Autoría propia

Una vez tomadas las medidas del puente con un distanciómetro digital (Herramienta de precisión +/- 0.001mm), procedemos a plantear y crear un modelo tridimensional de cada uno de ellos teniendo en cuenta los detalles necesarios para poder representar de manera adecuada tanto la subestructura como la superestructura. Para la creación y edición del cada sólido que compone el modelo, hemos requerido la aplicación del software AutoCAD CIVIL 3D.

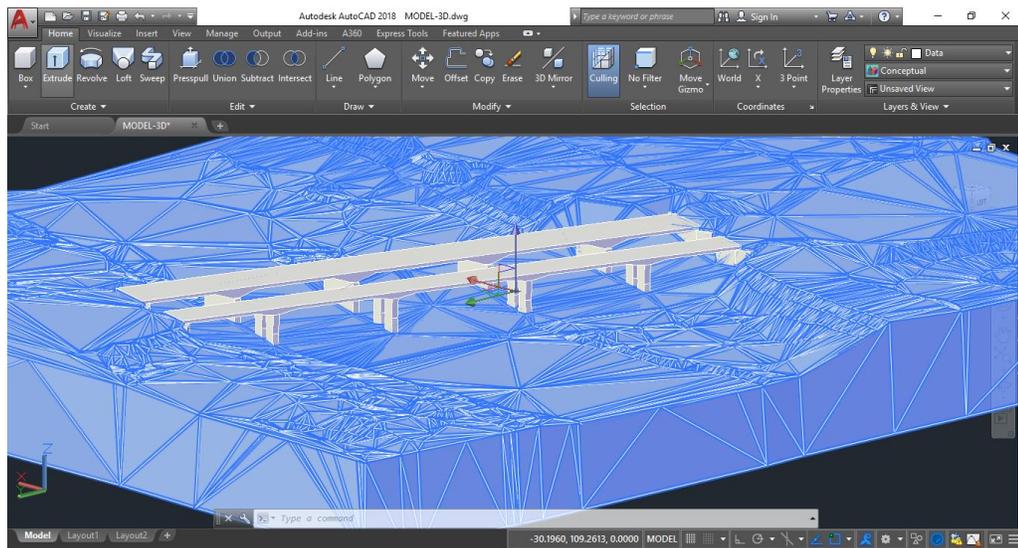


FIGURA 81 Emplazamiento del modelo digital del puente en el cauce del rio Moche.

Fuente: Autoría propia

Luego de construir de manera digital el modelo tridimensional de los puentes, procedemos a emplazar ambas estructuras en la topografía existente del cauce, el resultado de esta combinación se muestra en la imagen superior.

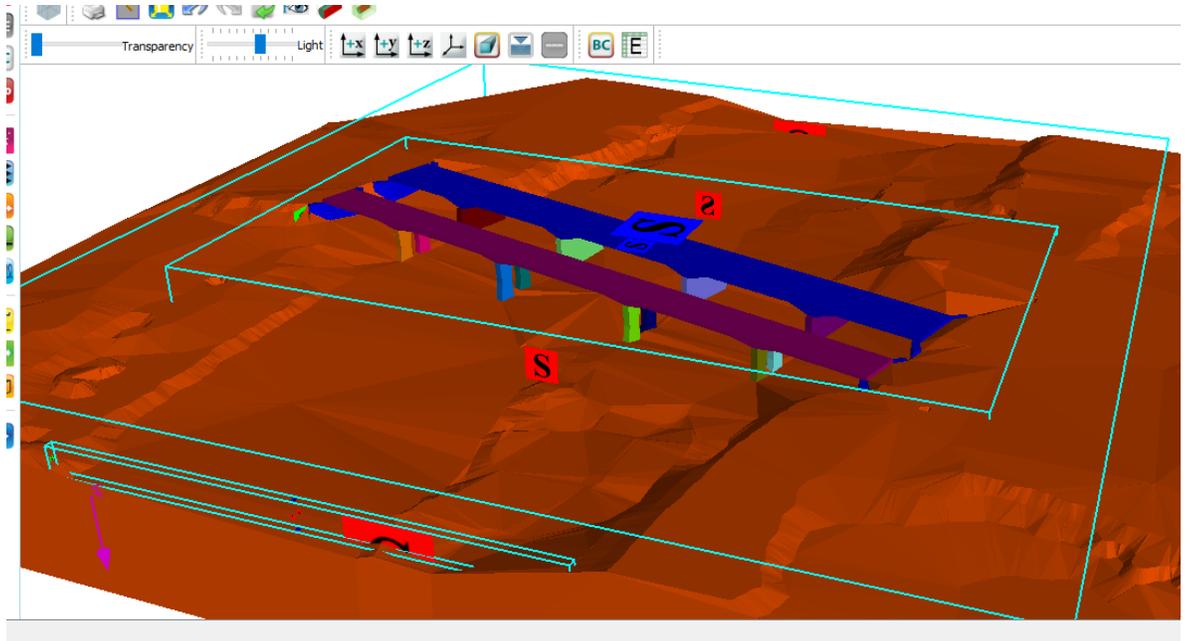


FIGURA 82 - Creación del modelo CDF – Flow3D.

Fuente: Autoría propia

Mediante la aplicación de un software de dinámica de fluidos computacional realizamos la importación de las estructuras representadas por sólidos y colocamos cada una dentro de la interfaz de tal manera que podamos realizar la independización y empotramiento de manera adecuada, para nuestro caso hemos requerido implementar el módulo de análisis de arrastre de sedimentos de fondo y así nosotros poder determinar la socavación localizada en cada uno de los pilares de ambos puentes correspondientes y pertenecientes a la sub estructura, a su vez poder también auscultar el impacto del fluido en cada uno de ellos y los posibles daños que repercutan en la totalidad de la estructura emplazada.

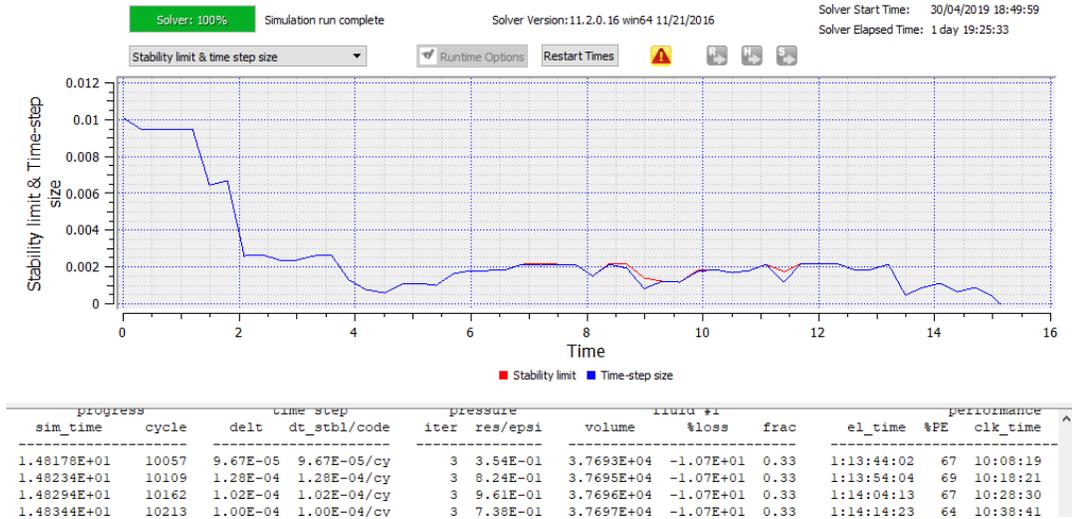


FIGURA 83- Cálculo del modelo hidráulico 3D.

Fuente: Autoría propia

Finalmente damos por finalizado el cálculo de los parámetros hidrodinámicos del modelo numérico computacional, evaluado mediante la discretización en 15 instantes de tiempo.

Además, cabe resaltar que el cálculo realizado por el software ha llevado un régimen muy estable a lo largo de todo el proceso, lo cual se puede visualizar en la convergencia de las líneas azul y roja del display Stability Limit & Time-step.

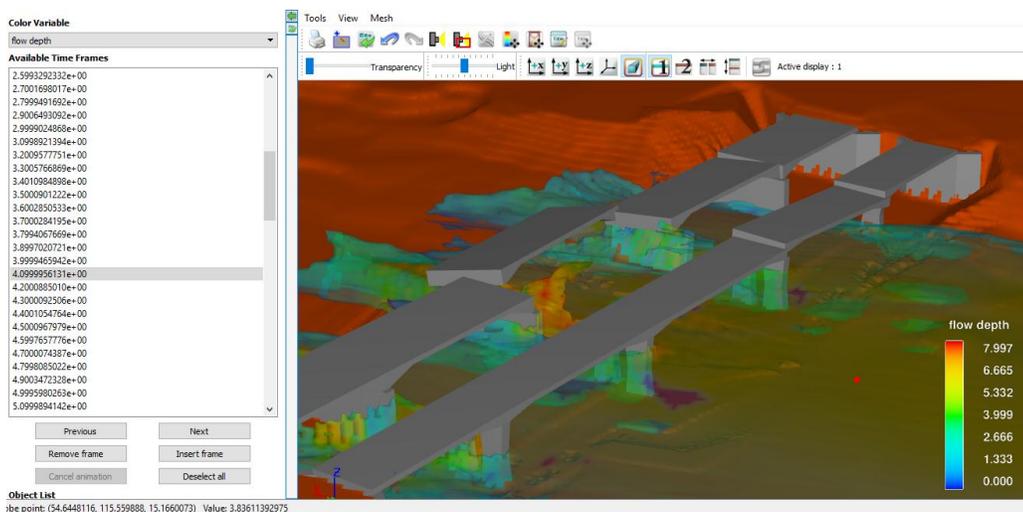


FIGURA 84 - Profundidad del tirante en el cauce para t = 4.09s.

Fuente: Autoría propia

En la imagen superior adjunta, podemos visualizar de manera gráfica y explícita el instante mediante el cual se produce el fallo debido a la socavación, desplazamiento y rotación del segundo pilar perteneciente al primer puente emplazado en el cauce, además el tirante o profundidad del flujo de agua en este instante alcanza 3.84 m por encima de la cota del cauce en el punto localizado en color rojo.

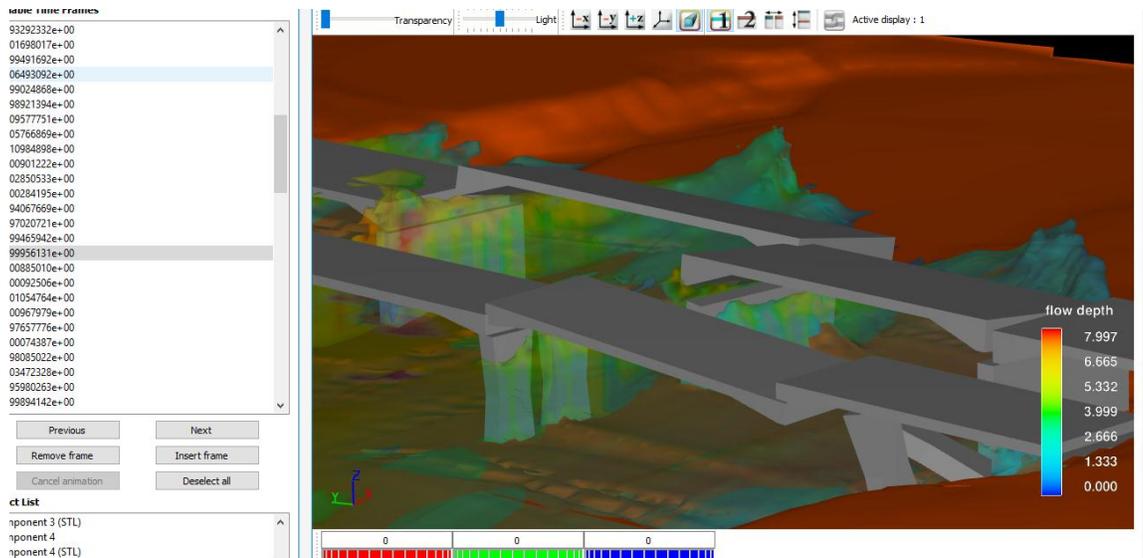


FIGURA 85 - Daños a la sub y superestructura del puente para $t = 4.09s$.

Fuente: Autoría propia

En el instante $t = 4.09 s$, también podemos observar mediante una toma más detallada los daños sufridos por el puente, los cuales han sido ocasionado debido a las cargas de agua provenientes de la máxima avenida, ante lo cual observamos desplazamiento de la losa debido al giro y reclinación de los pilares que la sostienen, además de ello se aprecia que la losa ha fallado en las intersecciones con los pilares, exactamente en los nudos rígidos, debido a que el pilar no está separado del puente mediante una junta con neopreno.

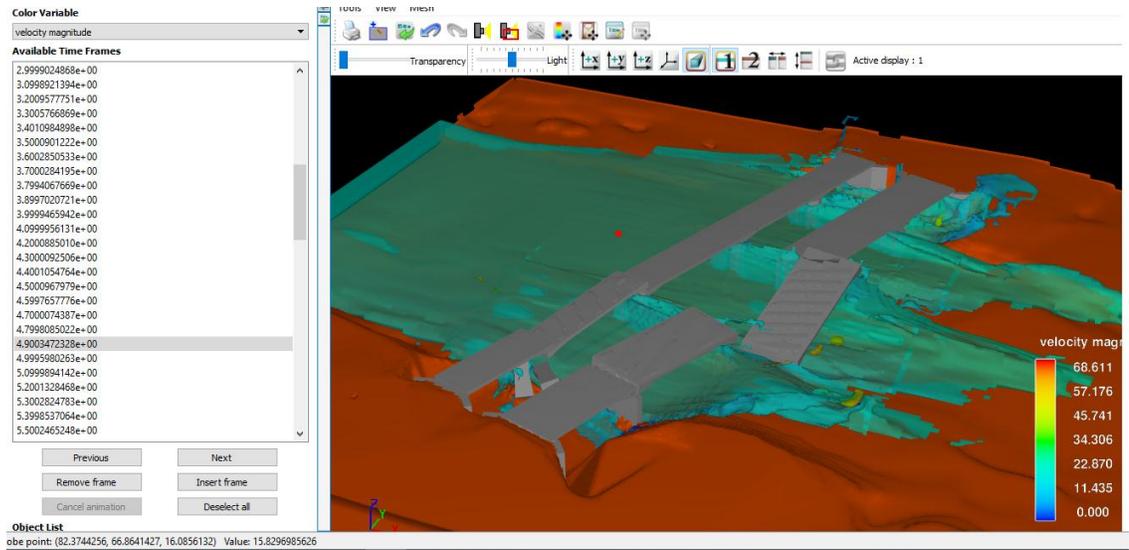


FIGURA 86 - Análisis de la Velocidad en el punto de interés – Perspectiva
Fuente: Autoría propia

En la imagen superior podemos denotar que la velocidad característica en la sección de cauce analizado se encuentra en el intervalo que va desde 11.435 hasta 22.870 m/s, para el punto de interés ubicado en el modelo la velocidad tiene un valor de 15.829 m/s.

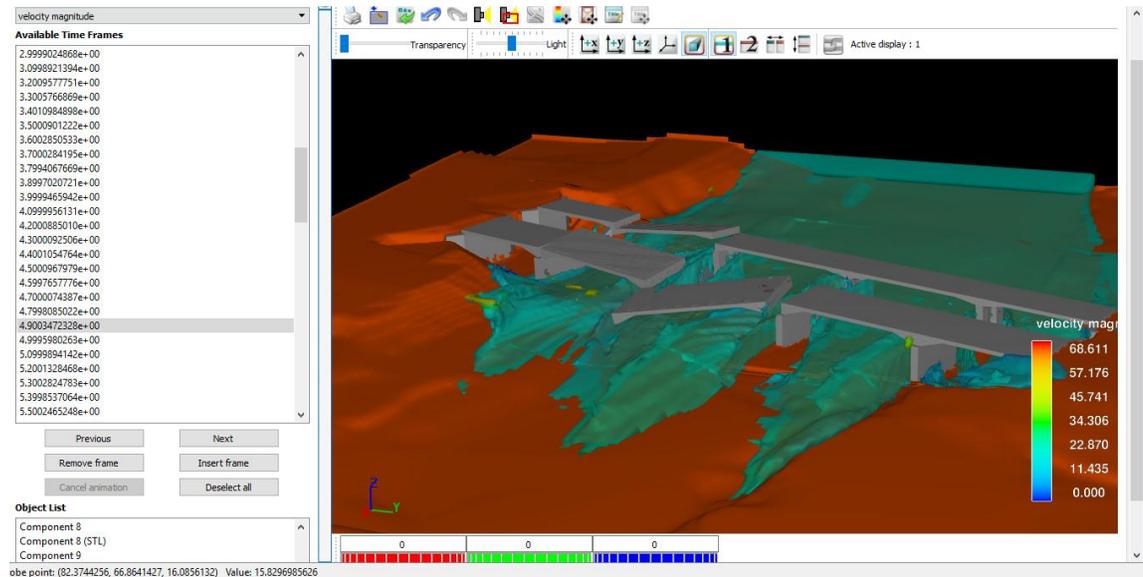


FIGURA 87 – Análisis de la Velocidad en el punto de interés – Perspectiva 02
Fuente: Autoría propia

Hemos considerado una segunda perspectiva para un adecuado entendimiento de la distribución de los intervalos de velocidad del flujo de agua en el modelo.

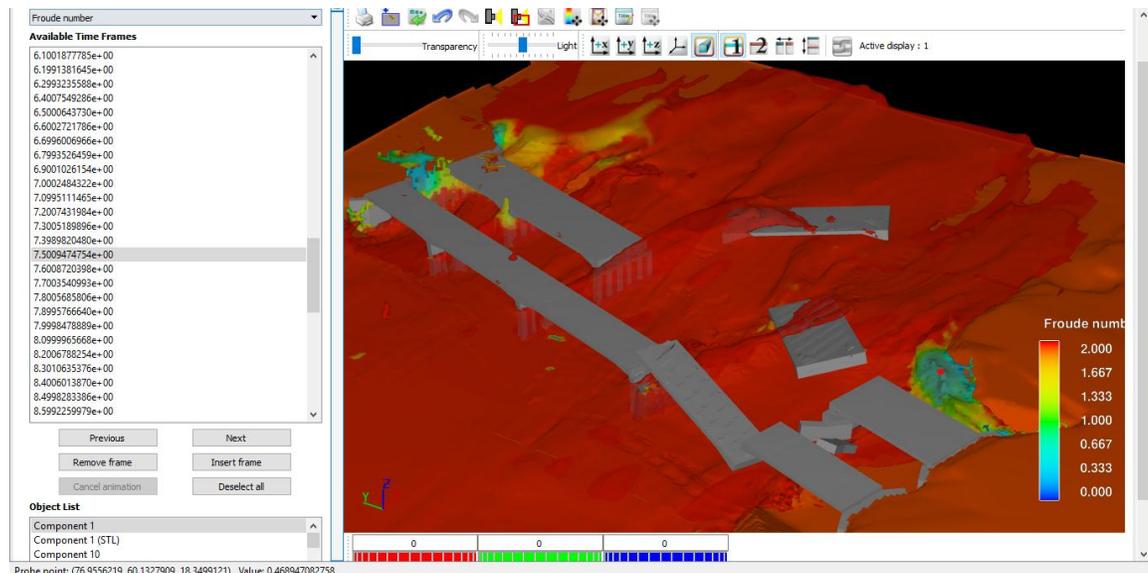


FIGURA 88 - Régimen de flujo en el punto de interés t= 7.50 s-Perspectiva 01

Fuente: Autoría propia

Únicamente hemos señalado el régimen de flujo para el punto de interés ubicado en la margen derecha, ya que solo en las riberas del cauce hemos detectado régimen de flujo subcrítico, a lo largo y ancho de la sección en análisis es predominante el régimen de flujo supercrítico debido a que el número de froude es mayor a la unidad $F > 1$.

En el punto de interés el valor para el número de froude es de 0.44, estando en el intervalo de 0.333 y 0.667 de acuerdo a la gráfica graduada a la derecha del cauce.

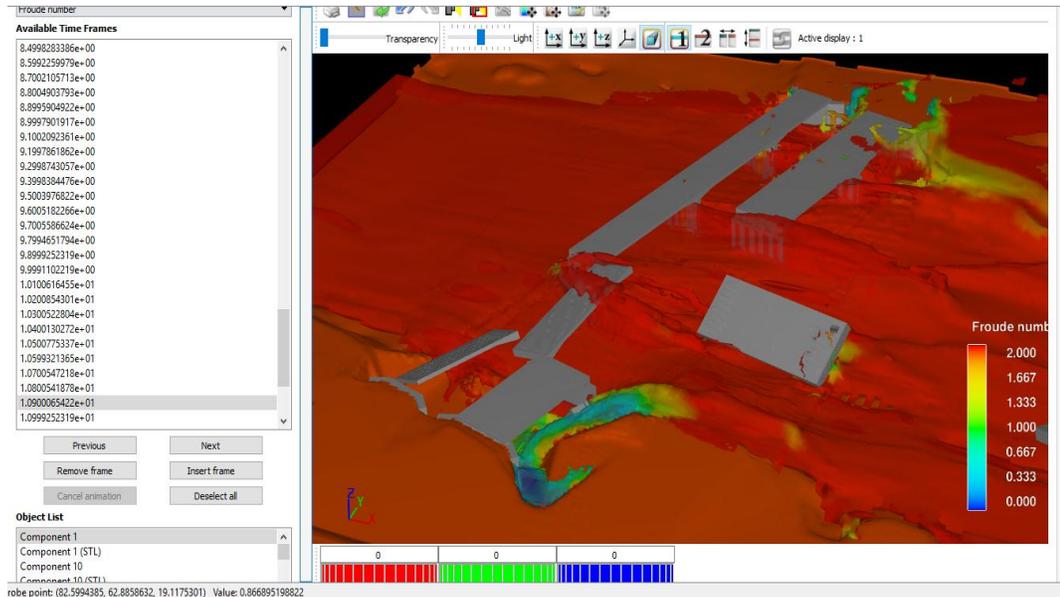


FIGURA 89 - Régimen de flujo en el punto de interés $t = 10.09$ s – Perspectiva 02
Fuente: Autoría propia

4.2. Prueba de hipótesis

La hipótesis plantea que el comportamiento hidrodinámico del puente del río moche influye en evaluación frente a los efectos de erosión y socavación en los pilares dando como resultado una socavación no uniforme de hasta 1.20 m lo cual no sucede, ya que la socavación producto del paso de la máxima hace colapsar los pilares 1 y 2 del primer y segundo puente respectivamente los cuales están empotrados en el cauce a una profundidad de 2.00 m cada uno.

La hipótesis específica plantea que el caudal circundante para la máxima avenida bajo un periodo de retorno de 500 años es de 600 m³/s lo cual es cercano al resultado de acuerdo al estudio de estimación de caudales que nos arroja un resultado de 823.6 m³/s.

V. INTERPRETACION DE RESULTADOS

- Mediante la creación de modelos de dinámica de fluidos computacional hemos determinados los parámetros hidrodinámicos del puente y por ende su comportamiento frente a las cargas dinámicas de agua obteniendo como resultado para el modelo bidimensional; un tirante máximo de 4.95 m en el eje del cauce, esto nos indica que el gálibo quedaría reducido a cero ya que según el levantamiento topográfico, la altura libre entre el cauce y el puente era de 4.79 m en total, teniendo un régimen supercrítico. En cuanto a la erosión se tienen resultados que van en un intervalo 1.02 m a 1.93 m, y la acumulación de sedimentos en zonas dispersas llega a estar entre 2.16 y 0.79 m lo que nos indica que se está rellorando algunas depresiones en el cauce del río.
- En cuanto a la socavación se tienen resultados que van en un intervalo 1.61 m a 2.01 m localizada en los pilares 1 y 2 del primer y segundo puente, el régimen de flujo en la sección de cauce analizada llega a ser supercrítico, un tirante máximo de 3.84m, igualmente desaparece el gálibo y eso lo pudimos denotar de manera visual, la velocidad experimentada en la sección del cauce llega a tener un intervalo que va desde 11.435 hasta 22.97 m/s,
- La topografía del cauce muestra una pendiente transversal de hasta 5%, y una equidistancia para las curvas de nivel de 1.00m, además el intervalo de las curvas de nivel está comprendido entre 9.00 y 20.00 metros sobre el nivel del mar, además se describe a detalle el emplazamiento de los puentes del río moche en el sector levantado.
- El estudio de suelos nos permitió clasificar el material del cauce según la nomenclatura SUCS en arena pobremente graduada (SP) con bajo porcentaje de gravas y mínima presencias y limos – arcillas, además en función a la curva granulométrica corroboramos que se trata de un suelo “mal gradado, poco uniforme (curva parada sin extensión)” (Bosch, 2008, pág. 29),

los diámetros característicos que hemos calculado son D50: 0.23mm, D30: 0.28mm y D10: 0.16mm.

- Los puentes tienen una envergadura de 94.00m en total cada uno, siendo el puente antiguo denominado en este informe como puente 01, con un ancho de 8.40m lineales, sus pilares tienen un ancho de 9.40 y un espesor de 1.00m, para el puente 02 (nuevo), tiene un ancho de 6.10m lineales y consta de 2 pilares que trabajan simultáneamente en cada tramo, siendo irregulares en ancho y teniendo un espesor de 1.00m al igual que el puente 01.
- Del estudio realizado para la estimación del caudal circundante y siguiendo las consideraciones indicadas en el manual de hidrología, hidráulica y drenaje hemos determinado que el caudal para un periodo de retorno de 500 años es de 823.60 m³/s.
- Se construyó 02 modelos de dinámica de fluidos computacional, un modelo en 2 dimensiones empleando IBER 2.3.4, y un mallado superficial de resolución 1.00x1.00m y también se elaboró un modelo numérico en 3 dimensiones utilizando la interfaz del software FLOW3D, con el cual se compiló la versión digital tanto del terreno como del puente creando una simulación a detalle del entorno donde se desarrolla la realidad problemática.
- De la evaluación de la velocidad, hemos determinado que es una velocidad erosiva basándonos en los resultados del modelamiento numérico bidimensional, donde muestra sectores del cauce que han sido afectados por la erosión de entre 1.02 m y 1.93 m, del tirante con un intervalo de 4.12 m a 4.95m podemos concluir que es tan elevado ya que reduce el gálibo a cero, además de ello produce inundación en la faja marginal del cauce del rio en el sector evaluado, para ambas márgenes tanto izquierda como derecha, finalmente el régimen de flujo predominante es el régimen supercrítico, muy característico en cauces con tendencia a la erosión.

- La erosión del cauce está mucho más demarcada y localizada aguas arriba y en la margen derecha, con un valor de hasta 1.93 m, y la socavación de los pilares del puente llega a tener hasta 2.00, excavando en el fondo alrededor las pilas y haciendo que 3 de estas fallen por volteo, dos de estas pertenecen al puente número 01 y la restante al puente número 02.

VI. CONCLUSIONES

- De la evaluación del comportamiento hidrodinámico en 2d podemos obtener que la erosión del cauce se da en la margen izquierda como en el eje central así conseguir los siguientes resultados:
 - Tirante: 4.12 - 4.95m
 - Velocidad: 7.98 – 8.88 m/s
 - Erosion: 1.02 – 1.93
 - Acumulación de Sedimentos: 2.16 – 0.79 m
 - Transporte de Sedimentos: 0.096 – 0.064 m²/s
 - Régimen de Flujo: Supercrítico predominante.
- De la evaluación del comportamiento hidrodinámico en 3d del emplazamiento de los puentes en el cause obtuvimos los siguientes resultados
 - Tirante máximo en el cauce: 3.84m
 - Velocidad 11.435 – 22.87 m/s
 - Erosion f= 0.83 – 0.67
 - Socavacion = 1.61m – 2.01m
 - Regimen de Flujo: Predominante supercrítico.
- La topografía del cauce muestra una pendiente transversal de hasta 5%, y una equidistancia para las curvas de nivel de 1.00m, además el intervalo de las curvas de nivel está comprendido entre 9.00 y 20.00 metros sobre el nivel del mar, además se describe a detalle el emplazamiento de los puentes del rio moche en el sector levantado.
- El estudio de suelos nos permitió clasificar el material del cauce según la nomenclatura SUCS en arena pobremente graduada con bajo porcentaje de gravas y mínima presencias y limos – arcillas (SP), además en función a la curva granulométrica corroboramos que se trata de un suelo “mal gradado, poco uniforme (curva parada sin extensión)” (Bosch, 2008, pág. 29), los diámetros característicos que hemos calculado son D50: 0.23mm, D30: 0.28mm y D10: 0.16mm.

- Los puentes tienen una envergadura de 94.00m en total cada uno, siendo el puente antiguo denominado en este informe como puente 01, con un ancho de 8.40m lineales, sus pilares tienen un ancho de 9.40 y un espesor de 1.00m, para el puente 02 (nuevo), tiene un ancho de 6.10m lineales y consta de 2 pilares que trabajan simultáneamente en cada tramo, siendo irregulares en ancho y teniendo un espesor de 1.00m al igual que el puente 01.
- Del estudio realizado para la estimación del caudal circundante y siguiendo las consideraciones indicadas en el manual de hidrología, hidráulica y drenaje hemos determinado que el caudal para un periodo de retorno de 500 años es de 823.60 m³/s.
- Se construyó 02 modelos de dinámica de fluidos computacional, un modelo en 2 dimensiones empleando IBER 2.3.4, y un mallado superficial de resolución 1.00x1.00m y también se elaboró un modelo numérico en 3 dimensiones utilizando la interfaz del software FLOW3D, con el cual se compiló la versión digital tanto del terreno como del puente creando una simulación a detalle del entorno donde se desarrolla la realidad problemática.
- De la evaluación y caracterización hidrodinámica en 2d y 3d del emplazamiento de los puentes en el cauce obtuvimos los siguientes resultados: Bidimensional - Tirante: 4.12 - 4.95m; velocidad: 7.98 – 8.88 m/s; erosión 1.02 – 1.93; acumulación de sedimentos: 2.16 – 0.79 m; transporte de sedimentos: 0.096 – 0.064 m²/s; Régimen de flujo: Supercrítico predominante, Tridimensional – Tirante máximo en el cauce: 3.84m; velocidad 11.435 – 22.87 m/s; Froude: Predominante supercrítico, riberas $f = 0.83 - 0.67$.

VII. RECOMENDACIONES

- Se recomienda, para obtener mejores resultados en cuanto a la estimación del caudal circundante por el cauce del río Moche sería más factible trabajar con aforos, estos aforos podrían ser obtenidos por hidrometría mediante el método del flotador, o método del correntómetro, esta información debe ser de por lo menos 18 meses, puesto que es imperativo disponer de dicha data a lo largo de todo un año tanto de los meses de estiaje (secos) así como los meses húmedos.
- Se recomienda contar con estaciones pluviométricas para obtener datos consistentes y así poder comparar dichos caudales con acertados procesos de transformación de lluvia a escorrentía.
- Se recomienda que se considere un cambio estructural en los puentes, de tal manera que se aproveche la estabilidad ventajosa de los estribos los cuales no han sido perjudicados durante el fenómeno de ocurrencia de máxima avenida.

VIII. Referencias

- Bedoya Cristancho, J. S. (2015). *Modelación numérica de la socavación local en los estribos del puente sobre el Río Sunuba según las características hidrodinámicas de la zona*. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana.
- Bosch, D. (2008). *Identificación y clasificación de suelos*. Lima: UNI.
- Chow, V. T. (1983). *Hidráulica de canales Abiertos*. Ciudad de Mexico, Mexico: Diana.
- Chow, V. T. (Enero de 2000). *Hidrología Aplicada*. Santa fe de Bogotá, Colombia: MCGRAW-HILL.
- Cotrino Cano, J. W., & Henrandez Genovez, I. W. (2017). *Estudio de la socavación del proyecto del puente el inca ubicado en el rio chorobal del distrito de chao mediante simulación numérica unidimensional*. Trujillo: UPAO.
- Elbio Felipe, M. (2016). *Socavación producida por el río huallaga al puente colpa alta en la provincia de uánuco, utilizando los métodos de artamanov, straub y maza, en el hec-ras*. Lima: UDEP.
- Enciso Navarro, P. D. (2015). *Estudio Hidráulico y Estimación de Socavación en el Puente Interconexión Muyurina- Ayacucho*. Ayacucho: Universidad Nacional San Cristobal de Huamanga.
- Estrada Gutierrez, G. (2014). *Propiedades físico hidráulicas de los canales abiertos*. Mexico: UACH.
- Franco, F., & Scacchi, G. (2001). *Aplicación del método de Lischtvan y Lebediev al calculo de la erosión general*. La plata: Universidad del Litoral de Argentina.
- Juárez Badillo, E., & Rico Rodriguez, A. (1974). *Mecánica de suelos - Flujo de agua en suelos*. Mexico: Limusa.
- Ministerio de Transportes y comunicaciones, M. (2012). *Manual de hidrología, hidráulica y drenaje*. Lima: Ministerio de Transportes y comunicaciones.

Moreno, C., Fuentes, R., & López, A. (1998). *Socavación generalizada: Método de cálculo de Lischtvan-Lebediev y Maza - Verificación experimental*. Oaxaca: Oaxac.

Riaño Valle, F. (2016). *La hidráulica experimental durante el siglo XVIII en Francia*. La Habana: Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría.

Usal. (2012). *Conceptos básicos de hidráulica*. Madrid: OCEANO.

IX. ANEXOS



FIGURA 1- Reconocimiento de campo de estudio.



FIGURA 2 - Medición de los puentes con la ayuda del distanciometro



FIGURA 3- Identificación del terreno para extracción de muestra



FIGURA 4 - Identificación de nudo rígido de la losa con los pilares.



FIGURA 5 - Identificación de dos tipos de pilares.



FIGURA 6 – Toma de muestra.



FIGURA 7 - Peso de la muestras obtenidas del puente moche.



FIGURA 8 - Muestra puesta al horno a una temperatura de $200\text{ }^{\circ}\text{C}$, en un tiempo estimado de 18 a 24 horas.



FIGURA 9 - Ensayo para obtener el peso específico del material.



FIGURA 10 - Ensayo para obtener la granulometría del material.

