

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL**

**MODELACIÓN NUMÉRICA BIDIMENSIONAL DEL RÍO  
GARRAPATA EN LA PROVINCIA DE MANABÍ APLICANDO EL  
PROGRAMA IBER.**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL  
MENCION HIDRÁULICA**

**CRISTIAN IVÁN GUAYA CARAGUAY**  
cristianguaya@gmail.com

**EDISON ANDRÉS MONTALVÁN ALCÍVAR**  
andresplots\_1992@hotmail.com

**DIRECTOR: MSC. ING. JORGE AUGUSTO TOAPAXI ÁLVAREZ**  
jorge.toapaxi@epn.edu.ec

**CODIRECTOR: PhD. KHALED MOHAMED AHMED HAMAD**  
khaled.hamad@epn.edu.ec

**QUITO, Febrero 2018**

## **DECLARACIÓN**

Nosotros, Cristian Guaya y Edison Montalván, declaramos que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido presentado previamente para ningún grado o calificación profesional; y que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional, puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su reglamento y por la normativa vigente.

---

**CRISTIAN IVÁN  
GUAYA CARAGUAY**

---

**EDISON ANDRÉS  
MONTALVÁN ALCÍVAR**

## **CERTIFICACIÓN**

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Cristian Iván Guaya Caraguay y Edison Andrés Montalván Alcívar, bajo mi supervisión.

---

**MSC. ING. JORGE AUGUSTO TOAPAXI ÁLVAREZ**  
**DIRECTOR DEL PROYECTO**

## AGRADECIMIENTO

Con especial cariño y gran amor a mis padres, por ser mi apoyo fundamental, mi gran ejemplo de vida y mi motor para mi superación personal.

A mis queridas hermanas y mis apreciados hermanos políticos por su gran ejemplo de lucha y superación. A mis sobrinos que son fuente de inspiración y motivación para ser mejor.

A la familia Caraguay Ramírez que ha sido mi segundo hogar, por el apoyo moral y anímico que me ofrecieron a lo largo de estos años.

A quien considero como un hermano, Rolo por brindarme su amistad en estos años de gran sacrificio.

De manera especial al Ing. Jorge Toapaxi y al Dr. Khaled Hamad por la disponibilidad, apoyo y tutela brindado en el desarrollo del presente trabajo.

A mi compañero de tesis y mi amigo Andrés, por su compromiso, responsabilidad y colaboración en la finalización de este proyecto.

A Jonathan, Gabriel, David, Mariu, Andre, May, Erik, Juan, Will, Sandy, Juli, Iván, Stalin por brindarme su sincera amistad en este gran camino, Gracias por todo.

*Cristian Iván.*

## DEDICATORIA

A mis padres Pedro y Carmen por ser fuentes de sabiduría e infinito amor en todo momento.

A mis hermanas, Dianita y Vane que siempre me brindan su amor, cariño y protección.

A mis hermanos políticos, Galito y Alez que son un ejemplo de superación profesional y humano.

A mis sobrinos; Camilo David y Matías Alejandro, que gracias a sus muestras de cariño, amor y ternura fueron un aliciente para seguir adelante y vencer los obstáculos día tras día.

A mi bella ciudad de Loja que años atrás me vio partir y a la cual anhelo pronto retornar.

*Cristian Iván.*

## AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por permitirme lograr cumplir esta meta con perseverancia y fortaleza, guiándome en toda la carrera universitaria con paciencia y dedicación.

A mis padres Mireya y Pedro porque en todo momento han apoyado y respetado mis decisiones, además por el cariño que me brindaron. A mis hermanos Luis y Anahí por su compañía y siempre han estado apoyándome.

A Vane, tú por quien lucho, por ser mi todo, mi persona, mi confidente y mi orgullo. Por ser una parte importante en mi vida, por ser mi aliento a seguir a delante y sobre todo el amor incondicional. El hecho de coincidir contigo en esta vida es algo por lo que estoy sumamente agradecido.

A Cristian mi amigo y compañero de tesis, por su amistad, la dedicación y mucho esfuerzo para lograr este proyecto que nos propusimos.

Un agradecimiento especial al Ing. Jorge Toapaxi, por su colaboración y la oportunidad de efectuar este proyecto bajo su ayuda y tutela.

A cada una de las personas que de una u otra forma cooperaron para concluir este proyecto. Finalmente, a la Escuela Politécnica Nacional por haberme acogido en su plantel y dado una formación profesional.

*Edison Andrés.*

## DEDICATORIA

Este proyecto dedico con mucho cariño a mis padres Mireya y Pedro, por ser guía y por inculcarme con valores para culminar mi carrera universitaria.

A mis hermanos y demás familiares en general por su soporte día a día en esta etapa y quienes conforman un apoyo primordial.

A Vane que alegras mis días y le das sentido a mi vida, por ser mi guía en este proyecto, por apoyarme en cada uno de mis pasos, por cada consejo para seguir adelante, logramos juntos esta meta. Con todo el amor dedicado para Ti.

Para ustedes este trabajo, con su presencia todo es posible.

*Edison Andrés.*

## CONTENIDO

DECLARACIÓN .....	II
CERTIFICACIÓN .....	III
AGRADECIMIENTO.....	IV
DEDICATORIA.....	V
AGRADECIMIENTO.....	VI
DEDICATORIA.....	VII
CONTENIDO.....	VIII
ÍNDICE DE FIGURAS .....	XII
ÍNDICE DE TABLAS .....	XVI
ÍNDICE DE ANEXOS .....	XVIII
RESUMEN .....	XIX
ABSTRACT .....	XX
PRESENTACIÓN .....	XXII
CAPÍTULO I .....	1
1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1 ASPECTOS GENERALES.....	1
1.2 JUSTIFICACIÓN .....	2
1.2.1 JUSTIFICACIÓN TEÓRICA .....	2
1.2.2 JUSTIFICACIÓN METODOLÓGICA .....	2
1.2.3 JUSTIFICACIÓN PRÁCTICA .....	3
1.3 ALCANCE .....	3
1.4 OBJETIVOS .....	4
1.4.1 OBJETIVO GENERAL.....	4
1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	4
CAPÍTULO II .....	5
2. MARCO TEÓRICO.....	5
2.1 INTRODUCCIÓN A LA MODELACIÓN NUMÉRICA.....	5



2.1.1	ANTECEDENTES DE LA DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL (C.F.D)	5
2.1.2	GENERALIDADES DE LA DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL (C.F.D.)	8
2.1.2.1	DEFINICIÓN	8
2.1.2.2	CONSIDERACIONES GENERALES	9
2.1.2.3	ESTUDIO DE LA DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL	10
2.1.2.4	PROCESO DE LA DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL	10
2.1.2.5	FUNCIONAMIENTO DE LA DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL	15
2.1.2.6	UTILIDAD	17
2.1.2.7	VENTAJAS E INCONVENIENTES DE LOS C.F.D.	19
2.2	MODELACIÓN NUMÉRICA ASOCIADA AL FLUJO EN RÍOS	20
2.2.1	GENERALIDADES SOBRE LOS RÍOS	20
2.2.2	CLASIFICACIÓN BÁSICA DE LOS RÍOS	21
2.2.3	HIDRÁULICA DE RÍOS	24
2.2.3.1	CAUDALES MÁXIMOS O MÁXIMAS AVENIDAS	24
2.2.3.2	TRÁNSITO DE AVENIDAS	29
2.2.4	MODELACIÓN NUMÉRICA Y SUS APLICACIONES	31
2.2.4.1	MODELACIÓN NUMÉRICA UNIDIMENSIONAL	32
2.2.4.2	MODELACIÓN NUMÉRICA BIDIMENSIONAL	32
2.2.4.3	MODELACIÓN NUMÉRICA TRIDIMENSIONAL	33
2.3	ESTADO DEL ARTE	33
	CAPÍTULO III	37
3.	SIMULACIÓN NUMÉRICA EN EL PROGRAMA IBER	37
3.1	GENERALIDADES	37
3.2	PAQUETE COMPUTACIONAL IBER	38
3.2.1	VENTAJAS DEL MODELO IBER	38
3.2.2	LIMITACIONES DEL MODELO IBER	38
3.2.3	PRE PROCESO	38
3.2.3.1	CONSTRUCCIÓN DE LA MALLA Y LA GEOMETRÍA	39

3.2.3.2	DATOS DE ENTRADA (CONDICIONES INICIALES Y DE CONTORNO) .....	40
3.2.4	ECUACIONES FUNDAMENTALES EN IBER .....	43
3.2.5	POST PROCESO .....	47
3.2.5.1	RESULTADOS DEL PAQUETE COMPUTACIONAL .....	47
3.3	METODOLOGÍA .....	48
3.3.1	3DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO .....	48
3.3.2	RECOPILACIÓN Y ANÁLISIS DE INFORMACIÓN BASE .....	49
3.3.3	INFORMACIÓN CARTOGRÁFICA, MODELO DIGITAL DE TERRENO .....	50
3.3.4	CORRECCIÓN DEL MODELO DIGITAL DEL TERRENO .....	52
3.3.5	CARACTERIZACIÓN DEL TRAMO DE ESTUDIO .....	53
3.3.6	DEFINICIÓN HIDROGRAMAS ASOCIADOS A PERIODOS DE RETORNO .....	63
3.3.7	GEOMETRÍA DEL MODELO NUMÉRICO .....	68
3.3.8	CONDICIONES DE CONTORNO DEL MODELO NUMÉRICO .....	69
3.3.9	ELABORACIÓN DEL MALLADO DEL ÁREA DE ESTUDIO .....	73
3.3.10	CONFIGURACIÓN DE MODELO NUMÉRICO .....	76
3.3.11	PLAN DE SIMULACIONES .....	79
3.3.12	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DEL MALLADO .....	79
3.3.13	CALIBRACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO .....	82
	CAPÍTULO IV .....	85
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	85
4.1	MODELACIÓN DE CAUDALES MÁXIMOS .....	85
4.2	HIDROGRAMAS DE SALIDA .....	85
4.2.1	HIDROGRAMA DE SALIDA FLUJO PERMANENTE .....	85
4.2.2	HIDROGRAMA DE SALIDA DE FLUJO NO PERMANENTE .....	88
4.3	VALORES MÁXIMOS DE LAS VARIABLES HIDRAULICAS .....	92
4.4	ANÁLISIS COMPARATIVO CON ESTUDIOS PREVIOS .....	93
4.5	MAPAS TEMÁTICOS DE LAS VARIABLES HIDRÁULICAS A LOS PERIODOS DE RETORNO DEFINIDOS .....	95
	CAPÍTULO V .....	98

5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	98
5.1	CONCLUSIONES.....	98
5.2	RECOMENDACIONES .....	100
	BIBLIOGRAFÍA .....	103
	ANEXOS .....	106

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 2.1 DISCRETIZACIÓN DE VARIABLES .....	11
FIGURA 2.2 TIPOS DE MALLAS .....	13
FIGURA 2.3 MALLA HEXAGONAL .....	13
FIGURA 2.4 MALLA TRIANGULAR .....	14
FIGURA 2.5 EJEMPLO DE MALLA HÍDRIDA .....	14
FIGURA 2.6 MALLAS CON PUNTOS CENTRADOS EN LOS ELEMENTOS Y CENTRADOS EN LOS VÉRTICES DE LAS CELDAS .....	16
FIGURA 2.7 MOVIMIENTO DE ONDA CINEMÁTICA Y DINÁMICA .....	30
FIGURA 3.1 REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LA GEOMETRICA RTIN EN IBER DEL RIO GARRAPATA. ....	40
FIGURA 3.2 VEGETACIÓN DEL MODELO PARA ASIGNACION DE COEFICIENTE DE RUGOSIDAD .....	41
FIGURA 3.3 USO DE SUELO PARA LA ASIGNACION DE COEFICIENTE DE RUGOSIDAD .....	41
FIGURA 3.4 VISUALIZACIÓN DE RESULTADOS EN EL PROGRAMA IBER .....	47
FIGURA 3.5 UBICACIÓN DEL RÍO GARRAPATA .....	49
FIGURA 3.6 ORTOFOTO DEL ÁREA DE ESTUDIO .....	50
FIGURA 3.7 MODELO DIGITAL DE TERRENO DEL ÁREA DE ESTUDIO .....	51
FIGURA 3.8 CORRECCIÓN DEL MODELO DIGITAL DE TERRENO .....	52
FIGURA 3.9 RESULTADO DEL PROCESO DE CORRECCIÓN DEL MDT .....	53
FIGURA 3.10 UBICACIÓN DEL CAUCE EN LA IMAGEN SATELITAL DEL CANTÓN CHONE .....	54
FIGURA 3.11 CLIMAS DE LAS PARROQUIAS RICAURTE Y CHONE .....	55
FIGURA 3.12 CUENCA HIDROGRAFICA DEL RÍO CHONE .....	57
FIGURA 3.13 FORMAS DE RELIEVE DE LA ZONA DE ESTUDIO. ....	59

FIGURA 3.14 DIVISIÓN EN ZONAS DEL ÁREA DE MODELACIÓN PARA EL CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE RUGOSIDAD DE MANNING.....	61
FIGURA 3.15 HIDROGRAMA UNITARIO TRIANGULAR .....	64
FIGURA 3.16 CAUDALES ASOCIADOS A PERIODOS DE RETORNO .....	66
FIGURA 3.17 HIDROGRAMA DE CRECIDA CONSTANTE PARA MODELACIÓN NUMÉRICA. ....	67
FIGURA 3.18 HIDROGRAMA DE CRECIDA TRIANGULAR PARA MODELACIÓN NUMÉRICA. ....	67
FIGURA 3.19 VENTANA DE IMPUTACION DE GEOMETRÍA DEL ÁREA DE ESTUDIO EN IBER .....	68
FIGURA 3.20 GEOMETRÍA DEL MODELO .....	69
FIGURA 3.21 VENTANA DE ENTRADA DE LAS CONDICIONES DE CONTORNO PARA EL HIDROGRAMA CONSTANTE EN IBER .....	70
FIGURA 3.22 VENTANA DE ENTRADA DE LAS CONDICIONES DE CONTORNO PARA EL HIDROGRAMA TRIANGULAR EN IBER .....	70
FIGURA 3.23 VENTANA DE SALIDA DE LAS CONDICIONES DE CONTORNO EN IBER .....	71
FIGURA 3.24 CONDICIONES INICIALES DE MODELACIÓN .....	72
FIGURA 3.25 CONDICIÓN INICIAL ESTABLECIDA .....	72
FIGURA 3.26 VENTANA DE ASIGNACIÓN DEL TAMAÑO DE LA MALLA PARA EL ÁREA DE ESTUDIO EN IBER.....	73
FIGURA 3.27 VENTANA PARA GENERAR LA MALLA DEL ÁREA DE ESTUDIO EN IBER .....	74
FIGURA 3.28 INGRESO DE COEFICIENTES DE RUGOSIDAD ASIGNADOS AL MODELO .....	75
FIGURA 3.29 ASIGNACIÓN DEL COEFICIENTE DE RUGOSIDAD .....	75
FIGURA 3.30 PRESENTACION DE LOS COEFICIENTES DE RUGOSIDAD ASIGNADOS EN EL MODELO.....	76
FIGURA 3.31 VENTANA PARA EL INGRESO DE LOS PARÁMETROS DE TIEMPO EN IBER .....	77
FIGURA 3.32 VENTANA DE DATOS GENERALES EN IBER.....	77
FIGURA 3.33 VENTANA DE RESULTADOS.....	78
FIGURA 3.34 VENTANA DE INFORMACIÓN DEL PROCESO .....	78

FIGURA 3.35 SECCIÓN TRANSVERSAL DE CALIBRACIÓN .....	83
FIGURA 4.1 HIDROGRAMA DE SALIDA RESULTANTE DE LA MODELACIÓN NUMÉRICA BIDIMENSIONAL CON FLUJO PERMANENTE PARA EL CAUDAL ASOCIADO AL PERIODO DE RETORNO DE 5 AÑOS. ....	86
FIGURA 4.2 HIDROGRAMA DE SALIDA RESULTANTE DE LA MODELACIÓN NUMÉRICA BIDIMENSIONAL CON FLUJO PERMANENTE PARA EL CAUDAL ASOCIADO AL PERIODO DE RETORNO DE 10 AÑOS. ....	86
FIGURA 4.3 HIDROGRAMA DE SALIDA RESULTANTE DE LA MODELACIÓN NUMÉRICA BIDIMENSIONAL CON FLUJO PERMANENTE PARA EL CAUDAL ASOCIADO AL PERIODO DE RETORNO DE 25 AÑOS. ....	87
FIGURA 4.4 HIDROGRAMA DE SALIDA RESULTANTE DE LA MODELACION NUMERICA BIDIMENSIONAL CON FLUJO PERMANENTE PARA EL CAUDAL ASOCIADO AL PERIODO DE RETORNO DE 50 AÑOS. ....	87
FIGURA 4.5 HIDROGRAMA DE SALIDA RESULTANTE DE LA MODELACIÓN NUMÉRICA BIDIMENSIONAL CON FLUJO PERMANENTE PARA EL CAUDAL ASOCIADO AL PERIODO DE RETORNO DE 100 AÑOS .....	88
FIGURA 4.6 HIDROGRAMA DE SALIDA RESULTANTE DE LA MODELACIÓN NUMÉRICA BIDIMENSIONAL CON FLUJO NO PERMANENTE PARA EL CAUDAL ASOCIADO AL PERIODO DE RETORNO DE 5 AÑOS. ....	89
FIGURA 4.7 HIDROGRAMA DE SALIDA RESULTANTE DE LA MODELACIÓN NUMÉRICA BIDIMENSIONAL CON FLUJO NO PERMANENTE PARA EL CAUDAL ASOCIADO AL PERIODO DE RETORNO DE 10 AÑOS .....	89
FIGURA 4.8 HIDROGRAMA DE SALIDA RESULTANTE DE LA MODELACIÓN NUMÉRICA BIDIMENSIONAL CON FLUJO NO PERMANENTE PARA EL CAUDAL ASOCIADO AL PERIODO DE RETORNO DE 25 AÑOS. ....	90
FIGURA 4.9 HIDROGRAMA DE SALIDA RESULTANTE DE LA MODELACIÓN NUMÉRICA BIDIMENSIONAL CON FLUJO NO	

PERMANENTE PARA EL CAUDAL ASOCIADO AL PERIODO DE RETORNO DE 50 AÑOS. ....	90
--	----

FIGURA 4.10 HIDROGRAMA DE SALIDA RESULTANTE DE LA MODELACIÓN NUMÉRICA BIDIMENSIONAL CON FLUJO NO PERMANENTE PARA EL CAUDAL ASOCIADO AL PERIODO DE RETORNO DE 100 AÑOS. ....	91
--	----

FIGURA 4.11 COMPARACIÓN DE MANCHA DE INUNDACIÓN: VARIABLE CALADO .....	96
---	----

FIGURA 4.12 COMPARACIÓN DE MANCHA DE INUNDACIÓN: VARIABLE VELOCIDAD .....	97
--	----

## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 2.1 ETAPAS EN UN ANÁLISIS DE CFD .....	10
TABLA 2.2 EJEMPLOS DE APLICACIÓN DE LOS CFD.....	17
TABLA 2.3 CLASIFICACIÓN DE CAUCES NATURALES .....	22
TABLA 2.4 NÚMEROS DE CURVA PARA LAS DIFERENTES SITUACIONES SUELO-VEGETACIÓN .....	28
TABLA 2.5 ESTADO DEL ARTE .....	34
TABLA 3.1 CONDICIONES QUE POSEE EL PROGRAMA IBER .....	42
TABLA 3.2 VALORES DE COEFICIENTE DE ARRASTRE SUPERFICIAL. ....	46
TABLA 3.3 DESCRIPCIÓN DE LOS CLIMAS DEL RÍO GARRAPATA .....	56
TABLA 3.4 CARACTERÍSTICAS DE LA CUENCA DEL RÍO GARRAPATA.....	57
TABLA 3.5 COEFICIENTES DE LA ECUACIÓN DE COWAN.....	60
TABLA 3.6 VALORES CALCULADOS PARA EL COEFICIENTE DE RUGOSIDAD DE MANNING.....	62
TABLA 3.7 INFORMACIÓN DE LA ESTACIÓN HIDROLÓGICA H0230 .....	63
TABLA 3.8 RESUMEN DE CAUDALES MAXIMOS ASOCIADOS A PERIODOS DE RETORNO.....	63
TABLA 3.9 CAUDALES MÁXIMOS PARA LA MODELACIÓN.....	64
TABLA 3.10 HIDROGRAMA PARA FLUJO NO PERMANENTE. ....	66
TABLA 3.11 RESUMEN DE PLAN DE SIMULACIÓN.....	79
TABLA 3.12 RESULTADOS OBTENIDOS EN LA APLICACIÓN DE DIFERENTES TAMAÑOS DE MALLADO .....	80
TABLA 3.13 TIEMPO DE SIMULACION OBTENIDOS PARA LOS DIFERENTES TAMAÑOS DE MALLA .....	81
TABLA 3.14 COEFICIENTES DE RUGOSIDAD UTILIZADOS EN EL MODELO DE CALIBRACIÓN.....	82



TABLA 3.15 COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS NUMÉRICOS OBTENIDOS EN LA SECCIÓN DE CALIBRACIÓN. ....	83
TABLA 4.1 TIEMPO DE SALIDA DEL FLUJO .....	92
TABLA 4.2 VALORES MAXIMOS OBTENIDOS EN LA SIMULACIÓN.....	93
TABLA 4.3 UBICACIÓN DE SECCIONES TRANSVERSALES .....	94
TABLA 4.4 COMPARACIÓN DE CALADOS MÁXIMOS .....	95

## ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO N° I: DIVISIÓN POLÍTICA EN PARROQUIAS DEL CANTÓN CHONE .....	107
ANEXO N° II: TOPOGRAFÍA DEL RÍO GARRAPATA EN EL TRAMO DE ESTUDIO .....	109
ANEXO N° III: ASIGNACIÓN DE COEFICIENTE DE RUGOSIDAD PARA LAS 9 ZONAS DE POLÍGONO DE MODELACIÓN .....	110
ANEXO N° IV: AFOROS HISTÓRICOS DEL INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA .....	116
ANEXO N° V: MAPAS DE LAS VARIABLES HIDRÁULICAS ASOCIADOS A LOS PERIODOS DE RETORNO DE 5, 10, 25, 50 Y 100 AÑOS .....	118
ANEXO N° VI: GUIA PARA PARA PREPARACIÓN DE INFOMACIÓN BASE.....	149
ANEXO N° VII: GUIA DE USO DEL PROGRAMA IBER.....	153
ANEXO N° VIII: DOCUMENTOS DE LEGALIDAD DE INFORMACIÓN .....	162

## RESUMEN

El presente estudio tiene como objetivo desarrollar la modelación numérica bidimensional del Río Garrapata para el tránsito de caudales máximos asociados a diferentes periodos de retorno, mediante la aplicación del paquete computacional IBER, con la finalidad de generar resultados que permitan realizar mapas temáticos de las variables hidráulicas e identificar áreas de inundación.

El modelo numérico se basó en la recopilación de información como: Ortofotos, Modelo Digital de Terreno, uso de suelo, información hidrológica, entre otras, proporcionadas por entidades públicas que se mencionan en el desarrollo del proyecto, esta información fue fundamental para la calibración del modelo y la modelación de los escenarios de crecida.

Para el desarrollo de la modelación numérica en IBER se consideró; aspectos referentes a la sensibilidad del tamaño de la malla en los resultados y en la distorsión del terreno, mientras que para la calibración del modelo se realizó en función de los registros de campo y la variación del coeficiente de rugosidad de Manning determinado mediante la fórmula de Cowan en una estimación inicial.

Como resultado de este estudio se obtuvo la modelación numérica de caudales de crecida asociados a periodos de retorno de 5, 10, 25, 50 y 100 años en condiciones de flujo permanente y no permanente. Además, se presenta la comparación de resultados obtenidos con la modelación numérica unidimensional realizada en el mismo tramo.

Con los valores obtenidos de cada simulación se generaron mapas temáticos correspondientes a los valores máximos de las variables: velocidad, calado y número de Froude, que permitan identificar áreas de riesgo.

## **ABSTRACT**

The aim of this study is to develop the bi-dimensional numeric modeling of Garrapata River for the transit of maximum flows in different return periods, by means of the use of IBER software package. The purpose of this work is the obtaining of results for the develop of thematic maps containing hydraulic variables which allow the identification of flood areas.

The numerical model used in this study was based on the collection of information, such us: orthophotos, Digital Terrain Model, land use, hydrological information and other. This material was provided by some public entities and it was useful for the calibration of the model and the modeling of flood scenarios.

The numerical modeling in IBER was developed taking into account some aspects, like sensitivity of the mesh size on the results and in the distortion of the terrain. On the other hand, the calibration of the model was done considering the field records and the variation of the roughness coefficient of Manning that was determined by the Cowan equation by an initial estimation.

The result of this study is the numerical modeling of flood flows associated with return periods of 5, 10, 25, 50 and 100 years under permanent and non-permanent flow conditions. In addition, it was obtained a comparison between bi-dimensional and one-dimensional results of numerical modeling in a same section.

Thematic maps were generated based on the values obtained in each simulation corresponding with maximum values of variables such as: speed, draft and Froude number, which allow the identification of risk areas.

## PRESENTACIÓN

El presente proyecto de modelación bidimensional del Río Garrapata está dividido por 5 capítulos de la siguiente manera:

En el capítulo I, se presenta los aspectos generales del proyecto como: introducción, alcance, justificación teórica y práctica, además del objetivo general y objetivos específicos.

En el capítulo II, se detalla de manera general base teórica para la modelación del Río Garrapata, con temas como: antecedentes y generalidades importantes de la dinámica computacional, además de la modelación asociada al tránsito de avenidas y el estado del arte.

El capítulo III, describe las características principales del paquete computacional IBER, seguidamente de la metodología detallada utilizada en la modelación numérica como: descripción del área de estudio, recopilación y tratamiento de la información, además contiene los pasos para la creación del modelo en el programa IBER como: generación de geometría, condiciones de contorno e iniciales, creación de la malla, asignación de rugosidad y configuración del modelo.

En el capítulo IV, se discute los resultados obtenidos de este proyecto de cada una de las variables hidráulicas, se presenta además de cuadros de aclaraciones y comparaciones de estos.

En el capítulo V, finalmente se presenta las conclusiones del presente proyecto de titulación y las recomendaciones como base para futuras modelaciones.

# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

### 1.1 ASPECTOS GENERALES

El estudio del comportamiento hidrodinámico de un cauce ante un evento de crecida es primordial para encontrar soluciones a los problemas de la hidráulica fluvial. Por lo tanto, el uso de modelos físicos a escala y modelos numéricos tienen la finalidad de encontrar los valores de las variables hidráulicas que se desarrollan en el cauce.

La influencia de las intensas precipitaciones en Manabí de manera constante ha generado eventos de crecidas y desbordamientos de los ríos, provocando inundaciones en grandes áreas donde se ubican sectores habitacionales, parcelas agrícolas, industriales y otros medios de producción económica.

A lo mencionado se suma la existencia de deforestación en la parte alta y media de la cuenca del Río Garrapata, ocasionando que el río acarree gran cantidad de material de manera que el cauce se azolve y conlleve a la pérdida de la capacidad hidráulica, por lo tanto produce que el flujo de agua que transita se desborde en el paso caudales extraordinarios, inundando las comunidades que se encuentran en las cercanías de la ribera del río (INAMHI, 2008).

El propósito de este proyecto se enfoca en el análisis hidrodinámico del Río Garrapata mediante la modelación numérica en el paquete computacional IBER, que permite la simulación de flujo en lámina libre de forma bidimensional (Bladé et al, 2012). De esta forma se pretende encontrar el valor de las variables hidráulicas del río que se generan en el tránsito de caudales de crecida asociados a diferentes periodos de retorno. Con la finalidad de generar mapas temáticos de dichas variables de la zona de estudio que sirvan de información base para mitigar los efectos de inundación sobre las comunidades cercanas a la orilla del río.

## **1.2 JUSTIFICACIÓN**

### **1.2.1 JUSTIFICACIÓN TEÓRICA**

En los últimos años el desarrollo de herramientas y capacidades tecnológicas, hacen más asequible el empleo de modelos numéricos, que han permitido analizar situaciones cada vez más complejas como los flujos turbulentos. Debido al incremento en las capacidades y velocidad de cálculo de los computadores, se facilita la introducción de paquetes computacionales para modelización numérica como una herramienta de simulación que complementa la modelización física. El uso de la modelización física y numérica permite el estudio de diversos escenarios, así como la implementación de soluciones optimizadas en el diseño o en un prototipo (Ochoa et al., 2016).

Para geometrías complicadas, como son las de los ríos, la modelación puede hacerse mediante modelos físicos o modelos a escala reducida, también mediante modelación numérica que presenta una ventaja sustancial en costo de construcción y operación sobre los modelos a escala reducida, además del prolongado tiempo que requieren para su construcción y toma de datos en cualquier estudio.

El Modelo Hidrodinámico Bidimensional IBER es un modelo numérico de simulación de flujo turbulento en lámina libre en régimen no permanente, y de procesos medioambientales en hidráulica fluvial. El rango de aplicación de IBER abarca la hidrodinámica fluvial, la simulación de roturas de presas, la evaluación de zonas inundables, el cálculo de transporte de sedimentos y el flujo de marea en estuario (Bladé et al., 2012).

### **1.2.2 JUSTIFICACIÓN METODOLÓGICA**

Para realizar una descripción de fenómenos naturales como: inundación de una gran llanura, la confluencia de dos cauces, el cruce de dos corrientes de agua, el flujo desarrollado en un cauce ancho e irregular, etc., la aproximación numérica unidimensional deja de prestar las garantías adecuadas, por lo cual se debe



desarrollar esquemas cuasi-bidimensionales y luego esquemas de mayor precisión como son los bidimensionales propiamente dichos (Bladé, 2005).

Los modelos numéricos existentes se encuentran en constante evolución, los resultados de esta aplicación se pueden combinar con datos georeferenciados para realizar una cuantificación sistemática de fenómenos naturales como las inundaciones. Existen desafíos como la existencia de puentes y estructuras que se involucran en la morfología del cauce, que ocasiona una difícil caracterización del comportamiento del río, es así que la modelación bidimensional finalmente optimiza el tiempo para los cálculos hidráulicos (Bladé et al., 2014).

### **1.2.3 JUSTIFICACIÓN PRÁCTICA**

El presente trabajo se desarrollará mediante el uso del programa IBER con el propósito de generar una simulación a lo largo del Río Garrapata, con la finalidad de la delimitación de poblaciones propensas a ser inundadas.

Con los resultados obtenidos en este estudio se podrá obtener una base confiable para el desarrollo de proyectos de evaluación de riesgo ante inundación que pretenda desarrollar algún ente pertinente, y podrá ser tomada como base sólida para el desarrollo de programas de ordenamiento territorial.

## **1.3 ALCANCE**

La finalidad de este trabajo de titulación, es realizar la modelación numérica bidimensional del Río Garrapata de la provincia de Manabí, con el uso del paquete computacional IBER, estableciendo los criterios necesarios en el mallado y el coeficiente de rugosidad, para una adecuada calibración y simulación del modelo, para caudales máximos asociados a periodos de retorno de: 5, 10, 25, 50 y 100 años

De los resultados obtenidos se generarán mapas temáticos con las variables hidráulicas más importantes, como son el calado y la velocidad.

## **1.4 OBJETIVOS**

### **1.4.1 OBJETIVO GENERAL**

Aplicar la modelación numérica bidimensional asociada a eventos de crecida del Río Garrapata para la generación de mapas temáticos hidráulicos.

### **1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Establecer una metodología para la obtención de mapas de inundación aplicando modelos numéricos.
- Determinar las áreas potencialmente afectadas por las inundaciones para diferentes periodos de retorno.
- Analizar las ventajas y desventajas en el uso del paquete computacional IBER para modelación numérica bidimensional en zonas susceptibles de crecidas.

## **CAPÍTULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1 INTRODUCCIÓN A LA MODELACIÓN NUMÉRICA**

Paralelamente, con el avance e incremento de la capacidad de los ordenadores, las técnicas de la modelación numérica también han evolucionado en el desarrollo del cálculo numérico de flujos en lámina libre. Con el paso de los tiempos los primeros modelos 1D en secciones simples han dado paso a un estudio más profundo, no solo en 2D para calados promedio sino también en 3D con modelos más complejos (Pérez L., 2004).

La modelación numérica se acopla a los problemas de la ingeniería del agua, en flujos donde existen cambios de régimen, geometrías complejas y con llanuras en el cual predomina la inundación, estructuras presentes en el cauce como: puentes, presas, taludes, vías, etc. El uso de la modelación numérica favorece en cuanto al tiempo y costo de resolver los problemas frente a los modelos físicos, además un modelo numérico genera información en todo el dominio del cálculo (Bladé E., 2005).

En esta sección se describen conceptos en cuanto a la modelación numérica basados en la dinámica computacional de fluidos, con una visión global en antecedentes, criterios, generalidades y métodos de resolución de ecuaciones especialmente utilizados en problemas fluviales de inundación en llanuras.

##### **2.1.1 ANTECEDENTES DE LA DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL (C.F.D)**

En la antigüedad los fluidos fueron investigados y analizados por Arquímedes, observando la interacción de los mismos los cuales al ser sometidos a una presión se desplazan desde zona de mayor a menor presión. El precursor que introdujo

las ecuaciones matemáticas al comportamiento de los fluidos fue Leonardo Da Vinci para el siglo XV, la ecuación de continuidad o de la conservación de la masa, fue uno de los trabajos que más destacados de su autoría (Orrego S., 2009).

Para el XIX, Claude-Luis Navier y George Stokes, desarrollaron la teoría sobre la fricción de fluidos de movimiento y formularon la famosa ecuación de Navier-Stokes, que describe el movimiento del fluido en un conjunto de ecuaciones en derivadas parciales, que al ser solucionadas permiten conocer el valor de las principales variables de un fluido tales como presión, temperatura, velocidad, entre otras.

Actualmente se debe recurrir a un análisis numérico para la solución del conjunto de ecuaciones, tomando en cuenta tipos de flujo y escenarios concretos. Este análisis se lo realiza mediante computadoras que nos facilitan los cálculos para llegar a una solución aproximada, esto se lo conoce como dinámica de fluidos computacional CFD.

La historia de la utilización de la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) inicia en los años 60, cuyas abreviaciones en ingles son CFD (Computational Fluid Dynamics), principalmente involucrados en la combinación física, métodos numéricos y computacionales, con el objetivo principal el cálculo de flujos (Álvarez E., 2008).

El desarrollo del CFD se observa principalmente en los avances tecnológicos, que está ligado a su vez en el progreso del campo de los fluidos. El CFD tuvo origen a partir de la combinación de dos disciplinas: mecánica de los fluidos y cálculo numérico. Las ecuaciones que rigen el flujo fluido tienen origen en la mecánica de los fluidos y pueden ser resueltas por medio de diferentes métodos numéricos (Kessler M, 2016).

Según De Ulloa (2005), los CFD dieron inicio en la industria aeroespacial, de ahí en adelante se desarrollaron nuevos métodos, siendo a inicios de los años 80 una herramienta útil en industrias para la predicción de fluidos. En los años 90 se expandieron ampliamente en distintas aplicaciones tales como transferencia de calor, fenómenos relacionados con reacciones químicas (combustión), flujos bifásicos, intercambio de masas e interacción con sólidos.

De acuerdo a Álvarez E. (2008), para la resolución de flujos viscosos, el interés del CFD se centró principalmente en las ecuaciones de Navier-Stokes, conjuntamente para flujos turbulentos se crearon modelos numéricos como son el Direct Numerical Simulation (DNS) y el Large Eddy Simulation (LES), estos últimos todavía se encuentran distantes a las aplicaciones en el campo de la ingeniería.

Seguidamente, se emplearon nuevas técnicas para dar solución a casos en donde la geometría es compleja, el progreso del CFD mostró interés en la generación de un modelo que se vea acompañado con los métodos numéricos y los modelos de turbulencia, junto con la generación de los mallados.

Una problemática que encuentran los ingenieros es el trabajo con información empírica, de forma que, es necesario recurrir a la experimentación en laboratorio. Los códigos de resolución de CFD suponen una herramienta de diseño que ofrece exactitud científica al mismo tiempo que un coste de dinero y en tiempo inferior al de la experimentación (Álvarez E., 2008).

## **2.1.2 GENERALIDADES DE LA DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL (C.F.D.)**

### **2.1.2.1 DEFINICIÓN**

Según Orrego S. (2009), define la dinámica de fluidos computacional como una de las ramas de la mecánica de fluidos que, usa métodos numéricos y algoritmos, tanto para un estudio y análisis de problemas que abarcan los fluidos en movimiento, mediante la resolución de las ecuaciones de Navier-Stokes, transferencia de calor y las reacciones químicas en el computador. En la actualidad existen diferentes métodos numéricos y algoritmos que resuelven de distinta forma las ecuaciones fundamentales de la hidráulica.

En otras palabras, la dinámica de fluidos computacional es un arte, arte de sustituir los distintos sistemas de ecuaciones diferenciales parciales presentes en un método algebraico de ecuaciones para que sean calculadas usando un ordenador.

Según Vega J. (2010) la dinámica de fluidos computacional es la ciencia que se encarga de predecir el flujo de un fluido, la transferencia de masa, de calor; las reacciones químicas y también con fenómenos relacionados con el cálculo de ecuaciones matemáticas presentes a un proceso numérico. Los resultados más relevantes de los análisis mediante CFD se enfocan en:

- Estudios de nuevos diseños conceptuales.
- Detalle de los productos.
- Solución de problemas ingenieriles.
- Rediseños.

La CFD suministra información cualitativa y cuantitativa de la predicción de un flujo, usando las ecuaciones fundamentales de la hidráulica usando los métodos numéricos existentes (Orrego S., 2009).

### 2.1.2.2 CONSIDERACIONES GENERALES

De acuerdo a Castillo, & Carrillo (2010), todos los softwares obtienen los resultados a los problemas de la mecánica de fluidos desarrollando de forma numérica las fórmulas de Navier-Stokes y mediante un valor promedio de Reynolds:

- Ecuación de Continuidad ecuación 2.1:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U}) = 0 \quad (2.1)$$

- Ecuación de Conservación de cantidad de movimiento ecuación 2.2:

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{U})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \otimes \mathbf{U}) = -\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + \mathbf{S}_M \quad (2.2)$$

- Ecuación de la Energía ecuación 2.3:

$$\frac{\partial(\rho h_{tot})}{\partial t} - \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} h_{tot}) = \nabla \cdot (\gamma \nabla T) + \nabla \cdot (\mathbf{U} \cdot \boldsymbol{\mu}) + \mathbf{U} \cdot \mathbf{S}_M + \mathbf{S}_g \quad (2.3)$$

Siendo la ecuación 2.4 de tensor tensiones turbulentas y ecuación 2.5 la energía total:

$$\boldsymbol{\tau} = \mu \left( \nabla \mathbf{U} + (\nabla \mathbf{U})^T - \frac{2}{3} \delta \nabla \cdot \mathbf{U} \right) \quad (2.4)$$

$$h_{tot} = h + \frac{1}{2} \mathbf{U}^2 \quad (2.5)$$

En donde:

$p$ : Presión

$\rho$ : Densidad del flujo

$\mathbf{U}$ : Vector velocidad

$\boldsymbol{\tau}$ : Tensor de tensiones turbulentas

$h$ : Energía

$\mathbf{S}_M$ : Fuerzas másicas

$\mathbf{S}_g$ : Término fuente

$\gamma$ : Viscosidad volumétrica

$\mu$ : Viscosidad dinámica

$\delta$ : Delta de Kronecker

Para la resolución de problemas con un sistema de más incógnitas que ecuaciones, se crearon algoritmos que toman en cuenta la turbulencia de distintos grados de complejidad como son los modelos algebraicos de vorticidad para viscosidad ( $k - \varepsilon$ ,  $RNG$ ,  $k - \omega$ ) y modelos de tensión de Reynolds ( $RMS$ ).

### 2.1.2.3 ESTUDIO DE LA DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL

El análisis completo de la dinámica de fluidos computacional comienza con la modelación geométrica del dominio o campo a analizar, es decir, una representación en el ordenador de dicha geometría a simular.

Según Orrego S. (2009), los pasos de forma resumida para un análisis de CFD son 3 como se muestra en la tabla 2.1.

**TABLA 2.1 ETAPAS EN UN ANÁLISIS DE CFD**

Etapas	Actividades
Pre procesamiento	Generación de geometría, mallado y configuración de la simulación
Procesamiento	Resolución numérica de las ecuaciones fundamentales.
Pos procesamiento	Visualización y análisis de resultados

FUENTE: Orrego S, 2009.

### 2.1.2.4 PROCESO DE LA DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL

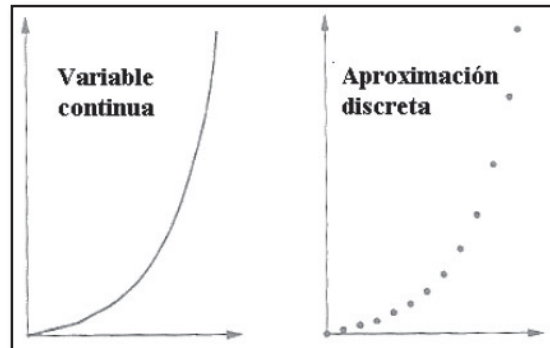
#### Discretización

El objetivo principal de la dinámica de fluidos computacional es la resolución de las ecuaciones de Navier-Stokes para un flujo, con las características determinadas y una geometría definida. Para resolver dichas ecuaciones se debe transformar las ecuaciones diferenciales en algebraicas, este proceso se denomina discretización espacial (Álvarez E., 2008).



La discretización es un método matemático en el cual se obtiene resultados aproximados de una ecuación diferencial o de un número finito de puntos, como se observa en la Figura 2.1.

**FIGURA 2.1 DISCRETIZACIÓN DE VARIABLES**



Fuente: Vázquez J, 2004.

Según Vázquez (2004), los principales elementos presentes en la dinámica de fluidos computacional son:

1. Discretización de flujo continuo, donde las variables de dominio tienden a un número finito de valores de puntos llamados *nodos*.
2. Discretizar las ecuaciones de movimiento, tomando en función de los valores de los nodos:

**Ecuaciones Integrales**  
**(continuas)**       $\Rightarrow$       **Ecuaciones Algebraicas**  
**(discretas)**

3. Obtener las variables de todos los nodos resolviendo el sistema de ecuaciones algebraicas.

Existen diversos métodos para la discretización de un problema, dividiéndolos en tres categorías como son: Diferencias finitas, volúmenes finitos y elementos finitos. Todos estos requieren primeramente de una discretización espacial para realizar la discretización de las ecuaciones fundamentales de un fluido.

Existen dos modelos de mallados:

- **Mallado estructurado:** Las mallas constan de celdas en forma de cuadriláteros si es el caso de 2D hexaedros en el caso de 3D. En cada punto se definen los índices  $i, j, k$ , en el sistema de coordenadas cartesianas.
- **Mallado no estructurado:** Tanto los nodos como las celdas no tienen un orden respectivo, es así que celdas juntas no pueden identificarse por sus índices. Las formas de las celdas para 2D serán triángulos y cuadriláteros, y para 3D las formas de tetraedros, prismas, hexaedros y pirámides.

Una malla estructurada permite una mayor rapidez en realizar un cálculo, debido a la información que almacena siendo de manera secuencial en los nodos, además del menor costo computacional. Los inconvenientes de este tipo de mallado es no poder ser aplicado a geometrías complejas.

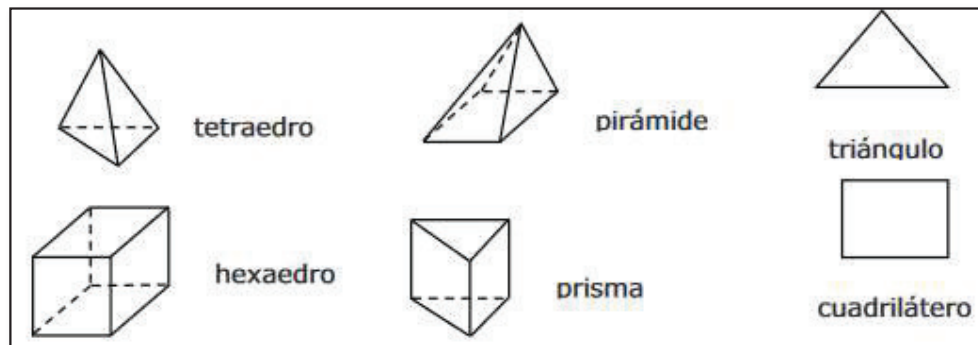
La malla no estructurada cuya principal ventaja es que tiene un mallado automático por lo que se recomienda para geometrías muy complejas. El uso de ordenadores en este tipo de mallas debe ser de mejores características que las usadas en un mallado estructurado y requieren mayor tiempo de cálculo (Álvarez E., 2008).

Para el diseño del mallado se deben realizar una serie de preguntas:

- ¿No se requiere considerar red?
- ¿Cuál es el grado de resolución de la cuadrícula para el dominio?
- ¿Qué cantidad de celdas considerar?
- ¿Existe memoria suficiente en el ordenador?

Luego de definir esas inquietudes se puede elegir el tipo de mallado que se requiere en el problema. Unos ejemplos se observan en la figura 2.2.

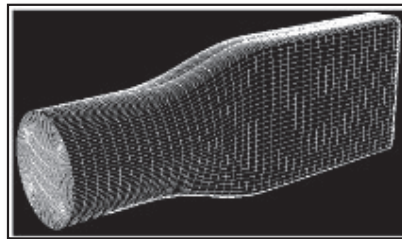
**FIGURA 2.2 TIPOS DE MALLAS**



Fuente: Vega J, 2010.

En geometrías simples, un mallado hexagonal proporciona una solución de alta calidad con menor cantidad de celdas que un mallado triangular y como se puede ver en la figura 2.3.

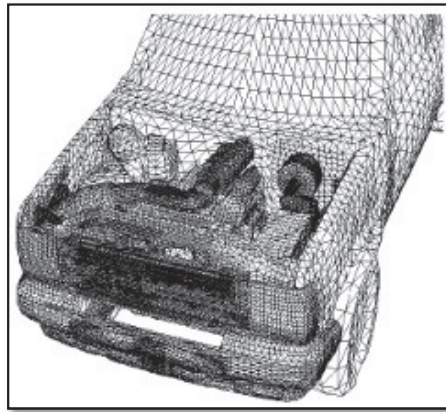
**FIGURA 2.3 MALLA HEXAGONAL**



Fuente: Vega J, 2010.

En geometrías más complejas, se utiliza perfectamente un **mallado triangular** como se ve en la figura 2.4, lo cual permite adquirir ventajas numéricas.

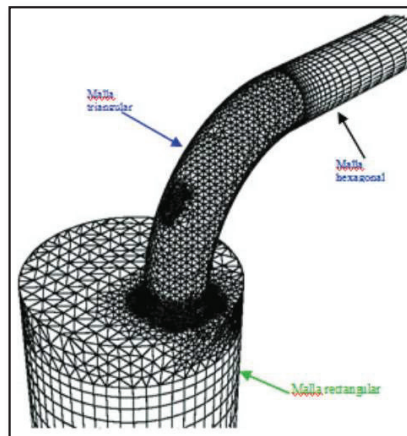
### FIGURA 2.4 MALLA TRIANGULAR



Fuente: Vega J, 2010.

Un **mallado híbrido**, es un conjunto de mallas dispuestas en función de la geometría y del espacio requerido en el análisis, cuyo beneficio es aumentar la eficiencia y mejora la exactitud de resultados en comparación con otros tipos de mallas, un ejemplo se ve en la figura 2.5.

### FIGURA 2.5 EJEMPLO DE MALLA HÍBRIDA



Fuente: Vázquez J, 2004.

Actualmente, en el mundo de la industria el definir el tipo de mallado es fundamental a la hora de obtener soluciones lo más exactas en el menor tiempo posible considerando tanto el tiempo empleado en la construcción del mallado,

como el tiempo que implica realizar el cálculo. Elementos rectangulares en 2D y hexaédricos en 3D son los más utilizados, suponen una solución en exactitud, tiempo y requerimiento del ordenador.

### 2.1.2.5 FUNCIONAMIENTO DE LA DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL

Como mencionamos anteriormente el objetivo principal de la CFD es resolver las ecuaciones de Navier-Stokes, mediante la discretización espacial existen numerosas técnicas, las tres más utilizadas son:

**Método de las diferencias finitas:** Este método se utiliza de forma directa sobre la forma diferencial de las ecuaciones de Navier-Stokes con el desarrollo de las derivadas en las series de Taylor. Siendo  $U(x)$  la función y el desarrollo en el punto  $x_0$  la ecuación 2.6.

$$U(x_0 + \Delta x) = U(x_0) + \Delta x \cdot \left. \frac{\partial U}{\partial x} \right|_{x_0} + \frac{\Delta x^2}{2} \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \dots \quad (2.6)$$

En otras palabras, la derivada de dicha función  $U(x)$  en el punto  $x_0$ , con más precisión y de segundo orden se calcula con la ecuación 2.7:

$$\left. \frac{\partial U}{\partial x} \right|_{x_0} = \frac{U(x_0 + \Delta x) - U(x_0)}{\Delta x} + \mathcal{O}(\Delta x) \quad (2.7)$$

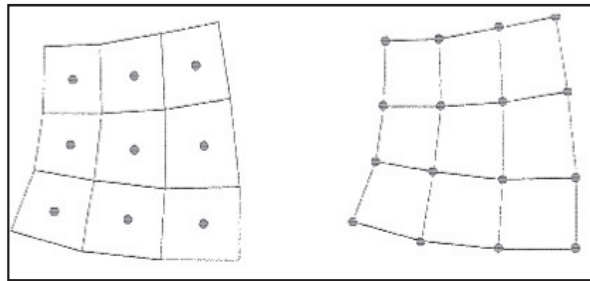
Como observamos en la ecuación anterior, la derivada se transforma en una expresión algebraica, requiere de una malla estructurada.

**Método de los volúmenes finitos:** Este método resuelve las ecuaciones de Navier-Stokes en forma integral, realizando una división del campo físico en volúmenes de control.

Según Álvarez E. (2008), para la creación de volúmenes de control existen dos métodos que son:

- *Punto en el centro de celda:* Este método resuelve las ecuaciones en la mitad de las celdas, además el volumen de control coincide con la celda. Ver en Figura 2.6.
- *Punto en los vértices de la celda:* Este método resuelve las ecuaciones en los vértices de la celda, cuyo volumen de control puede ser el centro del nodo o la unión de las celdas cuyo vértice es común en las celdas. Ver Figura 2.6.

**FIGURA 2.6 MALLAS CON PUNTOS CENTRADOS EN LOS ELEMENTOS Y CENTRADOS EN LOS VÉRTICES DE LAS CELDAS**



Fuente: Vázquez J, 2004.

**Método de los elementos finitos:** Este método, resuelve las ecuaciones de Navier-Stokes en forma integral al igual que resolver los problemas de deformaciones elásticas en estructuras. El utilizar este método a los fluidos hace que el tiempo sea menor en los casos anteriores, de igual complejidad en las técnicas numéricas.


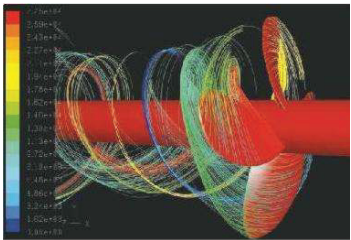
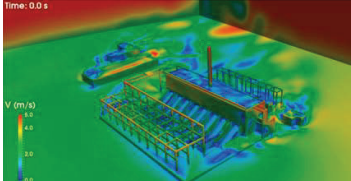
Seguidamente del mallado del dominio y de la discretización de las ecuaciones, se debe construir un sistema de ecuaciones algebraicas en cada uno de los volúmenes de control, para culminar cerrando las condiciones de contorno y de inicio. Se resolverá dichas ecuaciones en todos los volúmenes de control del

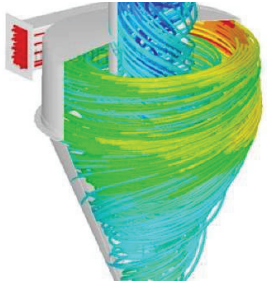
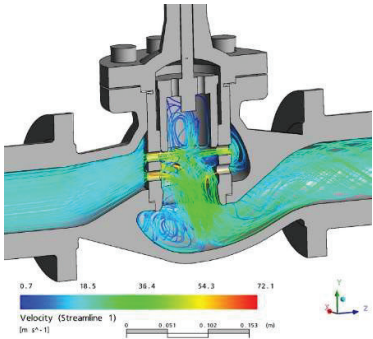
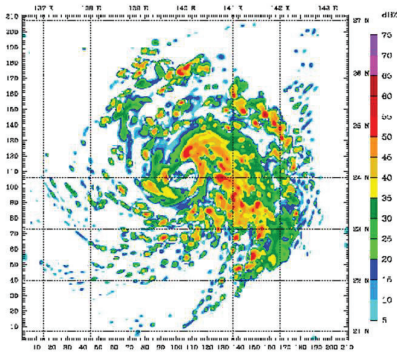
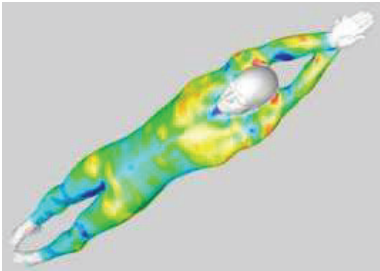
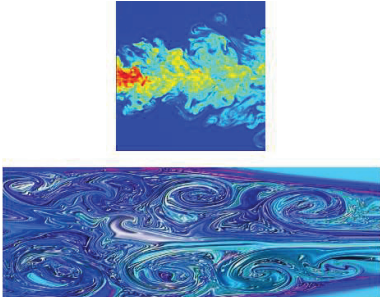
mallado geométrico. Si existe flujo turbulento se necesitará agregar un modelo de turbulencia para que de igual manera se cierre las ecuaciones.

### 2.1.2.6 UTILIDAD

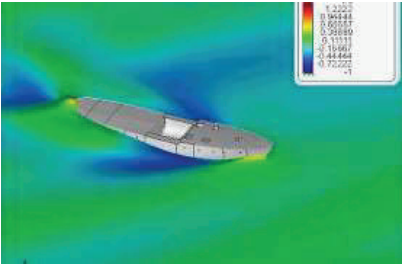
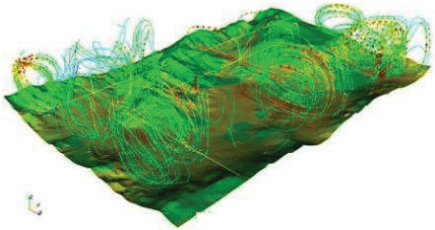
Actualmente, los campos en donde se aplican la dinámica de fluidos computacional son múltiples, existen softwares que buscan detalladamente el cálculo de los fluidos con la ayuda de la tecnología, para la resolución de las ecuaciones que rigen las leyes de los fluidos. Los campos en los que se desenvuelve la dinámica de fluidos se encuentran en la tabla 2.2 (Universidad de Oviedo, 2007).

**TABLA 2.2 EJEMPLOS DE APLICACIÓN DE LOS CFD.**

Aerodinámica de vehículos terrestres, aéreos y espaciales.	
Diseño de motores de bombas, turbinas, compresoras, calderas, etc.	
Equipos eléctricos y electrónicos (refrigeración).	

<p>Equipos de procesos químicos y físicos (reactores, mezcladores, eyectores, etc.)</p>	
<p>Sistemas de ventilación, aire acondicionado y calefacción.</p>	
<p>Estudios de predicción meteorológica.</p>	
<p>Ámbitos deportivos.</p>	
<p>Hidrología y oceanografía.</p>	



Hidrodinámica de buques.	
Comportamiento de los vientos.	

ELABORADO POR: Guaya Cristian, Montalván Edison.  
FUENTE: Universidad de Oviedo, 2007.

Siendo de uso general los casos detallados en la tabla 2.2, los que resultan de la dinámica de fluidos en cada campo de estudio.

### 2.1.2.7 VENTAJAS E INCONVENIENTES DE LOS C.F.D.

Es amplio el estudio de los flujos en la mecánica de fluidos debido a las ventajas que ofrece, los cuales se presentan a continuación:

- Menor coste económico que el análisis experimental.
- Reducción de tiempo en el diseño.
- Posibilidad de verificar resultados teóricos (flujo ideal, 2D,) imposibles de validar de forma experimental.
- Suministra información del campo de velocidades, presiones y demás variables dependientes.
- Capaces del estudio de sistemas bajo condiciones peligrosas.
- Nivel de los detalles es ilimitado.
- En comparación con los métodos experimentales, los CFD pueden generar un gran número de volumen de resultados y fácil de estudiarlos paramétricamente.

Los CFD utilizan técnicas no tan baratas, ya que necesitan de ordenadores de gran capacidad de cálculo. Además, que se necesita de personal especializado capaz de trabajar los programas y analizar los resultados obtenidos adecuadamente (Universidad de Oviedo, 2007).

El problema de los CFD, no es siempre llegar a obtener resultados precisos, esto proviene de:

- Simplificar el problema a estudiar para que el hardware y el software sean capaces de trabajarlos. Siendo los resultados más precisos siempre y cuando las hipótesis se hayan simplificado.
- La fiabilidad de los resultados está ligado a la correcta formulación matemática del proceso simular para ello es necesario validarlos.
- Limitación de modelos existentes para turbulencia, flujo bifásico, combustión, etc.

## **2.2 MODELACIÓN NUMÉRICA ASOCIADA AL FLUJO EN RÍOS**

### **2.2.1 GENERALIDADES SOBRE LOS RÍOS**

Un río es una corriente natural de agua que pertenece a una red ramificada y jerárquica, en donde los pequeños arroyos confluyen formando arroyos mayores, estos confluyen formando ríos de mayor tamaño, y así sucesivamente. El caudal que transita por el cauce de un río depende en último término del tamaño de la cuenca y del balance entre la precipitación y evapotranspiración. En climas húmedos el tamaño de los ríos aumenta aguas abajo, conforme van recibiendo el aporte de afluentes y aguas subterráneas. Sin embargo, en zonas áridas, el río puede ir perdiendo agua, llegando incluso a desaparecer o tener una presencia estacional (Elosegi y Sabater, 2009).

Según Martín Vide (2003), un río se caracteriza por no poseer parámetros definidos previos tales como:

- Caudal definido de transporte, es decir, posee un caudal variable establecido por el régimen hidrológico de la cuenca.
- El trazado o la planta del cauce, no es fijo como en el caso de un canal artificial si no tiende a cambiar, de forma aguda en sucesos extraordinarios o de manera gradual y lenta en el transcurso del tiempo.
- El material de la superficie o revestimiento, en si el río transporta el agua sobre el material del valle y la vegetación que se ha desarrollado en el cauce.
- Sección tipo, presenta una sección transversal variable debido al efecto del movimiento del agua en el cauce, el material tiende a ser movido, arrastrado y depositado afectando: el contorno, el fondo y orillas, presentándose fenómenos de sedimentación y erosión. Los contornos del cauce son varían, profundidad y/o ancho.

En la actualidad diversos problemas de ingeniería relacionados al cálculo del flujo, calado, velocidad, en un río, no pueden ser resueltos usando la hidráulica básica, debido a esto es necesario la aplicación de diversos modelos numéricos.

La modelación matemática o numérica del flujo de agua que transita por un río es una actividad que permite calcular las variables hidráulicas a través de la resolución de métodos numéricos. Este tipo de modelación permite conocer el comportamiento real del río (Balairón, 2011).

### **2.2.2 CLASIFICACIÓN BÁSICA DE LOS RÍOS**

Los ríos presentan una diversificación extensa, según los factores naturales del lugar donde se encuentre, como son: el clima: el relieve, la hidrología, la geografía, entre otras.

Hay que mencionar que no existe una clasificación definida de los ríos pues cada autor define y clasifica los ríos según su criterio.

Martín Vide (2003), clasifica a los ríos: por su periodo de actividad en efímeros y perennes; por su granulometría, los clasifica asociándolo a su material del fondo del lecho del río en aluviales y de lecho rocoso; por su pendiente en ríos torrenciales y torrentes; y finalmente, por un aspecto geográfico en ríos de montaña y ríos de llanura.

Sánchez y Maza (1997), clasifican a los ríos de la siguiente manera: por su edad en jóvenes, maduro y viejos; por su condición de estabilidad, ríos con estabilidad estática, estabilidad dinámica y estabilidad morfológica: según sus tramos, se clasifican en ríos de alta montaña, de montaña, de falda de montaña, intermedio y ríos de planicies; según los grados de libertad, en ríos de uno, dos o tres grados de libertad; por el material del fondo y de las márgenes; y finalmente por la geometría que desarrolla su cauce en ríos rectos, con meandros, trezados.

En la tabla 2.3 se muestra un resumen de la clasificación de los cauces naturales.

**TABLA 2.3 CLASIFICACIÓN DE CAUCES NATURALES**

<b>Régimen Hidrológico</b>	<p><b>Efímeros:</b> los ríos efímeros se caracterizan por ser receptores y conductores de agua tras fuertes precipitaciones, manteniéndose secos la mayor parte del tiempo. Este tipo de ríos se encuentran principalmente en sectores de clima árido y semiárido.</p>
	<p><b>Perennes:</b> Denominados así por ser cursos de agua que tienen aporte de un caudal base originado por las aguas subterráneas en el periodo seco, ubicados en regiones de abundante precipitación.</p>
<b>Material del Lecho del Río</b>	<p><b>Aluviales:</b> El transporte del agua se produce sobre material generado por el mismo río, conformado sustancialmente por material granular suelto. Los materiales aluviales ocupan una extensión mayor a la definida por el cauce dando origen a llanuras que pueden ser inundadas.</p>

	<p><b>Lecho Rocoso:</b> la presencia de estos ríos está definida por la presencia de afloramientos rocosos, que forma el fondo y los márgenes, son de menos problemática para los asentamientos humanos debido a su menor interacción con estos.</p>
<b>Geometría en Planta</b>	<p><b>Rectos:</b> Se asocia a la definición de ríos rectos a un concepto ideal, debido a que únicamente se presenta en tramos pequeños y de forma transitoria, generalmente interrumpido por el comportamiento natural del río.</p>
	<p><b>Con Meandros:</b> Este tipo de río presenta curvas pronunciadas unidas a tramos rectos y cortos, se presenta en ríos de pendiente baja. Se producen fenómenos de erosión en la parte externa de la curva donde la velocidad es mayor a la parte interna produciéndose fenómenos de sedimentación. La sección transversal de un meandro se caracteriza por poseer mayor depresión y velocidades altas en la parte cóncava del meandro.</p>
	<p><b>Trenzados:</b> Presentan a lo largo de su recorrido varios cauces que se unen y se dividen en varias ocasiones, formando "islas" entre sí, presentan varios cauces principales, con presencia de material grueso.</p>
<b>Pendiente</b>	<p><b>Torrentes:</b> "Cursos de agua de pendiente mayor que el 6%" (Martin Vide, 2003). Se caracterizan por tener gran capacidad de erosión, y transporte de material grueso como arenas, gravas y canto rodados, se encuentra en zonas montañosas y presentando caudal irregular.</p>
	<p><b>Ríos Torrenciales:</b> son cursos de agua situados en pie de monte que no transporta de forma permanente un caudal sólido, "Su Pendiente es mayor del 1.5% y menor a la pendiente de los torrentes" (Martin Vide, 2003).</p>

ELABORADO POR: Guaya Cristian, Montalván Edison, 2018.

Krochin (2011), menciona que en el desarrollo de un río se presentan tres tramos típicos:

- **Tramo Alto:** Asociado a los ríos de montaña donde predominan, los altos gradientes y velocidades, el proceso erosivo es activo, cauce estrecho-profundo y de sección transversal de forma en V.
- **Tramo Medio:** Asociado a los ríos que corren en las faldas de las montañas y valles que se encuentran en el descenso hacia las planicies o zonas más bajas, este tipo de río se caracteriza por el aumento del caudal de circulación, existe disminución en su pendiente y velocidad, en el cauce se producen fenómenos de erosión en el fondo y sedimentación en la orillas o márgenes simultáneamente.
- **Tramo Bajo:** Asociado a los ríos que atraviesan la parte baja de la cuenca, también denominados ríos de llanura o ríos de planicie, estos ríos se caracterizan por la presencia de bajas velocidades y pendientes, además de la circulación de grandes caudales que facilita el depósito de sedimentos, el cauce presenta profundidades pequeñas y anchos extensos.

### 2.2.3 HIDRÁULICA DE RÍOS

#### 2.2.3.1 CAUDALES MÁXIMOS O MÁXIMAS AVENIDAS

Una crecida o una avenida es un fenómeno natural caracterizado por la presencia de caudales grandes en relación a un caudal base o un caudal existente en estiaje, lo que genera que exista un aumento en los niveles normales de agua, originando frecuentemente que estos desborden del canal de la corriente. Por ende, el cálculo de una creciente consiste en proporcionar un caudal proyectado desde el inicio del aumento de la escorrentía superficial hasta que se presente el fin de esta.

Los caudales de crecida son originados principalmente por dos causas: el exceso de lluvia y el desbordamiento de cualquier volumen de agua almacenado aguas arriba (Monsalve G, 1999).

Una creciente solo causa inundaciones cuando el volumen de agua que la produce desborda el canal natural. También existen dos causas para la inundación:

- Exceso de la lluvia, de tal cuantía que el cauce del río no puede contener el volumen que transita por unidad de tiempo en la creciente.
- Existencia de obstrucción aguas abajo del área de inundación, que impida el paso normal del caudal. Por ejemplo, la existencia de obras mal dimensionadas.

El pronóstico de estos caudales de creciente se realiza mediante la extrapolación de datos históricos. Este resultado se asocia principalmente a un periodo de retorno expresado en años.

El periodo de retorno ( $T_r$ ), está definido como el promedio en años, en el cual el valor de un caudal pico ( $Q_p$ ) determinado puede ser igualado o superado por al menos una vez, la ecuación 2.8 muestra el periodo de retorno:

$$T_r = \frac{1}{P(Q_o > Q_p)} \quad (2.8)$$

Donde:

$T_r$ : Tiempo de Retorno (años)

$P(Q_o > Q_p)$ : Probabilidad de que el caudal pico pueda ser igualado o superado.

## **MÉTODOS DE CÁLCULO DE CAUDALES MÁXIMOS**

Los caudales asociados a diferentes periodos de retorno dependen principalmente del tamaño y naturaleza de la cuenca aportante.

### a) Método Racional

Utilizado principalmente para la estimación de un caudal máximo en cuencas relativamente pequeñas. Su uso es recomendado para cuencas que no sobrepasen los 5 km<sup>2</sup> (Monsalve G, 1999).

La ecuación 2.9 utilizada por el método racional es:

$$Q = \frac{(C*I*A)}{360} \quad (2.9)$$

Donde:

$Q$ : Caudal Máximo (m<sup>3</sup>/s)

$C$ : Coeficiente de escorrentía

$I$ : Intensidad de lluvia con duración igual al tiempo de concentración y asociada a un periodo de retorno (mm/h)

$A$ : Área de la cuenca (ha)

### Desventajas del método

- Proporciona solo un valor del caudal máximo y no el hidrograma de crecida
- Supone que la lluvia es uniforme en el tiempo
- Asume que la escorrentía posee una relación directamente proporcional a la precipitación.
- No considera efectos de almacenamiento temporal.

### b) Método SCS para abstracciones o del Numero de Curva

Este método desarrollado por el SCS (Soil Conservation Service) de los Estados Unidos de America, o también denominado Numero de Curva CN, sirve para calcular las abstracciones iniciales de una tormenta en las cuales incluye, la intercepción, la detención superficial y la infiltración (INAMHI, 2008).



Este método utiliza la ecuación 2.10, para la estimación de cálculos de avenida:

$$S = 25,4\left(\frac{1000}{CN} - 10\right) \quad (2.10)$$

Siendo

*S*: Retención máxima

*CN*: Número de Curva

El valor de CN varia en un rango de 1 a 100, permitiendo generar una relación entre las propiedades productoras de escorrentía de la cuenca hidrográfica y condición de humedad antecedente del suelo (INAMHI). Los valores para el coeficiente CN se muestra en la tabla 2.4.

**TABLA 2.4 NÚMEROS DE CURVA PARA LAS DIFERENTES SITUACIONES SUELO-VEGETACIÓN**

Clase	Cubierta del suelo		Grupos hidrológicos del suelo			
	Laboreo	Condiciones para la infiltración	A	B	C	D
Barbecho	---	---	77	86	91	94
Cultivos alineados	R	Pobres	72	81	88	91
	R	Buenas	67	78	85	89
	C	Pobres	70	79	84	88
	C	Buenas	65	75	82	86
	C-T	Pobres	66	74	80	82
	C-T	Buenas	62	71	78	81
Cultivos no alineados o con surcos pequeños o mal definidos	R	Pobres	65	76	84	88
	R	Buenas	63	75	83	87
	C	Pobres	63	74	82	85
	C	Buenas	61	73	81	84
	C-T	Pobres	61	72	79	82
	C-T	Buenas	59	70	78	81
Cultivos densos de leguminosas o prados en alternativa	R	Pobres	66	77	84	88
	R	Buenas	58	72	81	85
	C	Pobres	64	75	83	85
	C	Buenas	55	69	78	83
	C-T	Pobres	63	73	80	83
	C-T	Buenas	51	67	76	80
Pastizales (pastos naturales)	---	Pobres	68	79	86	89
	---	Regulares	49	69	79	84
	---	Buenas	39	61	74	80
	C	Pobres	47	67	81	88
	C	Regulares	25	59	75	83
	C	Buenas	6	35	70	79
Prados permanentes	---	---	30	58	71	78
Montes con pastos (ganadero-forestal)	---	Pobres	45	66	77	83
	---	Regulares	36	60	73	79
	---	Buenas	25	55	70	77
Bosques (forestal)	---	Muy pobres	56	75	86	91
	---	Pobres	46	68	78	84
	---	Regulares	36	60	70	76
	---	Buenas	26	52	63	69
	---	Muy buenas	15	44	54	61
Caseríos	---	---	59	74	82	86
Caminos en tierra	---	---	72	82	87	89
Caminos en firme	---	---	74	84	90	92

FUENTE: Castillo V. Martínez M y Albaladejo J. (sin año)

Para calcular el caudal de la cuenca en el método SCS se utiliza la ecuación 2.11:

$$Q = \frac{(P-0,2 S)^2}{P+0,8 S} \quad (2.11)$$

Donde:

$Q$ : Caudal ( $m^3/s$ )

$S$ : Precipitación diaria (mm)

### c) Método de la Envolventes

El método de la envolventes o envolventes de Creager se utiliza cuando existe información incompleta, pero en donde se conoce el área de la cuenca aportante.

Este método a pesar de que no analiza la relación entre la lluvia y escorrentía, permite generar estimación de caudales máximos en situaciones donde se dispone poca información.

La ecuación 2.12 De Creager utilizada es:

$$Q = 1,303 * Cc * (0,386 * Ac)^{\frac{0,936}{Ac^{0,048}}} \quad (2.12)$$

Siendo:

$Q$ : Caudal Máximo ( $m^3/s$ )

$Cc$ : Coeficiente de Creager definido por la curva envolvente

$Ac$ : Área de cuenca ( $km^2$ )

El coeficiente Creager se determinan por regiones, mediante caudales estadísticos de las estaciones hidrométricas de la región para cada periodo de retorno.

### 2.2.3.2 TRÁNSITO DE AVENIDAS

La propagación de flujo a través de un río o de una red de ríos en el espacio y en el tiempo es un problema complejo. El deseo de construir y vivir a lo largo de los ríos genera la necesidad de un cálculo acertado de niveles de agua y de caudales,

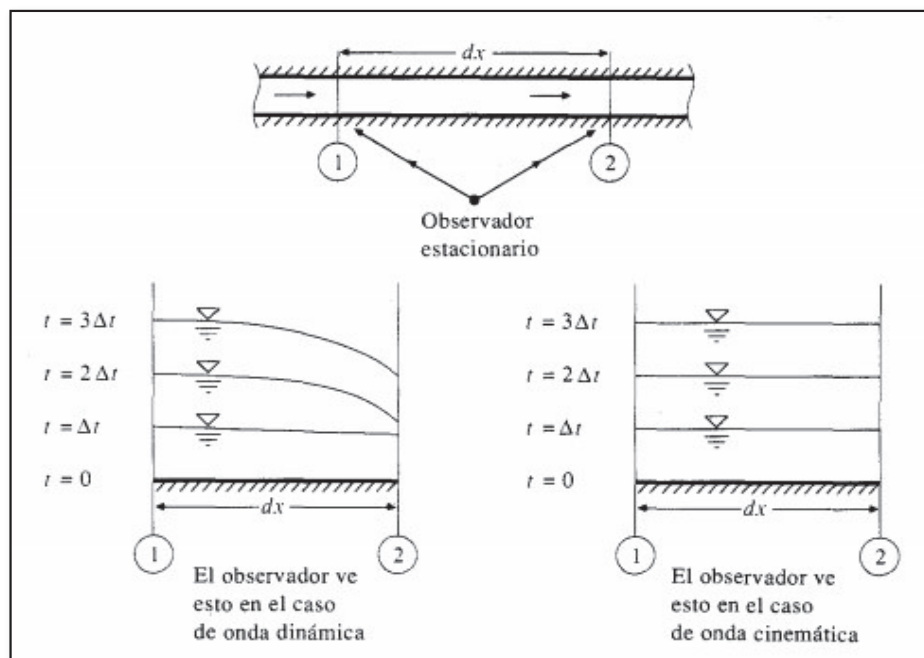
que provee el ímpetu de desarrollar modelos complejos en el tránsito de flujo (Chow et al., 1998).

Este flujo se presenta principalmente en dos tipos de ondas las cinemáticas y las ondas dinámicas.

### Movimiento de Ondas de Crecida

Las ondas cinemáticas dominan el flujo cuando las fuerzas inerciales y de presión no son importantes es decir cuando las fuerzas gravitacionales del flujo se encuentran balanceada por la fuerza de resistencia friccional de tal manera que el flujo no se acelera apreciablemente. Las ondas dinámicas dominan el flujo cuando las fuerzas de presión y las fuerzas inerciales se vuelven importantes, como se presentan en ríos de pendiente baja y en el movimiento que produce en una gran onda de creciente en un río ancho.

**FIGURA 2.7 MOVIMIENTO DE ONDA CINEMÁTICA Y DINÁMICA**



FUENTE: CHOW ET AL., 1998.

La figura 2.7 ilustra la diferencia entre el movimiento de la onda cinemática y dinámica en un elemento diferencial desde el punto de vista de un observador estacionario en la orilla del río. Para una onda cinemática, la línea de energía total es paralela al fondo del canal el flujo es uniforme y permanente ( $S_o = S_f$ ) dentro del diferencial, mientras que para una onda dinámica la línea de energía total y la elevación de la superficie de agua no son paralelas al lecho aun considerando un elemento diferencial.

Tanto el movimiento de onda cinemática como el movimiento de onda dinámica están presentes en las ondas de crecida naturales

### **Celeridad de la Onda**

Una onda es una variación en un flujo, tal como un cambio en el caudal o en la elevación del nivel del agua, y la celeridad de la onda se refiere a la velocidad con la cual esta variación se desarrolla a lo largo del canal. La celeridad depende del tipo de onda que se considere y puede ser diferente a la velocidad del agua. Para una onda cinemática los términos de aceleración y presión son depreciables, describiendo el movimiento de la onda principalmente por la ecuación de continuidad. El nombre cinemático se refiere al movimiento sin tener en cuenta la influencia de la masa y la fuerza, muy diferente a lo considerado a la onda dinámica donde se incluyen estas cantidades.

### **2.2.4 MODELACIÓN NUMÉRICA Y SUS APLICACIONES**

Como se ha expuesto previamente no existe coincidencia en las características de los ríos ya que esta varía en función del lugar donde se encuentre, debido a esto los diferentes tipos de modelaciones se ven ligados a las características físicas de los ríos principalmente a su geometría en planta y su tramo de recorrido asociándolas de la siguiente manera:

#### **2.2.4.1 MODELACIÓN NUMÉRICA UNIDIMENSIONAL**

Los modelos numéricos unidimensionales son y han sido los de mayor empleo desde que se empezó a utilizar la modelación numérica del flujo en ríos a mediados del siglo XX.

La aplicación de los modelos unidimensionales ha analizado principalmente al río como una línea, donde se ingresan puntos que caracterizan a las secciones transversales, de forma que la geometría es ingresada y formada mediante la información que contienen las secciones transversales.

La modelación unidimensional ha tenido excelentes resultados en la aplicación para cálculos en ríos que se considere relativamente rectos o con muy poca curvatura y el modelo se limita al cauce principal del río. Cuando se tiene llanuras de inundación y el cauce posee muchos meandros, la aplicación de un modelo unidimensional puede resultar insuficiente, obteniéndose resultados erróneos.

#### **2.2.4.2 MODELACIÓN NUMÉRICA BIDIMENSIONAL**

Los modelos numéricos bidimensionales son considerados como la principal herramienta para la modelación de inundaciones.

A diferencia de los modelos numéricos unidimensionales los modelos bidimensionales ya no consideran al río como una línea con una secuencia de secciones transversales que permiten el ingreso de la geometría del cauce, si no como una malla creada por celdas poligonales que está formada por triángulos y/o cuadriláteros que tiene la función de representar el cauce principal del río y las llanuras de inundación.

La modelación 2D requiere de mayor requerimiento computacional, alta demanda de datos para la generación y calibración del modelo, además del elevado tiempo de ejecución.

#### **2.2.4.3 MODELACIÓN NUMÉRICA TRIDIMENSIONAL**

El uso de modelos tridimensionales para el comportamiento de flujo a superficie libre que circula por un río, no es muy aplicado y desarrollado en relación a la predisposición del uso hacia modelos unidimensionales y bidimensionales, debido a que el modelo tridimensional usa mallas de cálculo complejas, lo que conlleva a un aumento en los requerimientos computacionales para su desarrollo, que permitan la obtención de resultados de precisión y la reducción del tiempo de ejecución.

“Los modelos 3D aplicado a hidráulica fluvial se suelen restringir al estudio del flujo local en meandros o en torno a estructuras hidráulicas como pilas de puentes, vertederos o compuertas” (E Bladé, Cea, & Corestein, 2014).

### **2.3 ESTADO DEL ARTE**

Las investigaciones más importantes de modelación numérica unidimensional y bidimensional de ríos con programas informáticos, son descritas a continuación en la tabla 2.5.

TABLA 2.5 ESTADO DEL ARTE

AUTOR(ES)	AÑO Y LUGAR	TÍTULO	OBJETIVO	RESUMEN	RESULTADOS
Collazos Guillermo	2009, Instituto de Hidrología de Llanuras. Buenos Aires. Argentina.	Uso del Modelo Iber en un Problema de Flujo Bidimensional	El objetivo de este trabajo es estimar el cambio en el flujo de agua debido a la construcción de la edificación, y proponer medidas correctivas locales que minimicen los efectos adversos, cuantificando su efecto.	Las construcciones emplazadas dentro del valle de inundación de ríos y arroyos pueden dificultar de forma significativa el flujo del agua durante las crecidas; pero aun conociendo esto suele existir un interés económico en realizar estas edificaciones. El caso de estudio comprende una pequeña zona de en la ciudad de Azul, en el centro de la provincia de Buenos Aires, en inmediaciones del Club de Remo. En su predio ubicado en la margen del arroyo, esta institución quería construir (sobre una cancha de paddle abierta) un edificio para un gimnasio.	Las medidas de mitigación producen efectos de diferente magnitud: mientras los conductos debajo de edificio tienen un efecto moderado, resulta fundamental la adecuación de la propiedad lindara al arroyo en la continuación de la calle Santa Cruz y la construcción del canal trapecial para aumentar la descarga. Además este aumento de capacidad de descarga superficial no está sujeto a obstrucciones como puede suceder con los conductos
Gunnarsson Karl	2015, Division of Water Resources Engineering Department of Building & Environmental Technology Lund University. Sweden	Two-dimensional hydrodynamic modeling of overland flow and infiltration in a sustainable drainage system	El objetivo de este estudio es identificar las condiciones bajo las cuales es posible modelar un sistema de drenaje sostenible, software de modelación es hidrodinámico con un simple módulo de infiltración MIKE 21.	Se creó un modelo con datos específicos del sitio seguido de análisis de sensibilidad, calibración, validación y finalmente contra un modelo correspondiente, establecido en el modelo hidrológico integrado sistema MIKE SHE. A partir de un análisis de sensibilidad se indicó que demasiado grande los pasos de tiempo pueden introducir pérdidas de volumen no deseadas cuando se usa la infiltración y módulo de fuga. Un segundo análisis de sensibilidad mostró que la rugosidad hidráulica asociada con el es de gran importancia. Basado en esto, una representación bidimensional apropiada de la varilla se consideró un punto crítico para predecir la descarga correctamente.	Se concluye que el modelo, bajo las condiciones previas actuales, fue posible calibrar pero no funcionó bien durante la validación. Un posible explicación de estas dificultades es una combinación de malos datos de entrada y calibración, los supuestos del modelo, así como las limitaciones del modelo básico. El desempeño del modelo MIKE 21 no pudo evaluarse completamente con el MIKE SHE modelo, debido a la ausencia de una versión en última instancia calibrada de este último. Sin embargo, el MIKE. Los resultados de la simulación de SHE proporcionaron valiosa información sobre posibles errores de datos o alternativamente, poner un poco de luz sobre las posibles dificultades generales de modelado de la respuesta de descarga a ciertos eventos de lluvia en este tipo de sistema.



<p>Palavecino Ramos Angelo Enrique</p>	<p>2015, Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Civil. Quito, Ecuador</p>	<p>Modelación Bidimensional del Flujo Generado por la Rotura de una Presa de Tierra, Utilizando el Programa Iber</p>	<p>El objetivo del proyecto Presa Pescado es proveer de agua potable a la población, mejorar las condiciones de vida actual y poder dar este suministro de forma continua para suplir las necesidades de la población, así como de entregar agua para riego, haciendo más productiva e impulsando la zona que se verá beneficiada por la otra. Por lo cual, se plantea construir una presa que permita almacenar y regular el caudal disponible.</p>	<p>Se utilizará el programa Iber para la simulación numérica del flujo bidimensional producido por la rotura de una presa de materia suelta. Los resultados obtenidos en la modelación serán comparados con los resultados del análisis unidimensional del programa HEC-RAS, para el mismo caso. Este análisis proporcionará información respecto a las condiciones de trabajo de los programas, además utilizar esta información en el desarrollo de zonas de riesgo en el caso de una falla en presa de tierra.</p>	<p>Los resultados de la modelación de IBER se asemeja más a lo que pudiese para en la falla de una presa, esto por cuanto la modelación unidimensional presenta limitaciones en la modelación de rotura de presas, en donde el flujo es evidentemente bidimensional y por las simplificaciones que se deben realizar en la modelación unidireccional. Con esto no se quiere dejar por abajo el modelo HEC-RAS, el cual tiene una enorme capacidad de modelación, en casos donde el flujo es unidimensional.</p>
<p>Ochoa Santiago, Reyna Teresa, Reyna Santiago, Gracia Marcelo, Labaque María y Diaz José. Argentina</p>	<p>2016, Universidad Nacional de Córdoba, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Córdoba, Argentina</p>	<p>Modelación Hidrodinámica del tramo medio del Río Citalamochita, Provincia de Córdoba.</p>	<p>El objetivo principal de este estudio, utilizando como herramienta de cálculo los esquemas numéricos hidrodinámicos unidimensional (HEC-RAS) y bidimensional (IBER), es el de representar el comportamiento hidráulico del río Tercero en su paso por la ciudad de Bell Ville que presenta tramos de gran curvatura longitudinal.</p>	<p>En este trabajo se ejecutó una modelación hidráulica a través del modelo hidrodinámico unidimensional HEC-RAS y el modelo hidrodinámico IBER para delinear posibles zonas de inundación en el río Tercero o río Citalamochita en su tramo medio a la altura de la ciudad de Bell Ville.</p>	<p>Los datos obtenidos coincidieron con las crecidas extraordinarias ocurridas en el mes de Marzo de 2014 que produjo cuantiosos daños a la propiedad pública y privada, y cientos de evacuados. La diferencia en los resultados obtenidos en HEC-RAS respecto a la serie de datos de campo crece cuando son mayores los caudales de entrada, siendo de 1.10 metros en los caudales pico de la serie, mientras que los errores del modelo IBER no son sistemáticos con una buena tendencia respecto la serie de datos medidos, siendo la mayor diferencia menor a 0.40 metros y con un error promedio menor al 5% frente al 12% obtenido al ser calculado con HEC-RAS.</p>

<p>Basile Pedro, Riccardi Gerardo, Peruzzo Florencia y Garcia Marina</p>	<p>2016, Universidad Nacional de Rosario, Departamento de Hidráulica - Escuela de Ingeniería Civil Rosario, Argentina.</p>	<p>Two-Dimensional Hydrodynamic Modelling of the Lower Parana River</p>	<p>implementar un modelo matemático 2DH para caracterizar la hidrodinámica del río Paraná Inferior, en el tramo comprendido entre Bella Vista (BV) y Villa Gobernador Gálvez (VGG), es decir, entre el km 452 (extremo aguas arriba) y el km 410 (extremo aguas abajo) de la ruta de navegación troncal Santa Fe-Océano.</p>	<p>La implementación del modelo matemático bidimensional CCHED para caracterizar la hidrodinámica del Río Paraná Inferior, en el tramo comprendido entre el km 410 y el km 452 de la ruta de navegación Santa Fe-Océano. Se realizaron simulaciones, en régimen permanente e impermanente, utilizando respectivamente caudales aforados y caudales generados mediante transformación de niveles (zw) en caudales (Q) con la curva zw-Q del km 448. Los caudales simulados variaron entre 11640 m<sup>3</sup>/s y 28600 m<sup>3</sup>/s, a los cuales le corresponden tiempos de excedencia de 97,7 % y 0,3 % respectivamente. De esta manera, se representaron condiciones de aguas bajas, medias y altas del río.</p>	<p>Los resultados del modelo hidrodinámico han sido contrastados con mediciones de caudales con ADCP y con niveles drométricos registrados en el hidrómetro de Rosario (ROS, km 416) y Puerto San Martín (PSM, km 448). El modelo ha representado satisfactoriamente la dinámica del flujo en el tramo estudiado, tanto en régimen permanente como impermanente; ya sea en lo que concierne a la reproducción de niveles hidrométricos, pendientes de la superficie libre, profundidades de flujo, distribución de velocidades y caudales específicos en secciones transversales, como así también, en lo que respecta a la representación de los porcentajes del caudal total que son derivados en las bifurcaciones del cauce</p>
--	--	---	--	--	---

ELABORADO POR: Guaya Cristian, Montalván Edison, 2018.

## **CAPÍTULO III**

### **SIMULACIÓN NUMÉRICA EN EL PROGRAMA IBER**

#### **3.1 GENERALIDADES**

Al hablar de simulación numérica en la dinámica fluvial a priori pensamos en programas de computación altamente avanzados para una y dos dimensiones, así como también, en el costo económico de los programas a utilizar.

Según Urries (2015), el mejor software en modelación en dos dimensiones y con bajo costo económico de aplicación es IBER, siendo este, un modelo numérico hidrodinámico que ofrece grandes ventajas en cálculos bidimensionales tanto en régimen de flujo permanente y no permanente.

IBER simula el flujo de ríos a superficie libre en aguas poco profundas, es decir, IBER entre otras cosas, permite calcular niveles de agua y velocidades en las dos direcciones horizontales del espacio (x, y) en ríos, estuarios, canales, llanuras de inundación y obras hidráulicas.

IBER fue desarrollado por el Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente (GEAMA, Universidad de A Coruña) y el Instituto FLUMEN (Universitat Politècnica de Catalunya, y Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, CIMNE) (Urries B, 2015).

El modelo consta de distintos módulos que son: Hidromecánica, Turbulencia, Transporte de sedimentos por arrastre y suspensión, Calidad de agua. Estos módulos se basan en las ecuaciones de tránsito bidimensionales con valores promedios en profundidad.

## **3.2 PAQUETE COMPUTACIONAL IBER**

### **3.2.1 VENTAJAS DEL MODELO IBER**

En comparación a los modelos unidimensionales, IBER ofrece ventajas demostrando una mayor estabilidad y convergencia, tanto para régimen permanente como para variable. Las simulaciones de los modelos bidimensionales poseen mayor precisión de flujo para zonas inundables.

Según Méndez J. (2017), las ventajas que tiene IBER en relación a modelos de una dimensión son las siguientes:

- Alta resolución del área de trabajo.
- En cambios de régimen presenta mayor precisión.
- Las mallas irregulares se adaptan de mejor forma a la topografía del terreno.
- La visualización de inundaciones es de alta precisión.
- Los resultados se generan en un plano horizontal.
- Programa amigable, simple y agradable.

### **3.2.2 LIMITACIONES DEL MODELO IBER**

Al referirse las limitaciones del programa IBER se pueden señalar las siguientes:

- El tiempo que requiere IBER para el cálculo es elevado mientras se utiliza una malla más detallada.
- Los resultados dependen de la calidad de información base que se proporciona al programa.

### **3.2.3 PRE PROCESO**

En la etapa de pre proceso para el modelo numérico y ejecutar la simulación se debe tener en cuenta los siguientes pasos en esa etapa:

1. Crear o importar una geometría

2. Crear malla de cálculo
3. Establecer situaciones de contorno y condiciones iniciales
  - Definir la rugosidad del terreno
  - Condiciones de borde hidrodinámicas, transporte de sedimentos y turbulencia si es necesario
4. Parámetros del problema
  - Parámetros de tiempo y cálculo
  - Elección del modelo de turbulencia
  - Establecer modelos de transporte de sedimentos

### **3.2.3.1 CONSTRUCCIÓN DE LA MALLA Y LA GEOMETRÍA**

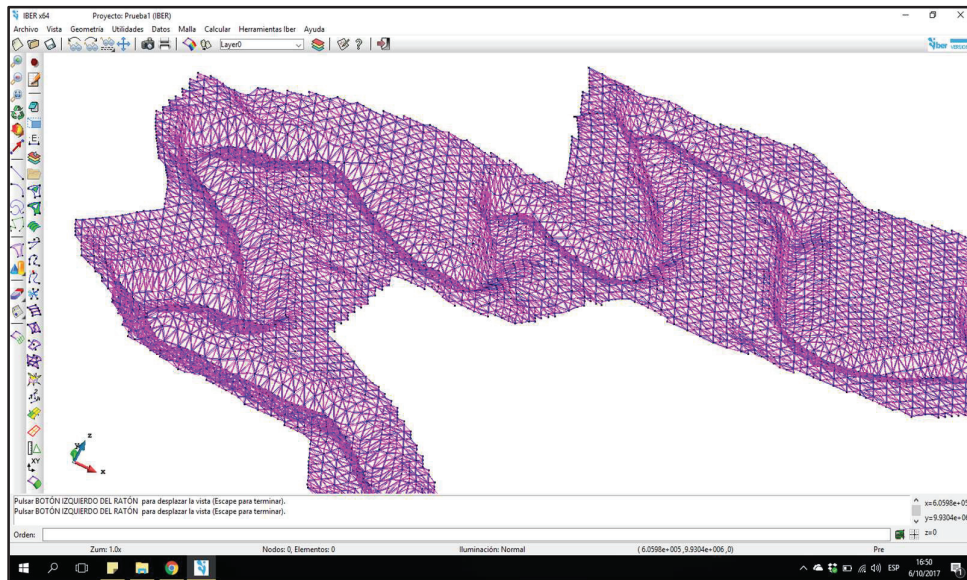
La generación de la malla en el programa IBER es uno de los procesos que necesita tiempo al momento de la simulación numérica. Para un río la geometría es irregular y compleja, que requiere de un mallado eficiente.

IBER utiliza una malla de cálculo, la cual está compuesta por formas de triángulos y/o cuadriláteros, para la generación de mallas tenemos:

- Estructuradas y no estructuradas.
- Triangulares de forma irregular creadas con error cordal.
- En forma de triángulos rectángulos o RTIN (Rectangular Triangular Irregular Network).
- Regulares con la totalidad de puntos de un modelo de terreno digital MDT.
- Importadas en formato .2dm.

IBER necesita que el MDT se encuentre en formato ASCII, para realizar una geometría RTIN como se observa en la figura 3.1.

**FIGURA 3.1 REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LA GEOMETRICA RTIN EN IBER DEL RIO GARRAPATA.**



ELABORADO POR: Guaya Cristian, Montalván Edison.

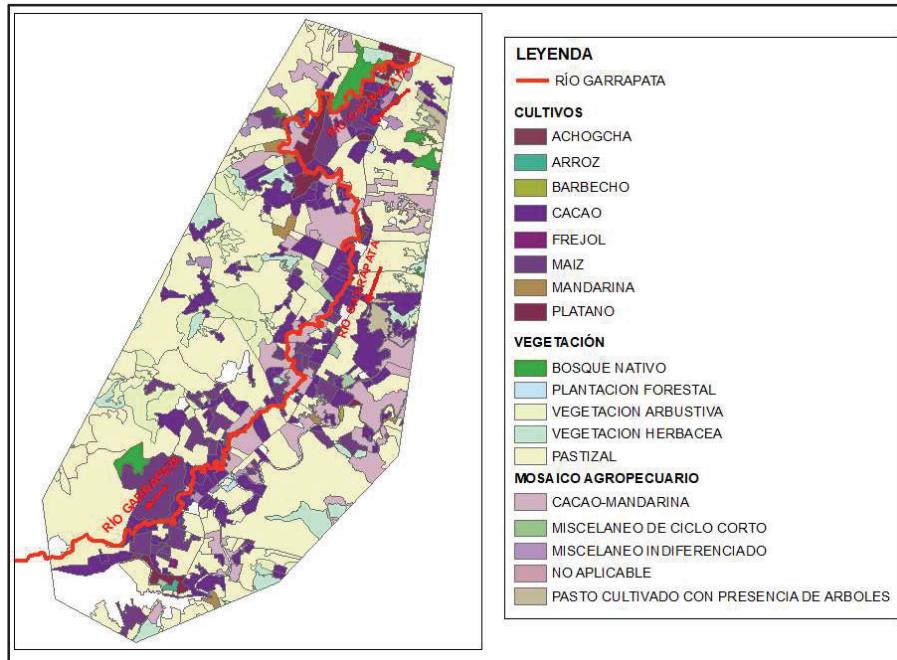
### 3.2.3.2 DATOS DE ENTRADA (CONDICIONES INICIALES Y DE CONTORNO)

#### Rugosidad del Terreno

Para IBER el coeficiente de rugosidad de Manning es un parámetro importante, ya que es responsable de la resistencia al flujo. El programa requiere de un archivo de formato ASCII con el uso del suelo del terreno con los respectivos valores del coeficientes de rugosidad, además es necesario de un archivo CSV designado con el mismo nombre que proporcione información de los tipos de suelo utilizados y el cual debe ser similar a la base de datos que tiene IBER (Salamea, 2015).

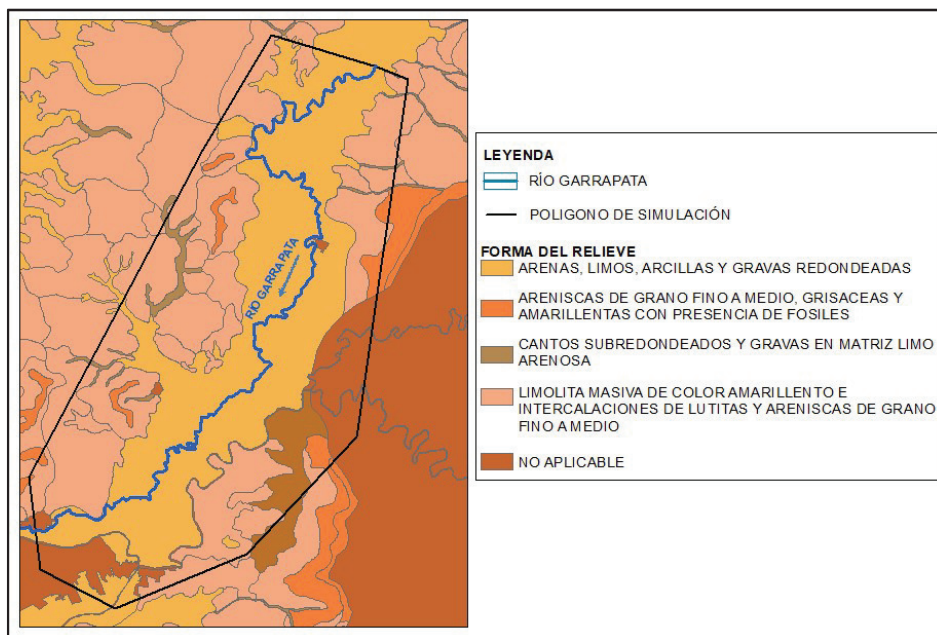
Se muestran en las figuras 3.2 y figura 3.3 la vegetación predominante y el uso del suelo respectivamente para la asignación de la rugosidad al programa IBER.

**FIGURA 3.2 VEGETACIÓN DEL MODELO PARA ASIGNACION DE COEFICIENTE DE RUGOSIDAD**



ELABORADO POR: Guaya Cristian, Montalván Edison.

**FIGURA 3.3 USO DE SUELO PARA LA ASIGNACION DE COEFICIENTE DE RUGOSIDAD**



ELABORADO POR: Guaya Cristian, Montalván Edison.

**CONDICIONES INICIALES:** Representa las condiciones que tiene el dominio al momento de iniciar la modelación, en este caso en particular, la asignación de cota de agua o calado a la superficie de control.

**CONDICIONES DE CONTORNO:** Definen las condiciones hidráulicas en las secciones de entrada y salida.

- **ENTRADA.** - El fluido en IBER se debe ingresar como caudal total o específico, o una cota; para ambos tipos se requiere definir el tipo de régimen al que pertenece el flujo, IBER posee características de condiciones por defecto, los mismos se detallan a continuación en la tabla 3.1.

**TABLA 3.1 CONDICIONES QUE POSEE EL PROGRAMA IBER**

Contorno	Régimen	Condiciones impuestas	
Entrada	Caudal total	Subcrítico / Crítico	Caudal total en dirección normal al contorno
		Supercrítico	Caudal total en dirección normal al contorno y velocidad media
	Caudal específico	Subcrítico / Crítico	Caudal específico en dirección normal al contorno
		Supercrítico	a) Caudal específico en dirección normal al contorno y calado b) Caudal específico en dirección normal al contorno y cota de agua
Salida	Subcrítico	a) Calado	
		b) Cota de agua	
		c) Vertedero (cota y coeficiente de descarga) d) Curva de gasto	
	Supercrítico / Crítico	No es necesario imponer ninguna condición	

FUENTE: Bladé et al., 2014.



- **SALIDA.** - Al igual que la entrada se debe asignar la condición del flujo en la salida, como se ve en la tabla 3.1.

### CONDICIONES DE CONTORNO EN TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

Esta condición resuelve el transporte de fondo y en suspensión, para ello IBER considera únicamente una granulometría uniforme.

- **TRANSPORTE DE FONDO:** En este menú el cálculo es empírico en función del esfuerzo en el fondo para determinar el valor del caudal sólido de fondo.
- **TRANSPORTE SUSPENDIDO:** Este menú se puede asignar una porción de sedimentos en suspensión al caudal definido en cualquier elemento del mallado.

### CONDICIONES DE CONTORNO MODELO DE TURBULENCIA

Este modelo no necesita condiciones de contorno por no utilizar ecuaciones, lo básico es definir este método al cálculo. IBER proporciona un modelo de turbulencia forma  $k - \varepsilon$  de 2 ecuaciones y para ello es necesario asignar condición de borde.

#### 3.2.4 ECUACIONES FUNDAMENTALES EN IBER

El módulo hidrodinámico del paquete IBER resuelve las ecuaciones fundamentales de flujo en lámina libre de Saint Venant en 2D, tanto para turbulencia como sedimentos, se resuelven de manera integral por el método de los volúmenes finitos con una malla no estructurada (Urries, 2015).

Bladé (2012), estipula que las ecuaciones bidimensionales de Saint Venant resueltas por IBER tienen incorporado los efectos de turbulencia y rozamiento en la superficie por viento como se indica en la ecuación 3.1:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h U_x}{\partial x} + \frac{\partial h U_y}{\partial y} &= 0 \\
\frac{\partial}{\partial t} (h U_x) + \frac{\partial}{\partial x} \left( h U_x^2 + g \frac{h^2}{2} \right) + \frac{\partial}{\partial y} (h U_x U_y) \\
&= -gh \frac{\partial Z_b}{\partial x} + \frac{\tau_{s,x}}{\rho} - \frac{\tau_{b,x}}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \nu_t h \frac{\partial U_x}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \nu_t h \frac{\partial U_x}{\partial y} \right) \\
\frac{\partial}{\partial t} (h U_y) + \frac{\partial}{\partial x} (h U_x U_y) + \frac{\partial}{\partial y} \left( h U_y^2 + g \frac{h^2}{2} \right) \\
&= -gh \frac{\partial Z_b}{\partial y} + \frac{\tau_{s,y}}{\rho} - \frac{\tau_{b,y}}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \nu_t h \frac{\partial U_y}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \nu_t h \frac{\partial U_y}{\partial y} \right)
\end{aligned} \tag{3.1}$$

Siendo:

$h$  : Calado

$U_x, U_y$  : Velocidades horizontales medias respecto a la profundidad

$g$  : Gravedad

$\rho$  : Densidad del Agua

$Z_b$  : Cota del fondo

$\tau_s$  : Rozamiento de la superficie libre debido al movimiento del viento

$\tau_b$  : Rozamiento en el fondo

$\nu_t$  : Viscosidad de turbulencia

## FRICCIÓN DE FONDO

Es una fuerza de rozamiento que existe entre dos superficies, siendo estas la superficie del fondo y el fluido, para ríos y estuarios la rugosidad de fondo es elevada. Para las ecuaciones de flujo, la fricción de fondo se produce por una fuerza opuesta a la velocidad promedio y por la turbulencia ("Modelización bidimensional del flujo en lámina libre en aguas poco profundas," 2010).

La fórmula para expresar la fricción de fondo, en unidades de velocidad es la ecuación 3.2:

$$u_f = \sqrt{\frac{\tau_b}{\rho}} \quad (3.2)$$

Siendo:

$u_f$  : Fricción de Fondo

$\tau_b$  : Módulo de la fuerza de fricción.

$\rho$  : Densidad del agua.

En los modelos 2D el radio hidráulico no se define como la relación entre el área y el perímetro mojado debido que los modelos 2D no requieren definir las secciones transversales, en comparación a los modelos 1D (Méndez, 2017).

El radio hidráulico se define en la ecuación 3.3 como:

$$R_h = \frac{A}{P_m} = \frac{h \cdot \Delta x}{\Delta x} = h \quad (3.3)$$

Siendo:

$R_h$  : Radio hidráulico (m).

$A$  : Area de sección (m<sup>2</sup>).

$P_m$  : Perímetro mojado (m).

$h$  : Calado (m)

$\Delta x$  : Base (m)

La ecuación 3.3 expresa que en los modelos bidimensionales el calado es igual al radio hidráulico (Krochin, 1986).

La fricción en el fondo se expresa mediante la fórmula de Manning, como se indica en la ecuación 3.4:

$$C_f = g \cdot \frac{n^2}{h^{1/3}} \quad (3.4)$$

Siendo:

$c_f$  : Fricción de fondo

$g$ : Aceleración de la gravedad

$n$  : Coeficiente de rugosidad de Manning

$h$  : Calado

### ROZAMIENTO POR VIENTO

La fuerza de rozamiento producida por el viento se debe calcular a partir de 10m de altura, con la ecuación 3.5 de Van Dorn (1953).

$$\tau_s = \rho \cdot C_{vd} \cdot V_{10}^2 \quad (3.5)$$

Siendo:

$\tau_s$  : Fuerza de Rozamiento

$\rho$  : Densidad del viento

$V_{10}$  : Velocidad del viento a una altura de 10m.

$C_{vd}$  : Coeficiente de arrastre superficial. Se asume un  $C_{vd} = 2,5 \cdot 10^{-6}$ .

Según Bladé (2012), el coeficiente de arrastre superficial en función de la velocidad del viento puede ser calculado con las expresiones que se muestran en la tabla 3.2.

**TABLA 3.2 VALORES DE COEFICIENTE DE ARRASTRE SUPERFICIAL.**

$ V_{10}  < 5,6 \text{ m/s}$	→	$C_{VD} = 1,2 \cdot 10^{-6}$
$ V_{10}  > 5,6 \text{ m/s}$	→	$C_{VD} = 1,2 \cdot 10^{-6} + 2,25 \cdot 10^{-6} \left(1 - \frac{5,6}{ V_{10} }\right)^2$

ELABORADO POR: Guaya Cristian, Montalván Edison.

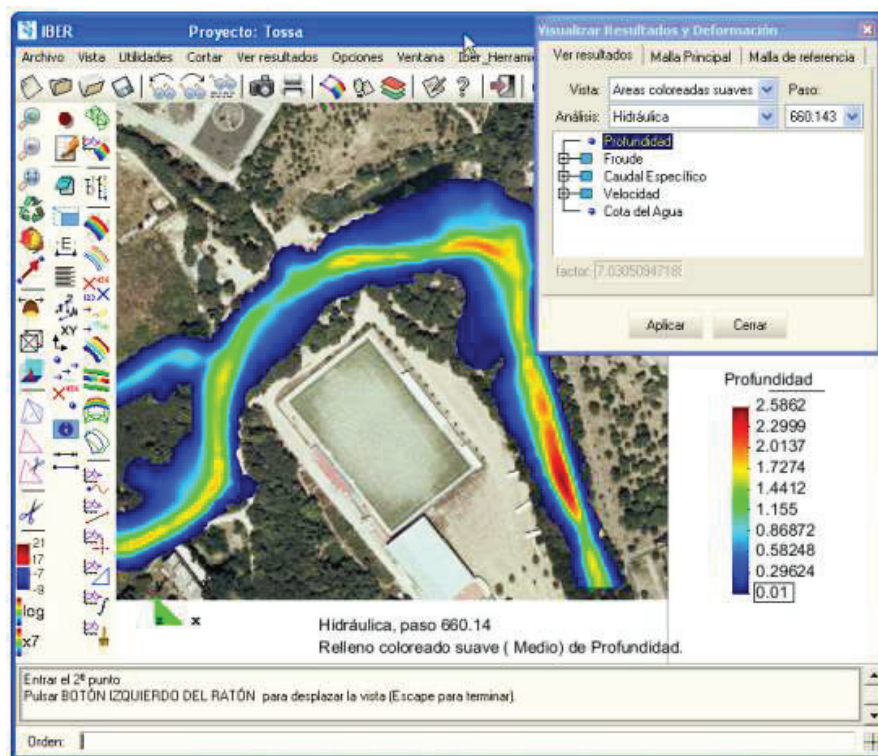
FUENTE: Bladé, 2012.

### 3.2.5 POST PROCESO

#### 3.2.5.1 RESULTADOS DEL PAQUETE COMPUTACIONAL

En el post proceso el programa IBER, tiene la funcionalidad de que los resultados sean visuales con escalas de colores de la simulación bidimensional, estos resultados pueden ser analizados mediante características hidráulicas como son principalmente calados, velocidad, número de Froude, cotas del agua en cada instante del tiempo, con áreas coloreadas suavizadas o como vectores como se ve en la figura 3.4.

**FIGURA 3.4 VISUALIZACIÓN DE RESULTADOS EN EL PROGRAMA IBER**



FUENTE: Manual básico de usuario, 2010.

### **3.3 METODOLOGÍA**

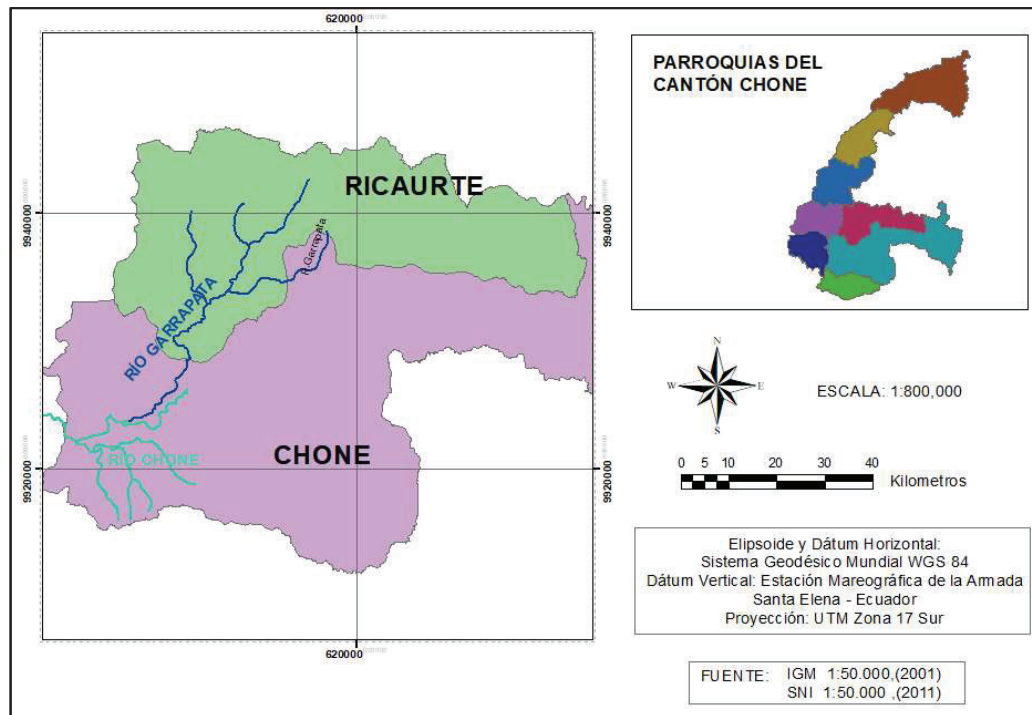
Para generar la información de los mapas temáticos de las variables hidráulicas del Río Garrapata, se desarrollará mediante la interpretación de insumos e información proporcionada principalmente de entidades públicas, con un completo análisis de las características fundamentales necesarias para la metodología.

#### **3.3.1 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO**

La zona de estudio se encuentra localizada sobre el Río Garrapata que atraviesa las parroquias Ricaurte y Chone, pertenecientes al cantón Chone en la provincia de Manabí. La importancia del estudio en esta zona se debe a la presencia de asentamientos poblacionales, áreas de alta producción agrícola y vías. El área de estudio se encuentra a una altitud media de 20 msnm.

En la figura 3.5 se presenta la ubicación del Río Garrapata en la parroquia antes mencionada.

La división política parroquial del cantón Chone se presenta en el Anexo I.

**FIGURA 3.5 UBICACIÓN DEL RÍO GARRAPATA.**

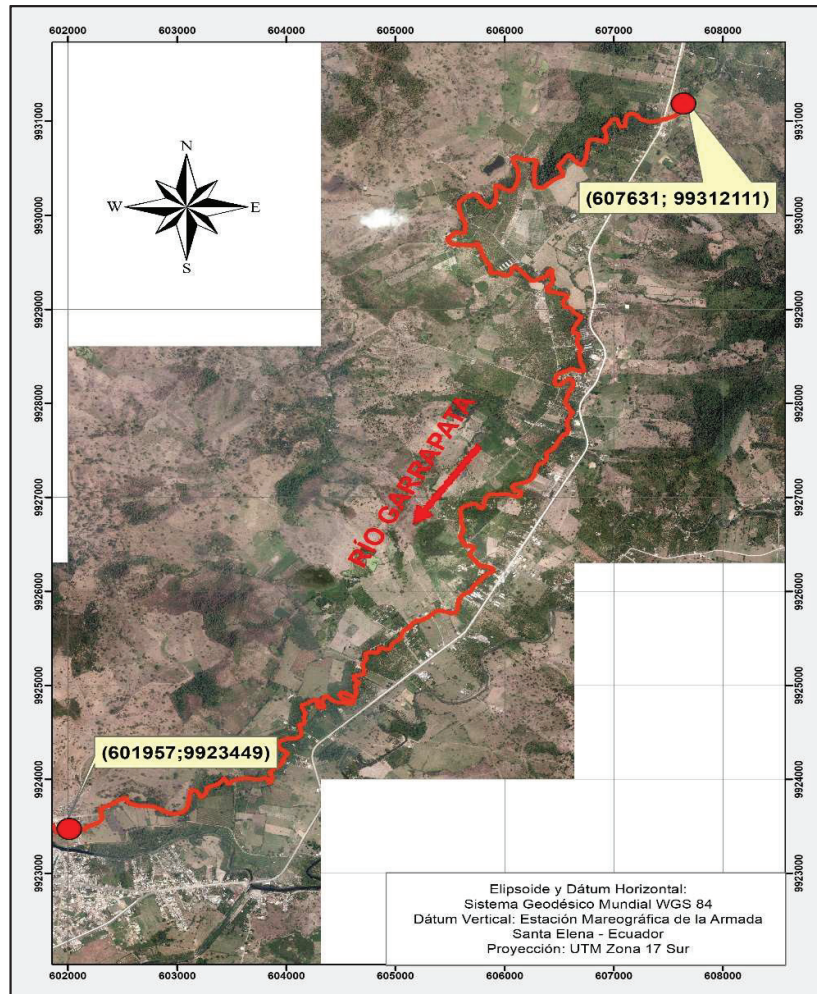
ELABORADO POR: Guaya Cristian, Montalván Edison.

### 3.3.2 RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE INFORMACIÓN BASE

La información primaria, secundaria y el material necesario para el desarrollo del presente proyecto son: mapas base a nivel cantonal (ríos, curvas de nivel, vías.), cartografía temática, ortofotos, modelos digitales de terreno (MDT) del área de estudio.

La recopilación de información del área de estudio como: cobertura de suelo y uso de tierra con escalas de 1:50000 se obtienen del Sistema Nacional de Información (SNI); Cartografía base del Instituto Geográfico Militar (IGM); MDT y ortofotos de la zona en coordenadas WGS 84 del Departamento de Sistema Nacional de Información de Tierras Rurales e Infraestructura Tecnológica (SIGTIERRAS) del Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAGAP), como se observa en la figura 3.6.

**FIGURA 3.6 ORTOFOTO DEL ÁREA DE ESTUDIO**



ELABORADO POR: Guaya Cristian, Montalván Edison.  
Fuente: SIGTIERRAS, 2017.

### 3.3.3 INFORMACIÓN CARTOGRÁFICA, MODELO DIGITAL DE TERRENO

El Modelo Digital de Terreno (MDT) es una representación digital de la superficie terrestre, que constituyen un elemento base de información para la aplicación en diferentes ciencias ingenieriles y ambientales (Sarria, 2006).

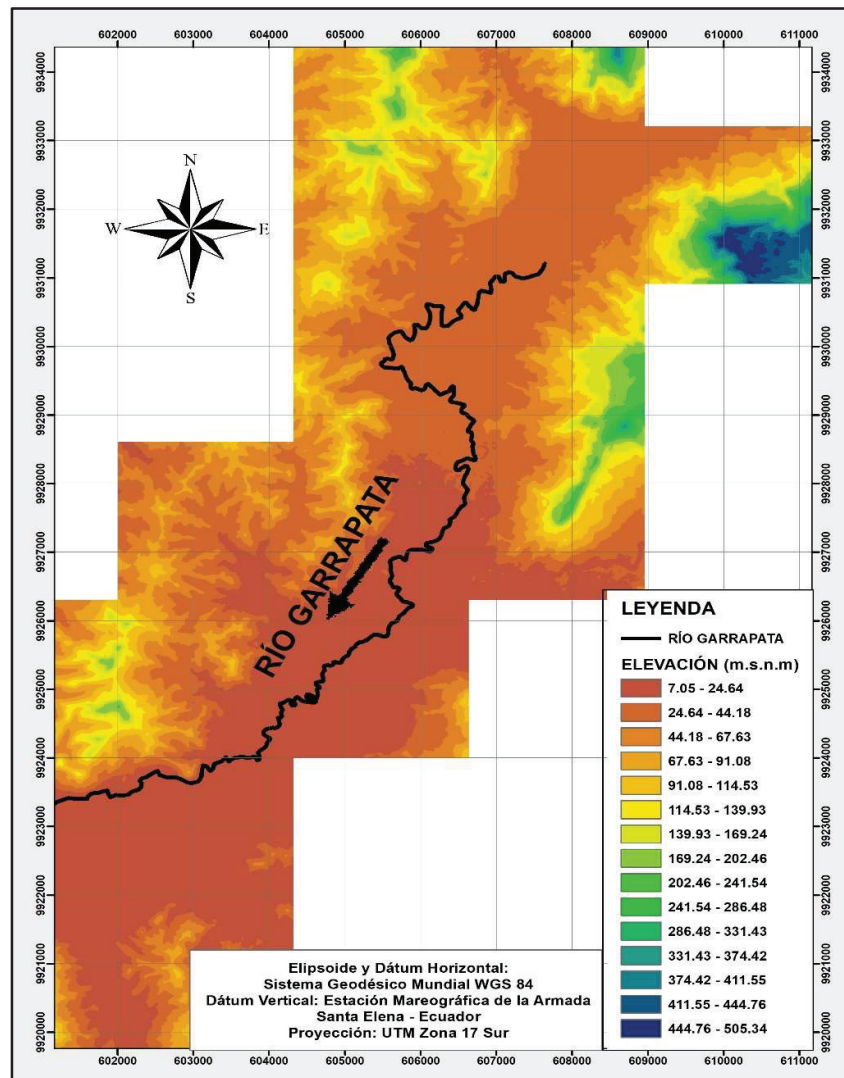
El MDT es un conjunto de capas, que cada una de estas representan distintas características del terreno, las cuales se derivan de una capa de elevaciones llamada Modelo Digital de Elevación (MDE).



Según Méndez J. (2017), un modelo digital de terreno es una interpretación de manera visual y matemática de valores de niveles de un espacio determinado en función de la altura del nivel del mar, y permite analizar las formas de la topografía.

La figura 3.7 muestra el MDT para la zona de estudio.

**FIGURA 3.7 MODELO DIGITAL DE TERRENO DEL ÁREA DE ESTUDIO.**



ELABORADO POR: Guaya Cristian, Montalván Edison.  
Fuente: IGM, 2017.

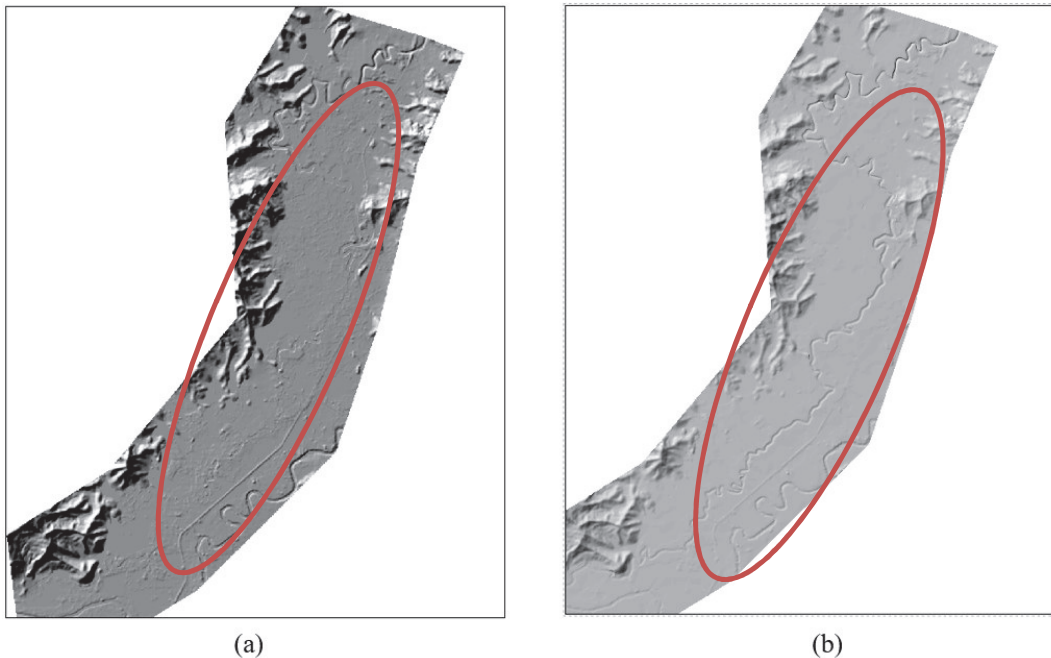
IBER trabaja con una visualización de todas las características topográficas del área a ser simulada.

### 3.3.4 CORRECCIÓN DEL MODELO DIGITAL DEL TERRENO

Una vez analizada la información base referente al modelo digital del terreno, se encontró errores que generaban la interrupción y corte del cauce del Río Garrapata. Por lo tanto, fue necesario utilizar cartografía base proporcionada por el IGM, la misma que contiene información georreferenciada de la zona y principalmente información de altura del fondo del cauce, lo que permitió generar una mejor definición de la topografía del terreno mediante la aplicación del software AutoCAD Civil 3D.

En la figura 3.8 se presenta la comparación del modelo digital del terreno, entre (a) imagen original del cauce y (b) el resultado obtenido en el proceso de corrección de la información.

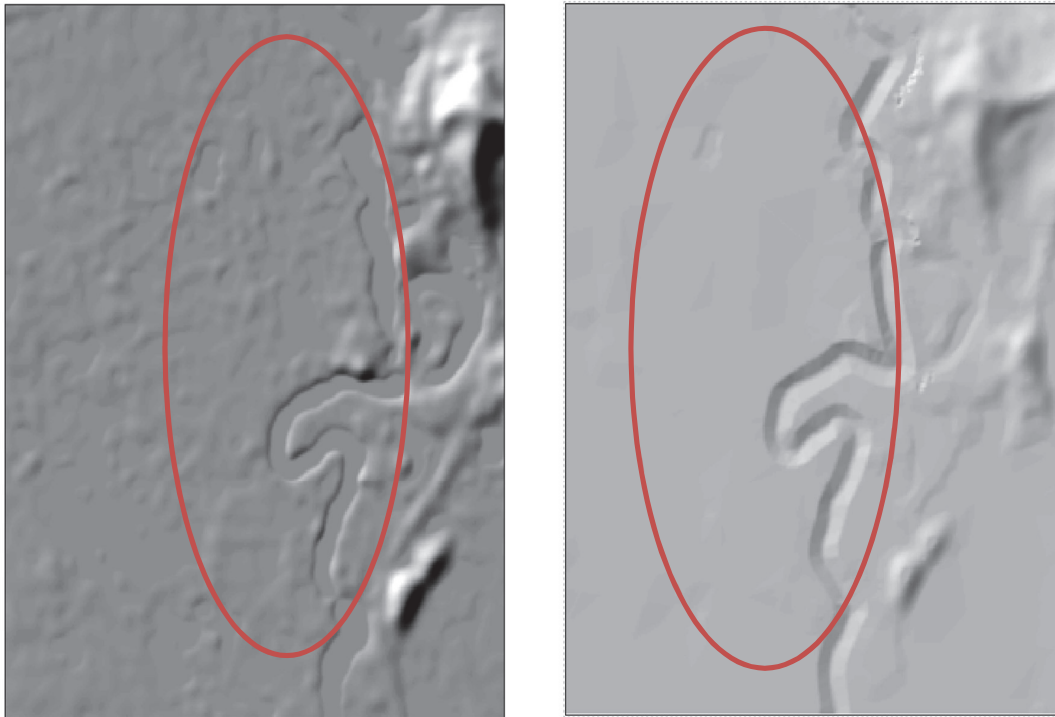
**FIGURA 3.8 CORRECCIÓN DEL MODELO DIGITAL DE TERRENO**



ELABORADO POR: Guaya Cristian, Montalván Edison.

En la figura 3.9 se presenta una ampliación de las imágenes presentadas en la figura 3.8, observando fácilmente el resultado del proceso de corrección del modelo digital del terreno.

**FIGURA 3.9 RESULTADO DEL PROCESO DE CORRECCIÓN DEL MDT**

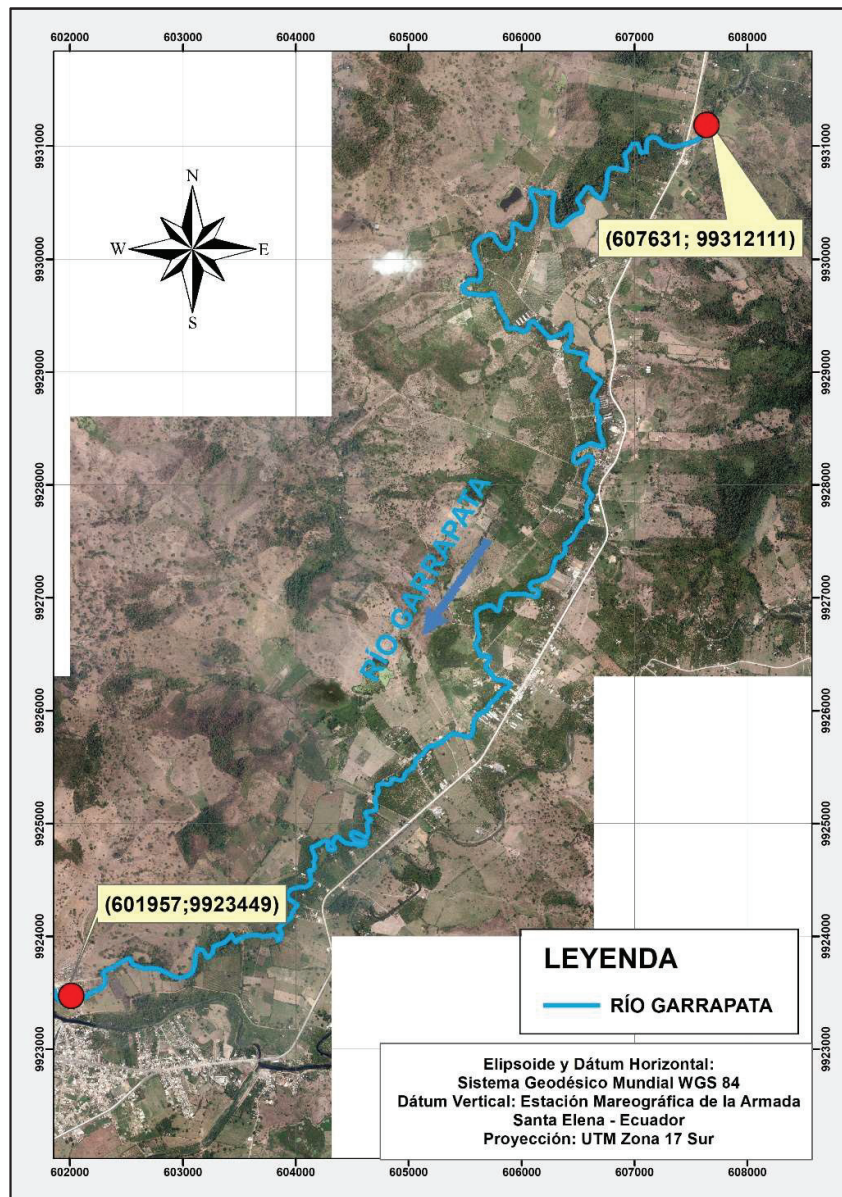


ELABORADO POR: Guaya Cristian, Montalván Edison.

### **3.3.5 CARACTERIZACIÓN DEL TRAMO DE ESTUDIO**

El tramo de estudio perteneciente al Río Garrapata presenta al inicio de la modelación las coordenadas 607631 E, 99312111 N y el fin en 601957 E, 9923449 N, como se observa en la figura 3.10.

**FIGURA 3.10 UBICACIÓN DEL CAUCE EN LA IMAGEN SATELITAL DEL CANTÓN CHONE**



ELABORADO POR: Guaya Cristian, Montalván Edison.

FUENTE: SIGTIERRAS, 2017.

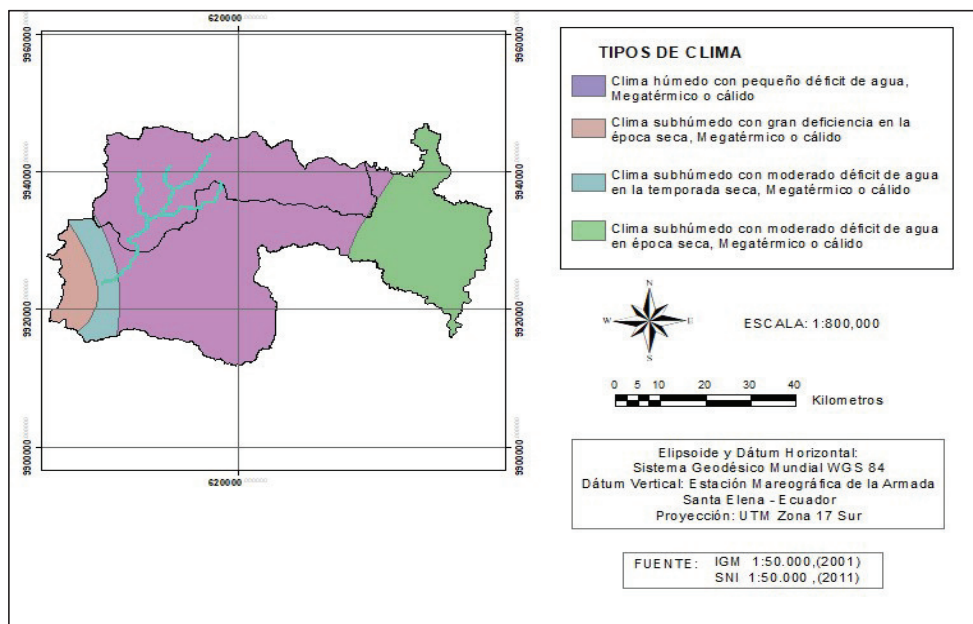
El Río Garrapata nace en la parte alta de la cuenca del río Chone, con una longitud aproximada de 25km, el cual atraviesa las parroquias formadas por Chone y Ricaurte. El Río Garrapata posee características de río de montaña con grandes

pendientes y velocidad en su parte alta, también de río de llanura en su parte baja antes que desemboque en el Río Chone.

## CLIMA

Las dos parroquias que abarca el Río Garrapata, presenta 4 tipos de climas de acuerdo a información del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (2006), como se observa en la figura 3.11.

**FIGURA 3.11 CLIMAS DE LAS PARROQUIAS RICAURTE Y CHONE**



ELABORADO POR: Guaya Cristian, Montalván Edison.

FUENTE: MAGAP, 2017.

La descripción de cada clima que posee el cantón Chone se lo muestra a continuación en la tabla 3.3.

**TABLA 3.3 DESCRIPCIÓN DE LOS CLIMAS DEL RÍO GARRAPATA**

<b>CLIMA</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
<b>Húmedo con pequeño déficit de agua, Mesotérmico templado frío</b>	Este tipo de clima corresponden a un ambiente seco templado cálido con ligero o nulo exceso de agua en época lluviosa, posee una deficiencia hídrica que supera los 6 meses, en los cuales presenta severos riesgos de desertificación
<b>Subhúmedo con gran deficiencia en la época seca, Megatérmico o cálido</b>	Este clima se caracteriza por temperaturas superiores a 24°C, la estación es seca muy marcada, las lluvias se concentran desde diciembre a mayo siendo los demás muy seco.
<b>Subhúmedo con moderado déficit de agua en la temperatura seca, Megatérmico o cálido</b>	Las temperaturas fluctúan alrededor de los 24°C, las máximas rara vez llegan a los 30°C, posee poca lluvia en los meses predominantes de sequedad, con vegetación predominante seca como los ceibos
<b>Subhúmedo con moderado déficit de agua en época seca, Megatérmico o cálido</b>	Presenta temperaturas que varía de 22.8 y 25.8 °C anualmente, la mayor precipitación se concentra en los meses de junio a septiembre, y entre julio y agosto disminuye, aumentando nuevamente a finales de agosto.

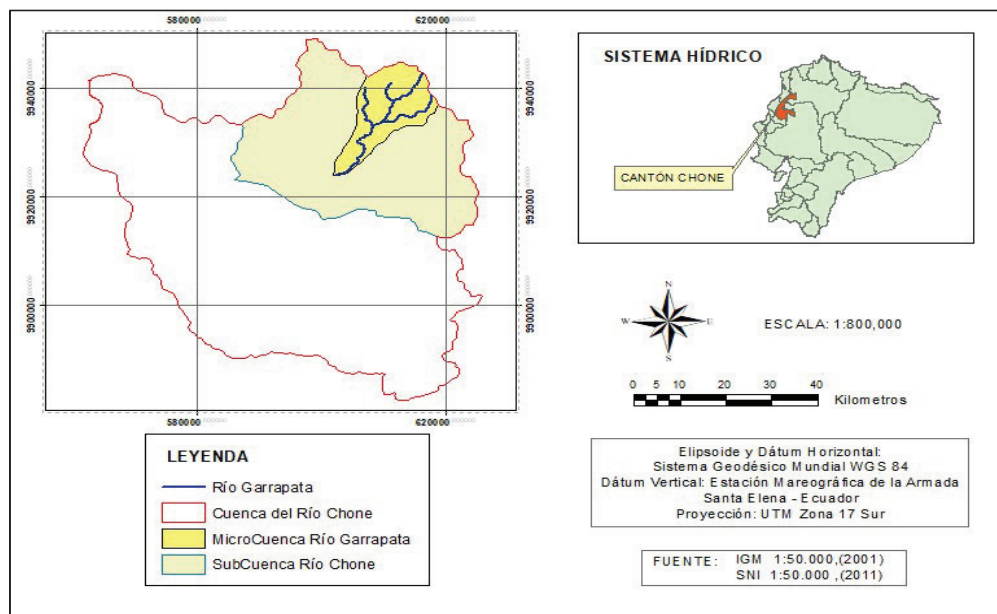
ELABORADO POR: Guaya Cristian, Montalván Edison.

FUENTE: INAMHI, 2006.

### **HIDROLOGÍA DEL TRAMO DE ESTUDIO**

En la figura 3.12 se muestra que, en el margen noreste de la cuenca del Río Chone, nace el Río Garrapata uno de los principales cauces aportantes al Río Chone, el cual toma su nombre la convergencia de los ríos Grande y Mosquito.

**FIGURA 3.12 CUENCA HIDROGRAFICA DEL RÍO CHONE**



ELABORADO POR: Guaya Cristian, Montalván Edison.

FUENTE: MAGAP, 2017.

Las presencias de grandes precipitaciones son de influencia en las comunidades cercanas al Río Garrapata, debido a que genera el desbordamiento del río (INAMHI, 2008).

El tramo de estudio considerado para la modelación numérica bidimensional abarca 18km del Río Garrapata localizados en la parte baja de la cuenca.

En la tabla 3.4, se detallan las características físicas principales de la cuenca del Río Garrapata presentadas en el documento “Estudio Hidrológico de inundaciones en la cuenca alta del Río Chone (Subcuencas: Garrapata, Mosquito, Grande)”

**TABLA 3.4 CARACTERÍSTICAS DE LA CUENCA DEL RÍO GARRAPATA.**

Cuenca	Coordenadas		ÁREA DE DRENAJE (A) Km <sup>2</sup>	PERÍMETRO (P) Km	LONGITUD DEL RÍO (LR) Km	PENDIENTE DEL RÍO (m/m)	TIEMPO DE CONCENTRACIÓN (TC) h.	COEFICIENTE DE COMPACIDAD (KC)	FACTOR DE FORMA (Kf)
	E	N							
Garrapata AJ chone	606544	9927637	130,76	54,36	25,54	0,0174	5,02	1,33	0,379

FUENTE: INAMHI, 2008.

Las ecuaciones utilizadas por el INAMHI para determinar el tiempo de concentración de la cuenca son: ecuación de Kirpich (3.6) y Giandontti (3.7).

$$t_c = 0,0195 \left( \frac{L^3}{H} \right)^{0,385} \quad (3.6)$$

$$t_c = \frac{(4\sqrt{S}+1,5L)}{0,8H^{0,5}} \quad (3.7)$$

Siendo:

*L*: Longitud del río (m)

*H*: Diferencia de cotas (m)

*t<sub>c</sub>*: Tiempo de concentración (min)

*S*: Área de la cuenca (km<sup>2</sup>)

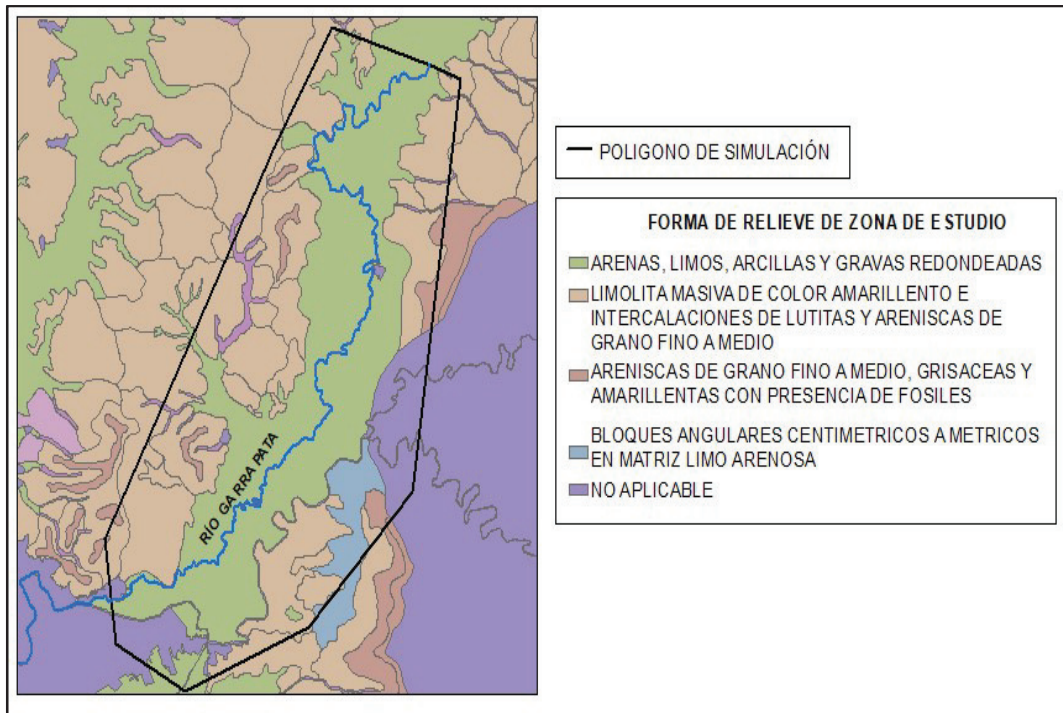
### **MORFOLOGÍA DEL CAUCE**

Según el Gobierno Autónomo Descentralizado (GAD) de Chone, la morfología principal del Río Garrapata es de: arenas, limos, arcillas y gravas redondeadas como se muestra en la figura 3.13.

Para fuertes épocas lluviosas el Río Garrapata arrastra material sólido como troncos de árboles que obstaculizan la circulación del cauce, por tal motivo se desvía hacia las márgenes provocando erosión del suelo (INAMHI, 2008).



**FIGURA 3.13 FORMAS DE RELIEVE DE LA ZONA DE ESTUDIO.**



ELABORADO POR: Guaya Cristian, Montalván Edison.

FUENTE: MAGAP, 2017.

### COEFICIENTE DE RUGOSIDAD N MANNING

Según Ven Te Chow (1994), la estimación del coeficiente “n” de rugosidad de Manning, se utiliza la expresión matemática de Cowan presentada en la ecuación 3.8.

$$n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) * m_5 \quad (3.8)$$

Donde  $n_0$  es un valor básico de  $n$  para un canal recto, uniforme y liso en los materiales naturales involucrados,  $n_1$  es un valor que debe agregarse al  $n_0$  para corregir el efecto de las rugosidades superficiales,  $n_2$  es un valor para considerar las variaciones en forma y tamaño de la sección transversal del canal,  $n_3$  es el valor para considerar las obstrucciones,  $n_4$  es un valor para considerar la

vegetación y las condiciones de flujo, y  $m_5$  es un factor de corrección de los efectos por meandros en el canal.

En tabla 3.5 se detallan los valores de los coeficientes que intervienen en la ecuación 3.8.

**TABLA 3.5 COEFICIENTES DE LA ECUACIÓN DE COWAN**

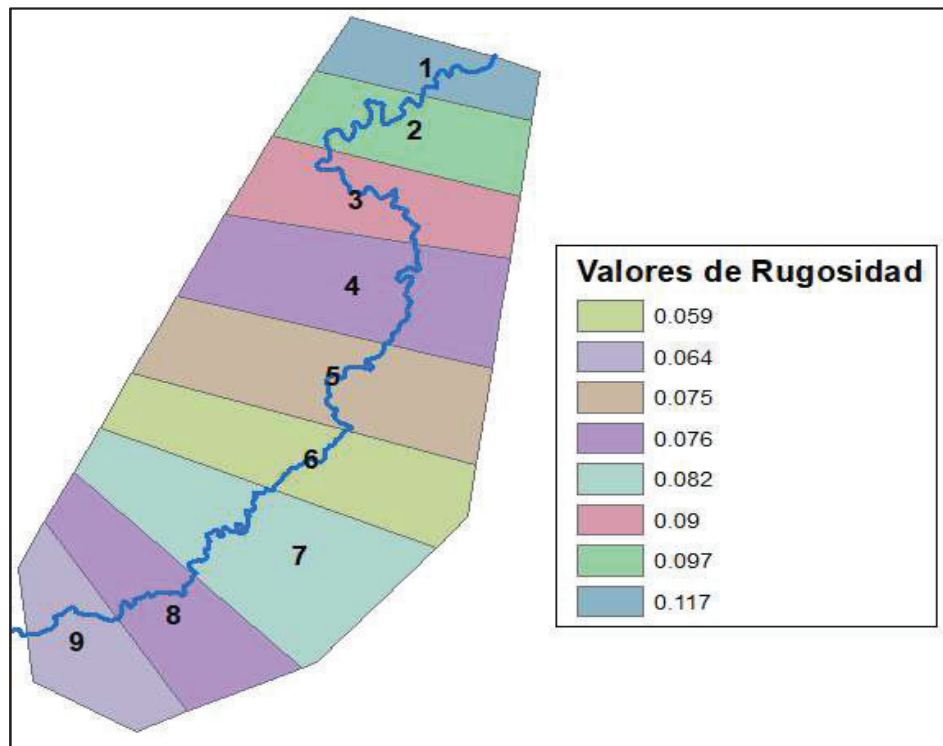
<b>Valores para el cálculo de coeficiente de Rugosidad</b>			
<b>Condiciones del Canal</b>		<b>Valores</b>	
Material involucrado	Tierra	n0	0,020
	Corte en roca		0,025
	Grava fina		0,024
	Grava gruesa		0,028
Grado de irregularidad	Suave	n1	0,000
	Menor		0,005
	Moderado		0,010
	Severo		0,020
Variaciones de la sección transversal	Gradual	n2	0,000
	Ocasionalmente alternante		0,005
	Frecuentemente alternante		0,010-0,015
Efecto relativo de las obstrucciones	Insignificante	n3	0,000
	Menor		0,010-0,015
	Apreciable		0,020-0,030
	Severo		0,040-0,060
Vegetación	Baja	n4	0,005-0,010
	Media		0,010-0,025
	Alta		0,025-0,050
	Muy alta		0,050-0,100
Grado de los efectos por meandros	Menor	m5	1,000
	Apreciable		1,150
	Severo		1,300

ELABORADO POR: Guaya Cristian, Montalván Edison.

FUENTE: VEN TE CHOW (1994).

Las características geométricas y morfológicas del área de modelación, se desarrollarán mediante una división de 9 tramos, con diferentes coeficientes de rugosidad "n" de Manning, en la figura 3.14 se detalla la división de las áreas y la tabla 3.6 muestra los valores calculados de rugosidad.

**FIGURA 3.14 DIVISIÓN EN ZONAS DEL ÁREA DE MODELACIÓN PARA EL CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE RUGOSIDAD DE MANNING**



ELABORADO POR: Guaya Cristian, Montalván Edison.

**TABLA 3.6 VALORES CALCULADOS PARA EL COEFICIENTE DE RUGOSIDAD DE MANNING**

FACTOR n		n0	n1	n2	n3	n4	m5	n
1	DESCRIPCIÓN	ARENAS, LIMOS, ARCILLAS Y GRAVAS REDONDEADA	MENOR-MODERADO	OCASIONALMENTE ALTERNANTE	MENOR	ALTA	SEVERO	0.112
	VALOR	0.024	0.0075	0.005	0.01	0.04	1.3	
2	DESCRIPCIÓN	ARENAS, LIMOS, ARCILLAS Y GRAVAS REDONDEADA	MENOR-MODERADO	FRECUENTEMENTE ALTERNANTE	MENOR	MEDIA	SEVERO	0.093
	VALOR	0.024	0.0075	0.01	0.0125	0.0175	1.3	
3	DESCRIPCIÓN	ARENAS, LIMOS, ARCILLAS Y GRAVAS REDONDEADA	MENOR-MODERADO	OCASIONALMENTE ALTERNANTE	MENOR	MEDIA-ALTA	SEVERO	0.086
	VALOR	0.024	0.0075	0.005	0.01	0.02	1.3	
4	DESCRIPCIÓN	ARENAS, LIMOS, ARCILLAS Y GRAVAS REDONDEADA	MENOR-MODERADO	FRECUENTEMENTE ALTERNANTE	MENOR	BAJA	SEVERO	0.073
	VALOR	0.024	0.0075	0.01	0.01	0.005	1.3	
5	DESCRIPCIÓN	ARENAS, LIMOS, ARCILLAS Y GRAVAS REDONDEADA	MENOR-MODERADO	OCASIONALMENTE ALTERNANTE	MENOR	BAJA-MEDIA	SEVERO	0.072
	VALOR	0.024	0.0075	0.005	0.011	0.008	1.3	
6	DESCRIPCIÓN	ARENAS, LIMOS, ARCILLAS Y GRAVAS REDONDEADA	MENOR-MODERADO	OCASIONALMENTE ALTERNANTE	MENOR	MEDIA	MENOR	0.057
	VALOR	0.024	0.0075	0.005	0.01	0.01	1	
7	DESCRIPCIÓN	ARENAS, LIMOS, ARCILLAS Y GRAVAS REDONDEADA	MENOR-MODERADO	FRECUENTEMENTE ALTERNANTE	MENOR	BAJA	SEVERO	0.079
	VALOR	0.024	0.0075	0.01	0.012	0.007	1.3	
8	DESCRIPCIÓN	ARENAS, LIMOS, ARCILLAS Y GRAVAS REDONDEADA	MENOR-MODERADO	OCASIONALMENTE ALTERNANTE	INSIGNIFICANTE	MEDIA	SEVERO	0.073
	VALOR	0.024	0.0075	0.005	0.005	0.015	1.3	
9	DESCRIPCIÓN	ARENAS, LIMOS, ARCILLAS Y GRAVAS REDONDEADA	MENOR-MODERADO	OCASIONALMENTE ALTERNANTE	INSIGNIFICANTE	MEDIA	APRECIABLE	0.062
	VALOR	0.024	0.0075	0.005	0.003	0.014	1.15	

ELABORADO POR: Guaya Cristian, Montalván Edison.

El cálculo y consideraciones establecidas para los valores presentados en la tabla 3.6 se encuentran especificadas en el anexo III.

### 3.3.6 DEFINICIÓN HIDROGRAMAS ASOCIADOS A PERIODOS DE RETORNO

Los hidrogramas de entrada al programa IBER son importantes, ya que permiten el ingreso del caudal en función del tiempo.

El estudio hidrológico del presente trabajo se fundamenta en el “Estudio hidrológico de inundaciones en la cuenca alta del Río Chone (subcuencas: Garrapata, Mosquito y Grande)”, con la información de la estación hidrológica Garrapata Aj Chone (H0230), a continuación, en la tabla 3.7 se encuentra la información de la estación.

**TABLA 3.7 INFORMACIÓN DE LA ESTACIÓN HIDROLÓGICA H0230**

COD.	NOMBRE	Coordenadas		ÁREA km <sup>2</sup>	COTA m.s.n.m	TIPO
		Latitud	Longitud			
H0230	Garrapata AJ Chone	6065444	9927637	130,7	23	LG

FUENTE: (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología, 2012)

El estudio realizado en el 2008 por el INAMHI, proporciona los caudales asociados a los distintos periodos de retorno, tomando como resultados los caudales desarrollados por los métodos de la envolvente y número de curva. En la tabla 3.8 se detalla el resumen de caudales.

**TABLA 3.8 RESUMEN DE CAUDALES MAXIMOS ASOCIADOS A PERIODOS DE RETORNO**

PERIODO DE RETORNO - Tr (años)	CUENCA Garrapata AJ. Chone Q (m <sup>3</sup> /s)	
	Método de Envolventes Creager	Método de Número de Curva - Abstracciones
5	46	45,38
10	51	70,13
25	56	97,91
50	60	128,51
100	64	157,08

FUENTE: (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología, 2008)

En la tabla 3.9, se encuentran los caudales máximos para los diferentes periodos de retorno que serán utilizados en la simulación, estos fueron promediados de los caudales presentados la tabla 3.8.

**TABLA 3.9 CAUDALES MÁXIMOS PARA LA MODELACIÓN**

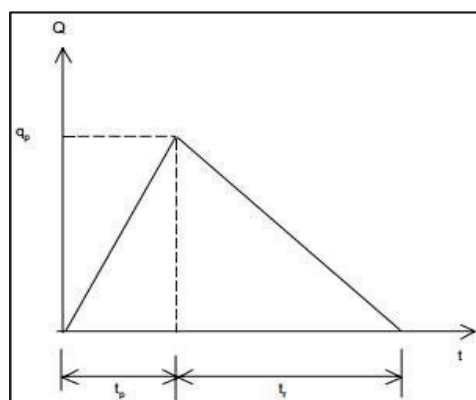
PERIODO DE RETORNO - Tr (años)	CAUDAL MÁXIMO DE MODELACIÓN (m <sup>3</sup> /s)
5	45,69
10	60,57
25	76,96
50	94,26
100	110,54

FUENTE: (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología, 2008)

Los hidrogramas de entrada que requiere el programa IBER, se establecieron mediante el análisis de dos formas de hidrogramas que permite representar dos tipos de flujo; para flujo no permanente un hidrograma en forma triangular que alcanza su valor pico para cada uno de los valores de los caudales máximos y otro de tipo constante para flujo permanente.

La determinación de un tiempo aproximado para el paso del flujo no permanente, se realiza teóricamente con el hidrograma unitario triangular como se muestra en la figura 3.15.

**FIGURA 3.15 HIDROGRAMA UNITARIO TRIANGULAR**



FUENTE: (Breña, 2003)

Según Breña (2003), las ecuaciones empleadas el hidrograma unitario triangular son las ecuaciones 3.9, 3.10 y 3.11:

$$q_p = 0.208 \frac{A}{t_p} \quad (3.9)$$

$$t_r = 1.67 t_p \quad (3.10)$$

$$t_p = \sqrt{t_c} + 0.6 t_c \quad (3.11)$$

Donde:

$q_p$ : Caudal pico Unitario ( $m^3/s/mm$ )

$A$ : Área de la cuenca ( $km^2$ )

$t_p$ : Tiempo pico (hr)

$t_r$ : Tiempo de recesión (hr)

$t_c$ : Tiempo de concentración de la cuenca (hr)

$h_e$ : Lluvia efectiva (mm)

De las características de la cuenca del Río Garrapata mencionadas en la tabla 3.4, se utilizan los datos como el área de la cuenca y el tiempo de concentración, estos tomados del estudio realizado por el INAMHI.

En la tabla 3.10 se muestran los resultados obtenidos para las ecuaciones del hidrograma triangular unitario aplicado a la zona de estudio.

**TABLA 3.10 HIDROGRAMA PARA FLUJO NO PERMANENTE.**

<b>Tiempo de concentración</b>	$t_c$	5,02	Hr.
<b>Tiempo pico</b>	$t_p$	5,25	Hr.
<b>Tiempo de recesión</b>	$t_r$	8,77	Hr.

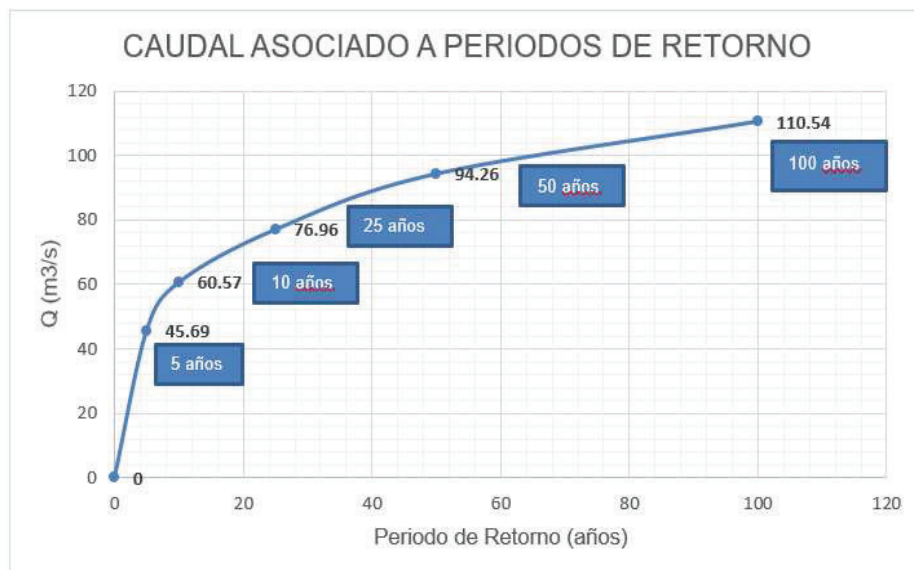
<b>TIEMPO TOTAL APROXIMADO DE SIMULACIÓN</b>	14,02	Hr.
--	-------	-----

<b>PERIODO DE RETORNO</b>	<b>Caudal Pico (m<sup>3</sup>/hr)</b>
5	45,69
10	60,57
25	76,96
50	94,26
100	110,54

ELABORADO POR: Guaya Cristian, Montalván Edison.

La figura 3.16, presenta la relación existente entre los diferentes caudales asociados para los periodos de retorno establecidos para el desarrollo de la modelación bidimensional.

**FIGURA 3.16 CAUDALES ASOCIADOS A PERIODOS DE RETORNO**

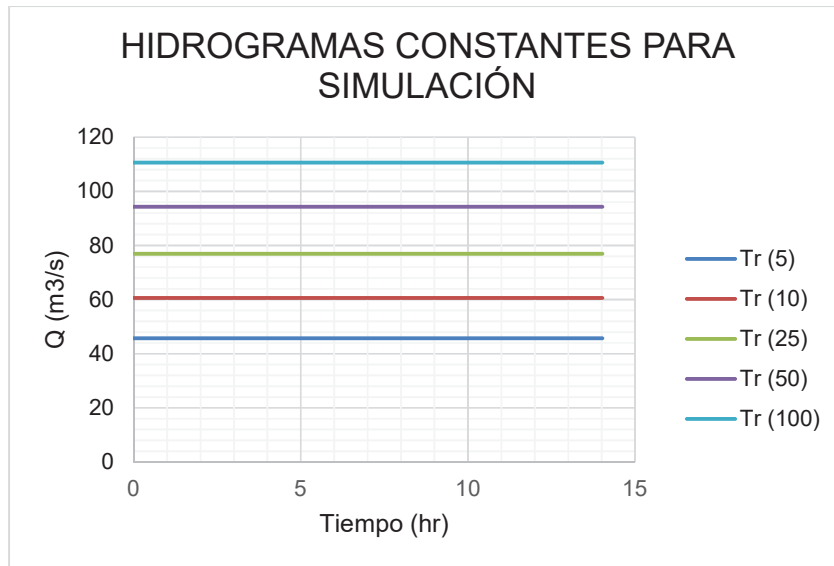


ELABORADO POR: Guaya Cristian, Montalván Edison.



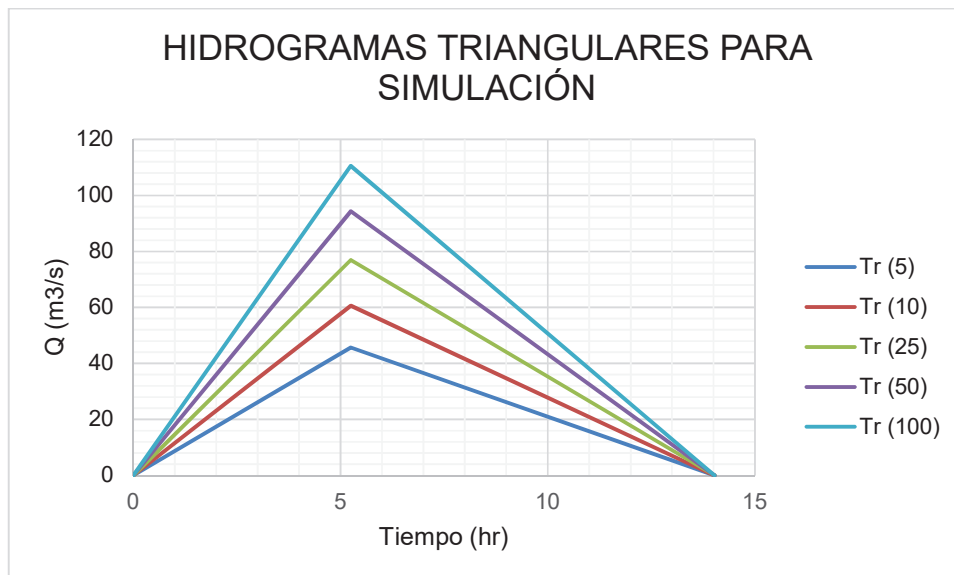
En la figura 3.17 y 3.18 se muestra los hidrogramas utilizados para el ingreso en la modelación.

**FIGURA 3.17 HIDROGRAMA DE CRECIDA CONSTANTE PARA MODELACIÓN NUMÉRICA.**



ELABORADO POR: Guaya Cristian, Montalván Edison.

**FIGURA 3.18 HIDROGRAMA DE CRECIDA TRIANGULAR PARA MODELACIÓN NUMÉRICA.**



ELABORADO POR: Guaya Cristian, Montalván Edison.

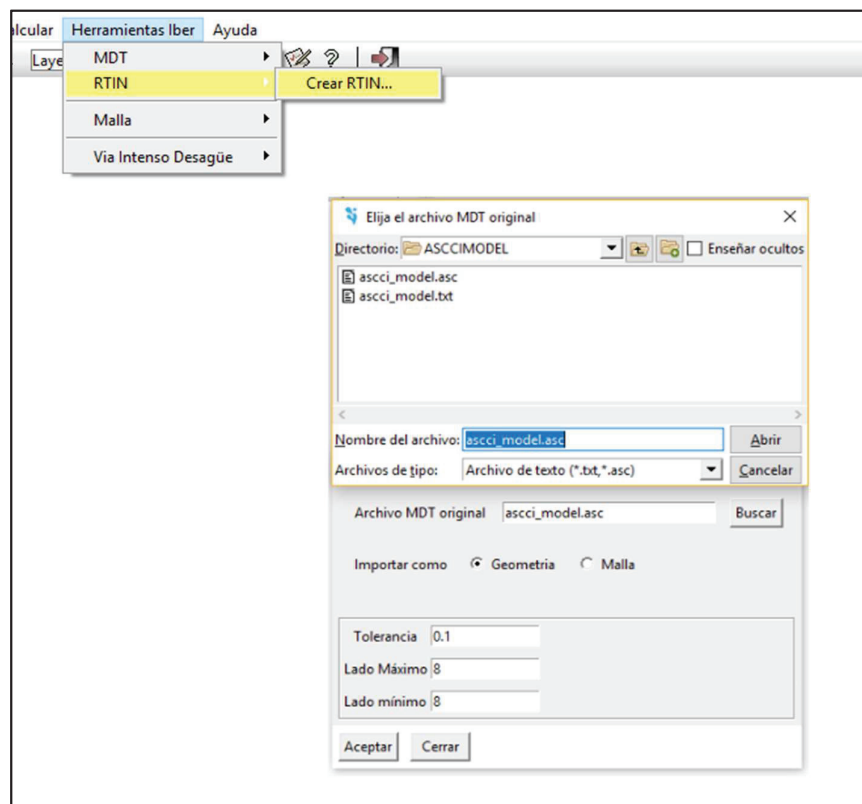
Cada uno de estos 10 hidrogramas se simulará para la obtención de mapas temáticos.

### 3.3.7 GEOMETRÍA DEL MODELO NUMÉRICO

Se importa la geometría del terreno del área de modelación en formato ASCII que contiene la información del MDT, esta conversión se la realiza mediante el programa ArcMap.

En la figura 3.19 se muestra el proceso de importación de la geometría de zona, se optaron las dimensiones de la geometría en largo y ancho de 8 metros respectivamente y una tolerancia mínima de 0.1.

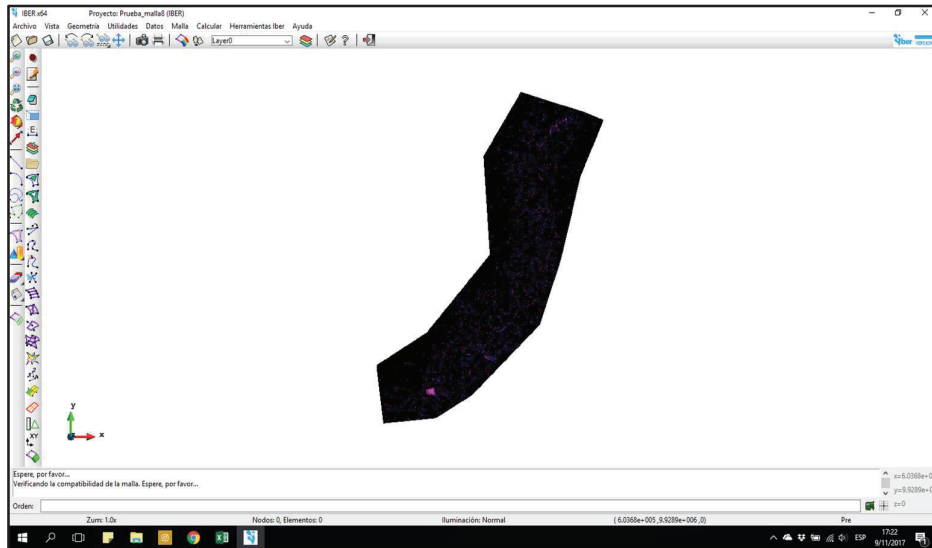
**FIGURA 3.19 VENTANA DE IMPOTACION DE GEOMETRÍA DEL ÁREA DE ESTUDIO EN IBER**



ELABORADO POR: Guaya Cristian, Montalván Edison.

La figura 3.20, muestra la geometría importada en IBER.

**FIGURA 3.20 GEOMETRÍA DEL MODELO**

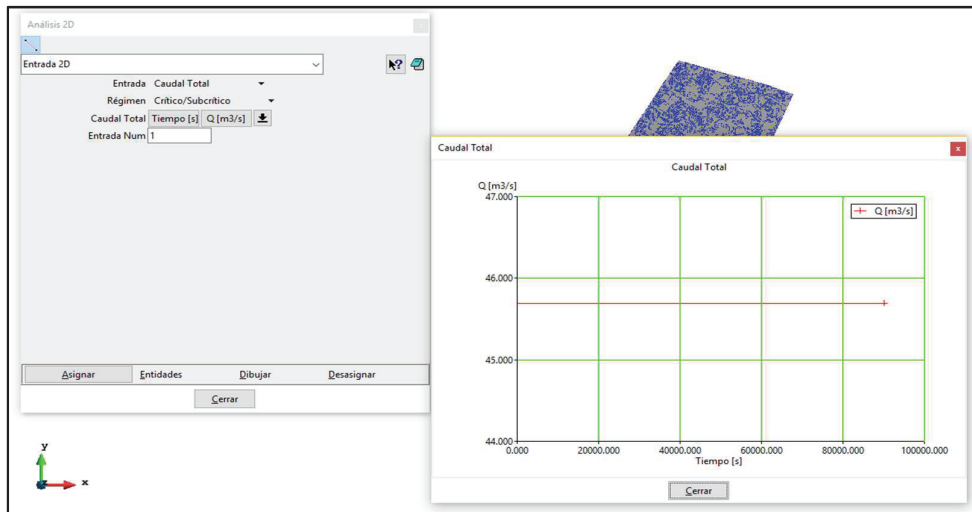


ELABORADO POR: Guaya Cristian, Montalván Edison.

### 3.3.8 CONDICIONES DE CONTORNO DEL MODELO NUMÉRICO

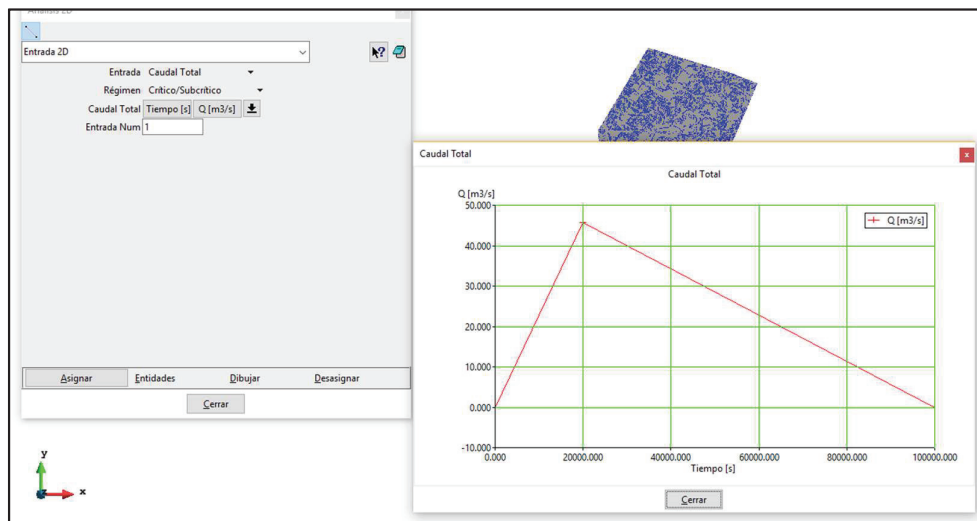
Los parámetros de contorno para el programa IBER, requieren del ingreso de los hidrogramas tanto para flujo permanente y no permanente, asignando los elementos de entrada en el cauce del Río Garrapata, proceso que se muestra las figuras 3.21 y figura 3.22.

**FIGURA 3.21 VENTANA DE ENTRADA DE LAS CONDICIONES DE CONTORNO PARA EL HIDROGRAMA CONSTANTE EN IBER**



ELABORADO POR: Guaya Cristian, Montalván Edison.

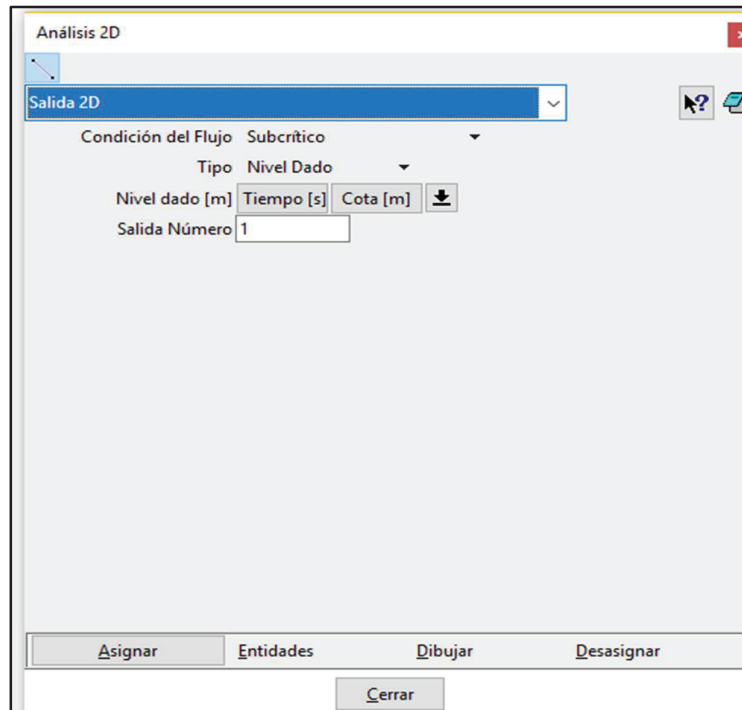
**FIGURA 3.22 VENTANA DE ENTRADA DE LAS CONDICIONES DE CONTORNO PARA EL HIDROGRAMA TRIANGULAR EN IBER**



ELABORADO POR: Guaya Cristian, Montalván Edison.

Posteriormente, en la figura 3.23 se presenta la condición de contorno a la salida de la modelación será de flujo subcrítico y el tipo nivel dado.

**FIGURA 3.23 VENTANA DE SALIDA DE LAS CONDICIONES DE CONTORNO EN IBER**



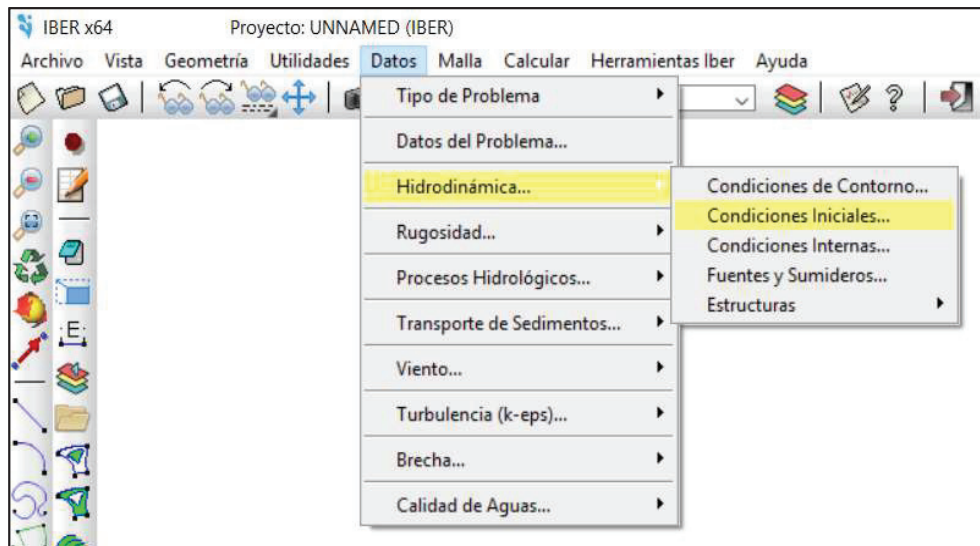
ELABORADO POR: Guaya Cristian, Montalván Edison.

### **Condición Inicial**

La condición inicial se refiere a la cantidad de agua que existe en el modelo cuando inicia la simulación.

Para establecer la condición inicial se ingresa al menú de “condiciones iniciales” presentado en la figura 3.24.

**FIGURA 3.24 CONDICIONES INICIALES DE MODELACIÓN**



ELABORADO POR: Guaya Cristian, Montalván Edison.

**FIGURA 3.25 CONDICIÓN INICIAL ESTABLECIDA**



ELABORADO POR: Guaya Cristian, Montalván Edison.

Como se observa en la figura 3.25 se establece la condición inicial de calado 0 m. por lo tanto se supone que la zona de estudio se encuentra seca.

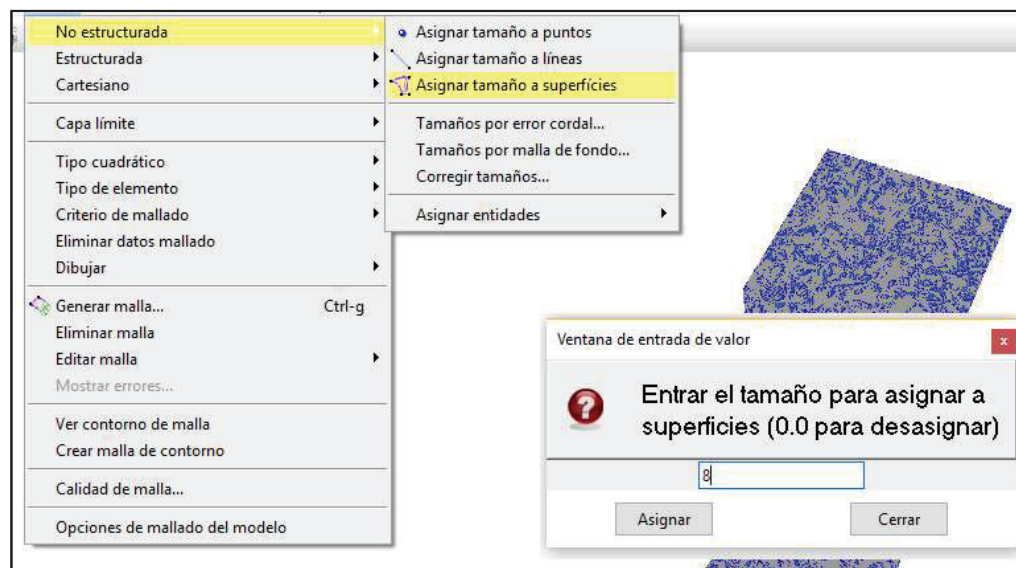
Hay que tomar en consideración que a partir de la versión 2.0 de IBER, si no se asigna condición inicial, el programa supone automáticamente que la zona de

simulación se encuentra seca es decir el calado inicial toma propiedades por default (calado = 0 m.).

### 3.3.9 ELABORACIÓN DEL MALLADO DEL ÁREA DE ESTUDIO

El mallado del área de estudio, se genera mediante una malla no estructurada de 8 x 8 metros, que se adapta de mejor forma a la topografía del terreno, esta malla está representada por triángulos y cuadriláteros. La figura 3.26, indica los pasos para asignar el tamaño de las superficies del mallado.

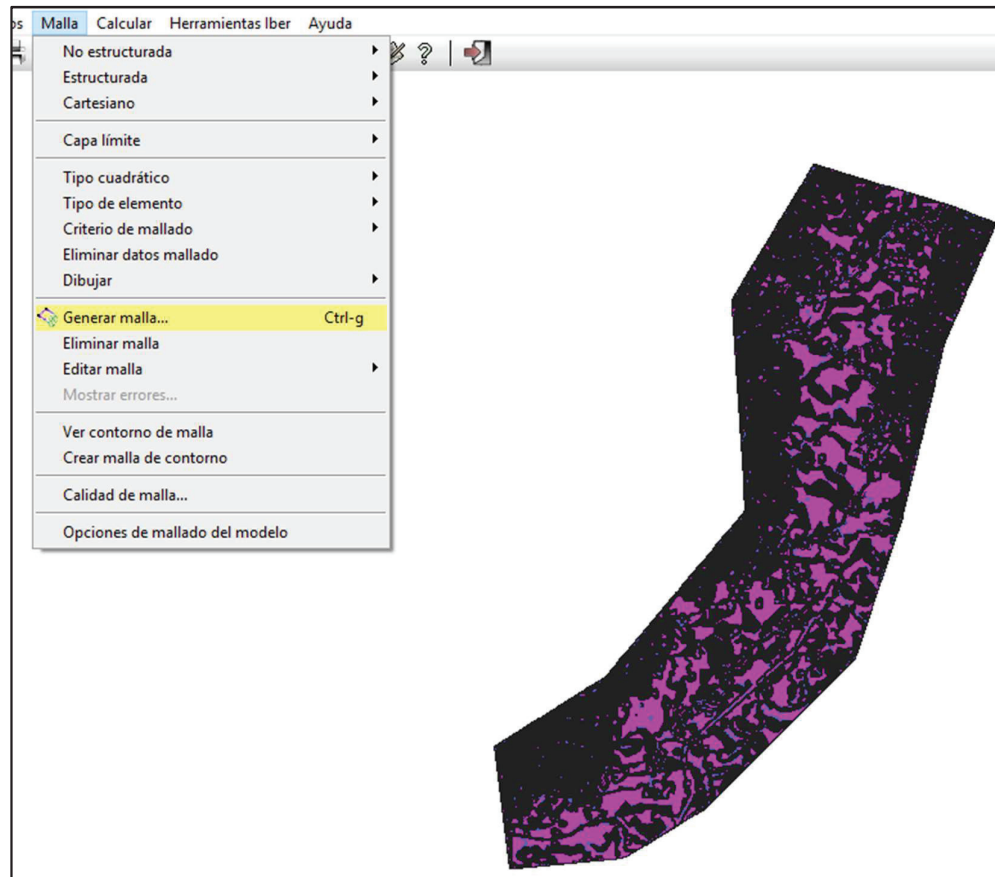
**FIGURA 3.26 VENTANA DE ASIGNACIÓN DEL TAMAÑO DE LA MALLA PARA EL ÁREA DE ESTUDIO EN IBER**



ELABORADO POR: Guaya Cristian, Montalván Edison.

Luego de asignar el tamaño de mallado, se procede a generar la malla como indica figura 3.27.

**FIGURA 3.27 VENTANA PARA GENERAR LA MALLA DEL ÁREA DE ESTUDIO EN IBER**

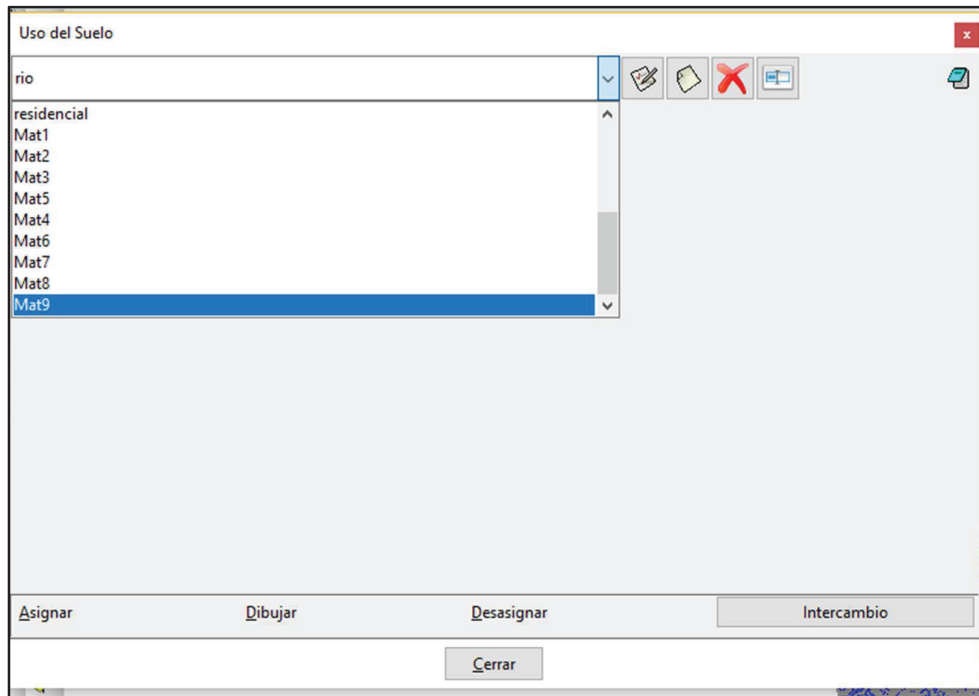


ELABORADO POR: Guaya Cristian, Montalván Edison.

Finalmente, una vez generado el mallado del terreno se procede al ingreso del dato de la rugosidad del área, creando primero el tipo del uso del suelo de manera individual de las 9 zonas y posterior se procede a la asignación de manera automática de la rugosidad como se presenta en las figuras 3.28 y 3.29 respectivamente.

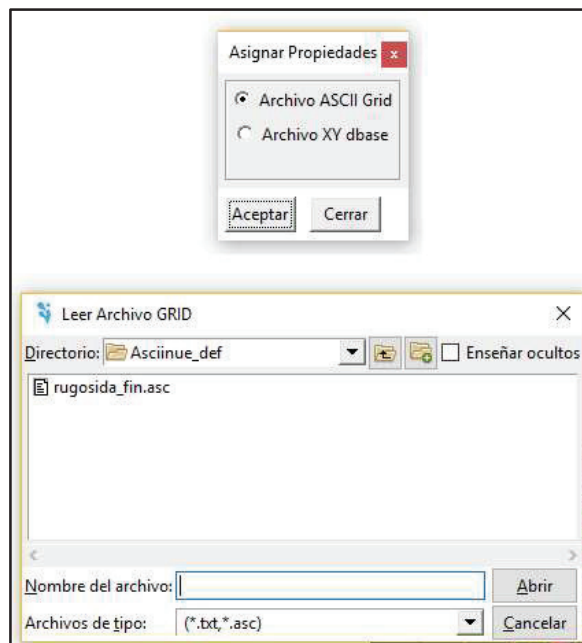


**FIGURA 3.28 INGRESO DE COEFICIENTES DE RUGOSIDAD ASIGNADOS AL MODELO**



ELABORADO POR: Guaya Cristian, Montalván Edison.

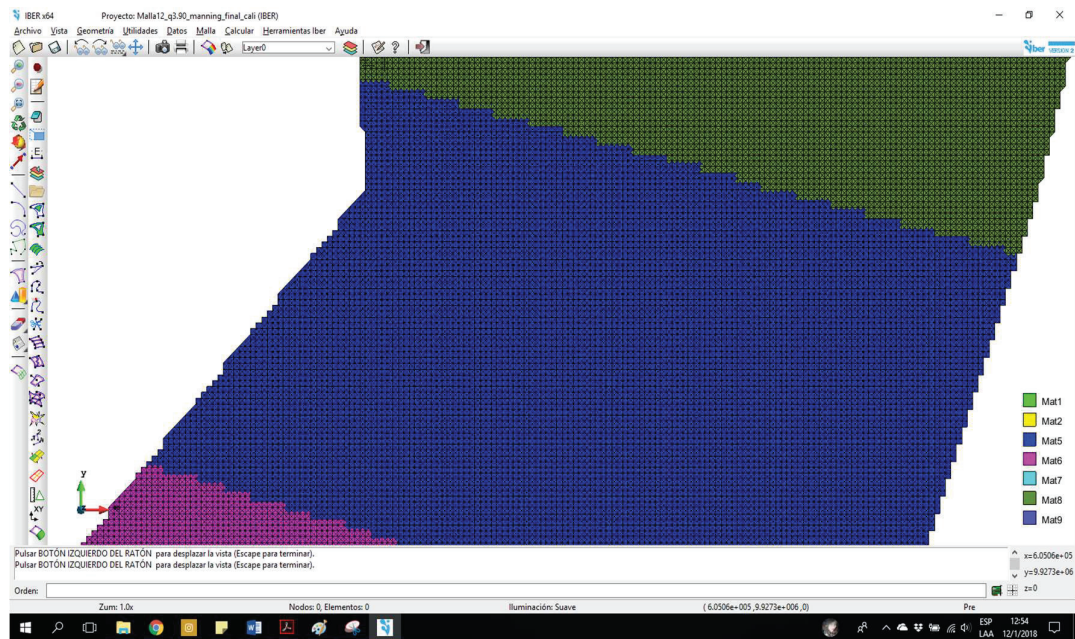
**FIGURA 3.29 ASIGNACIÓN DEL COEFICIENTE DE RUGOSIDAD**



ELABORADO POR: Guaya Cristian, Montalván Edison.

A continuación, en la figura 3.30 se indica el resultado de la asignación de rugosidad del área de estudio.

### FIGURA 3.30 PRESENTACION DE LOS COEFICIENTES DE RUGOSIDAD ASIGNADOS EN EL MODELO



ELABORADO POR: Guaya Cristian, Montalván Edison.

#### 3.3.10 CONFIGURACIÓN DE MODELO NUMÉRICO

El ingreso de los datos para la configuración del modelo numérico se presenta en la figura 3.31, donde se ingresa la información de tiempo máximo de simulación, el cual debe ser mayor al tiempo de desarrollo de los hidrogramas de entrada presentados en la sección 3.3.6.

Además, se designa un valor a la celda de intervalo de resultados, este intervalo de tiempo permitirá presentar los resultados en el avance del proceso de cálculo del modelo o información del proceso. En este caso se designó un intervalo igual a 100 segundos para la simulación de todos los escenarios.

**FIGURA 3.31 VENTANA PARA EL INGRESO DE LOS PARÁMETROS DE TIEMPO EN IBER**

Datos

Parámetros de Tiempo | General | Resultados | Peligrosidad personalizada | Turbulencia | Sedimentos | V▶

Simulación Nueva ▼

Instante Inicial [s] 0

Tiempo máximo de simulación [s] 120000

Intervalo de Resultados [s] 100

Opciones de tiempo Ocultar ▼

TIEMPO MÁXIMO DE SIMULACIÓN: Tiempo superior al tiempo de desarrollo de hidrograma de entrada

INTERVALO DE TIEMPO: Intervalo de tiempo en el cual se mostrarán los resultados en el proceso de cálculo.

Aceptar Cerrar

ELABORADO POR: Guaya Cristian, Montalván Edison.

En la figura 3.32, se presentan los datos generales que requiere IBER para el inicio de la modelación, en este paso únicamente depende ingresar el número máximo de procesadores que posee el ordenador a utilizar y los demás datos por defecto.

**FIGURA 3.32 VENTANA DE DATOS GENERALES EN IBER**

Datos

Parámetros de Tiempo | General | Resultados | Peligrosidad personalizada | Turbulencia | Sedimer▶

Análisis 2D

Número de procesadores 8

Esquema Numérico Primer Orden[Rápido] ▼

CFL 0.45

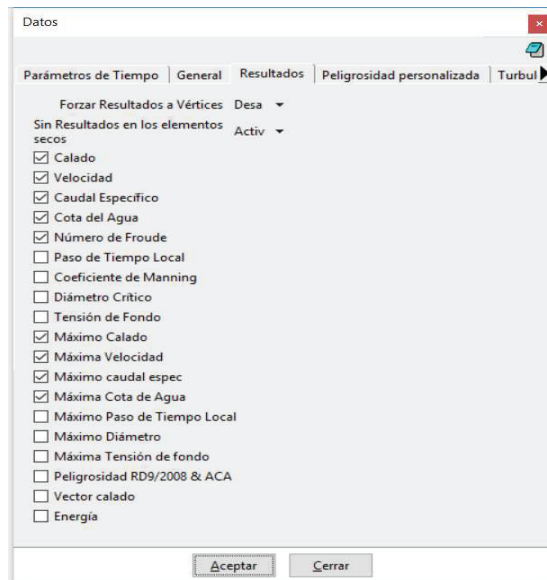
Límite Seco-Mojado [m] 0.01

Método de Secado Por Defecto ▼

Opciones generales Ocultar ▼

Aceptar Cerrar

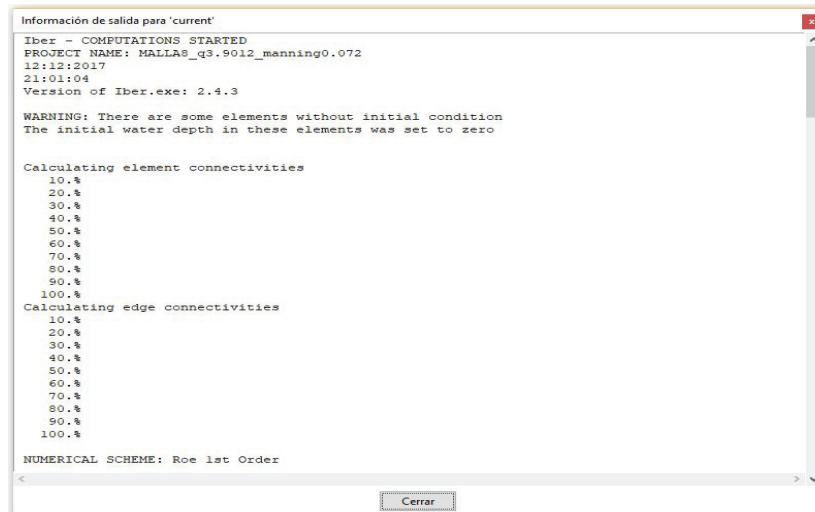
ELABORADO POR: Guaya Cristian, Montalván Edison

**FIGURA 3.33 VENTANA DE RESULTADOS**

ELABORADO POR: Guaya Cristian, Montalván Edison.

En la figura 3.33, se observa la ventana de selección de los resultados que el programa IBER determinará como finalidad de la modelación.

Establecido los datos del problema y los resultados requeridos se procede a correr el modelo donde la figura 3.34 muestra el avance del cálculo de la modelación.

**FIGURA 3.34 VENTANA DE INFORMACIÓN DEL PROCESO**

ELABORADO POR: Guaya Cristian, Montalván Edison.

### 3.3.11 PLAN DE SIMULACIONES

Para las simulaciones definitivas se plantea lo siguiente

- El desarrollo del modelo considerando un tramo representativo caracterizado principalmente por su topografía, de forma que permita la selección adecuada del tamaño del mallado del modelo.
- El desarrollo del modelo en su totalidad para la validación del coeficiente de rugosidad que permita la calibración del modelo.
- La ejecución de las modelaciones que representen cada uno de los hidrogramas de los escenarios asociados a los periodos de retorno.

En la tabla 3.11 se presenta un resumen del plan de simulación.

**TABLA 3.11 RESUMEN DE PLAN DE SIMULACIÓN**

Objetivo	Tipo de Flujo	Caudal	Longitud de Análisis
Análisis de sensibilidad de la Malla	Permanente	Qaforo	7 Km.
		Qtr5	
		Qtr100	
Calibración del Modelo	Permanente	Qaforo-2013	18.2 km
		Qaforo-2014	
Modelación de caudales de crecida asociadas a un periodo de retorno	Permanente - No Permanente	Qtr5	18.2 km
		Qtr10	
		Qtr25	
		Qtr50	
		Qtr100	

ELABORADO POR: Guaya Cristian, Montalván Edison.

### 3.3.12 ANALISIS DE SENSIBILIDAD DEL MALLADO

Se desarrolló el modelo en el tramo seleccionado, principalmente caracterizado por su topografía accidentada y de alta pendiente, en un mallado de 4x4, 8x8 y 12x12 metros.

La finalidad de este análisis es conocer la distorsión y la influencia que generan los diferentes tamaños de mallado en los resultados y en la información del terreno, de forma que permita realizar una selección adecuada del tamaño de malla del modelo considerando además de la variación de los resultados el tiempo que se requiere para la modelación numérica.

Los resultados expresados en la tabla 3.12, corresponden a las simulaciones generadas para los caudales asociados a los periodos de retorno de 100 y 5 años y para el caudal de aforo de  $28.44 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Para la obtención de los resultados de la cota del fondo del cauce y del espejo de agua se estableció una sección fija en cada uno de los escenarios previamente mencionados.

Los valores de velocidad y calado máximo corresponden a los valores determinados en la totalidad del modelo de sensibilidad.

**TABLA 3.12 RESULTADOS OBTENIDOS EN LA APLICACIÓN DE DIFERENTES TAMAÑOS DE MALLADO**

		Fondo [m.s.n.m]	Error Absoluto [%]	Espejo de agua [m.s.n.m]	Error Absoluto [%]	Velocidad máx. [m/s]	Error Absoluto [%]	Calado máx. [m]	Error Absoluto [%]	
Tramo 1	Q Tr100	MALLA 12	27.23	2.45	29.1	1.05	1.59	6.27	5.42	3.48
		MALLA 8	26.78	0.75	29.34	0.24	1.57	4.96	5.49	2.24
		MALLA 4	26.58	-----	29.41	-----	1.49	-----	5.62	-----
	Q Tr 5	MALLA 12	27.23	2.45	27.9	1.27	2.24	5.22	4.40	3.30
		MALLA 8	26.78	0.75	28.16	0.35	2.14	0.71	4.53	0.44
		MALLA 4	26.58	-----	28.26	-----	2.13	-----	4.55	-----
	Qaforo	MALLA 12	29.2	3.11	31.76	1.05	1.21	20.08	4.01	1.35
		MALLA 8	28.43	0.39	31.46	0.10	1.40	7.60	3.90	1.37
		MALLA 4	28.32	-----	31.43	-----	1.51	-----	3.95	-----

ELABORADO POR: Guaya Cristian, Montalván Edison.

De la tabla 3.12, se observa que no existe una diferencia sustancial en los valores obtenidos en el desarrollo del análisis de sensibilidad, tomando como referencia los valores del mallado de 4x4.

Los errores de menor valor se presentan en el mallado de 8x8, con respecto al mallado de 12x12 metros.

Los tiempos de simulación obtenidos para los diferentes tamaños de mallado propuestos se presentan en la tabla 3.13.

**TABLA 3.13 TIEMPO DE SIMULACION OBTENIDOS PARA LOS DIFERENTES TAMAÑOS DE MALLA**

<b>Malla</b>	<b>Tiempo [min]</b>
12	15
8	35
4	95

ELABORADO POR: Guaya Cristian, Montalván Edison.

El tiempo de simulación obtenido en el tramo modelado para el desarrollo del análisis de sensibilidad del mallado presenta una relación inversa al tamaño de la malla, es así que a menor tamaño de malla se requiere mayor tiempo en la simulación y viceversa.

De la tabla 3.13 se deduce que, tomando como referencia el tiempo de desarrollo del modelo correspondiente al mallado de 4 metros existe una reducción de 3 a 1 en el caso del mallado de 8 metros y de 5 a 1 para el mallado de 12 metros.

Por lo tanto, se selecciona al mallado de 8 metros como el tamaño de malla óptimo para el desarrollo de la calibración y modelación de caudales de crecida, permitiendo la obtención de resultados fiables en un tiempo razonable.

### 3.3.13 CALIBRACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO

La calibración del modelo se plantea mediante la comparación de los resultados obtenidos en la simulación numérica bidimensional con los resultados de los aforos de los años 2013 y 2014 realizado por el INAMHI correspondiente a los valores de  $28.44 \text{ m}^3/\text{s}$  y  $3.902 \text{ m}^3/\text{s}$  respectivamente.

Los valores de los caudales de los aforos fueron obtenidos del registro histórico presentado en el anexo IV.

El principal sustento de la calibración del modelo se basa en la variación del coeficiente de rugosidad que permita obtener en la simulación valores cercanos a los valores obtenidos en las mediciones aforadas.

La tabla 3.14 muestra los valores finales del coeficiente rugosidad utilizados para la calibración del modelo. Los valores presentados hacen referencia a la subdivisión en zonas correspondiente a la figura 3.14.

**TABLA 3.14 COEFICIENTES DE RUGOSIDAD UTILIZADOS EN EL MODELO DE CALIBRACIÓN**

Zona	Coefficiente de rugosidad
1	0,117
2	0,097
3	0,09
4	0,076
5	0,075
6	0,059
7	0,082
8	0,076
9	0,064

ELABORADO POR: Guaya Cristian, Montalván Edison.



Los valores de las variables hidráulicas correspondiente a los aforos citados y los valores obtenidos mediante la simulación bidimensional se muestran en la tabla 3.15.

**TABLA 3.15 COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS NUMÉRICOS OBTENIDOS EN LA SECCIÓN DE CALIBRACIÓN.**

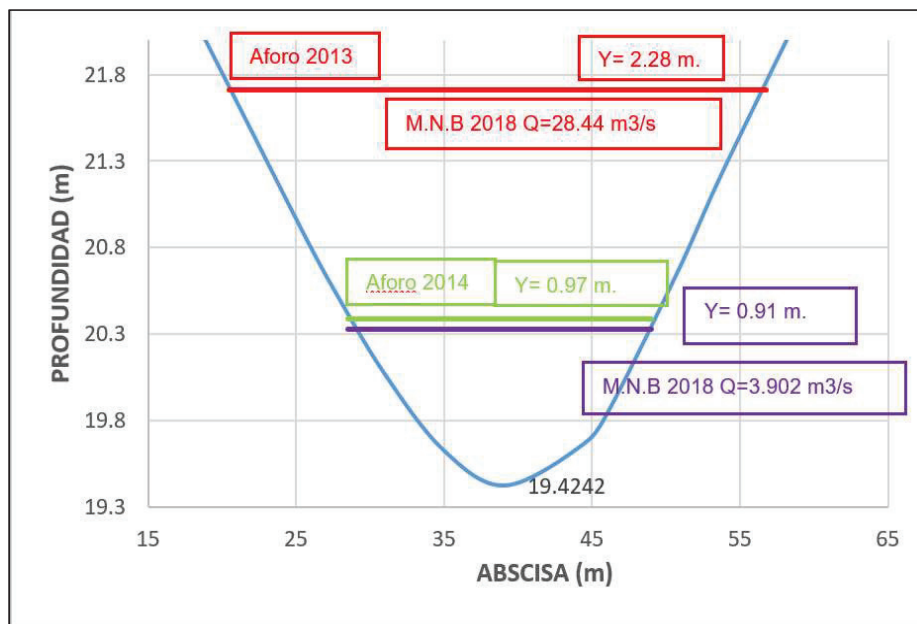
Fuente	Calado Máximo [m]	Velocidad [m/s]	Froude	Número de Reynolds
Aforo 2013 Q=28,44 m <sup>3</sup> /s, (1)	2,28	1,068	0,265	429419,22
Aforo 2014 Q=3,902 m <sup>3</sup> /s, (2)	0,97	0,552	0,205	100363,64
M,N,B,2018 Q=28,44 m <sup>3</sup> /s, (3)	2,28	0,978	0,247	370877,92
M,N,B,2018 Q=3,902 m <sup>3</sup> /s, (4)	0,91	0,504	0,222	81163,64
Error absoluto (1)-(3) [%]	0,00	8,43	6,79	13,63
Error absoluto (2)-(4) [%]	6,19	8,70	8,29	19,13

\*M,N,B: Modelo Numérico Bidimensional

ELABORADO POR: Guaya Cristian, Montalván Edison.

La representación gráfica de los valores de calado alcanzados en la calibración y presentados en los aforos descritos se encuentran en la figura 3.35.

**FIGURA 3.35 SECCIÓN TRANSVERSAL DE CALIBRACIÓN**



ELABORADO POR: Guaya Cristian, Montalván Edison.

En la tabla 3.15 se observa que, los valores obtenidos en las simulaciones de calibración presentan un error absoluto inferior al 10% en la comparación del calado máximo, velocidad y número de Froude, mientras que, para el número de Reynolds este error no es mayor al 20%, lo que permite ratificar la fiabilidad del modelo, así como las consideraciones establecidas en la implementación de este.

## **CAPÍTULO IV**

### **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

#### **4.1 MODELACIÓN DE CAUDALES MÁXIMOS**

Se desarrollan las simulaciones correspondientes a los modelos definitivos asociados a cada uno de los caudales de crecida para los periodos de retorno establecidos.

Los hidrogramas de entrada corresponden a las consideraciones de flujo permanente y no permanente presentados en el capítulo 3 en la sección 3.3.6.

Se mantienen las condiciones iniciales utilizadas en el proceso de calibración del modelo numérico.

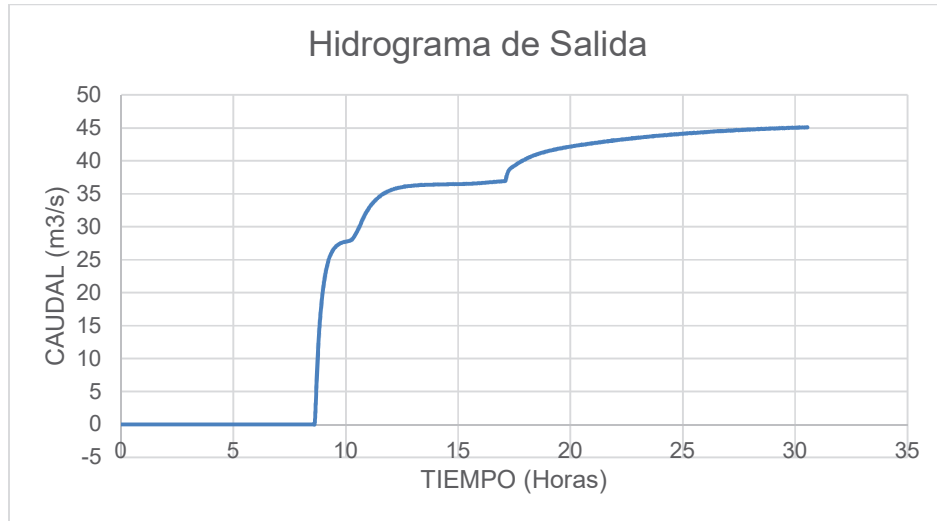
#### **4.2 HIDROGRAMAS DE SALIDA**

Los hidrogramas de salida del tramo modelado es un dato que se visualiza en la etapa de cálculo de IBER, mediante el cual permite conocer el avance de la simulación.

##### **4.2.1 HIDROGRAMA DE SALIDA FLUJO PERMANENTE**

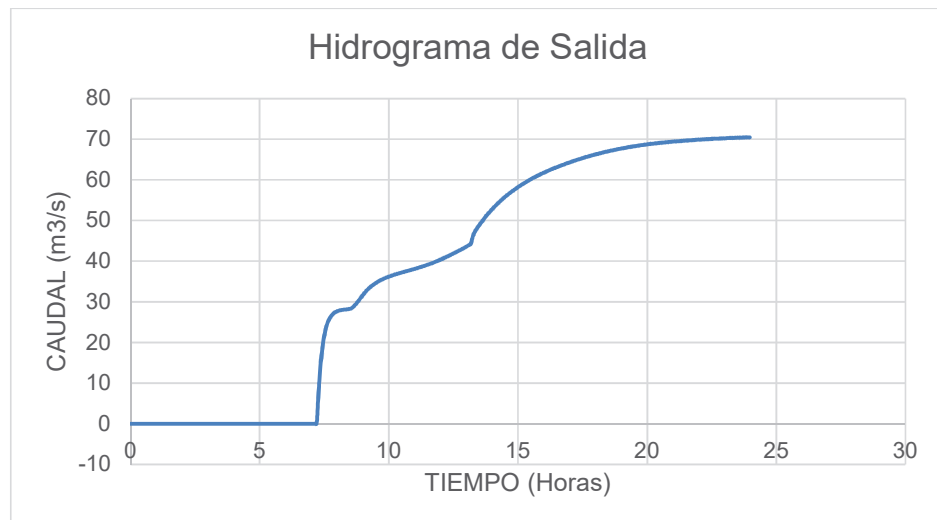
Las figuras 4.1 a 4.5 muestran los hidrogramas de salida resultantes para la simulación de flujo permanente representado mediante el ingreso de un hidrograma constante para los periodos de retorno de 5, 10, 25, 50 y 100 años.

**FIGURA 4.1 HIDROGRAMA DE SALIDA RESULTANTE DE LA MODELACIÓN NUMÉRICA BIDIMENSIONAL CON FLUJO PERMANENTE PARA EL CAUDAL ASOCIADO AL PERIODO DE RETORNO DE 5 AÑOS.**



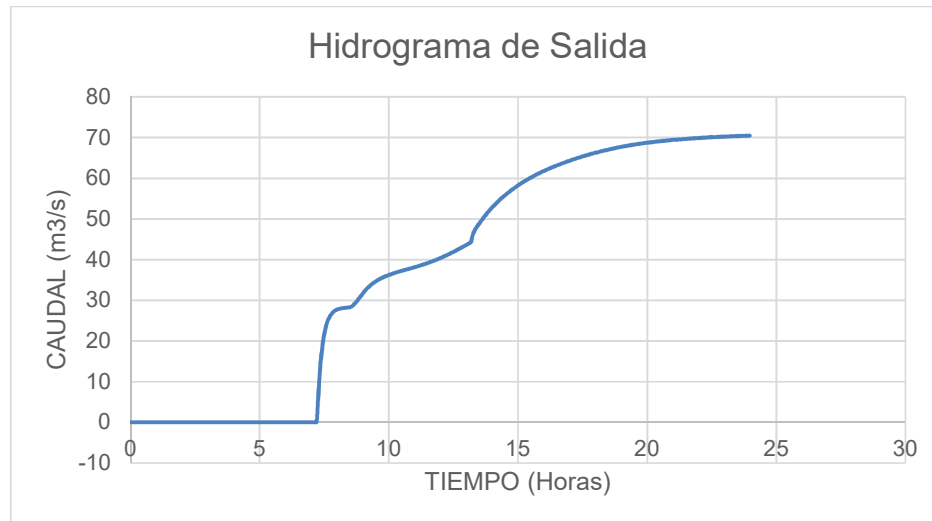
ELABORADO POR: Guaya Cristian, Montalván Edison.

**FIGURA 4.2 HIDROGRAMA DE SALIDA RESULTANTE DE LA MODELACIÓN NUMÉRICA BIDIMENSIONAL CON FLUJO PERMANENTE PARA EL CAUDAL ASOCIADO AL PERIODO DE RETORNO DE 10 AÑOS.**



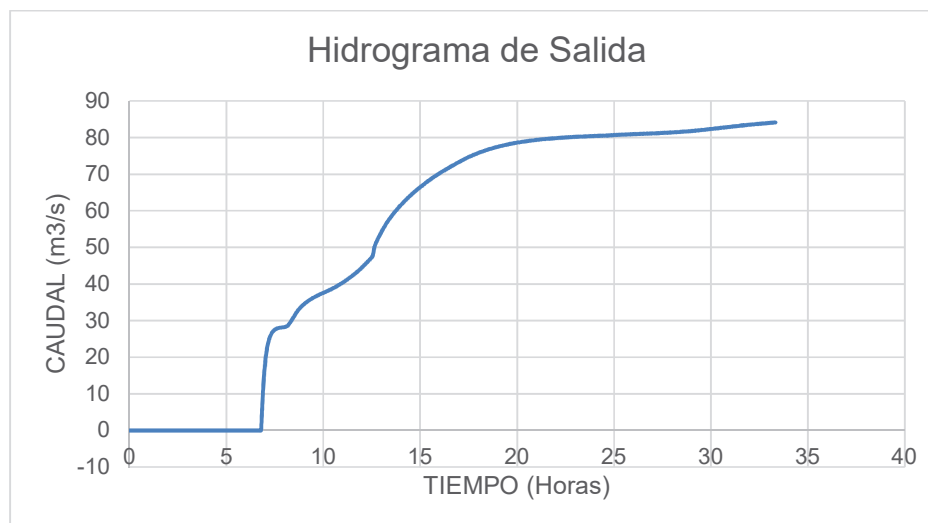
ELABORADO POR: Guaya Cristian, Montalván Edison.

**FIGURA 4.3 HIDROGRAMA DE SALIDA RESULTANTE DE LA MODELACIÓN NUMÉRICA BIDIMENSIONAL CON FLUJO PERMANENTE PARA EL CAUDAL ASOCIADO AL PERIODO DE RETORNO DE 25 AÑOS.**



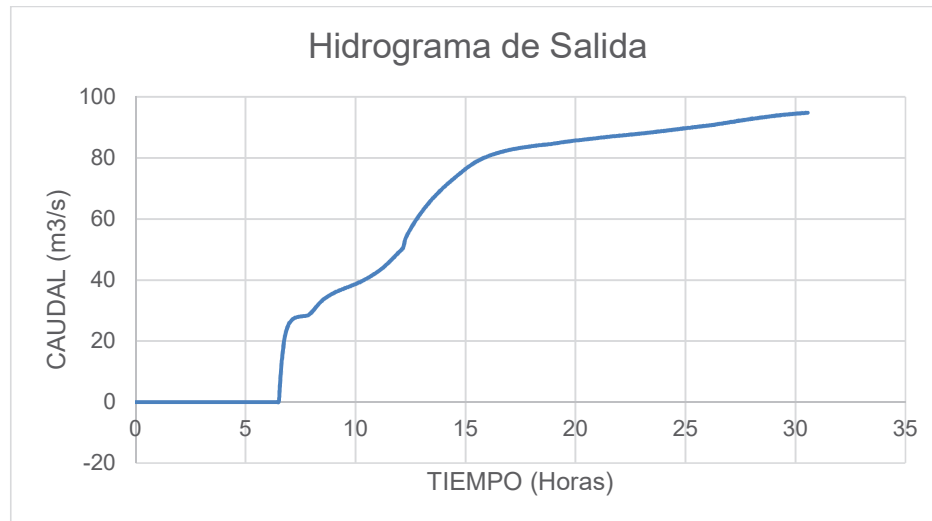
ELABORADO POR: Guaya Cristian, Montalván Edison.

**FIGURA 4.4 HIDROGRAMA DE SALIDA RESULTANTE DE LA MODELACION NUMERICA BIDIMENSIONAL CON FLUJO PERMANENTE PARA EL CAUDAL ASOCIADO AL PERIODO DE RETORNO DE 50 AÑOS.**



ELABORADO POR: Guaya Cristian, Montalván Edison.

**FIGURA 4.5 HIDROGRAMA DE SALIDA RESULTANTE DE LA MODELACIÓN NUMÉRICA BIDIMENSIONAL CON FLUJO PERMANENTE PARA EL CAUDAL ASOCIADO AL PERIODO DE RETORNO DE 100 AÑOS**



ELABORADO POR: Guaya Cristian, Montalván Edison.

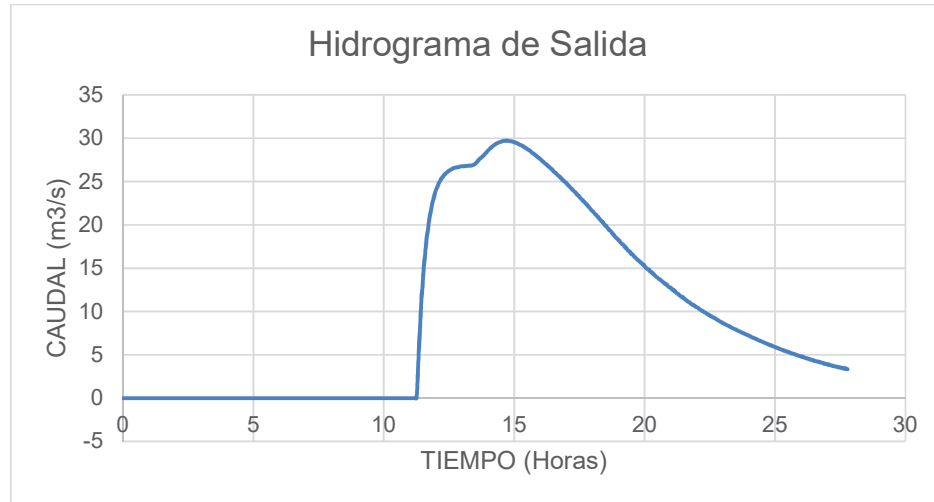
De los hidrogramas de salida mostrados anteriormente, se observa que el tiempo de salida del flujo va disminuyendo conforme el aumento de caudal, siendo así que para el periodo de retorno de 5 años el tiempo de salida del flujo se establece en 8.64 horas y para el periodo de retorno de 100 años este corresponde a 6.5 horas, además se visualiza que el hidrograma de salida posee una tendencia ascendente desde el tiempo de salida hasta llegar al caudal de salida donde este se atenúa en un valor inferior al valor del caudal máximo ingresado.

El caudal pico obtenido en la salida del tramo de estudio se presenta como un valor constante en los instantes finales de la modelación.

#### 4.2.2 HIDROGRAMA DE SALIDA DE FLUJO NO PERMANENTE

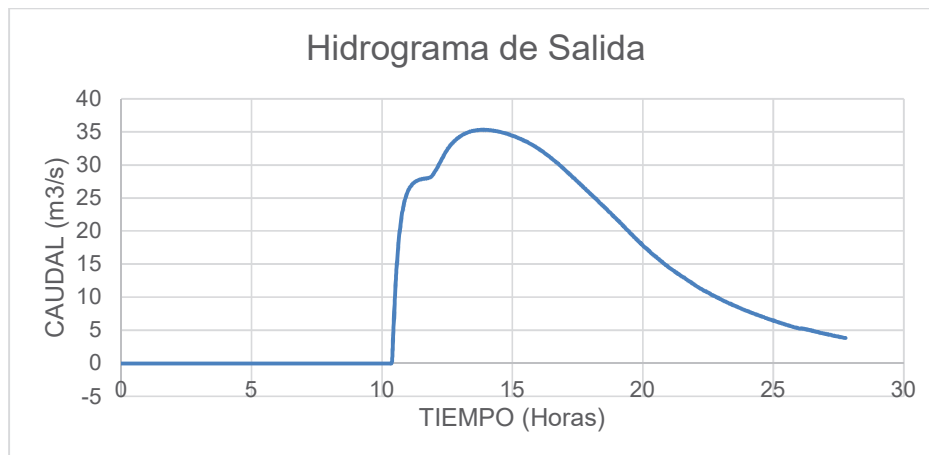
Las figuras 4.6 a 4.10 muestran los hidrogramas de salida resultantes para la simulación de flujo no permanente representado mediante el ingreso de un hidrograma triangular para los periodos de retorno de 5, 10, 25, 50 y 100 años.

**FIGURA 4.6 HIDROGRAMA DE SALIDA RESULTANTE DE LA MODELACIÓN NUMÉRICA BIDIMENSIONAL CON FLUJO NO PERMANENTE PARA EL CAUDAL ASOCIADO AL PERIODO DE RETORNO DE 5 AÑOS.**



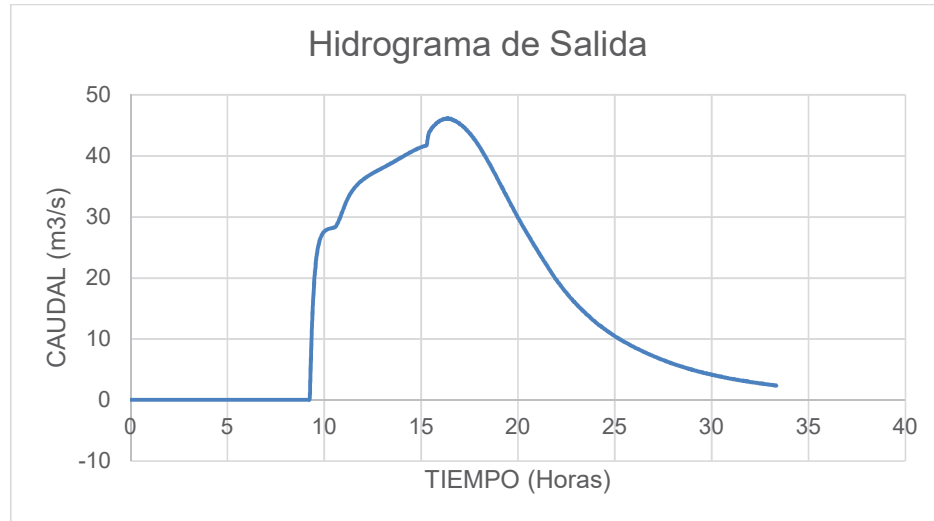
ELABORADO POR: Guaya Cristian, Montalván Edison.

**FIGURA 4.7 HIDROGRAMA DE SALIDA RESULTANTE DE LA MODELACIÓN NUMÉRICA BIDIMENSIONAL CON FLUJO NO PERMANENTE PARA EL CAUDAL ASOCIADO AL PERIODO DE RETORNO DE 10 AÑOS**



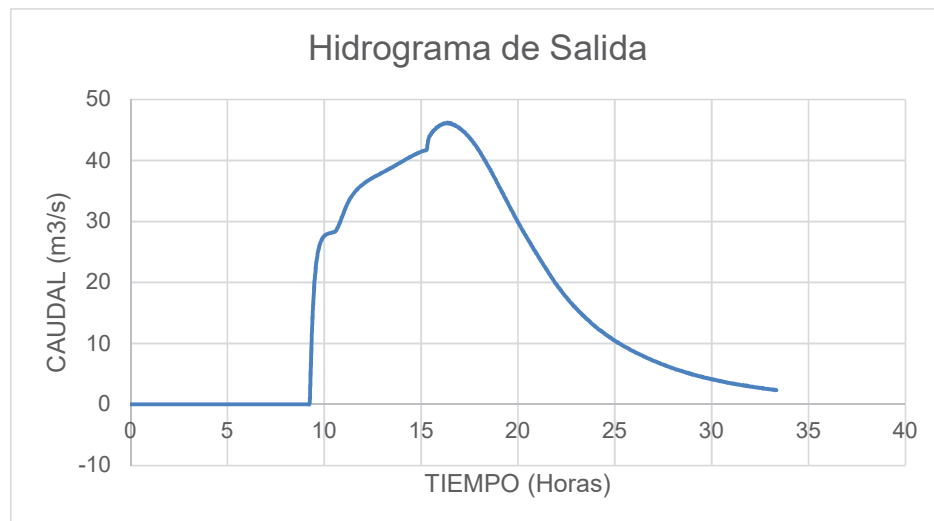
ELABORADO POR: Guaya Cristian, Montalván Edison.

**FIGURA 4.8 HIDROGRAMA DE SALIDA RESULTANTE DE LA MODELACIÓN NUMÉRICA BIDIMENSIONAL CON FLUJO NO PERMANENTE PARA EL CAUDAL ASOCIADO AL PERIODO DE RETORNO DE 25 AÑOS.**



ELABORADO POR: Guaya Cristian, Montalván Edison.

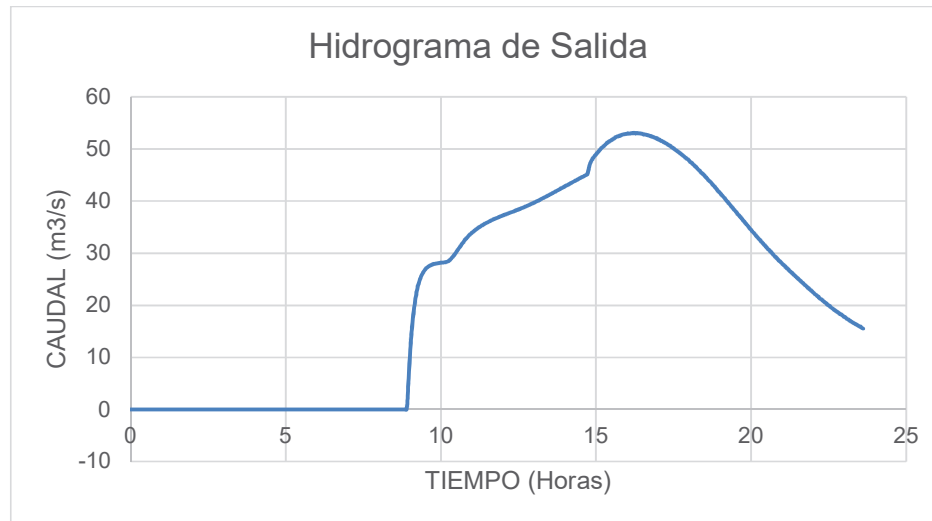
**FIGURA 4.9 HIDROGRAMA DE SALIDA RESULTANTE DE LA MODELACIÓN NUMÉRICA BIDIMENSIONAL CON FLUJO NO PERMANENTE PARA EL CAUDAL ASOCIADO AL PERIODO DE RETORNO DE 50 AÑOS.**



ELABORADO POR: Guaya Cristian, Montalván Edison.



**FIGURA 4.10 HIDROGRAMA DE SALIDA RESULTANTE DE LA MODELACIÓN NUMÉRICA BIDIMENSIONAL CON FLUJO NO PERMANENTE PARA EL CAUDAL ASOCIADO AL PERIODO DE RETORNO DE 100 AÑOS.**



ELABORADO POR: Guaya Cristian, Montalván Edison.

De los hidrogramas de salida mostrados anteriormente, se puede observar que conservan una tendencia triangular semejante a los hidrograma de entrada, este hidrograma presenta su caudal pico en el segundo tercio del tiempo de modelación, el mismo que se atenúa en un tiempo mayor al tiempo en el que ingresa el caudal máximo, para luego descender hasta un valor menor donde el flujo de salida se estabiliza en un valor relativamente pequeño.

El tiempo de salida del tránsito de la crecida se presenta de manera similar a los resultados presentados para el flujo permanente, donde el tiempo de salida disminuye en función del aumento del caudal, obteniendo tiempos de salida aproximados de 11.25 y 8.89 horas para los periodos de retorno de 5 y 100 años respectivamente.

Los tiempos de salida de la onda de crecida, el caudal pico desarrollado y el tiempo requerido para el desarrollo del caudal pico para todos los periodos de retorno se encuentran expuestos en la tabla 4.1.

TABLA 4.1 TIEMPO DE SALIDA DEL FLUJO

RESUMEN	FLUJO PERMANENTE			
	PERIODO RETORNO	TIEMPO DE SALIDA [H]	CAUDAL PICO [m <sup>3</sup> /S]	TIEMPO AL CAUDAL PICO [H]
	5	8,84	45,088	30,56
	10	7,78	59,483	36,11
	25	7,19	70,469	24,44
	50	6,78	84,129	33,33
	100	6,50	94,867	30,56
	FLUJO NO PERMANENTE			
	PERIODO RETORNO	TIEMPO DE SALIDA [H]	CAUDAL PICO [m <sup>3</sup> /S]	TIEMPO AL CAUDAL PICO [H]
	5	11,25	29,744	14,75
10	10,36	35,319	13,83	
25	9,72	37,295	14,67	
50	9,22	46,247	16,36	
100	8,89	53,088	16,22	

ELABORADO POR: Guaya Cristian, Montalván Edison.

En la tabla 4.1 se observa que la situación más crítica con respecto al avance de crecida se obtiene mediante la simulación de un flujo permanente, presentando valores inferiores en el tiempo de salida en relación con los valores obtenidos para un flujo no permanente.

Los valores obtenidos de caudal pico en el tránsito del flujo no permanente se observa un valor inferior al valor del caudal máximo ingresado para cada periodo de retorno debido al hidrograma atenuado resultante.

### 4.3 VALORES MÁXIMOS DE LAS VARIABLES HIDRAULICAS

En la tabla 4.2 se detallan los valores máximos de las variables hidráulicas obtenidas en el proceso de simulación. Los valores presentados en la tabla 4.2 se obtienen del anexo V.

**TABLA 4.2 VALORES MAXIMOS OBTENIDOS EN LA SIMULACIÓN**

RESUMEN DE RESULTADOS MÁXIMOS							
PERIODO DE RETORNO	CAUDAL [m <sup>3</sup> /S]	VELOCIDAD MÁXIMA [m/s]			CALADO MÁXIMO [m]		
		PERMANENTE	NO PERMANENTE	DIFERENCIA %	PERMANENTE	NO PERMANENTE	DIFERENCIA %
5	45.69	2.14	2.5	16.82	5.62	5.49	2.31
10	60.57	2.01	2.31	14.93	6.15	6.03	1.95
25	76.96	2.6	2.23	14.23	6.63	6.49	2.11
50	94.26	2.44	2.11	13.52	7.06	6.92	1.98
100	110.54	2.34	2.78	18.80	7.4	7.27	1.76

ELABORADO POR: Guaya Cristian, Montalván Edison.


La tabla 4.2 presenta la diferencia entre los valores máximos de las variables obtenidos en la simulación de flujo permanente y no permanente, dando como resultado: una diferencia no mayor al 20% en la comparación de la velocidad y una diferencia que no supera el 2.5% para el valor de calado.

#### 4.4 ANÁLISIS COMPARATIVO CON ESTUDIOS PREVIOS

Una de las facilidades del programa IBER es la representación gráfica de secciones transversales, permitiendo observar en secciones específicas el nivel de agua alcanzado en dicha sección en cualquier instante en el transcurso de la modelación e inclusive el valor de calado máximo desarrollado en la sección.

Este recurso permite establecer una comparación entre los resultados obtenidos en la modelación numérica unidimensional desarrollada sobre el Río Garrapata por el INAMHI como parte del proyecto “Estudio Hidrológico de Inundaciones en la Cuenca Alta del Río Chone (Subcuencas: Garrapata, Mosquito y Grande)”, con los resultados de la modelación numérica bidimensional desarrollado en el presente trabajo. Las ubicaciones de las secciones de comparación se presentan en la tabla 4.3.

**TABLA 4.3 UBICACIÓN DE SECCIONES TRANSVERSALES**

	<b>ESTE</b>	<b>NORTE</b>	
<b>SECCIÓN 1</b>	607560,055	9931197,577	
	607627,670	9931179,459	
	607695,285	9931161,341	
<b>SECCIÓN 2</b>	607410,150	9931063,271	
	607444,000	9931002,000	
<b>SECCIÓN 3</b>	607477,850	9930940,729	
	606629,628	9928566,058	
	606709,000	9928562,000	
<b>SECCIÓN 4</b>	606778,909	9928558,426	
	606219,648	9927283,580	
	606292,000	9927261,000	
	606358,822	9927240,146	

ELABORADO POR: Guaya Cristian, Montalván Edison.

Los valores de calados máximos para cada sección se encuentran reportados en la tabla 4.4. Que muestra los valores obtenidos en la modelación numérica unidimensional, así como también los valores encontrados en la modelación numérica bidimensional para los tipos de flujo modelados.

**TABLA 4.4 COMPARACIÓN DE CALADOS MÁXIMOS**

Sección	Periodo de retorno	Caudal [m <sup>3</sup> /s]	(1) Calado Máximo "M.N.U" [m]	(2) Calado Máximo "Flujo permanente" [m]	(3) Calado Máximo "Flujo no permanente" [m]	Error absoluto [%] (1)-(2)	Error absoluto [%] (1)-(3)
1	5	45.69	3.08	4.39	4.27	42.53	38.64
	10	60.57	3.40	5.03	4.83	47.94	42.06
	25	76.96	3.70	5.44	5.34	47.03	44.32
	50	94.26	3.98	5.88	5.71	47.74	43.47
	100	110.54	4.21	6.23	6.10	47.98	44.89
2	5	45.69	2.49	4.85	4.72	94.78	89.56
	10	60.57	2.82	5.56	5.28	97.16	87.23
	25	76.96	3.13	5.90	5.71	88.50	82.43
	50	94.26	3.47	6.35	6.20	83.00	78.67
	100	110.54	3.72	6.69	6.59	79.84	77.15
3	5	45.69	4.27	3.05	2.83	28.57	33.72
	10	60.57	4.69	3.46	3.22	26.23	31.34
	25	76.96	5.06	3.81	3.58	24.70	29.25
	50	94.26	5.48	4.14	3.90	24.45	28.83
	100	110.54	5.77	4.41	4.14	23.57	28.25
4	5	45.69	2.19	2.73	2.52	24.66	15.07
	10	60.57	2.55	3.02	2.83	18.43	10.98
	25	76.96	2.91	3.32	3.10	14.09	6.53
	50	94.26	3.25	3.55	3.38	9.23	4.00
	100	110.54	3.54	3.71	3.50	4.80	1.13

"M.N.U" Modelación Numérico Unidimensional

ELABORADO POR: Guaya Cristian, Montalván Edison.

Además, en la tabla 4.4 se presenta el error absoluto obtenido de la comparación de los calados para cada una de las secciones entre los valores de la modelación numérica unidimensional y la modelación bidimensional. El error obtenido se presenta principalmente por la diferencia en la calidad de información utilizada en los modelos desarrollados y debido al predominio del flujo de tipo bidimensional en el Río Garrapata.

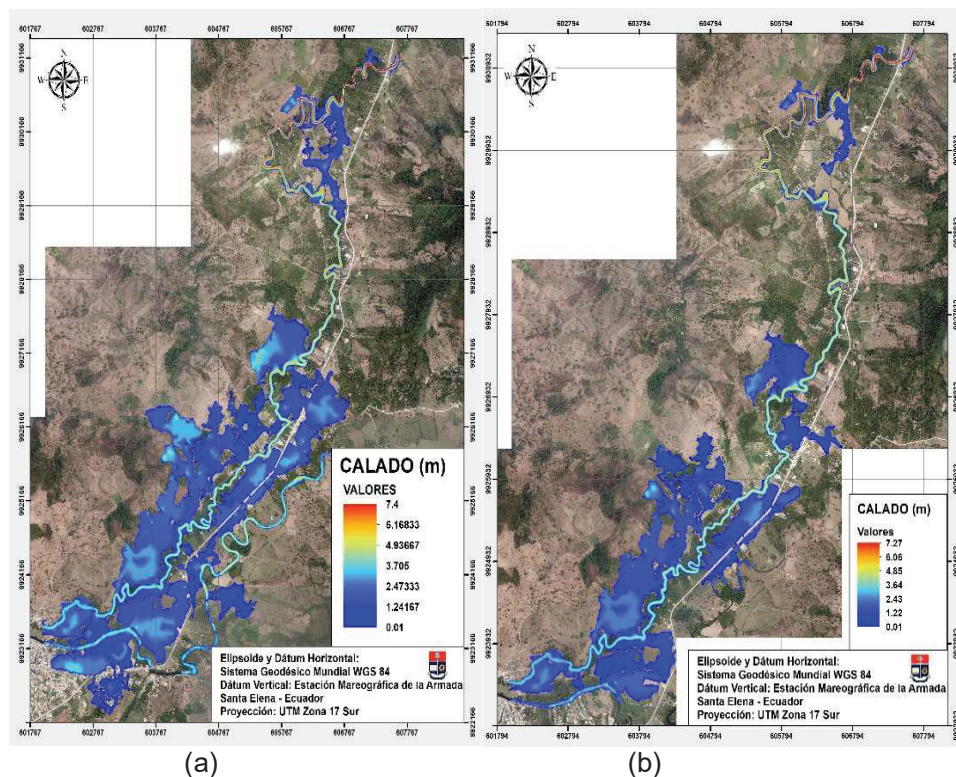
#### **4.5 MAPAS TEMÁTICOS DE LAS VARIABLES HIDRÁULICAS ASOCIADOS A LOS PERIODOS DE RETORNO DEFINIDOS**

En el Anexo V, se presentan los mapas temáticos de las variables hidráulicas como son: calado, velocidad y número de Froude, generados a partir de los resultados

obtenidos en la modelación numérica bidimensional en el tramo de estudio, de forma que se presentan los mapas para flujo permanente obtenidos mediante un hidrograma constante y los mapas para flujo no permanente representado por un hidrograma triangular. Para ambos casos los hidrogramas de entrada se encuentran descritos en capítulo 3.

Referente a la mancha de inundación se observa notablemente un área de mayor afección en los mapas resultantes de la simulación de flujo permanente para todos los periodos de retorno, como se muestra en las figuras 4.11 y 4.12.

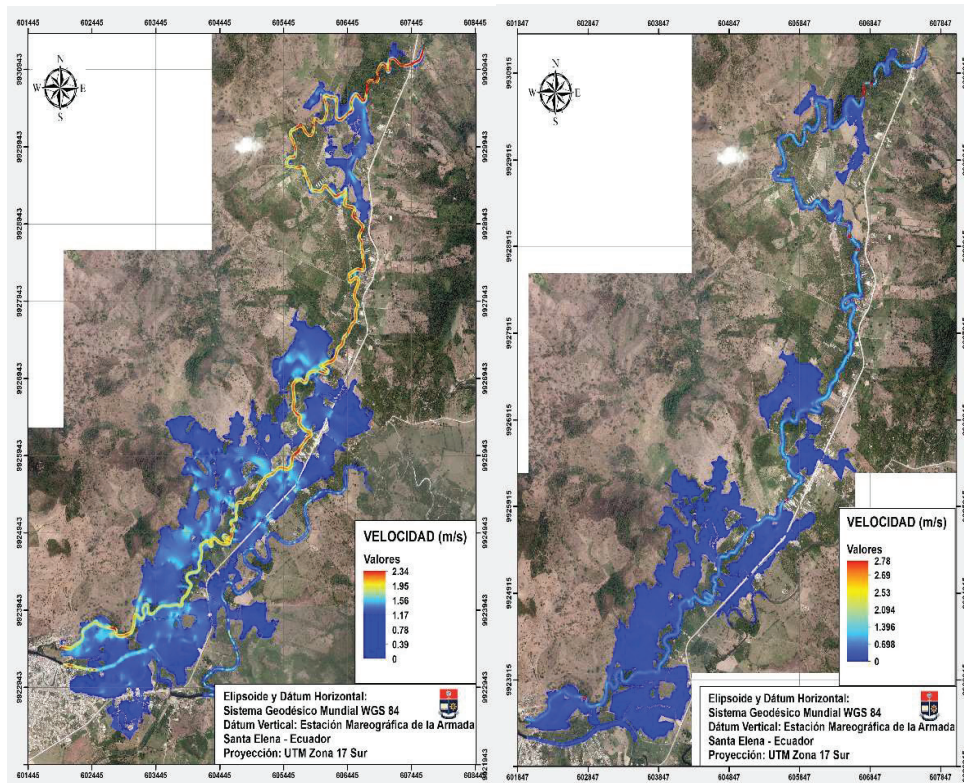
#### FIGURA 4.11 COMPARACIÓN DE MANCHA DE INUNDACIÓN: VARIABLE CALADO



ELABORADO POR: Guaya Cristian, Montalván Edison.

La figura 4.11, presenta la mancha de inundación con la información referente a calados máximos en donde: (a) corresponde a la simulación en flujo permanente y (b) a flujo no permanente, en ambos casos para el periodo de retorno de 100 años.

**FIGURA 4.12 COMPARACIÓN DE MANCHA DE INUNDACIÓN: VARIABLE VELOCIDAD**



(a)

(b)

ELABORADO POR: Guaya Cristian, Montalván Edison.

La figura 4.12, muestra la mancha de inundación con la información referente a velocidades máximas en donde: (a) corresponde a la simulación en flujo permanente y (b) a flujo no permanente, en ambos casos para el periodo de retorno de 100 años.

## CAPÍTULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1 CONCLUSIONES

- La generación de mapas temáticos para el Río Garrapata permitió conocer áreas de inundación, velocidades y calados máximos además de la representación del número de Froude, para periodos de retorno entre 5 y 100 años con el desarrollo de un modelo numérico bidimensional mediante la aplicación del programa IBER.
- El modelo numérico bidimensional del Río Garrapata, permitió verificar el comportamiento bidimensional del flujo en la mayoría del tramo de estudio. Considerar una modelación unidimensional en un cauce de secciones anchas con calados pequeños, no es aplicable. Así como también, no es recomendable un modelo tridimensional en la simulación de caudales de crecida en cauces en tramos largos, debido al alto gasto computacional.
- Se comprobó que IBER es un software que permite el desarrollo de modelos numéricos en dos dimensiones para el tránsito del flujo a lámina libre en cauces naturales, debido a su método de análisis por volúmenes finitos que permite que el agua fluya por una superficie permitiendo representar el fenómeno bidireccional que se produce en un río de llanura.
- IBER requiere que el ingreso de la geometría y la formación de la malla que permite la representación de la superficie del terreno este en función de valores iguales o múltiplos al tamaño de pixel que posee el modelo digital del terreno MDT.
- Se consiguió realizar la calibración del modelo mediante la información presentada para la estación hidrológica H0230 Garrapata AJ Chone perteneciente al INAMHI, en los aforos realizados en los años 2013 y 2014,



estos aforos fueron seleccionados ya que presentaron continuidad acorde a la red hidrográfica a la cual pertenece el Río Garrapata.

- Se comprobó que el coeficiente de rugosidad de Manning es el parámetro más sensible en la modelación., ya que se manifiesta de manera directa en las variaciones de calado y velocidad del flujo. Los valores referenciales del coeficiente de rugosidad se obtuvieron mediante la fórmula de Cowan en función del uso del suelo, la vegetación y las características morfológicas del cauce.
- La calibración del modelo se realizó mediante la simulación de un flujo permanente, considerando el caudal aforado en la sección de calibración, con lo cual se afinó el coeficiente de rugosidad de Manning; de tal manera que los valores de calado sean iguales a los valores obtenidos en el aforo histórico.
- En lo referente a la calibración y la simulación de caudales de crecida, se seleccionó una malla no estructurada que permite una mejor adaptación a la geometría irregular del terreno como lo es la topografía existente en la zona de estudio. Además, se definió mediante un análisis de sensibilidad de la malla, que el tamaño óptimo de la celda para este estudio es de 8m x 8m. Este tamaño de malla permite obtener resultados fiables en un tiempo razonable.
- La modelación de caudales de crecida se llevó a cabo mediante el ingreso de hidrogramas que representan flujo permanente y no permanente. En el estudio se alcanzó un tiempo de modelación que permitió el desarrollo de los hidrogramas en un periodo aproximado de 13 horas para el paso del flujo no permanente y de aproximadamente 20 horas para el flujo permanente.
- Se obtuvo el tiempo requerido para la salida de la onda de crecida, el cual permite establecer un tiempo referencial que puede ser tomado para sistemas de alerta temprana para ejecutar actividades de prevención en la población. Este tiempo resultó menor y por lo tanto más crítico para la salida del flujo permanente en cada uno de los periodos de retorno simulados.

- Se estableció una diferencia aproximada del 40% entre los resultados de calado presentados en la modelación unidimensional y la modelación bidimensional realizada sobre el Río Garrapata, esta diferencia se presenta principalmente por la calidad de la información y el tipo de modelo.
- De los resultados obtenidos se evidenció que la simulación en flujo permanente supera en un 20% los valores de velocidad máxima y en un 2.5% los resultados de calado con respecto a la simulación en flujo no permanente, en todos los periodos de retorno modelados.

## **5.2 RECOMENDACIONES**

- La información base recopilada para el desarrollo del modelo numérico debe ser de calidad, actualizada y tener un nivel de detalle aceptable. Además, considerando que la información utilizada generalmente proviene de distintas fuentes de origen, debe tener un sistema de coordenadas de georreferenciación similar. Todo esto permitirá obtener resultados fiables aplicados a la zona de estudio.
- El uso de un modelo numérico bidimensional es aplicable al estudio de fenómenos hidráulicos que se presentan en ríos de llanura con presencia de meandros y zonas donde se producen desbordamientos laterales generando áreas de inundación.
- Para el desarrollo del modelo numérico en el programa IBER, es necesario poseer un ordenador con suficiente memoria RAM y una buena tarjeta de video, de forma que favorezca el tiempo de construcción del modelo y obtención de los resultados. Cabe indicar que el caso del presente estudio se utilizó un ordenador con 16 Gb. RAM y Tarjeta de video de 4gb, para desarrollar el modelo y todos los escenarios implicados en un aproximado de 230 horas. Cuando las condiciones computacionales no satisfacen por completo los

requerimientos del software, se recomienda activar el modo a prueba de fallos que presenta IBER.

- Para la generación del modelo numérico es recomendable utilizar en la construcción del mallado, malla irregular que permita una mejor adaptación a las irregularidades de la topografía del terreno en la zona de estudio, ya que el uso de malla regular está destinado a los modelos aplicados a estructuras hidráulicas como por ejemplo canales.
- Es necesario realizar una simulación preliminar que abarque la totalidad del área estudio con una malla relativamente grande, con la finalidad de observar que no exista interferencia, obstrucciones o cortes del cauce; de forma que se pueda realizar acciones oportunas para corregir la información del terreno y evitar pérdidas de tiempo en el desarrollo de simulaciones con un mallado pequeño.
- Se recomienda la generación de un modelo que contemple un tramo representativo del área de estudio, generado a partir de diferentes tamaños de malla, con lo cual se establece el tamaño del mallado adecuado que permita la obtención de resultado fiables en un tiempo aceptable.
- Para el cálculo de los resultados en el modelo es preferible utilizar la capacidad máxima del equipo, es decir indicando en el programa el uso de todos los procesadores que cuente el computador, lo cual permite una mayor eficiencia en el tiempo del proceso de cálculo de los resultados.
- Finalizado el proceso de cálculo e iniciado el postproceso de resultados es común que cuando el área de modelación es extensa se presente un error por falta de memoria, este error puede ser superado mediante el cambio de memoria para resultados establecido por defecto en la ventana de preferencias de IBER y seleccionando el valor máximo disponible.

- Se recomienda continuar con la investigación alrededor del tema, generando una validación de campo de los coeficientes de rugosidad utilizados en la zonificación del área de estudio y así generar una cuantificación de la precisión en el uso de la ecuación de Cowan utilizada en el presente trabajo.

## BIBLIOGRAFÍA

- Álvarez, E. (Producer). (2008). *Estudio del sistema de ventilación de una instalación industrial para el tratamiento de desechos*. Recuperado de: [http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/4119/direccion/Proyecto\\_PDF+-+Estudio+del+Sistema+de+Ventilaci%C3%B3n+de+una+Instala%252F](http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/4119/direccion/Proyecto_PDF+-+Estudio+del+Sistema+de+Ventilaci%C3%B3n+de+una+Instala%252F)
- Balairón, L. (2011). *Modelación matemática en el ámbito de la dinámica fluvial: Laboratorio de hidráulica del centro de Estudios Hidrograficos del CEDEX*.
- Bladé, E. (2005). *Modelación del flujo en lámina libre sobre cauces naturales. Análisis integrado con esquemas en volúmenes finitos en una y dos dimensiones* (pp. 315). Barcelona , España.
- Bladé, E., Cea, L., & Corestein, G. (2014). Modelización numérica de inundaciones fluviales. *Ingeniería del Agua*, 18(1), 71-81.
- Bladé, E., Cea, L., Corestein, G., Escolano, E., Puertas, J., Vázquez, E., . . . Coll, A. (2012). IBER: *Herramienta de simulación numérica del flujo en ríos*. Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería. Vol. 30(1), pp. 1-10.
- Chow, V. T. (1959). *Hidráulica de Canales Abiertos*. McGraw-Hill.
- Elosegi, A., Sabater, S., (2009), *Conceptos y técnicas en ecología fluvial, España*.
- Espinosa, M. V. (2017). *Río Portoviejo se desborda e inunda a cinco cantones*. El Comercio. Recuperado mayo 5, 2017, de <http://www.elcomercio.com/actualidad/rio-portoviejo-desbordamiento-inundaciones-cantones.html>
- INAMHI. (2008). *Proyecto Sistema de Alerta Temprana de Control de Inundaciones en la Cuenca del Río Chone* (Vol. 1, pp. 65). Quito, Ecuador.
- Instituto Geográfico Militar (I.G.M.) (2017).
- Kessler, M. (Producer). (2016, junio 24). *Dinámica de Fluidos Computacional: ¿Qué es?*. Recuperado de: <http://www.esss.com.br/blog/es/2016/06/dinamica-de-fluidos-computacional-que-es/>
- Krochin, S. (1986). *Diseño Hidráulico*. Tercera Edición. Quito-Ecuador.

- Martin Vide, J. P. (2003). *Ingeniería de Ríos*. Barcelona, España: Universidad Politécnica de Cataluña.
- Ministerio de Agricultura y Ganadería. (2018). Proyecto Sistema Nacional de Información y Gestión de Tierras Rurales e Infraestructura Tecnológica - SIGTIERRAS.
- Méndez J. (2017). *Simulación Numérica Bidimensional con el Programa IBER del Flujo de Lahares Primarios del Rio Santa Clara en la Población de Sangolqui Correspondiente al Drenaje Norte del Volcán Cotopaxi*. Quito-Ecuador.
- Modelización bidimensional del flujo en lámina libre en aguas poco profundas. (2010, junio 7). Recuperado de: [ftp://ceres.udc.es/ITS\\_Caminos/2\\_Ciclo/Obras\\_hidraulicas/Curso%202012-2013/Hidraulica%20Fluvial/IBER/Manual\\_Referencia\\_Hidraulico\\_IBER.pdf](ftp://ceres.udc.es/ITS_Caminos/2_Ciclo/Obras_hidraulicas/Curso%202012-2013/Hidraulica%20Fluvial/IBER/Manual_Referencia_Hidraulico_IBER.pdf)
- Monsalve, G. (1999). *Hidrología en la Ingeniería*. Primera Edición. Colombia.
- Ochoa, S., Reyna, T., Reyna, S., García, M., Labaque, M., & Díaz, J. (2016). *Modelación hidrodinámica unidimensional y bidimensional del tramo medio del río Ctalamochita, provincia de Córdoba*. Revista de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba., Vol 3(2), pp. 1-7.
- Orrego, S. (Producer). (2009, noviembre 20). INDISA ON LINE. *Simulación de fluidos utilizando computadores*. Retrieved from <http://www.indisa.com/indisaonline/anteriores/Indisa%20On%20line%202077.pdf>
- Palavecino A. (2015). *Modelación Bidimensional del Flujo Generado por la Rotura de una presa de tierra, Utilizando el Programa IBER*. Quito-Ecuador.
- Pérez, L. (2004). *Modelación matemática en el ámbito de la dinámica fluvial*. . Prácticas de simulación numérica en mecánica de fluidos.
- Rossel, F., Cadier, E., & Gómez, G. (1996). *Las inundaciones en la zona costera ecuatoriana: Causas; Obras de protección existentes y previstas*. Bulletin de l'Institut Français d'Études Andines, Vol. 25(3), pp. 399-420.
- Ruiz Estelita, M. M. (2015). *Hidrología Aplicada. Escorrentía*. Recuperado el 23 de noviembre de 2017, de

[https://ocw.ehu.eus/pluginfile.php/4576/mod\\_resource/content/1/Material\\_Docente/Tema\\_1.pdf](https://ocw.ehu.eus/pluginfile.php/4576/mod_resource/content/1/Material_Docente/Tema_1.pdf)

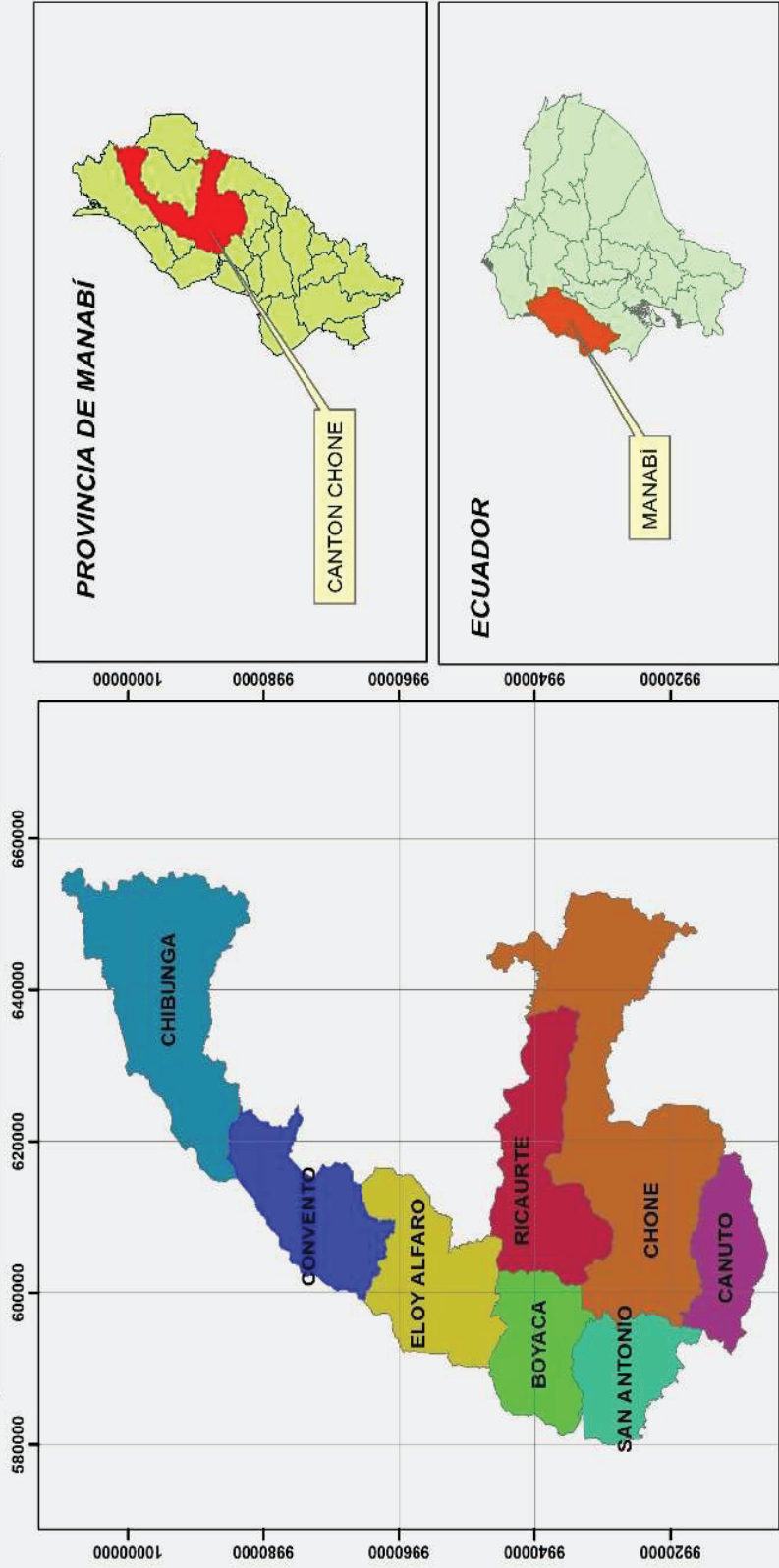
- Salamea, T. (2015). *Modelamiento Bidimensional Hidrodinámico del flujo y transporte de sedimentos a través del Río Calabí y obras Hidráulicas*. (Tesis de Ingeniería), Universidad de Cuenca, Cuenca.
- Urries, B. J. d. (2015). *IBER. Potente software libre de modelado hidráulico bidimensional*.
- Vázquez, J. (2004). *Simulación numérica directa en paralelo de las ecuaciones de Navier-Stokes en flujos con capa límite desprendida*. Aplicaciones en instalaciones deportivas con gradas cubiertas.
- Vega, J. E. (2010). *Simulación del comportamiento de una bomba/turbina hidráulica mediante dinámica de fluidos computacional*. Barcelona, España.

**ANEXOS**



**ANEXO N° I: DIVISIÓN POLÍTICA EN PARROQUIAS DEL CANTÓN  
CHONE**

# ANEXO 1: DIVISIÓN POLÍTICA EN PARROQUIAS DEL CANTÓN CHONE



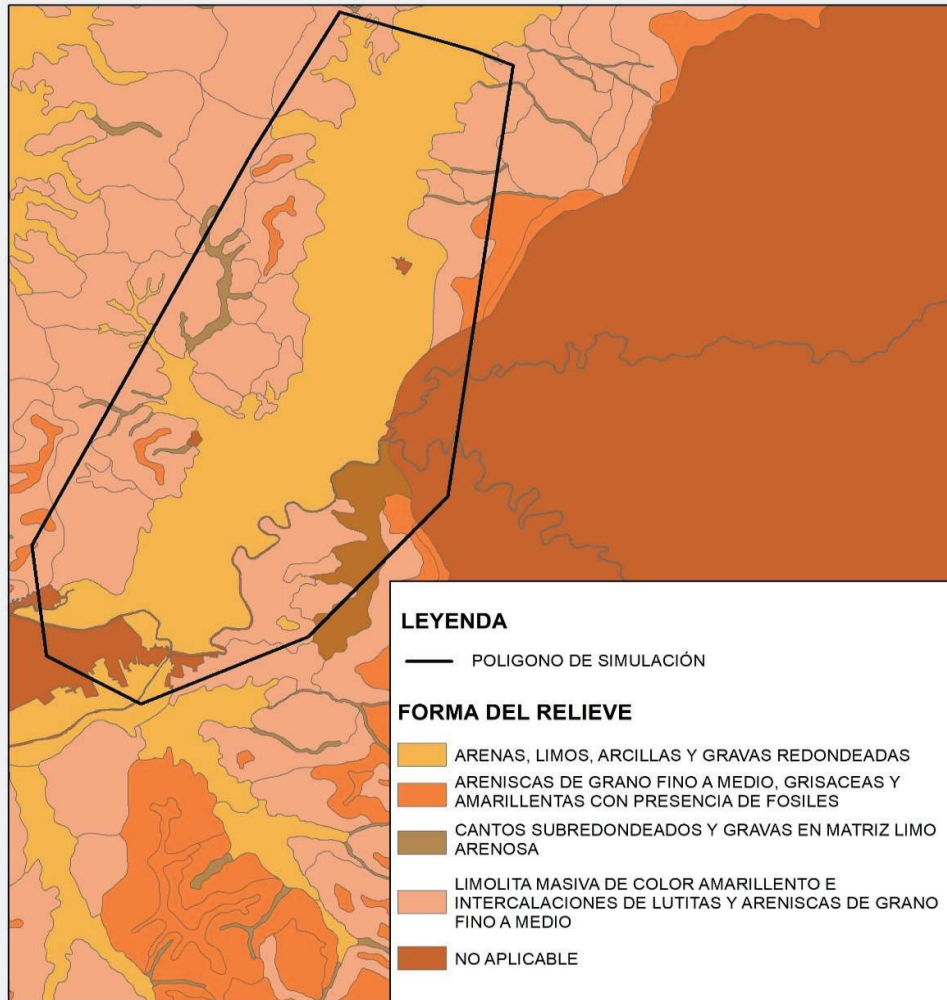
Elipsoide y Dátum Horizontal:  
Sistema Geodésico Mundial WGS 84  
Dátum Vertical: Estación Mareográfica de la Armada  
Santa Elena - Ecuador  
Proyección: UTM Zona 17 Sur

FUENTE: IGM 1:50.000,(2001)  
SNI 1:50.000 ,(2011)

**ANEXO N° II: TOPOGRAFÍA DEL RÍO GARRAPATA EN EL TRAMO DE ESTUDIO**

**ANEXO N° III: ASIGNACIÓN DE COEFICIENTE DE RUGOSIDAD PARA LAS  
9 ZONAS DE POLÍGONO DE MODELACIÓN**

**MATERIAL INVOLUCRADO PARA VALOR DE "no"**



ESCALA: 1:800,000

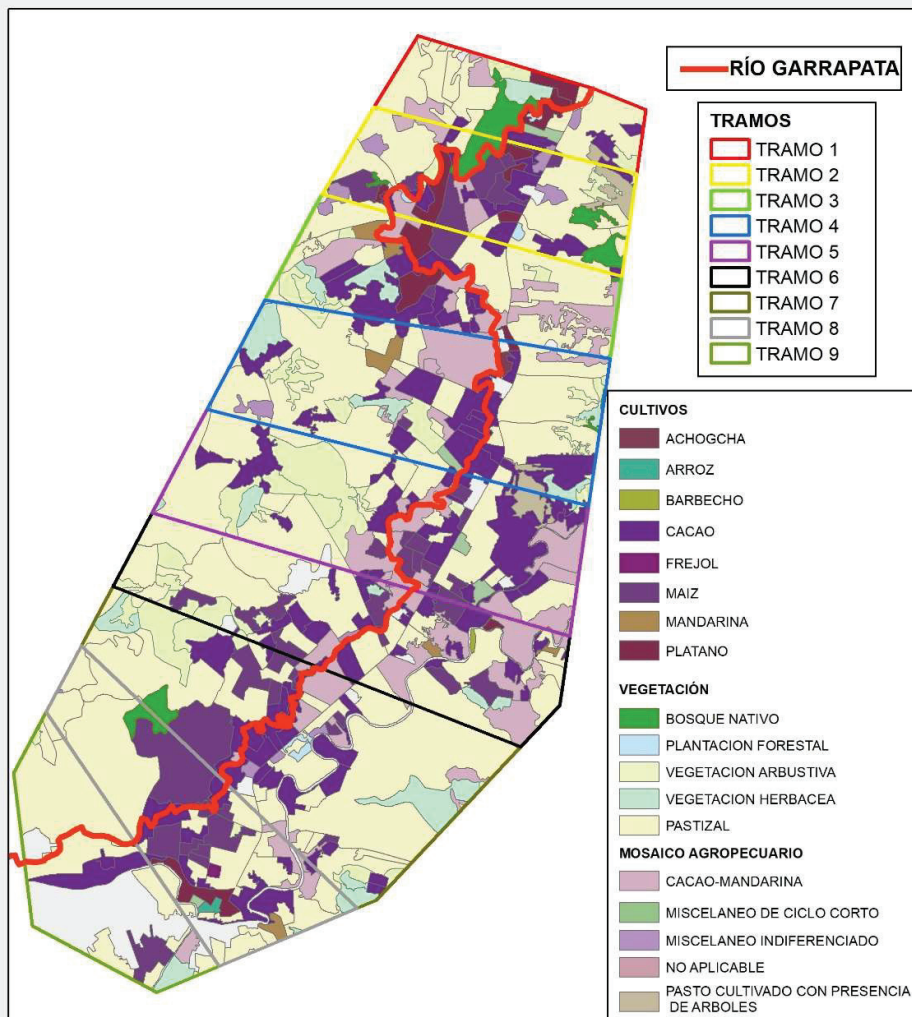
0 0.5 1 2 3 4 Kilometers

Elipsoide y Dátum Horizontal:  
Sistema Geodésico Mundial WGS 84  
Dátum Vertical: Estación Mareográfica de la Armada  
Santa Elena - Ecuador  
Proyección: UTM Zona 17 Sur

FUENTE: IGM 1:50.000,(2001)  
SNI 1:50.000 ,(2011)

no correspondiente a Arenas, limos, arcillas y gravadas redondeada con un valor igual 0.024

## CULTIVO - VEGETACIÓN DE ÁREA DE SIMULACIÓN

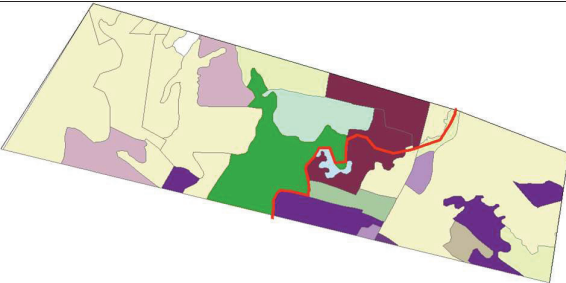

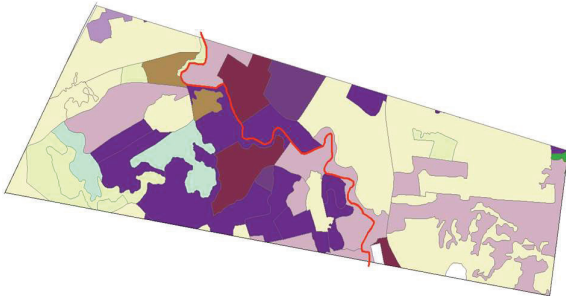




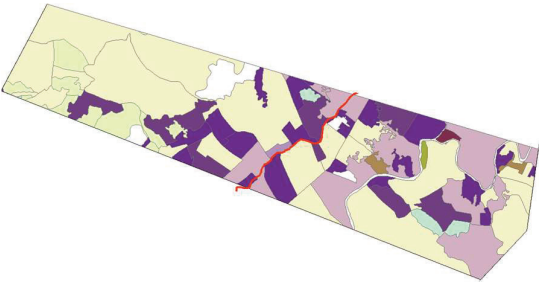
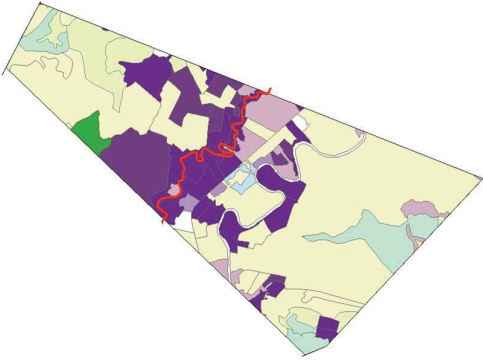
Elipsoide y Dátum Horizontal:  
Sistema Geodésico Mundial WGS 84  
Dátum Vertical: Estación Mareográfica de la Armada  
Santa Elena - Ecuador  
Proyección: UTM Zona 17 Sur

FUENTE: IGM 1:50.000,(2001)  
SNI 1:50.000 ,(2011)

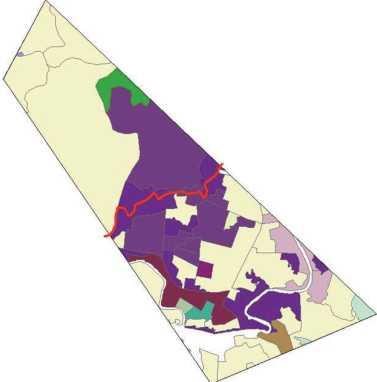
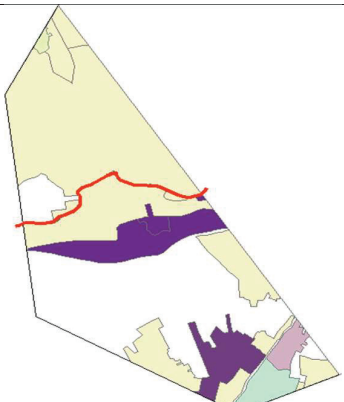
Se establece el valor n4 en función de la descripción de presencia de cultivo.

Coeficiente m5 de la fórmula de Cowan		
Relación entre la longitud con meandros y longitud recta del tramo		Grado de los efectos por meandros
Menores	1 - 1,2	1,000
Apreciables	1,2 - 1,5	1,150
Severos	> 1,5	1,300

CALCULO DE PARÁMETRO “m5” DE LA ECUACIÓN POR EL MÉTODO DE COWAN PARA COEFICIENTE DE RUGOSIDAD			
TRAMO 1		Longitud con meandros	Longitud recta
		1571,26	1018,87
		m5 = 1,54 (Severo)	
TRAMO 2		Longitud con meandros	Longitud recta
		2821,42	1351,65
		m5 = 2.08 (Severo)	
TRAMO 3		Longitud con meandros	Longitud recta
		2768,17	1657,06
		m5 = 1,6 (Severo)	

<b>TRAMO 4</b>		Longitud con meandros	Longitud recta
		2090,10	1496,85
		m5 = 1,4 (Severo)	
<b>TRAMO 5</b>		Longitud con meandros	Longitud recta
		2100,30	1193,71
		m5 = 1,75 (Severo)	
<b>TRAMO 6</b>		Longitud con meandros	Longitud recta
		1206,69	1069,13
		m5 = 1,12 (Menor)	
<b>TRAMO 7</b>		Longitud con meandros	Longitud recta
		2834,52	1645,53
		m5 = 1,72 (Severo)	

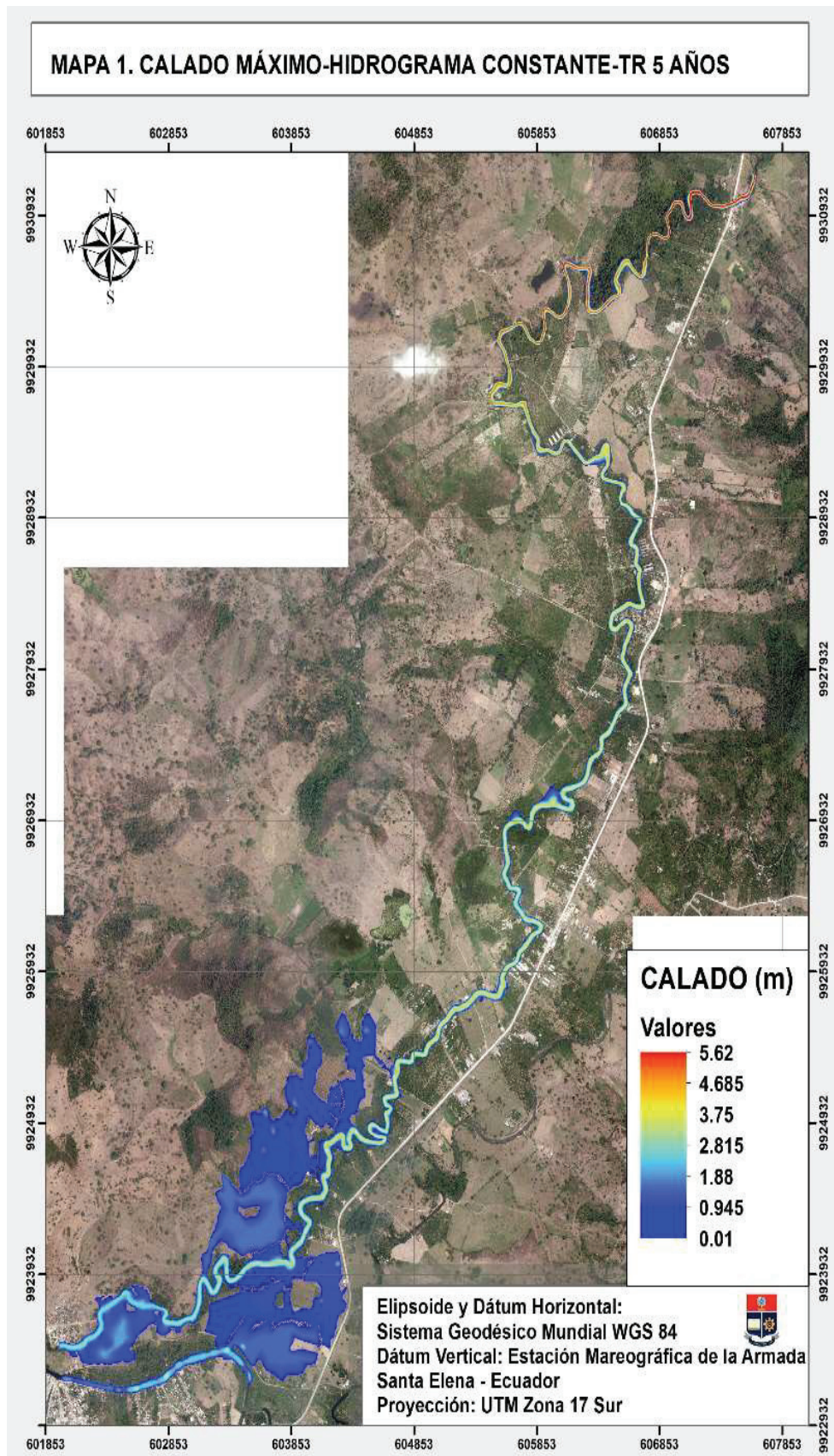


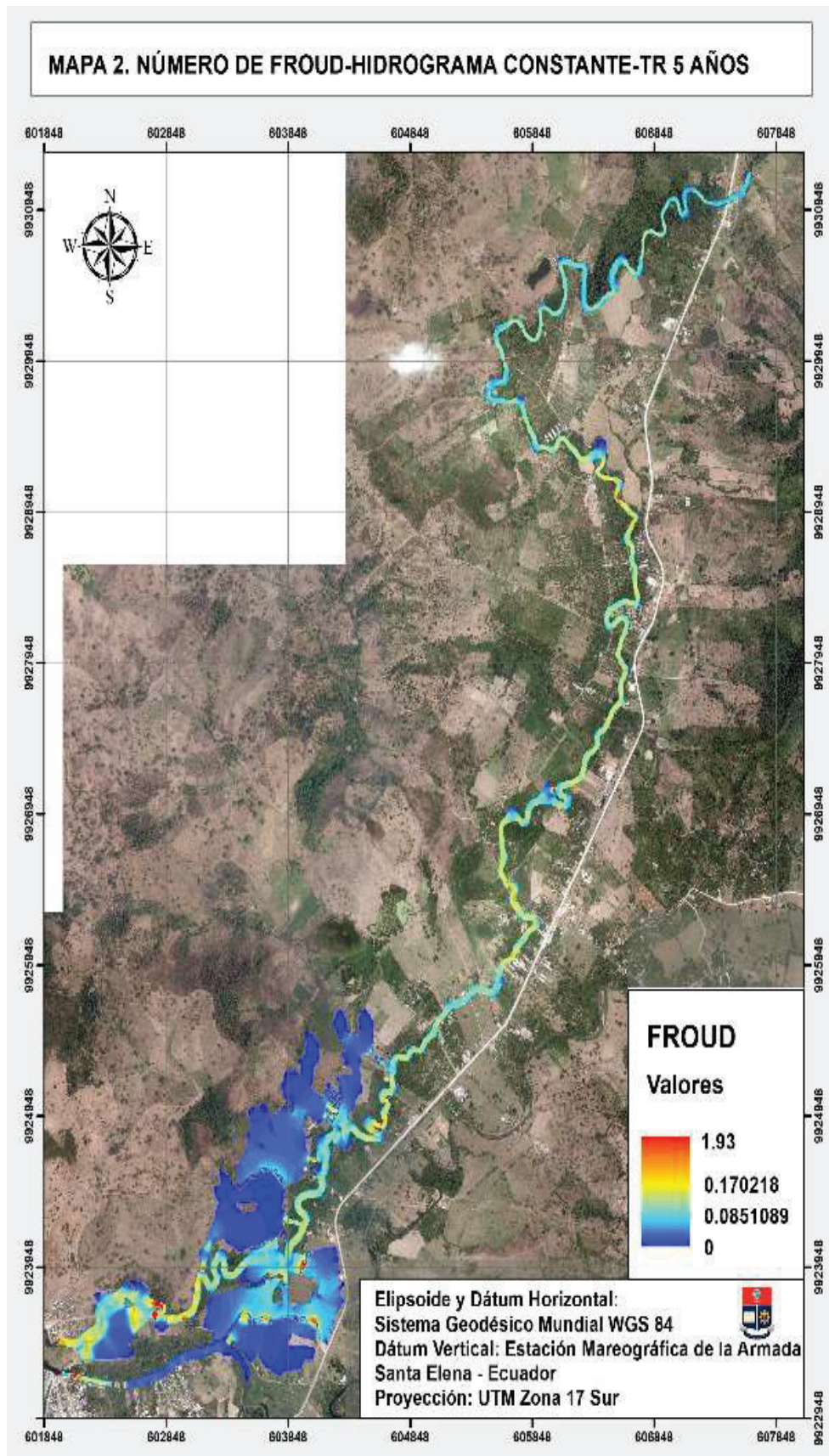
<b>TRAMO 8</b>		Longitud con meandros	Longitud recta
		1652,36	1069,41
		m5 = 1,54 (Severo)	
<b>TRAMO 9</b>		Longitud con meandros	Longitud recta
		1423,80	1053,94
		m5 = 1,35 (Apreciable)	

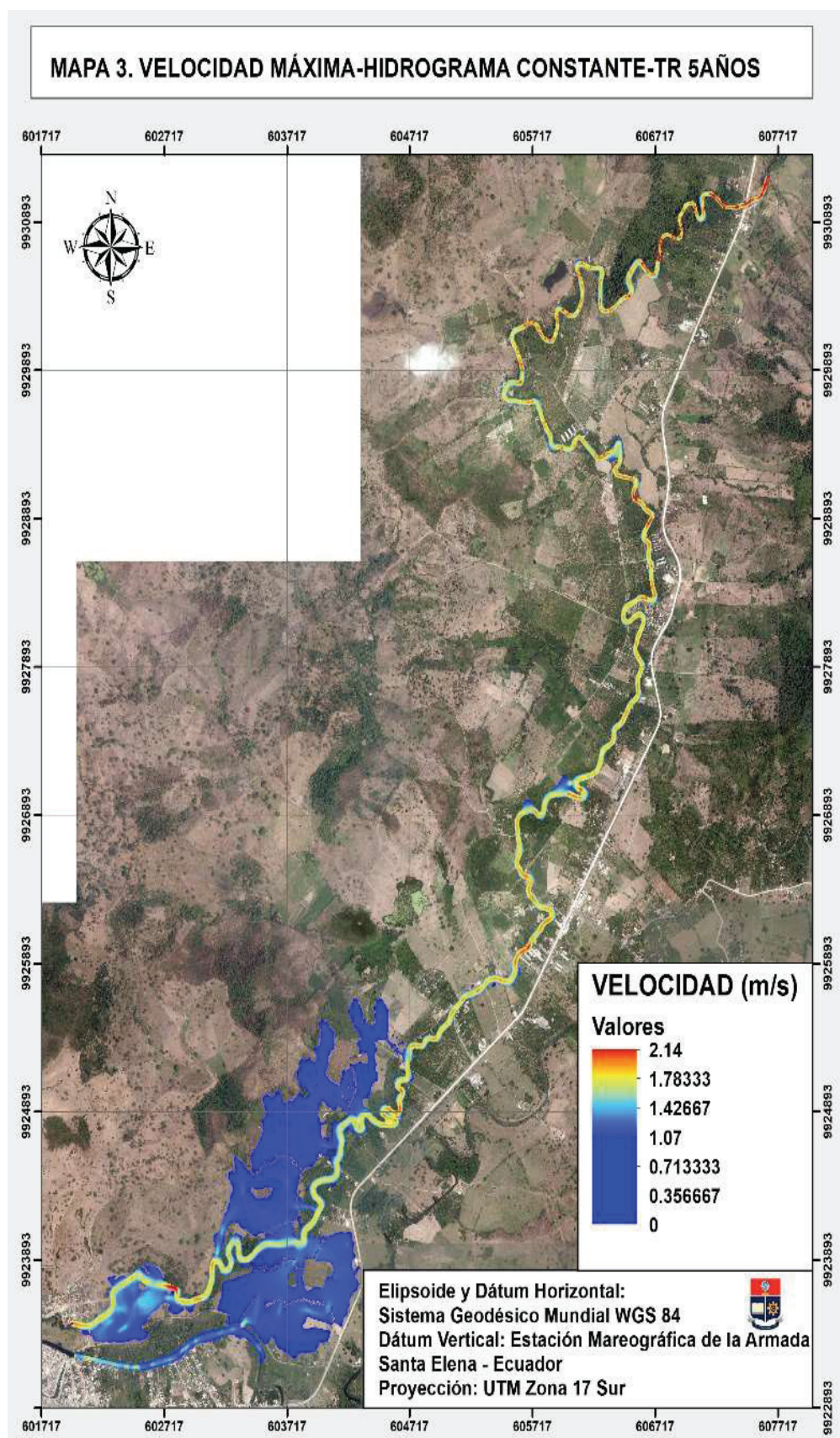
**ANEXO N° IV: AFOROS HISTÓRICOS DEL INSTITUTO NACIONAL DE  
METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA**

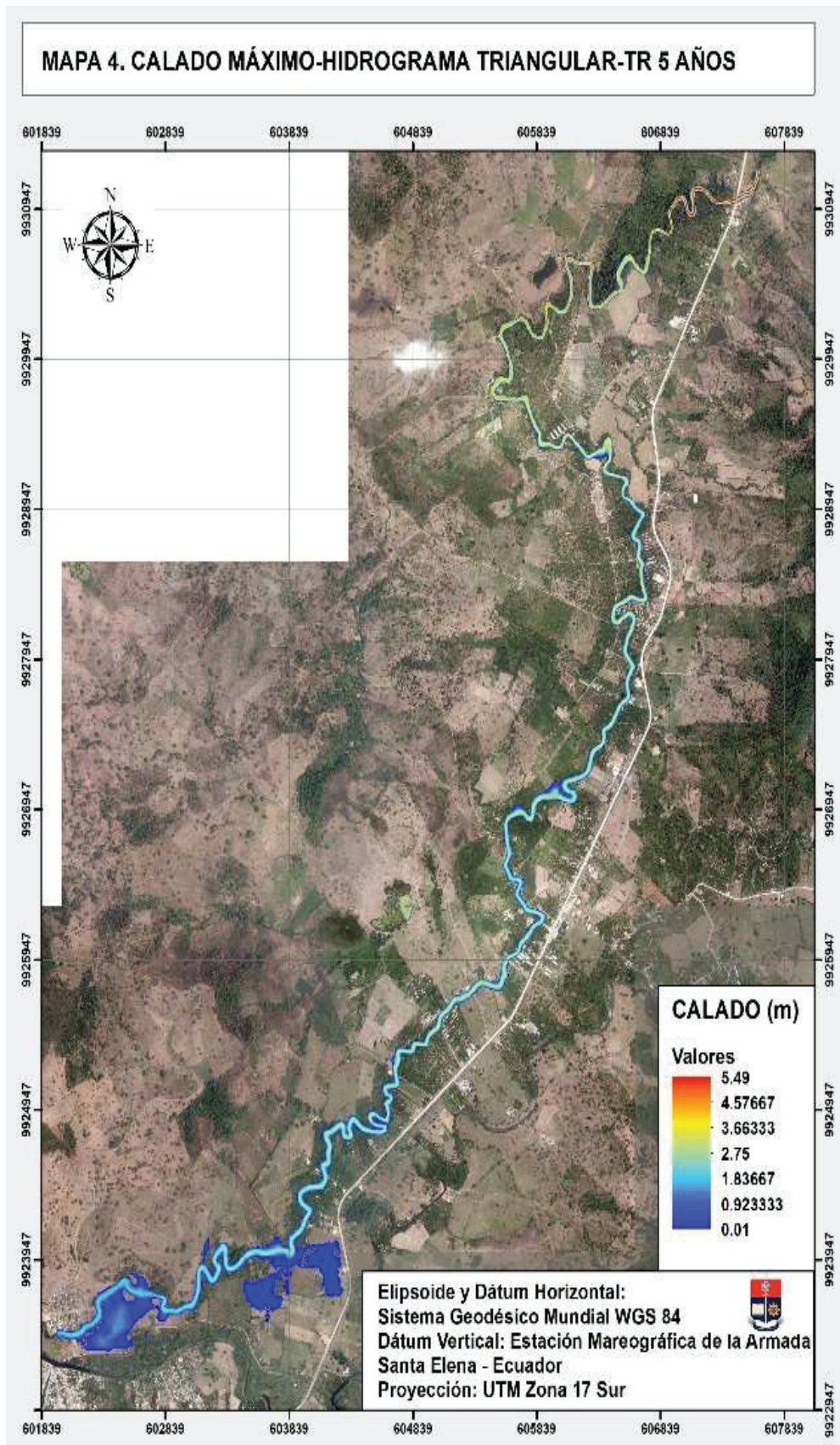
INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA E HIDROLOGIA																		
ESTACIÓN: GARRAPATA AJCHONE																		
PERIODO: 2001-2015																		
CÓDIGO: H0230																		
LATITUD: 1° 25'32" S																		
LONGITUD: 79° 16'48" W																		
ELEVACIÓN: 50 m																		
CÓDIGO	FECHA	LECTURAS			CAUDAL TOTAL QT	ÁREA TOTAL	VELOC SUPERF MEDIA	PROFUND MÁXIMA	ANCHO SECCIÓN	TIRANTE	PERIM. MOJADO	RADIO HIDRÁUL	MANNING HIDRÁUL	GEOMET	STEVENS A (D) ** 5	FACTOR CAUCE	FROUDE	REALIZADO CON
		LIMNIMET INICIAL	LIMNIMET PROMEDIO	PROMEDIO														
H0230	19/6/2001	1.380	1.380	1.380	0.786	2.570	0.305	0.340	10.000	0.257	10.085	0.254	0.761	1.033	1.302	0.912	0.193	Molinete
H0230	3/2/2005	1.200	1.200	1.200	0.164	1.060	0.154	0.340	4.500	0.235	4.635	0.228	0.414	0.396	0.514	1.499	0.102	Molinete
H0230	21/8/2005	1.040	1.040	1.040	0.176	1.295	0.135	0.260	7.500	0.172	7.550	0.171	0.440	0.400	0.538	1.205	0.104	Molinete
H0230	16/2/2006	1.550	1.550	1.550	1.429	3.690	0.387	0.630	9.000	0.410	9.179	0.402	0.711	2.010	2.362	1.051	0.193	Molinete
H0230	17/10/2006	0.950	0.950	0.950	0.072	1.080	0.066	0.300	6.500	0.166	6.704	0.161	0.225	0.320	0.440	1.749	0.052	Molinete
H0230	14/6/2007	1.100	1.100	1.100	0.714	2.355	0.303	0.500	6.800	0.346	7.020	0.335	0.628	1.137	1.385	1.171	0.165	Molinete
H0230	24/11/2007	0.800	0.800	0.798	0.130	1.070	0.121	0.380	6.000	0.178	6.294	0.170	0.396	0.328	0.451	1.370	0.092	Molinete
H0230	6/3/2008	2.900	2.860	2.880	13.607	22.200	0.612	2.200	14.000	1.585	15.185	1.461	0.476	28.596	27.955	1.471	0.155	Molinete
H0230	28/3/2008	1.400	1.400	1.400	7.954	12.425	0.640	1.400	11.500	1.080	12.345	1.006	0.637	12.479	12.915	1.248	0.197	Molinete
H0230	21/8/2009	1.170	1.170	1.170	0.176	1.140	0.154	0.290	7.000	0.162	7.101	0.160	0.522	0.337	0.460	1.117	0.122	Molinete
H0230	25/2/2010	1.880	1.880	1.880	3.033	7.404	0.409	1.120	7.800	0.949	9.231	0.802	0.474	6.392	7.213	1.612	0.134	Molinete
H0230	14/7/2010	1.570	1.570	1.570	0.993	3.148	0.315	0.440	9.500	0.331	9.595	0.328	0.663	1.497	1.812	1.033	0.175	Molinete
H0230	24/2/2011	1.780	1.780	1.780	3.086	5.690	0.542	0.900	8.000	0.711	8.510	0.668	0.709	4.351	4.798	1.205	0.205	Molinete
H0230	3/12/2011	0.100	0.110	0.106	0.031	0.470	0.065	0.100	6.000	0.078	6.021	0.078	0.360	0.086	0.131	1.232	0.075	Molinete
H0230	23/3/2012	2.980	2.980	2.980	12.891	15.520	0.830	1.500	16.000	0.970	16.572	0.936	0.868	14.856	15.285	0.956	0.269	Molinete
H0230	29/10/2012	1.490	1.490	1.490	23.092	1.297	17.804	0.360	5.200	0.249	5.679	0.228	47.612	0.485	0.647	0.139	11.388	Molinete
H0230	30/10/2012	1.490	1.490	1.490	0.228	1.297	0.175	0.360	5.200	0.249	5.679	0.228	0.470	0.485	0.647	1.396	0.112	Molinete
H0230	20/11/2012	1.490	1.490	1.490	0.228	1.297	0.175	0.360	5.200	0.249	5.679	0.228	0.470	0.485	0.647	1.396	0.112	Molinete
H0230	5/4/2013	3.400	3.500	3.469	28.444	26.620	1.068	2.280	16.000	1.663	17.189	1.548	0.798	35.633	34.336	1.104	0.265	Molinete
H0230	26/10/2013	1.400	1.400	1.399	0.129	0.665	0.193	0.240	5.800	0.114	6.025	0.110	0.843	0.153	0.225	0.877	0.183	Molinete
H0230	11/4/2014	0.180	0.180	0.180	3.902	7.063	0.552	0.970	9.500	0.743	10.084	0.700	0.701	5.570	6.090	1.169	0.205	Molinete
H0230	21/8/2014	1.300	1.300	1.300	0.578	2.065	0.279	0.400	10.500	0.196	10.684	0.193	0.838	0.690	0.915	0.824	0.202	Molinete
H0230	19/5/2015	1.700	1.680	1.690	1.857	4.325	0.429	0.780	7.500	0.576	8.093	0.534	0.652	2.848	3.284	1.239	0.181	Molinete

**ANEXO N° V: MAPAS DE LAS VARIABLES HIDRÁULICAS  
ASOCIADOS A LOS PERIODOS DE RETORNO DE 5, 10, 25, 50 Y  
100 AÑOS**

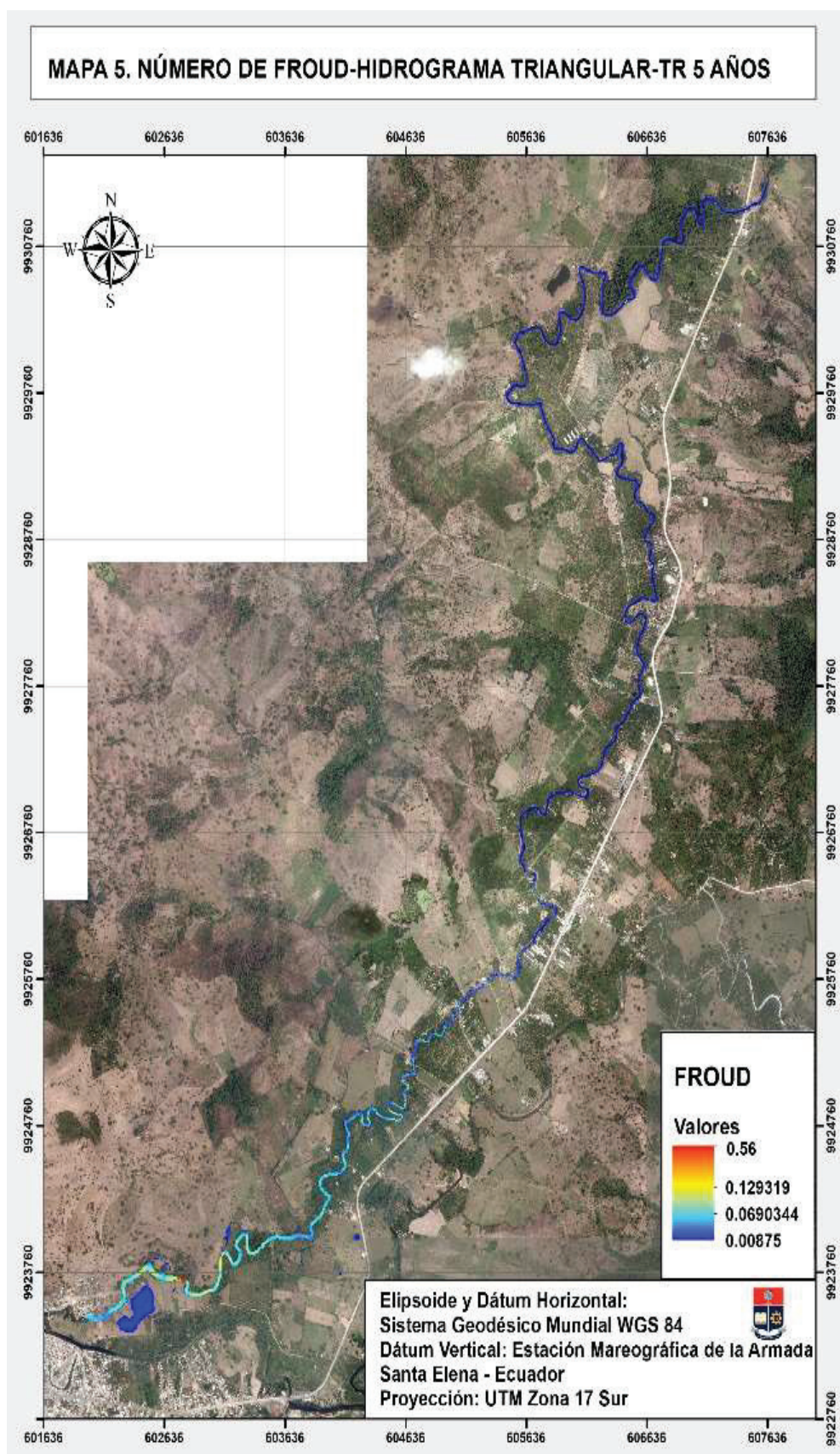




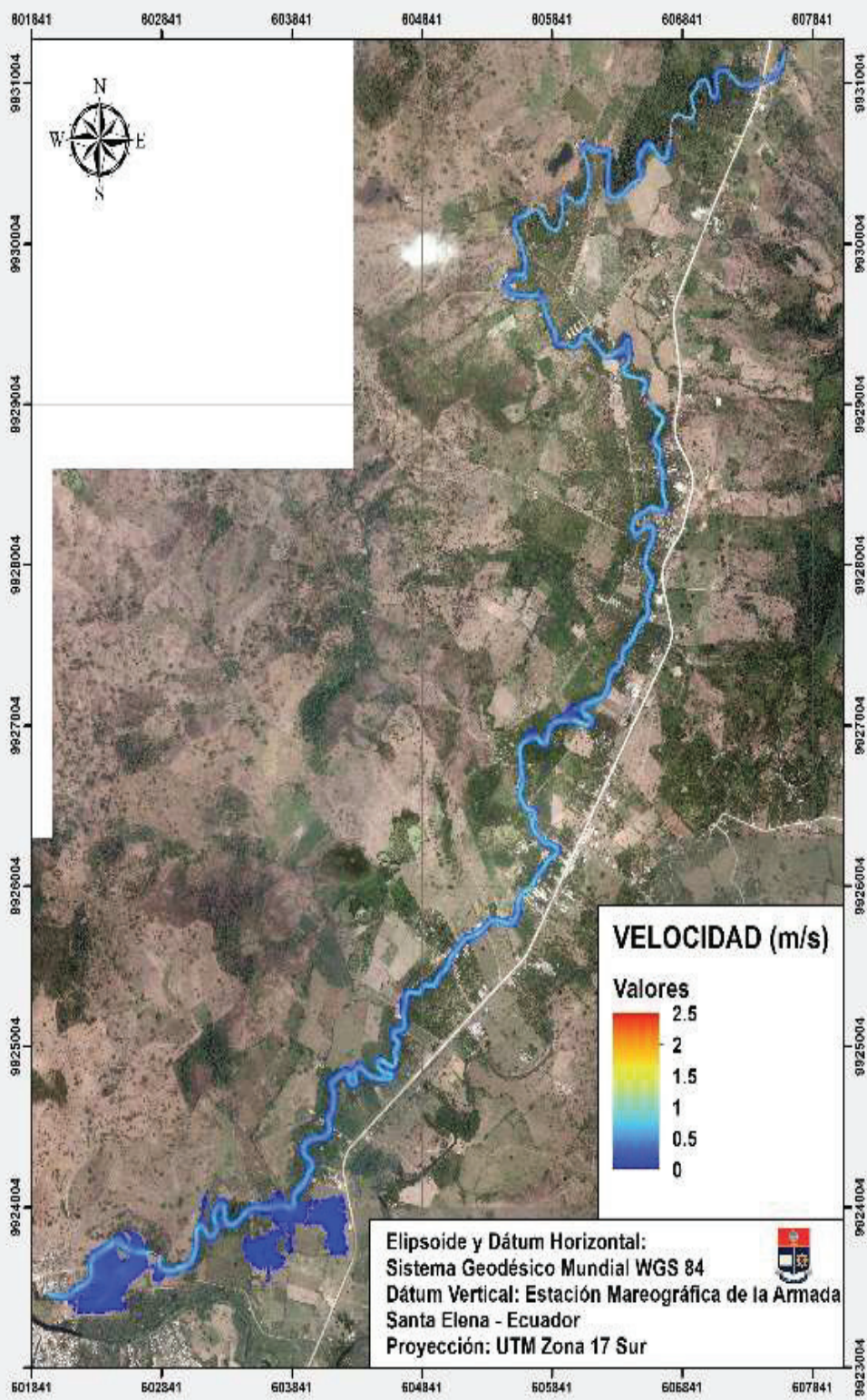


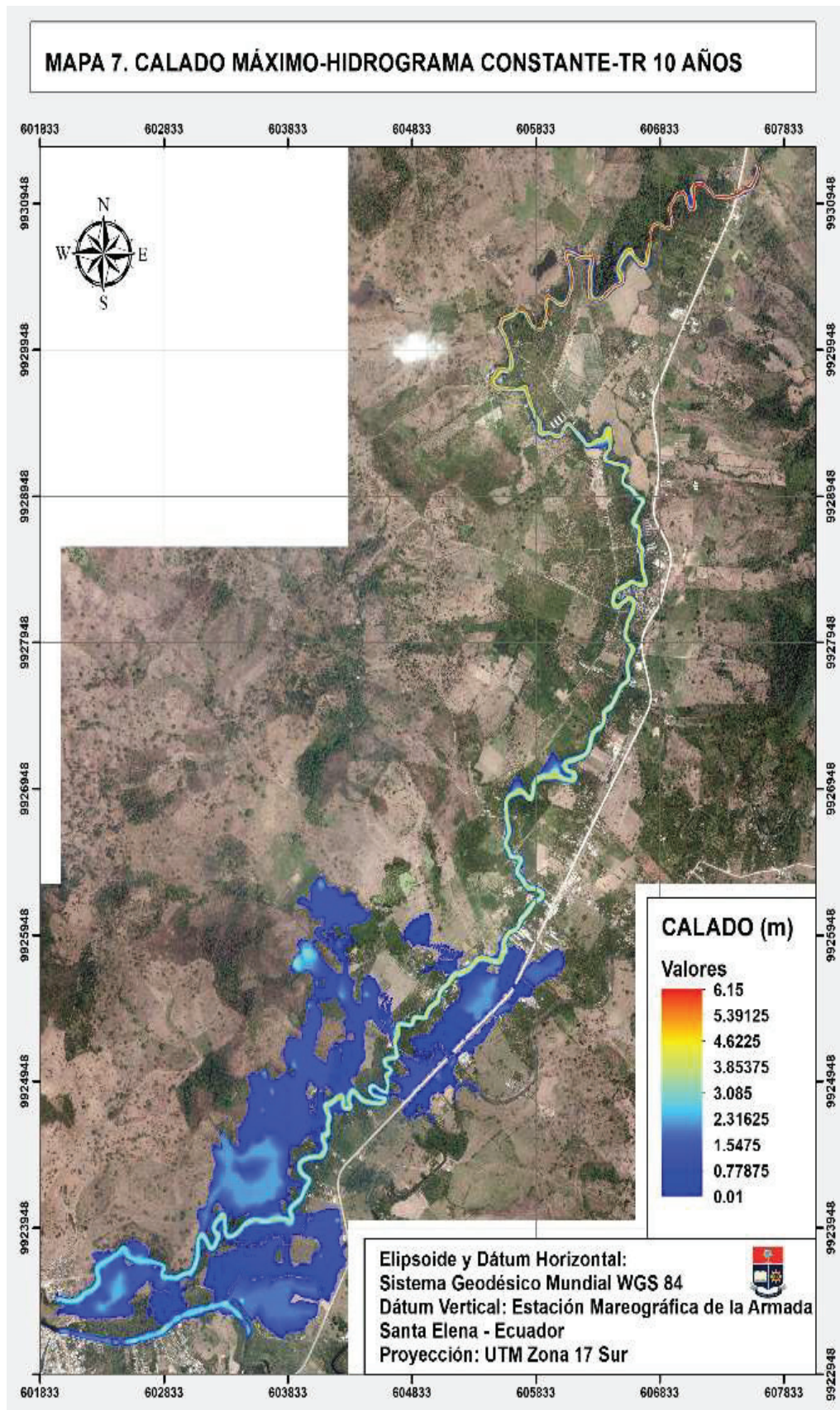


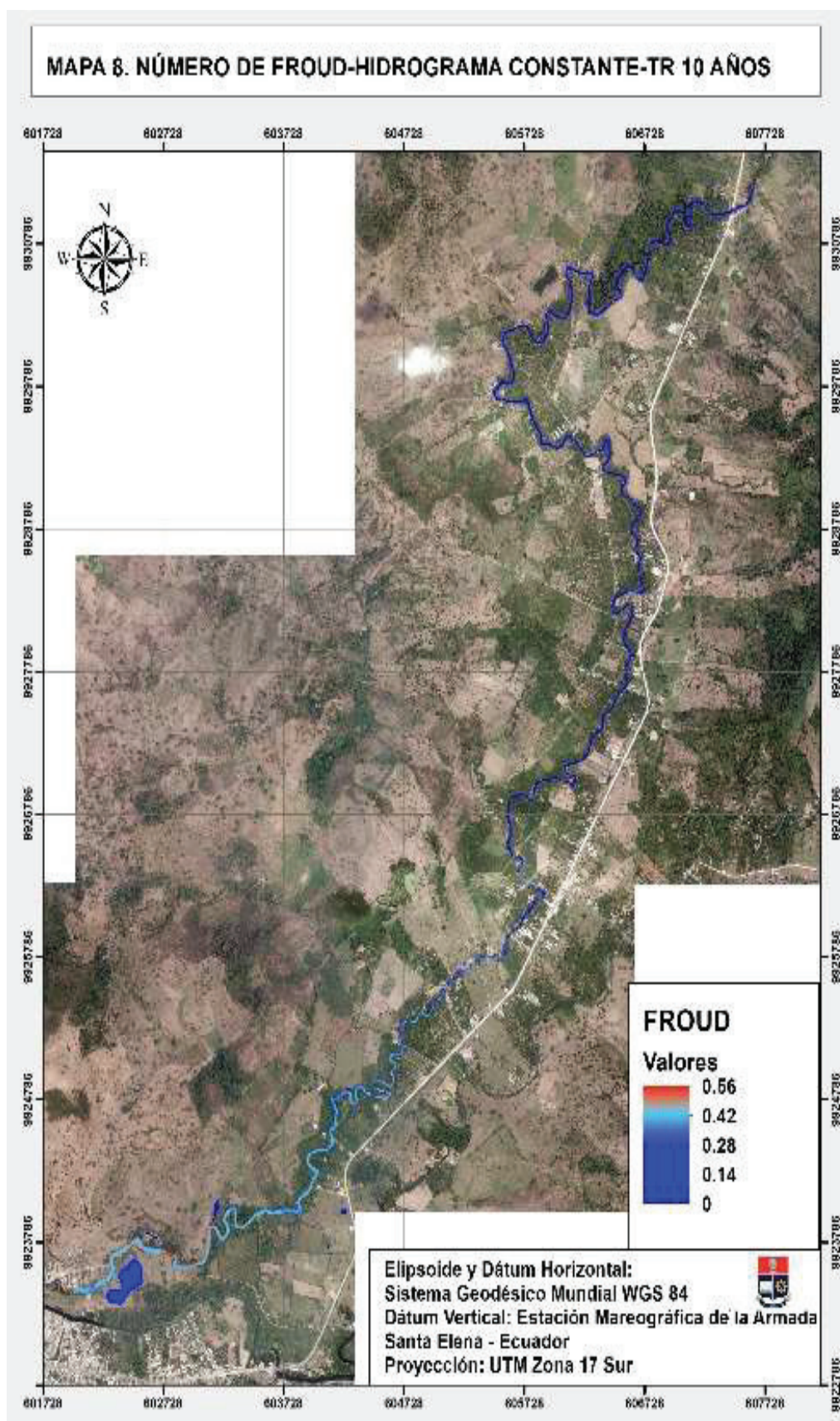


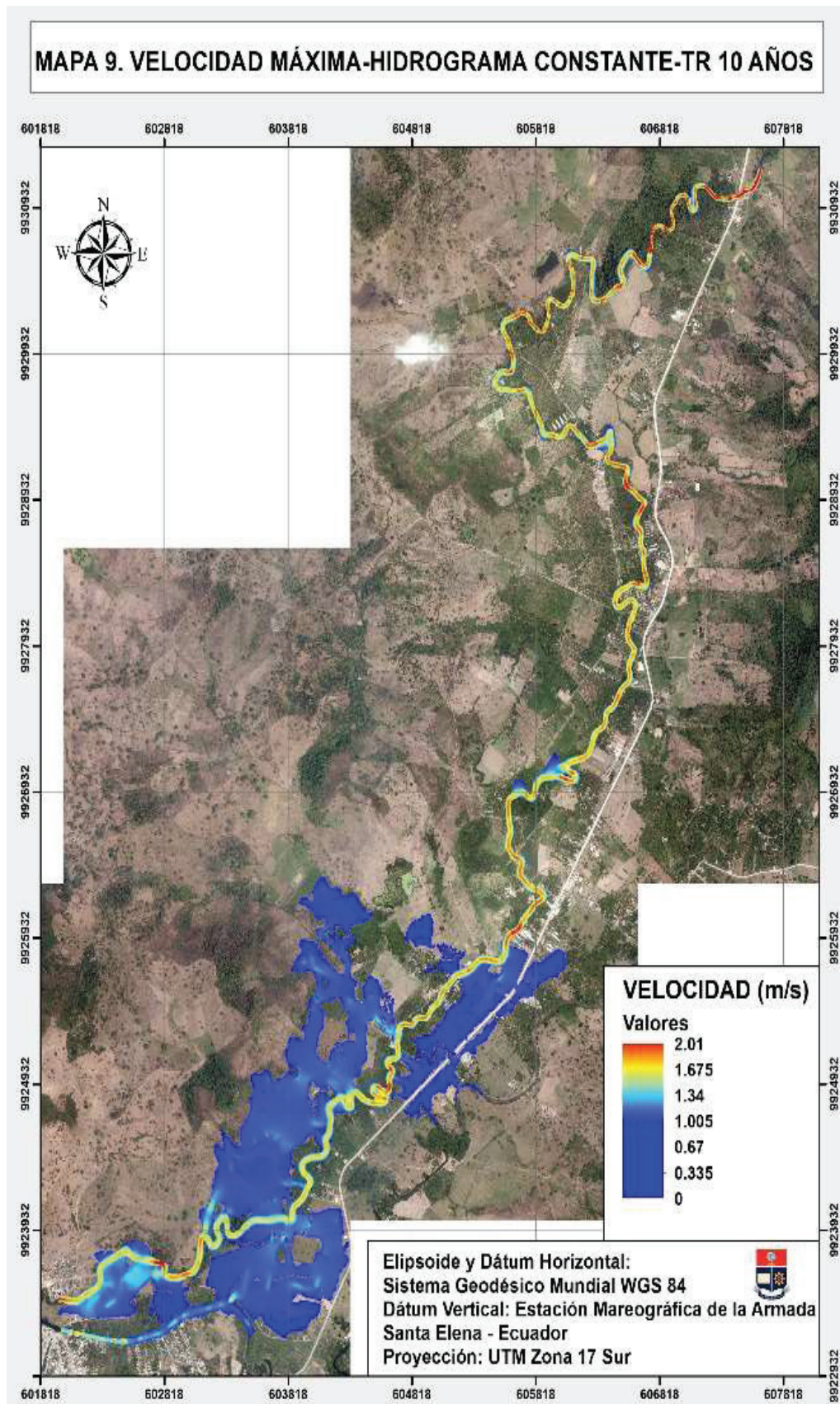


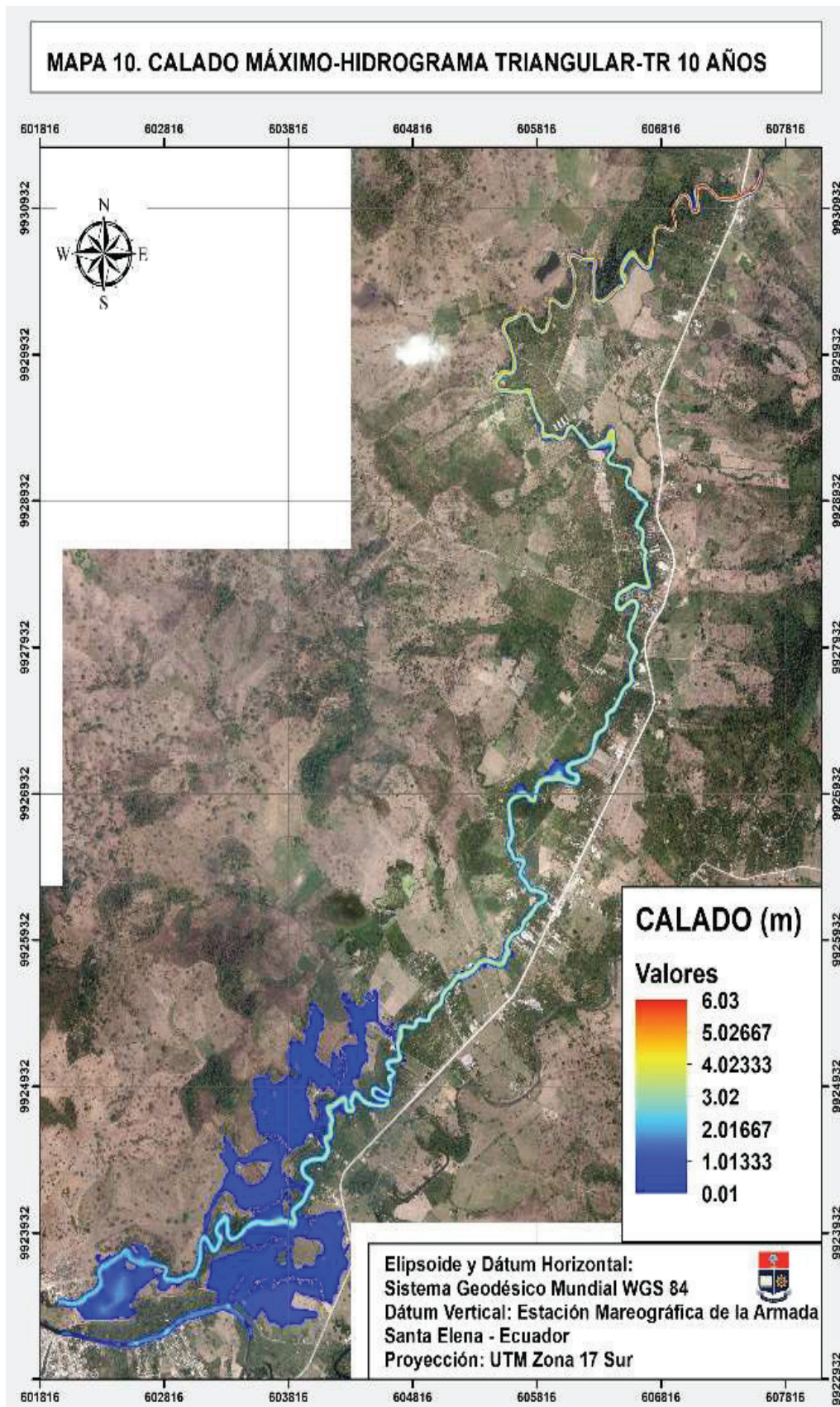
**MAPA 6. VELOCIDAD MÁXIMA-HIDROGRAMA TRIANGULAR-TR 5 AÑOS**

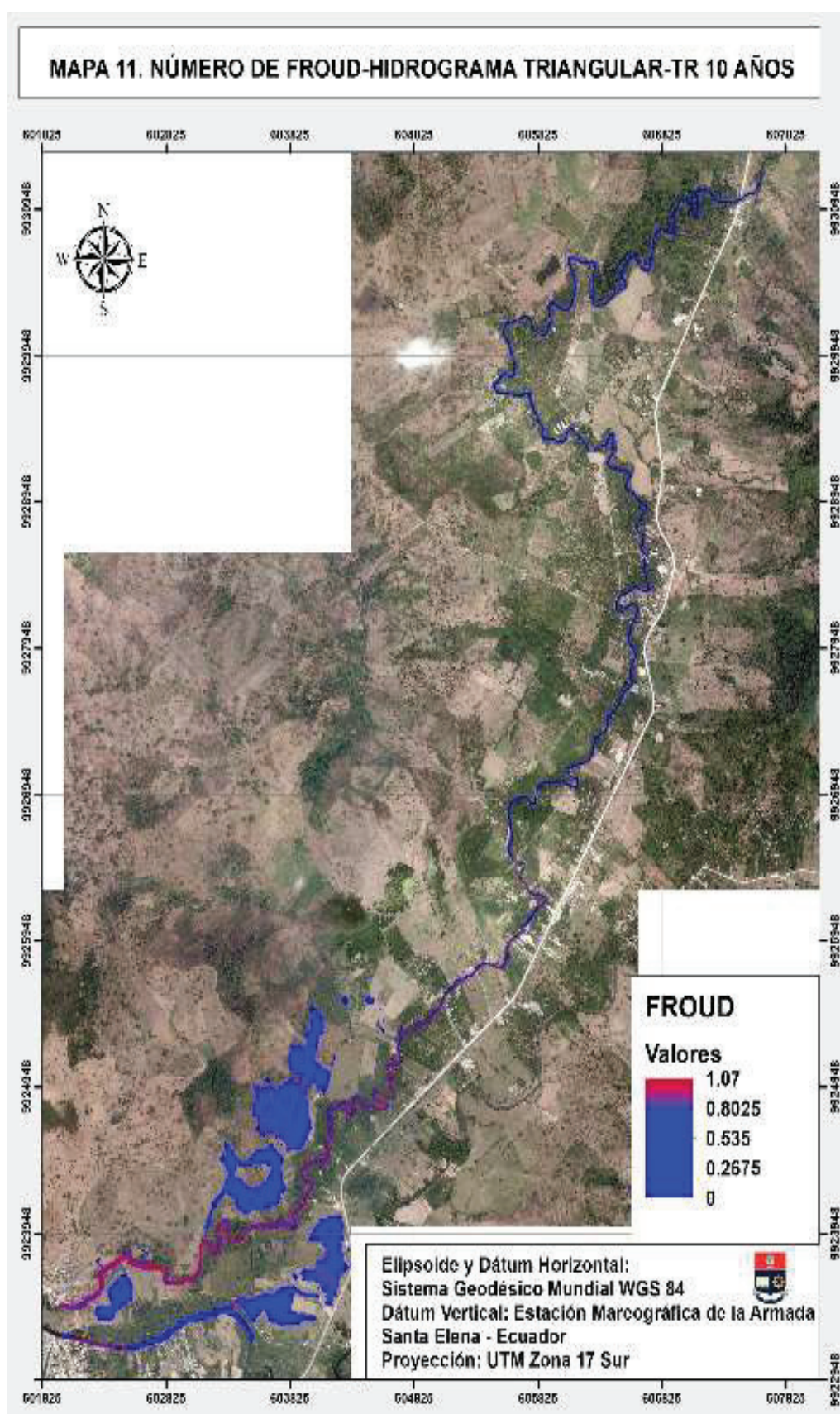


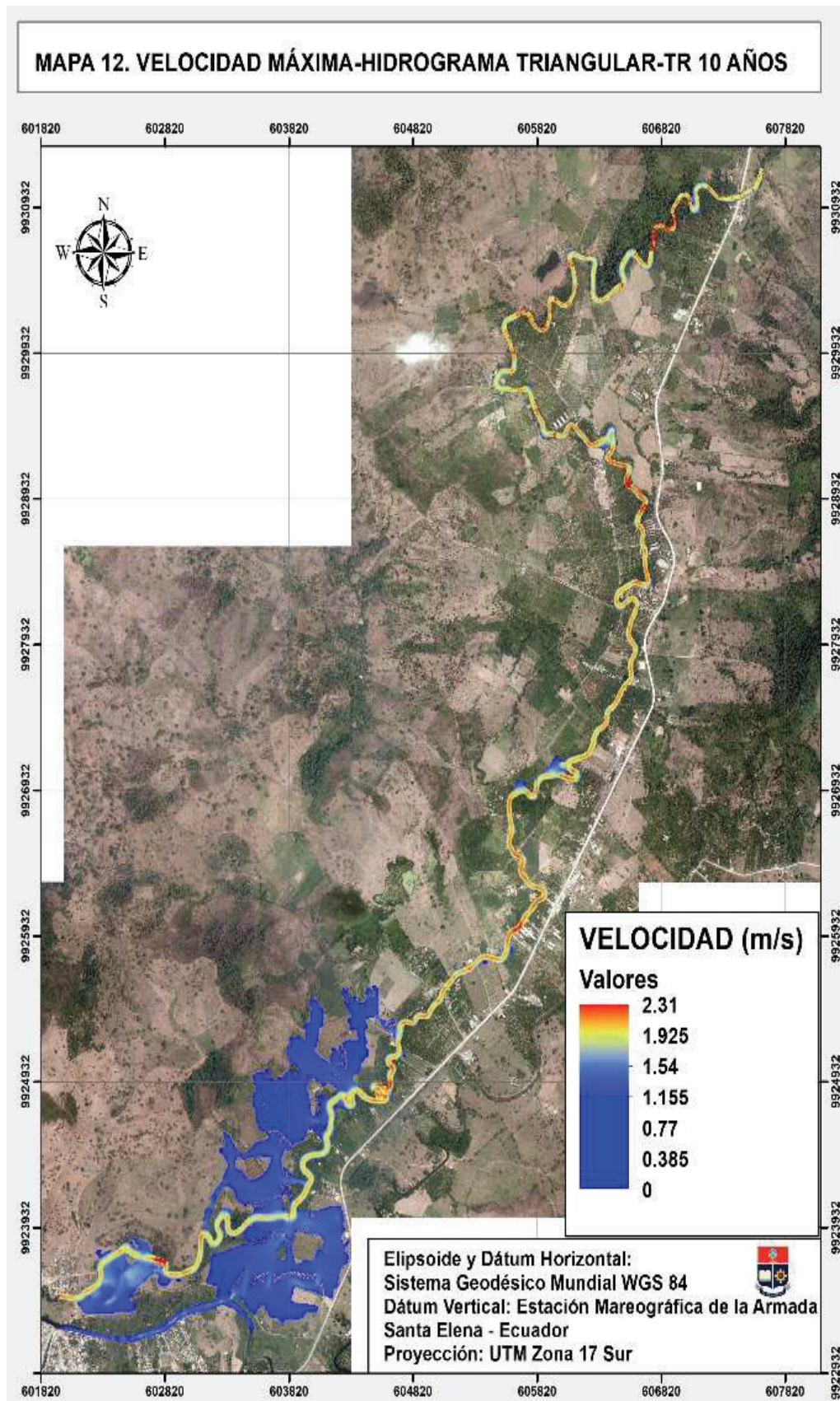




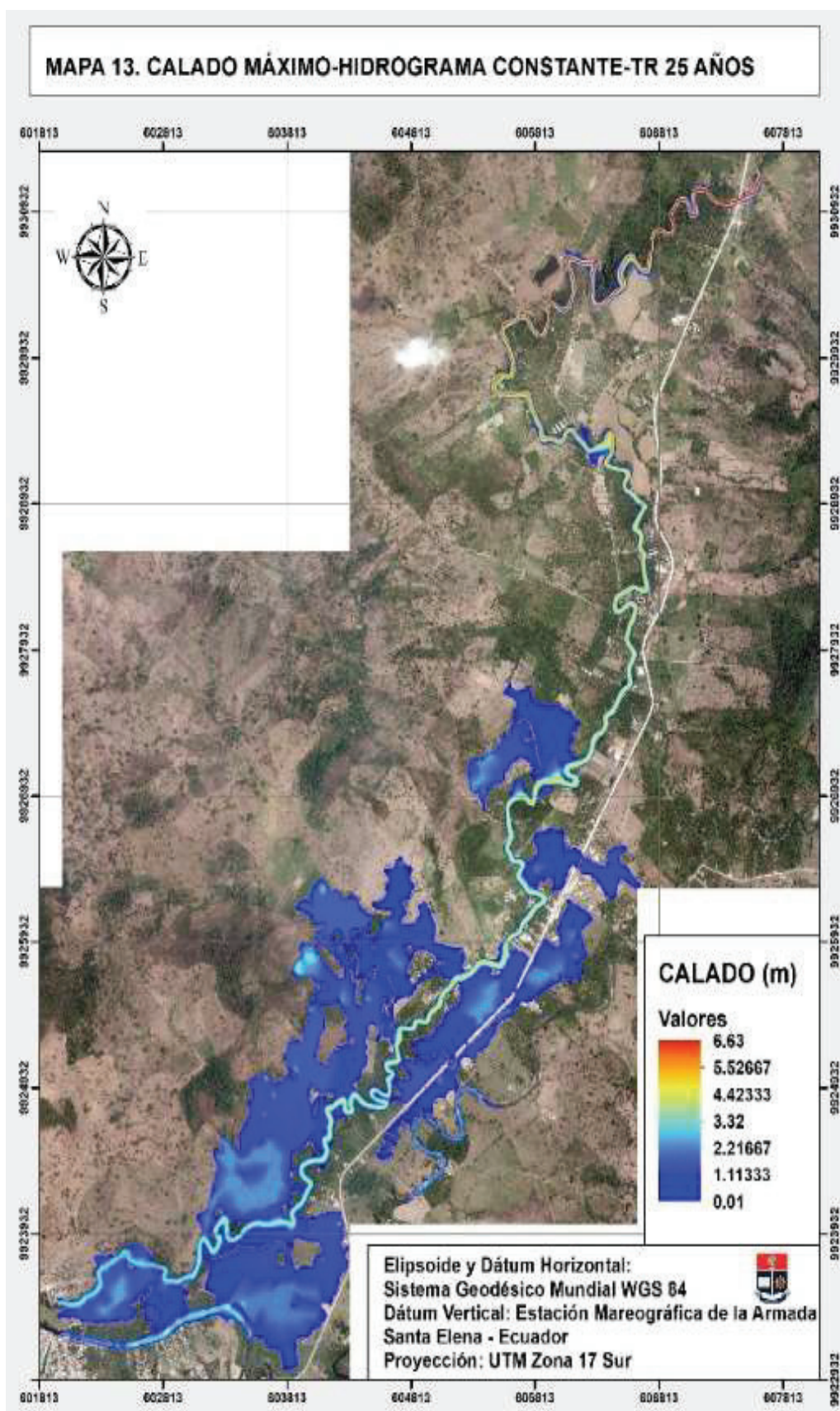


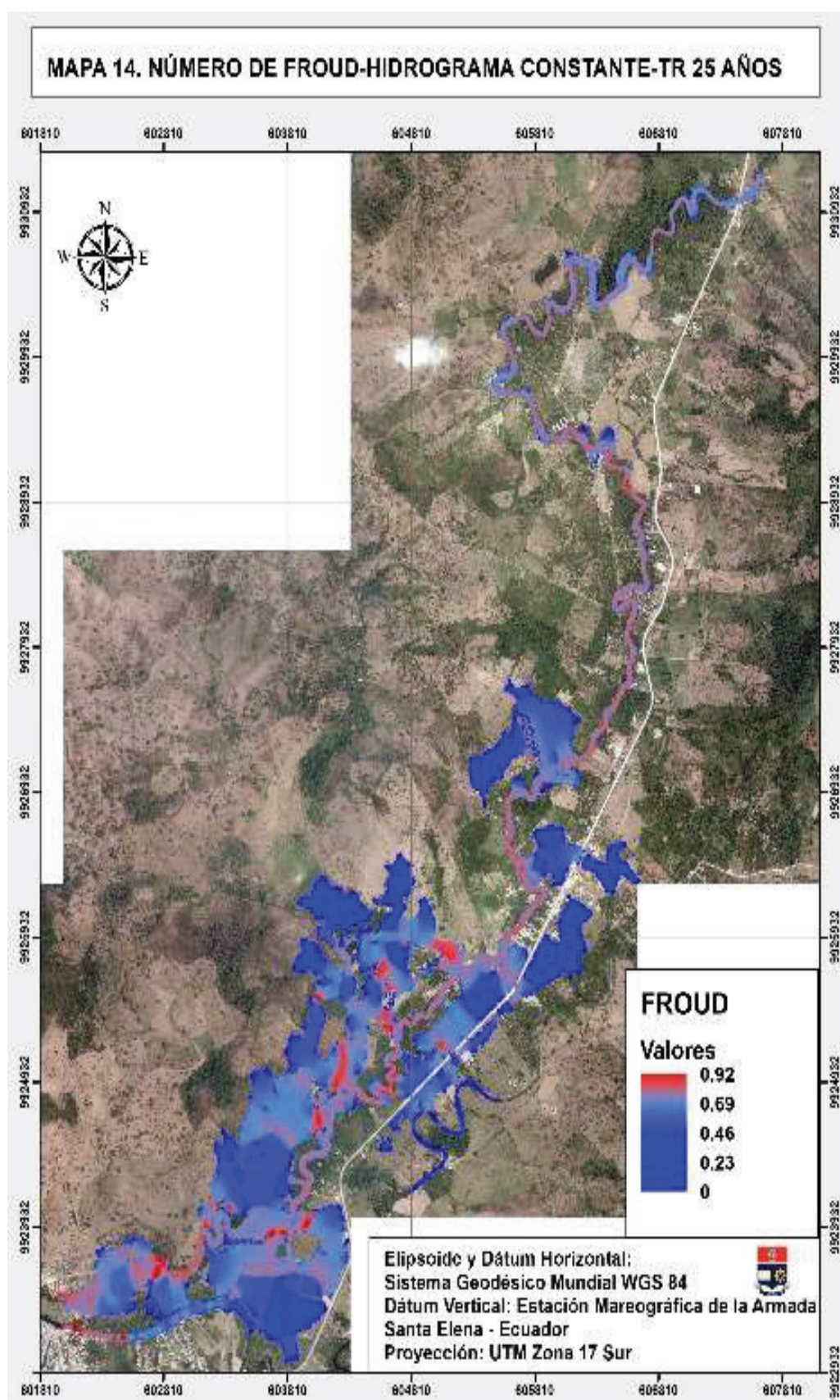


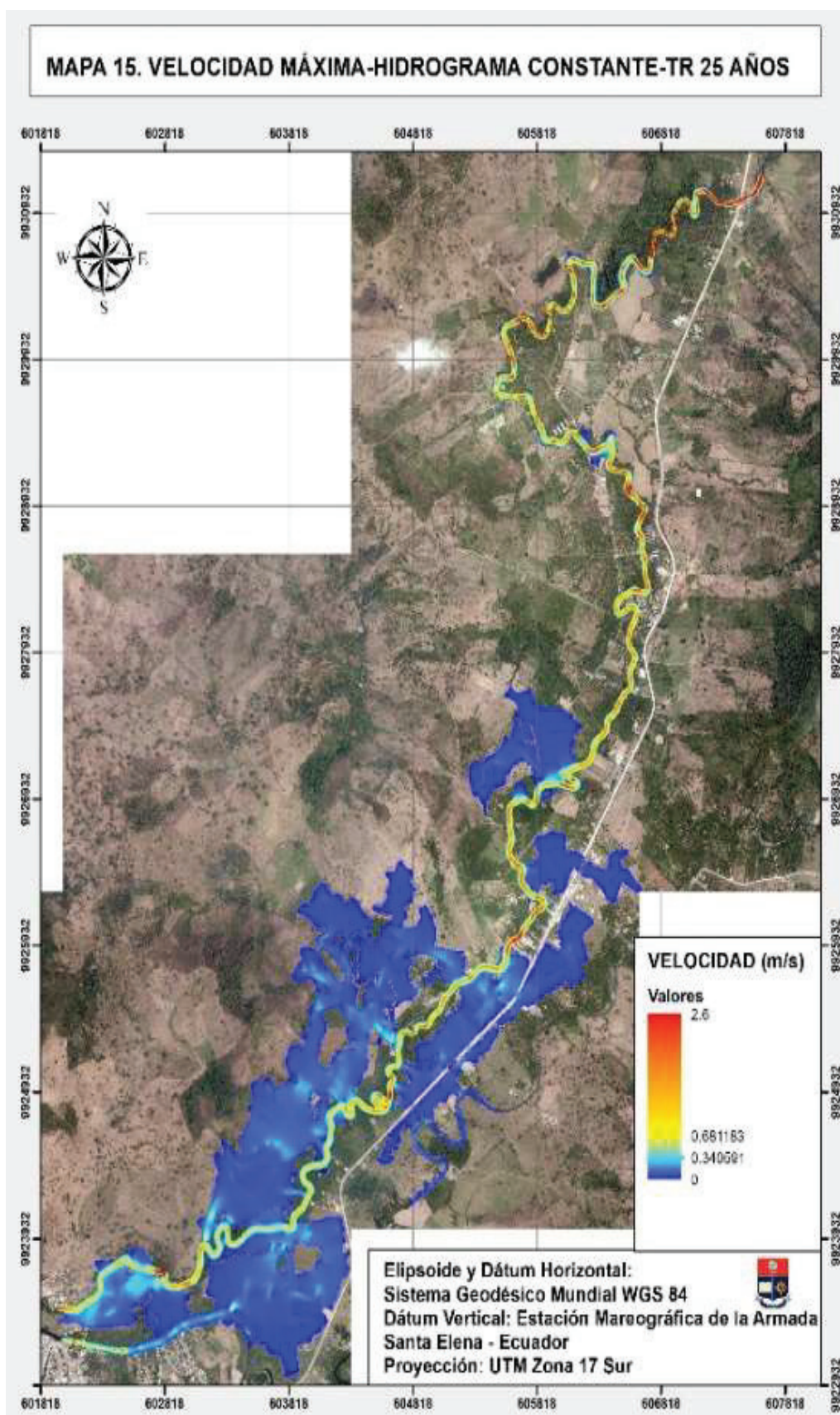


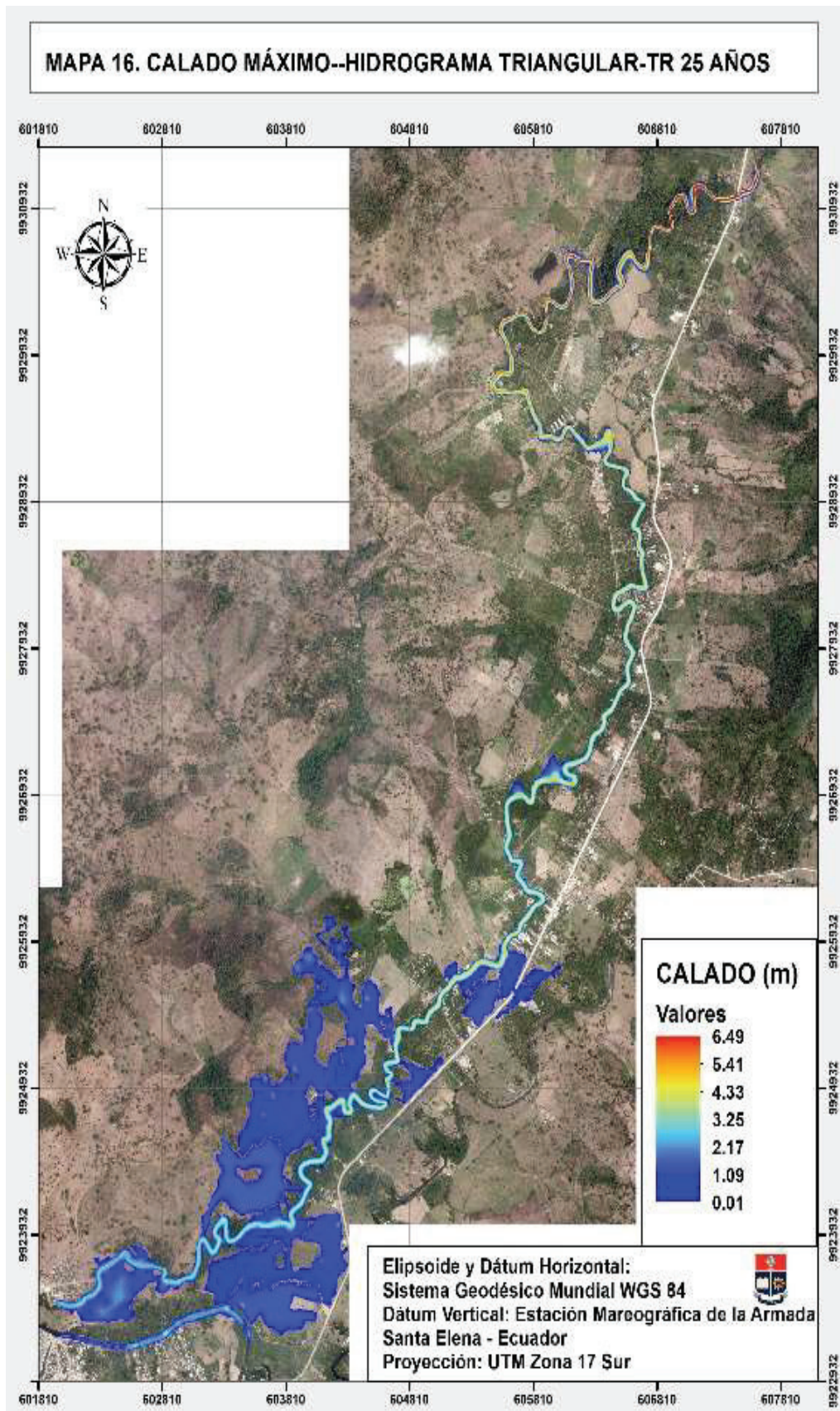


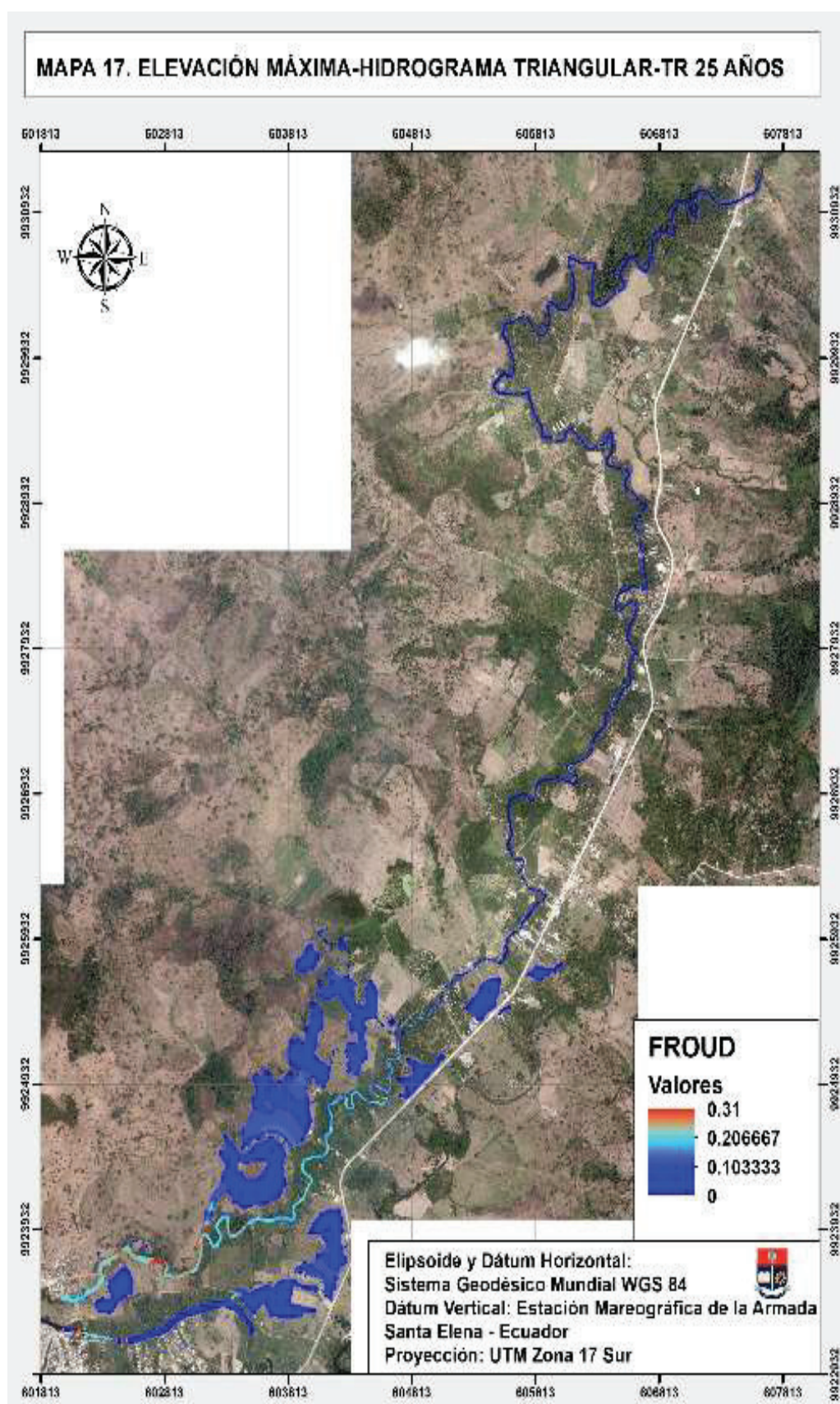


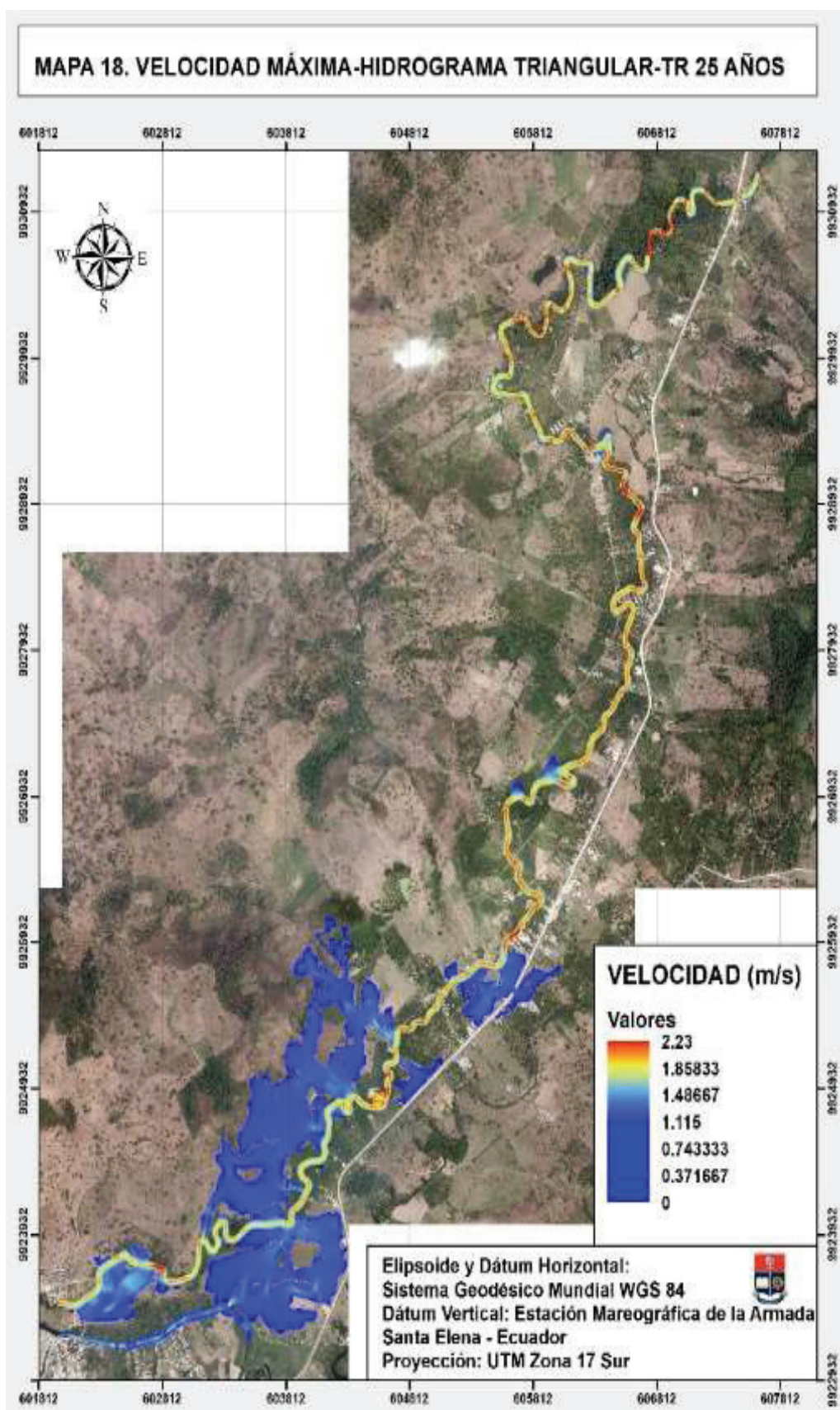


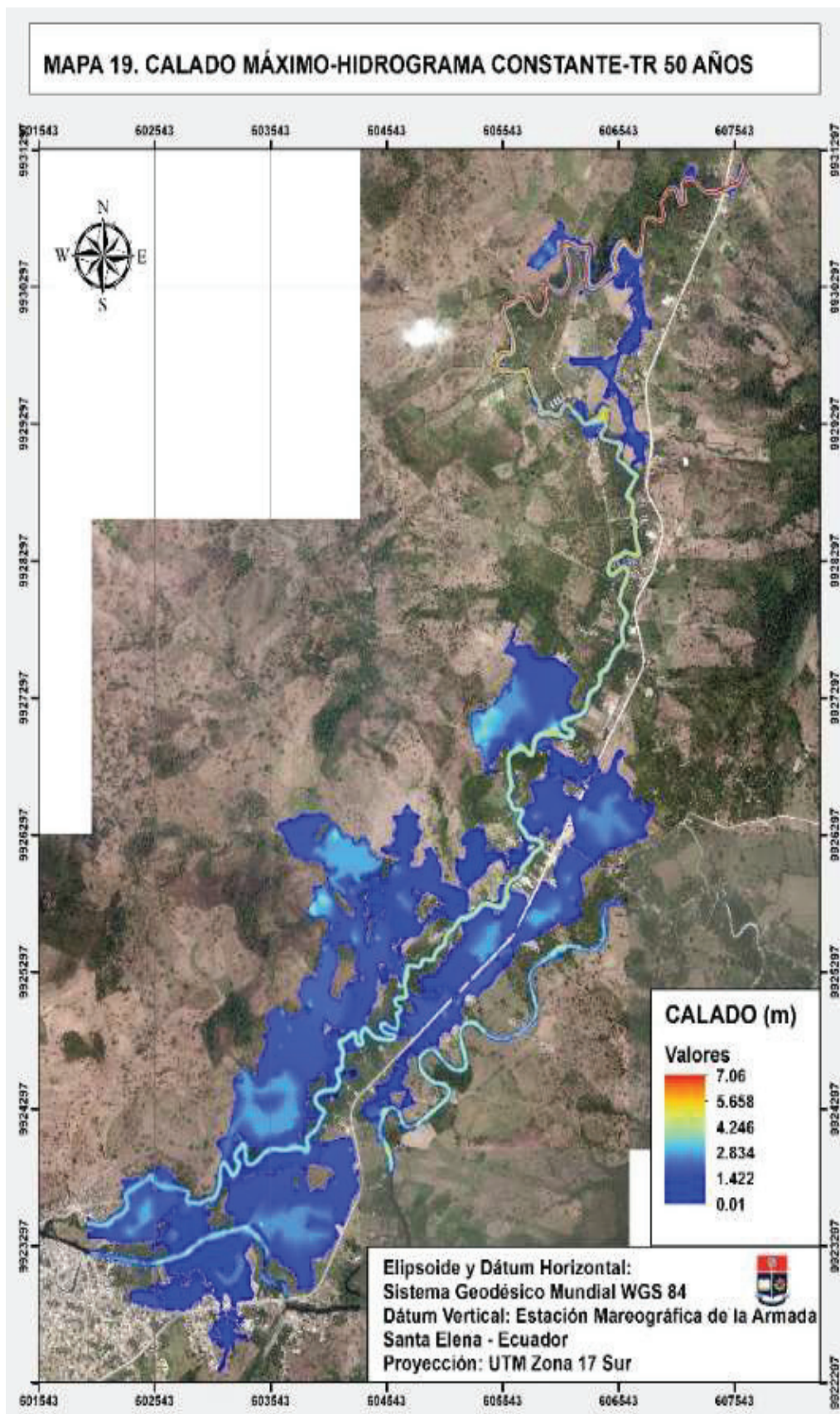


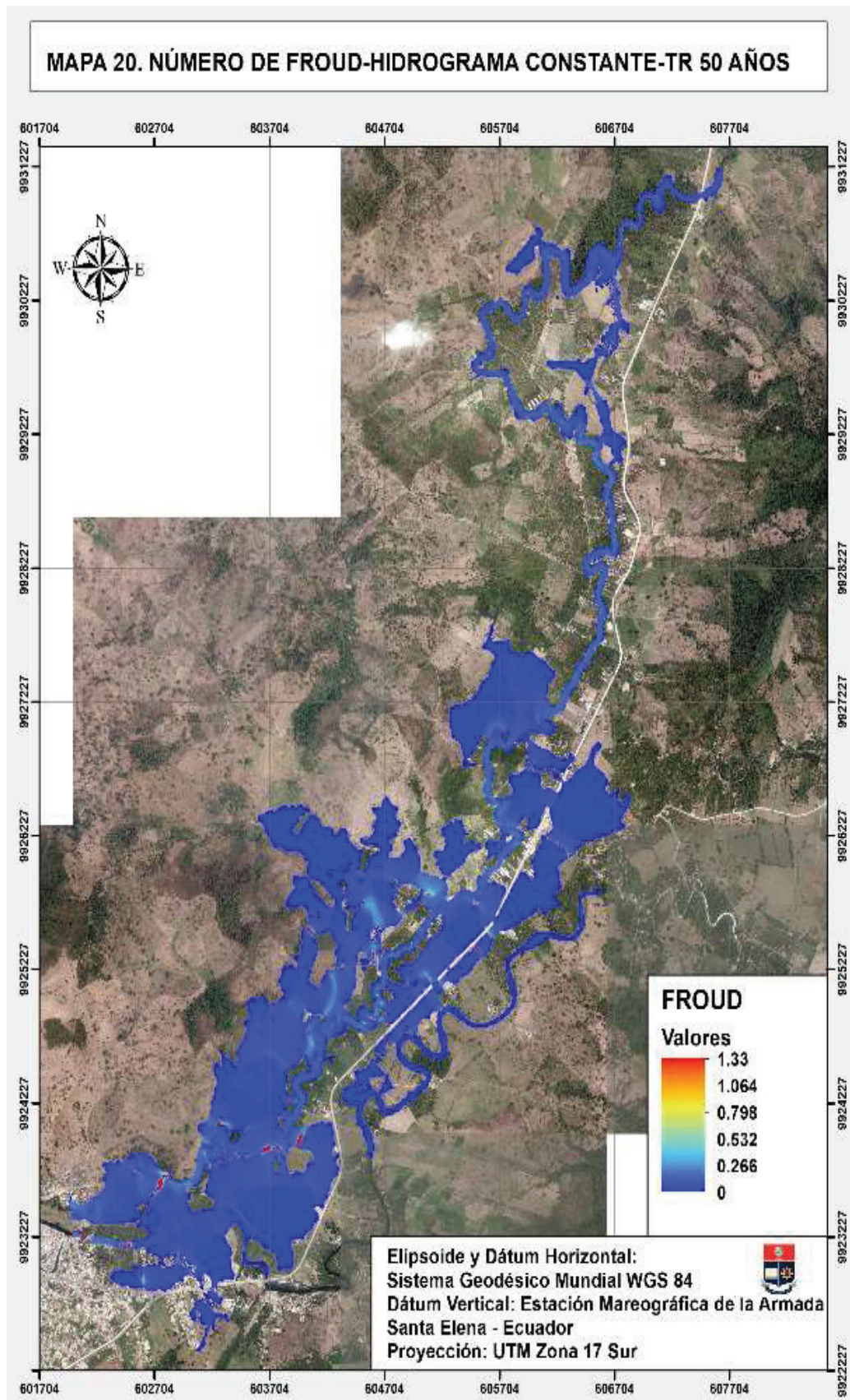




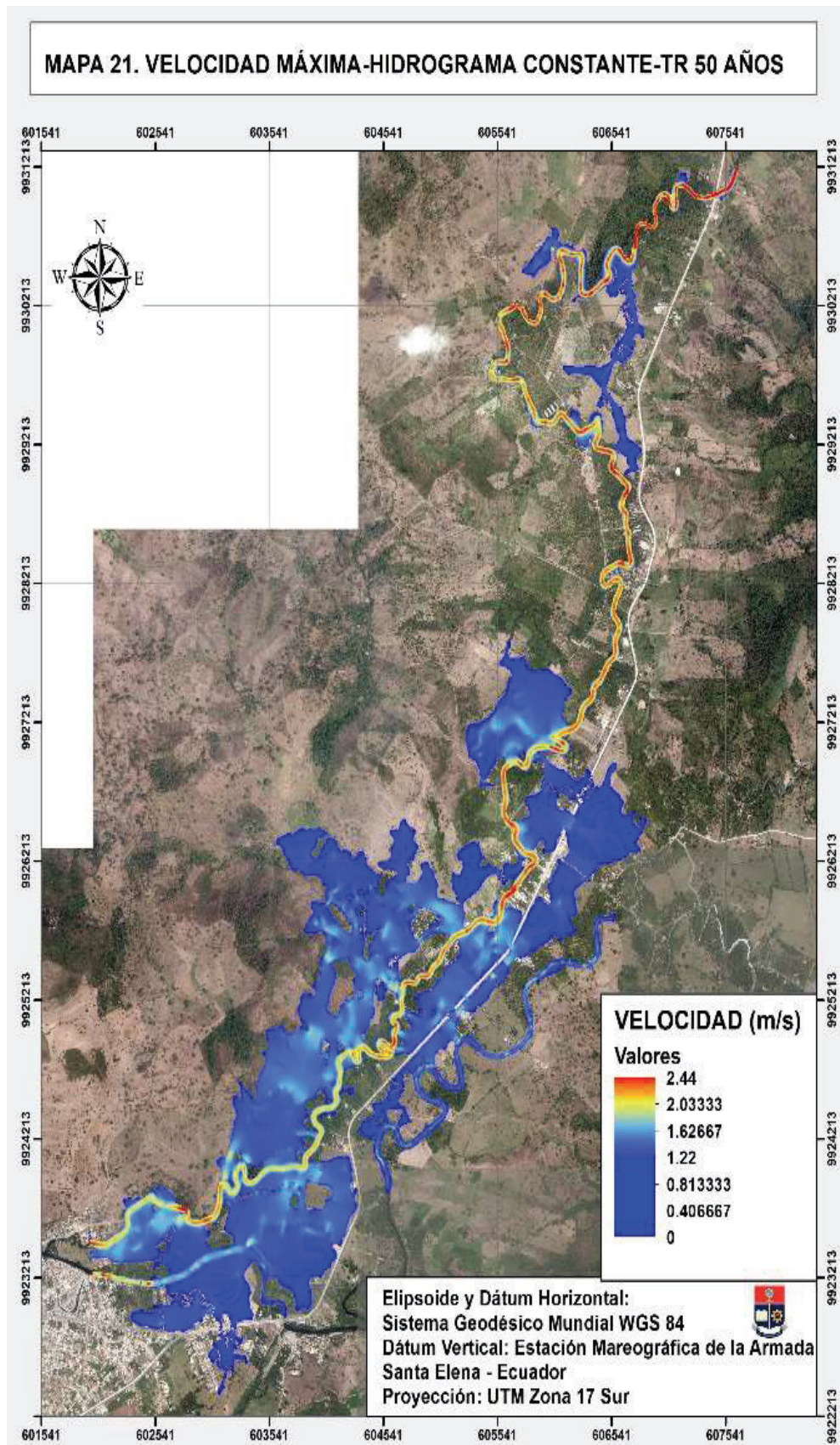


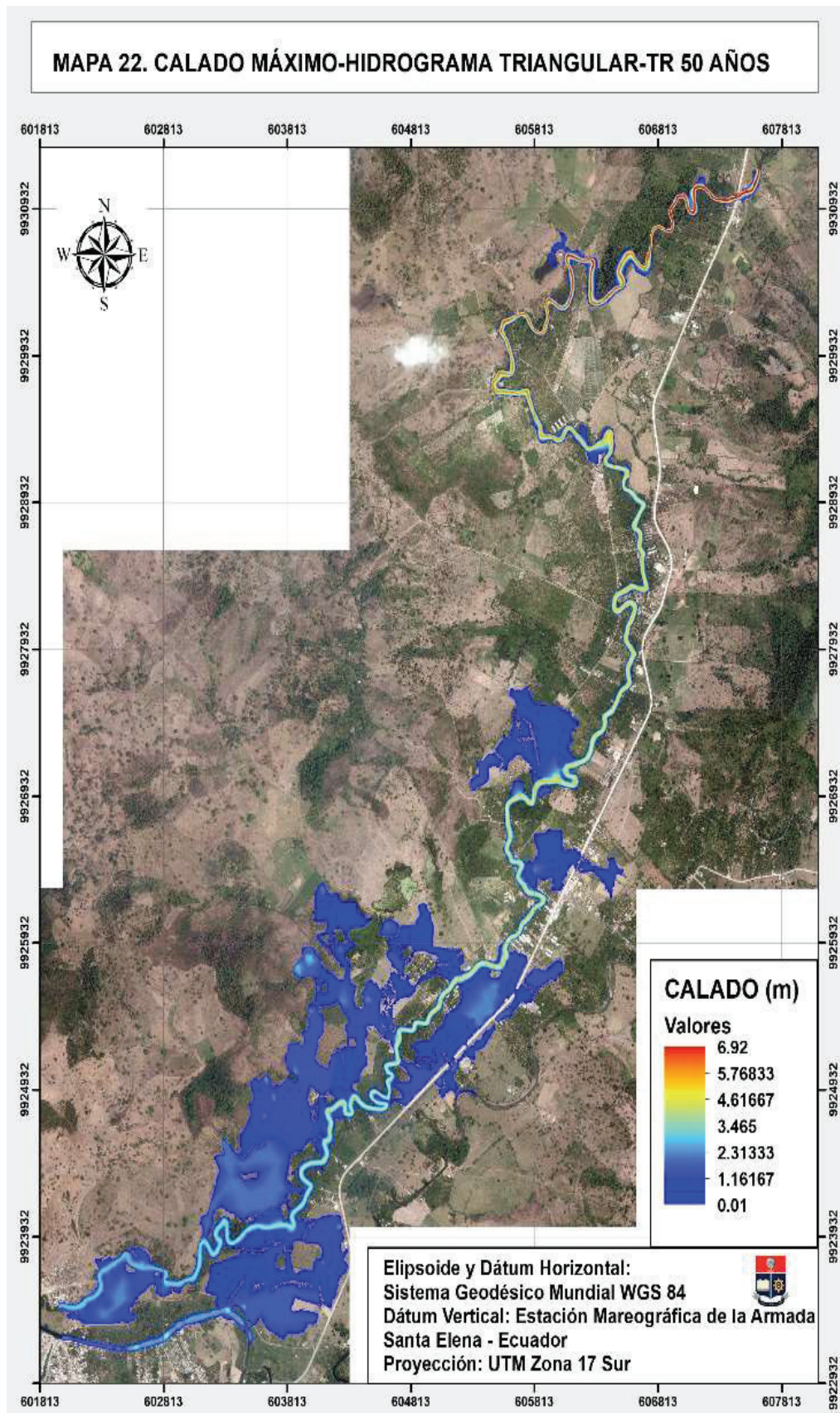


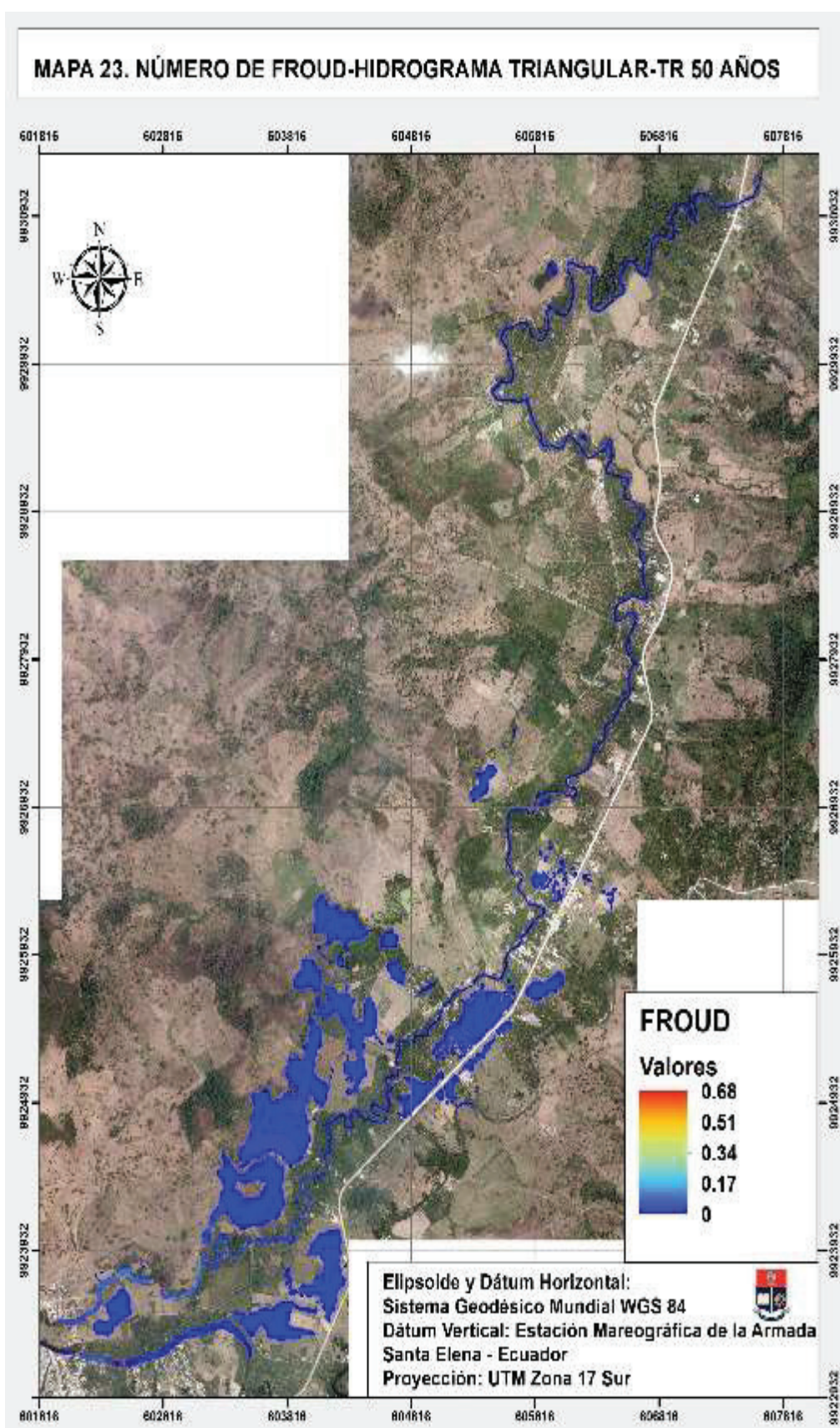


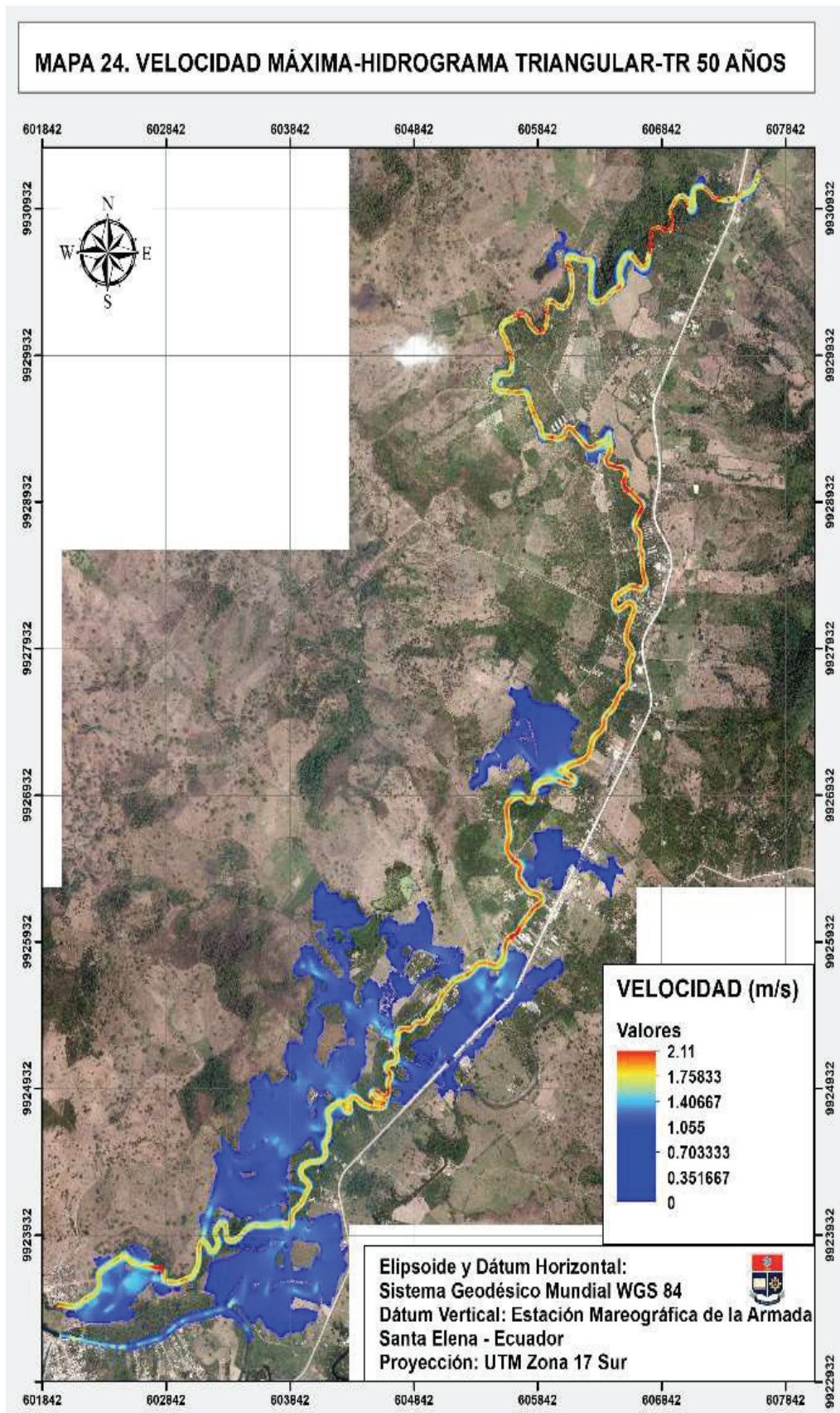


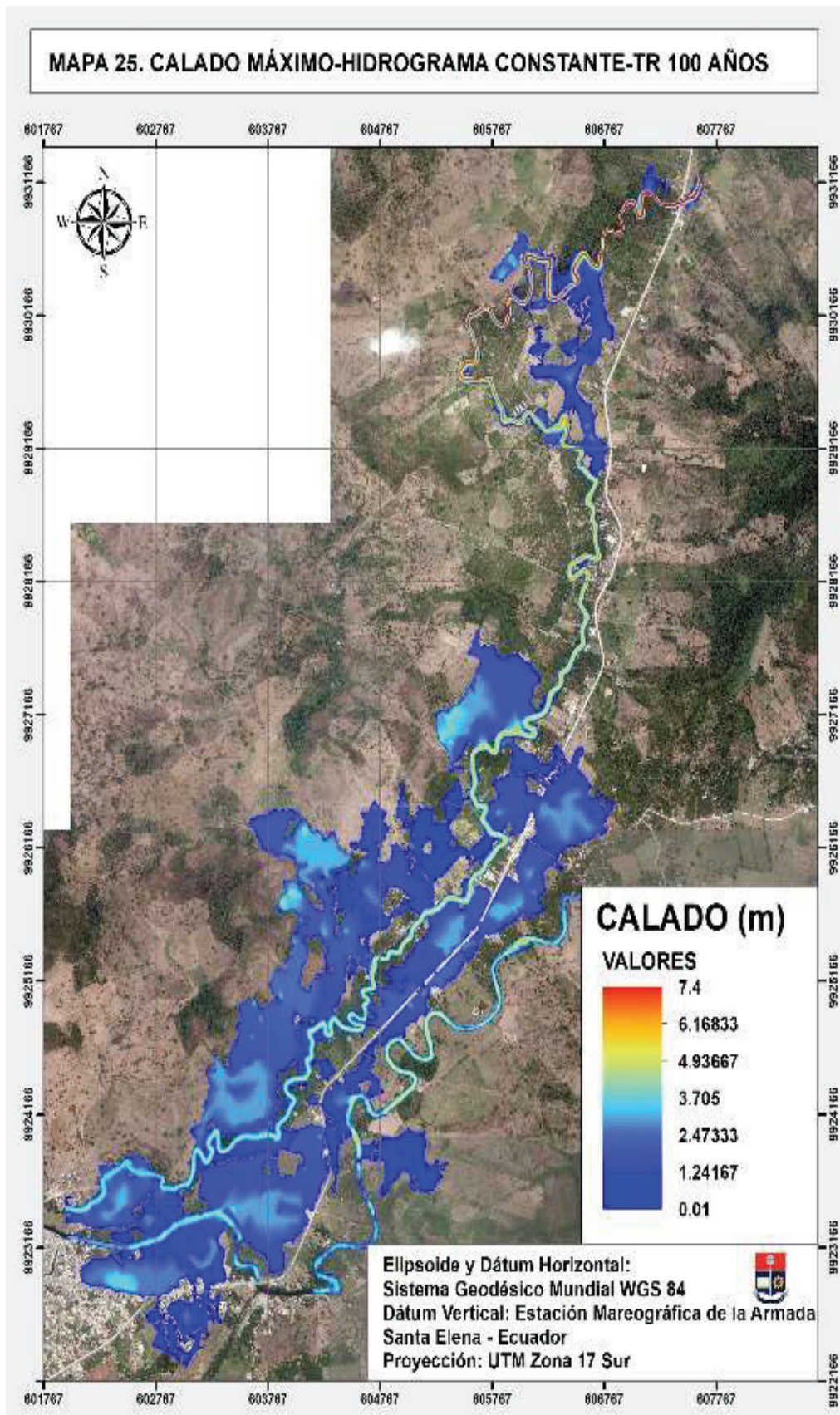


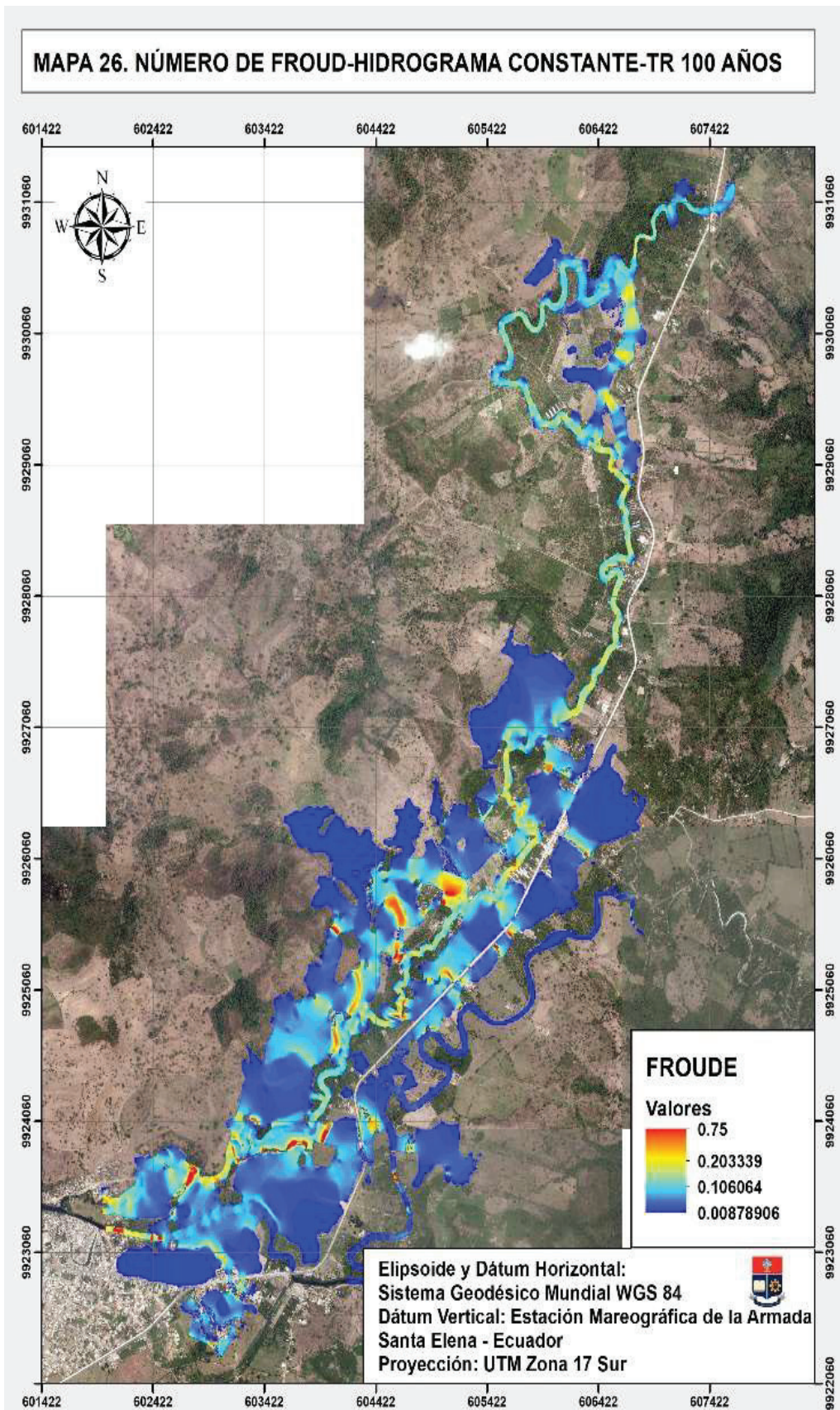


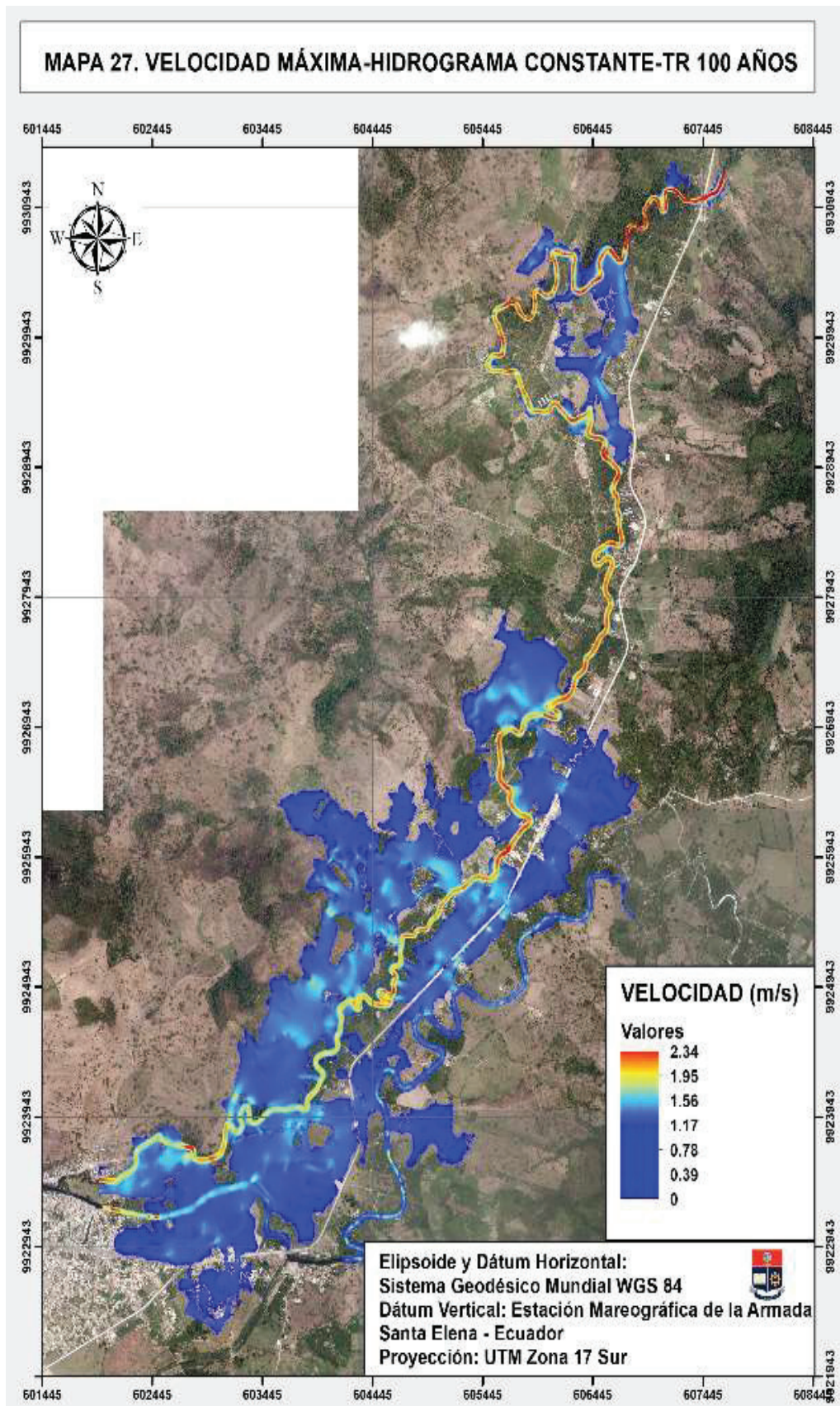


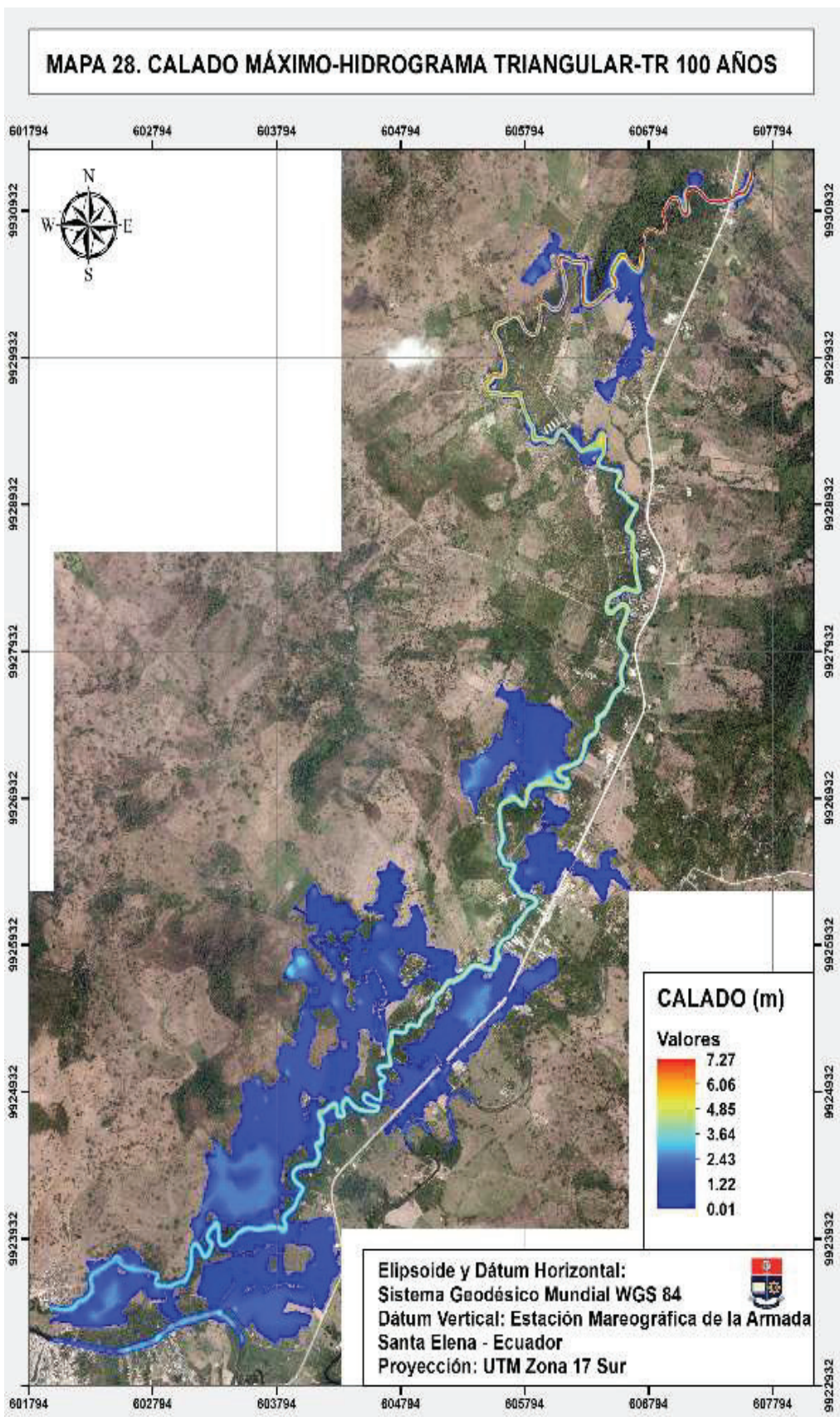




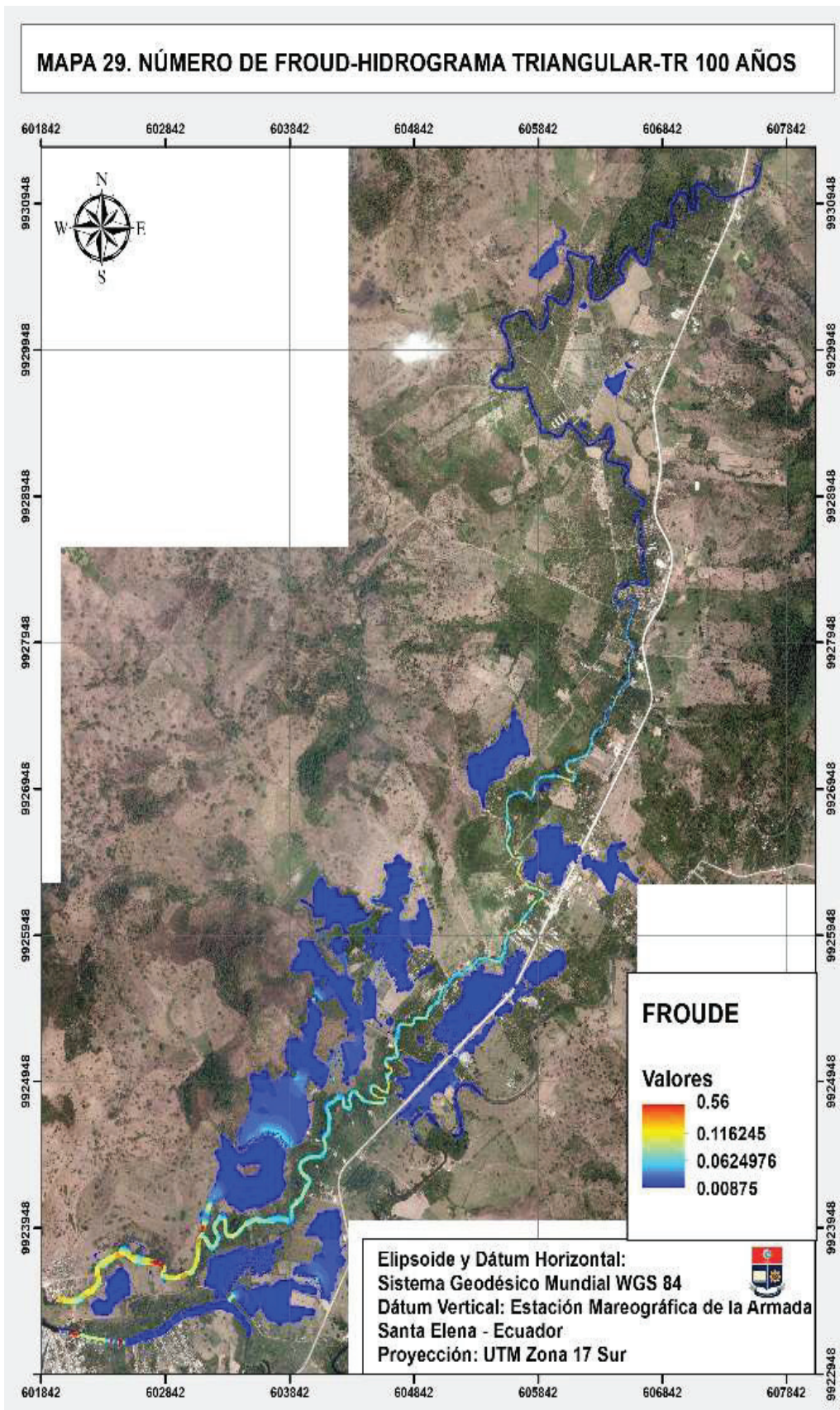


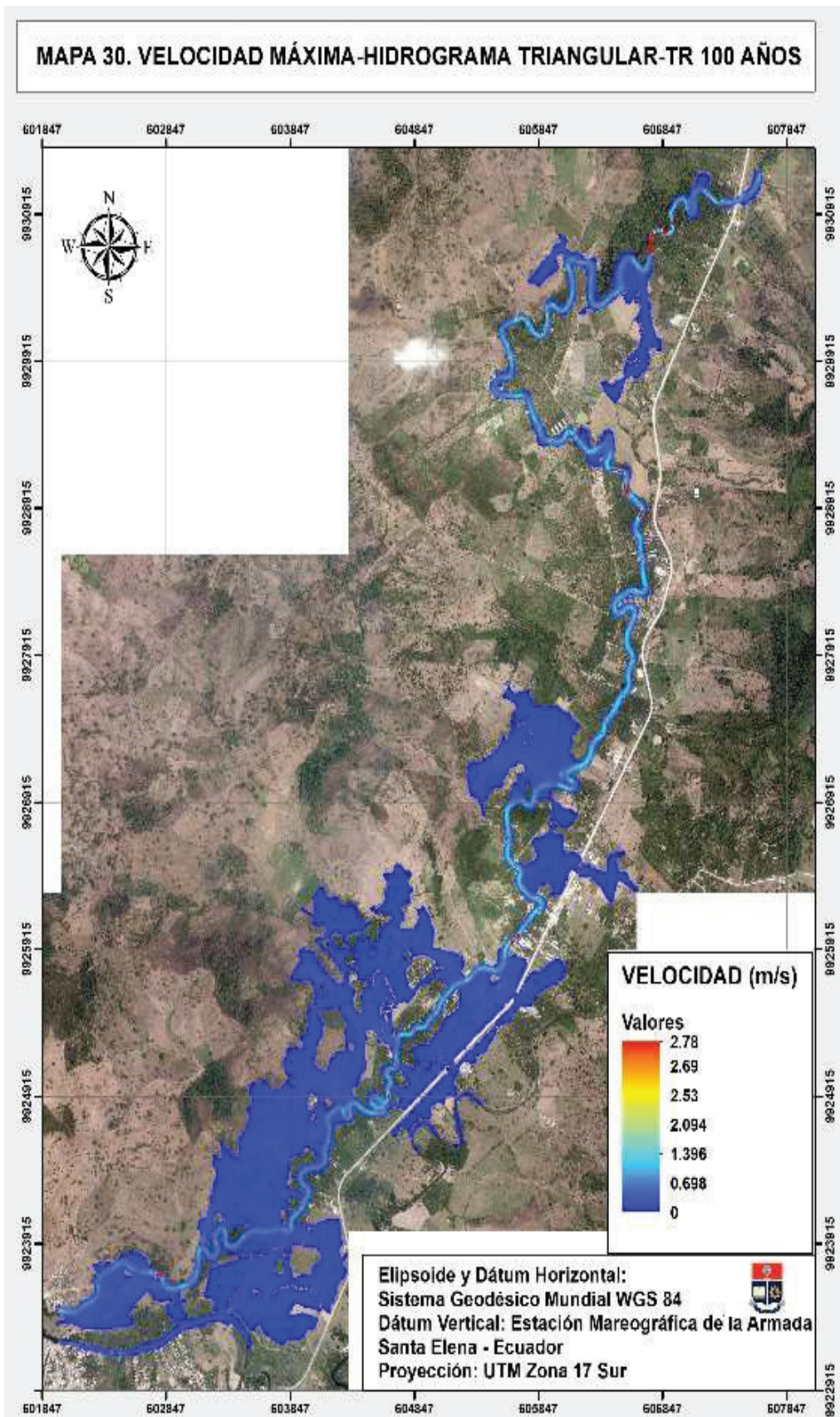












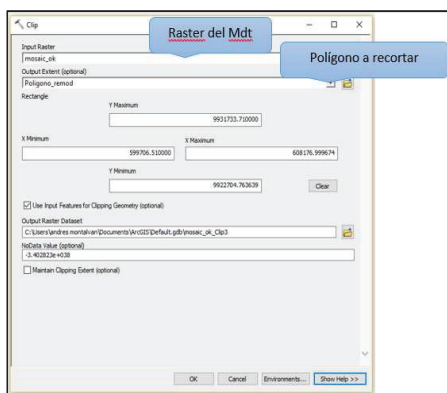
**ANEXO N° VI: GUIA PARA PARA PREPARACIÓN DE INFOMACIÓN BASE**

## Preparación de la información requerida por IBER

Una vez obtenida la información base, IBER requiere el área de simulación en formato ASCII, para esto, el análisis de información inicia con la obtención de la zona de estudio del Mdt se procede a recortar el ráster con el polígono del sector, mediante el programa Arcgis.



Primero en ArcToolbox / Data Management Tools / Ráster / Clip, seleccionando las opciones siguientes

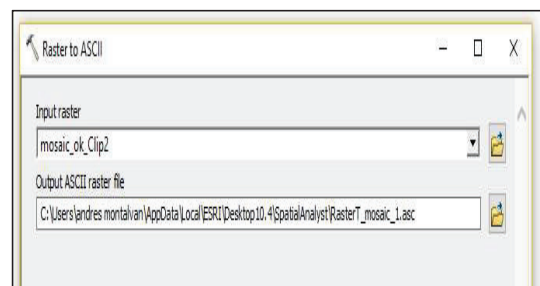


Seleccionado las opciones aceptar el clip en OK tenemos.

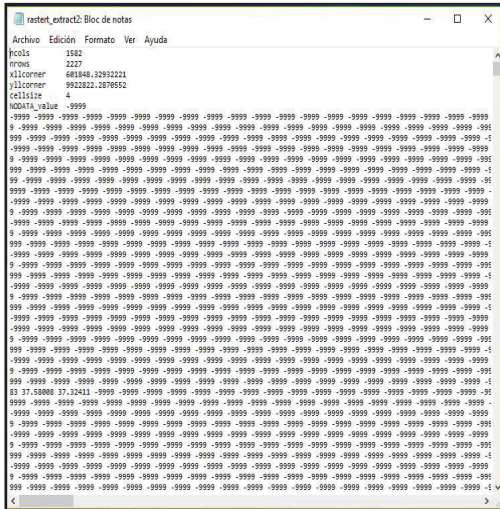


Posteriormente el formato ráster debe ser transformado a ASCII siguiendo los pasos: ArcToolbox / Conversion Tools / From Raster / Ráster to ASCII.

La ubicación para guardar el archivo transformado, se debe cambiar la extensión de TXT a ASC el cual corresponde a formato ASCII.



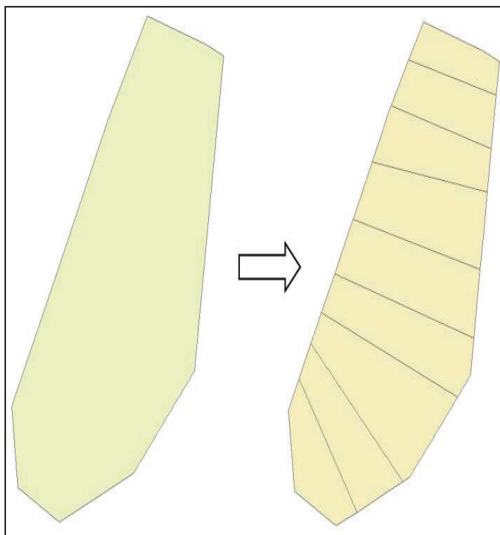
Buscar el archivo y abrirlo en bloc de notas debe salir de la siguiente manera, para finalmente ser utilizado en el programa IBER



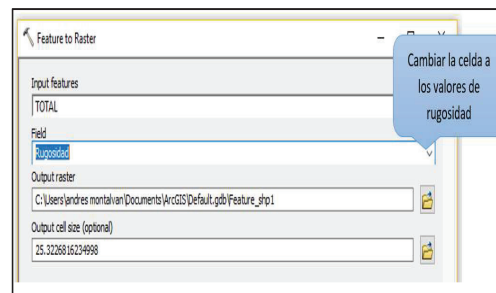
FID	Shape *	Id	Rugosidad
0	Polygon ZM	9	0.064
1	Polygon ZM	7	0.082
2	Polygon ZM	6	0.059
3	Polygon ZM	5	0.075
4	Polygon ZM	3	0.09
5	Polygon ZM	1	0.117
6	Polygon ZM	2	0.097
7	Polygon ZM	4	0.076
8	Polygon ZM	8	0.076

**Creación del ASCII correspondiente a la asignación del coeficiente de rugosidad de Manning**

Tenemos el polígono completo del área de simulación, se requiere dividirlo en tramos para cada rugosidad

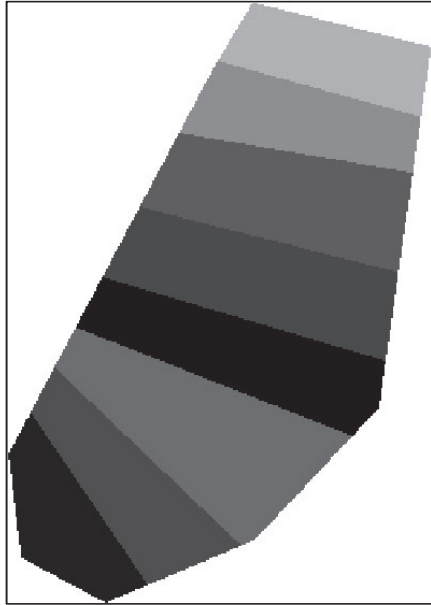


Se debe tener en cuenta que para transformar a formato ASCII el archivo debe ser ráster, posterior se debe transformar el polígono definido por tramos a un ráster siguiendo: ArcToolbox / Conversion Tool / To Ráster / Feature to Ráster



Teniendo como resultado el siguiente ráster, el cual de la misma manera se debe transformar a archivo ASCII siguiendo los pasos antes mencionados.

En la barra Editor / Star Editing y asignar a capa tramo el coeficiente de rugosidad en la tabla de atributos de la siguiente manera.



Finalmente, generado el formato ASCII de la rugosidad del área, se debe crear un archivo con extensión csv. (delimitado por comas) en el programa Excel con los mismos datos que se presentaron en la tabla de atributos del polígono por tramos la información del archivo debe

constar como se indica a continuación, por último, debe ser guardado en la misma carpeta donde se encuentra el archivo ASCII y con el mismo nombre que tiene.

	A	B
1	id	class_Names
2	0.117	Mat1
3	0.097	Mat2
4	0.09	Mat3
5	0.076	Mat4
6	0.075	Mat5
7	0.059	Mat6
8	0.082	Mat7
9	0.076	Mat8
10	0.064	Mat9

Nombre	Tipo	Tamaño
.prj	Archivo PRJ	1 KB
rugosida_fin	Archivo ASC	552 KB
rugosida_fin	Archivo de...	1 KB
rugosida_fin.prj	Archivo PRJ	1 KB

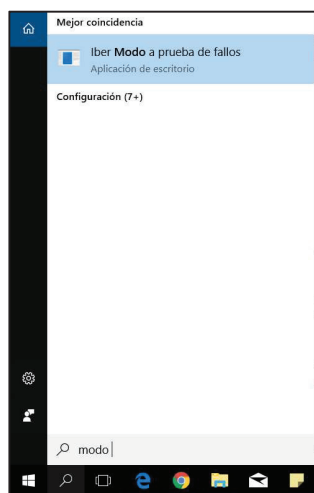
**ANEXO N° VII: GUIA DE USO DEL PROGRAMA IBER**

Con el propósito de generar una guía base que facilite el manejo del programa IBER, se presenta a continuación una guía con la cual se ejecutó el desarrollo de cada uno de los escenarios para la modelación de los caudales de crecida.

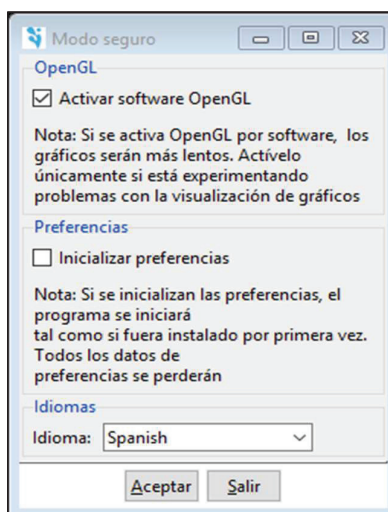
### Inicio del Programa

En el caso de que al iniciar el programa este se cierre de manera inesperada es necesario la ejecución de la extensión a prueba de fallos de la siguiente forma:

Inicio/ Buscar/ IBER modo a prueba de fallos/ Doble Clic

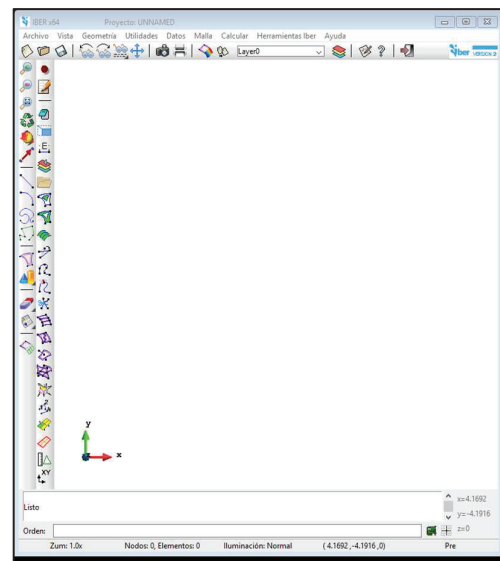


Una vez iniciado se desactiva las dos casillas que se muestra en la pantalla de ejecución del modo a prueba de fallos.



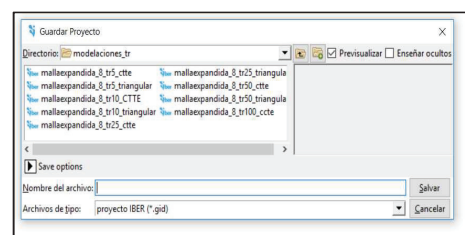
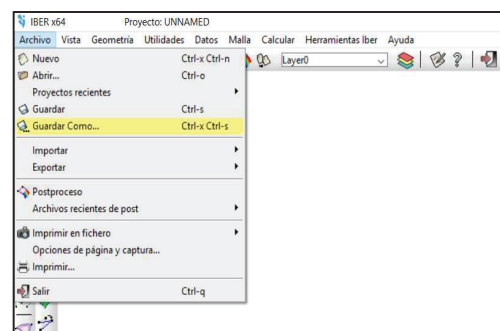
Desactivar casillas de selección / Clic en aceptar

Automáticamente se inicia una ventana de IBER la cual debe ser cerrada, y se debe ejecutar de forma normal el programa obteniendo la siguiente pantalla.



### Almacenar el Proyecto.

Archivo/guardar como.



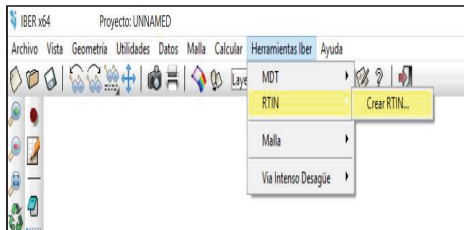


Asignar nombre al archivo/Salvar.

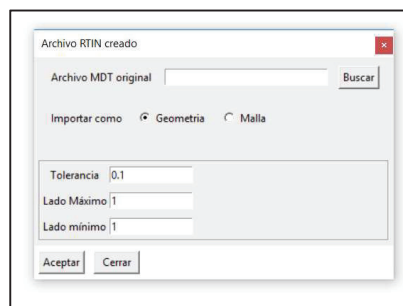
### Importar la geometría.

Una vez almacenado el archivo destino al proyecto se prosigue con la importación de la información que contiene a la geometría del terreno.

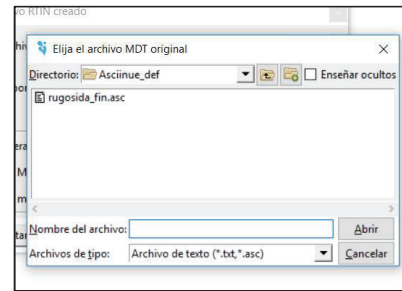
Herramientas IBER/ Rtin/ Crear Rtin



Realizando doble clic en la opción de crear Rtin se visualiza la pantalla donde se seleccionará la información del terreno en formato ASCII, además la opción asignar valores a los lados del cuadrilátero que formara la geometría tomando en consideración que estos valores deben ser múltiplos del valor del pixel que tiene el modelo digital de elevación.

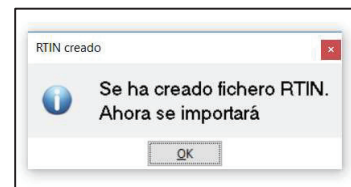


Clic en Buscar.

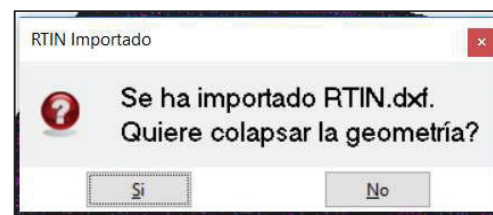
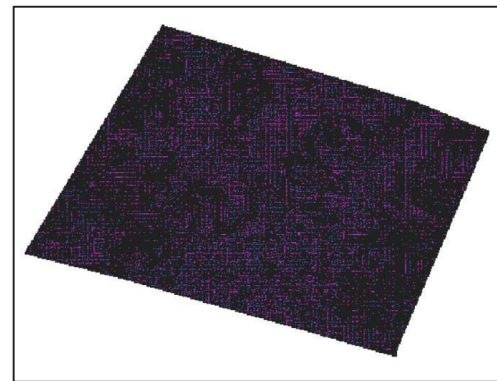


Seleccionar el archivo ASCII/ abrir.

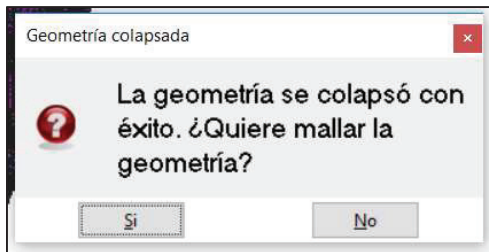
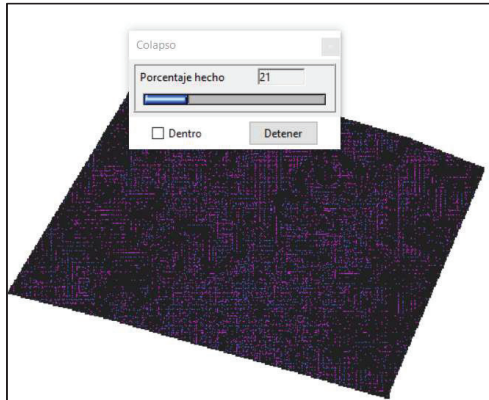
Una vez seleccionado el archivo correspondiente a la información del terreno este se cargará mostrando la siguiente ventana.



Clic en Ok y automáticamente se mostrará en pantalla la geometría cargada.



Clic en si/ Esperar a que el proceso termine.

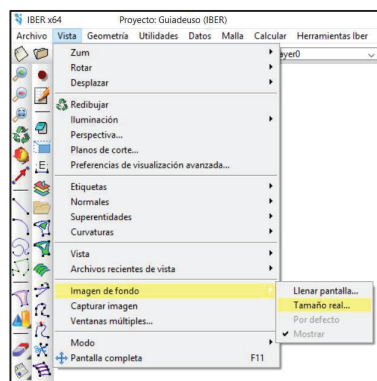


Elegir la opción no, debido a que IBER construirá con opciones establecidas por default la malla.

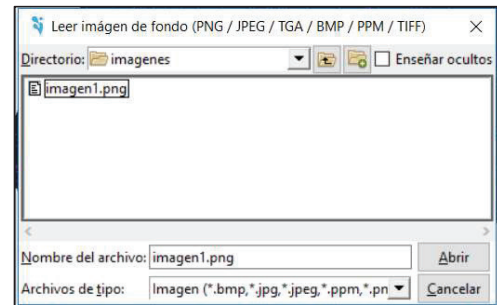
### Ingreso de imagen de fondo

Una opción adicional que facilitará el ingreso del flujo al modelo es adherir la imagen georreferenciada al fondo de la geometría.

Vista/Imagen de fondo/Tamaño real



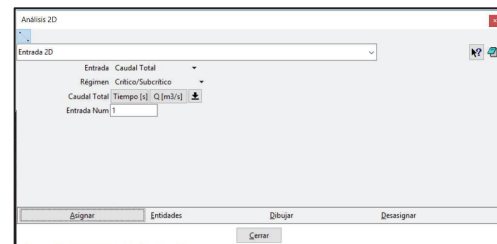
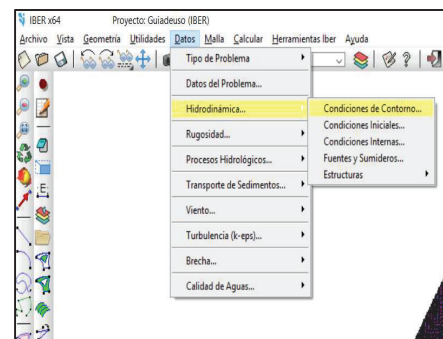
Al realizar clic en tamaño real se abrirá una ventana auxiliar donde se podrá buscar la imagen de fondo que se desea añadir.



Seleccionar imagen/ Clic en Abrir


### Ingreso de condiciones de contorno

Datos/ Hidrodinámica/ Clic en Condiciones de contorno



En el caso del desarrollo del presente trabajo la opción de ingreso de caudal de entrada se selecciona como caudal total.

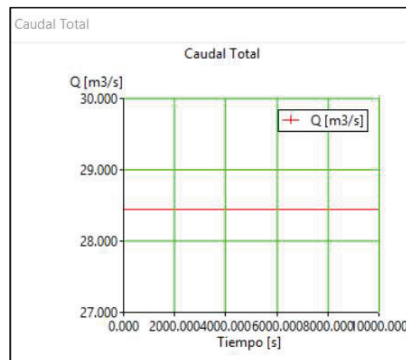
Para ingresar el valor del caudal modelar, se debe ingresar un hidrograma que recorra el modelo

mediante la selección del icono  que se muestra en la última imagen, al seleccionar este icono se despliega la siguiente pestaña.

Entrada Caudal Total		
Régimen Crítico/Subcrítico		
Caudal Total	Tiempo [s]	Q [m <sup>3</sup> /s]
Entrada Num	0.0	0.0

Entrada Caudal Total		
Régimen Crítico/Subcrítico		
Caudal Total	Tiempo [s]	Q [m <sup>3</sup> /s]
Entrada Num	10000	28.44

Para graficar el hidrograma ingresado se requiere dar clic en

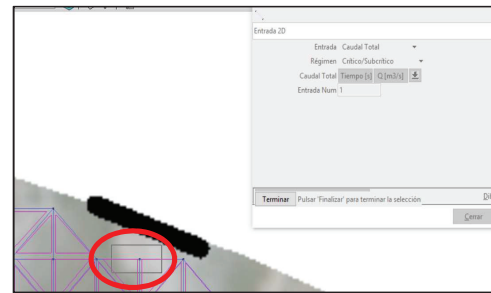


Para asignar el lugar de ingreso de caudal se debe dar clic en el botón de asignar de la siguiente ventana.

Análisis 2D		
Entrada 2D		
Entrada	Caudal Total	
Régimen	Crítico/Subcrítico	
Caudal Total	Tiempo [s]	Q [m <sup>3</sup> /s]
Entrada Num	1	


Asignar Entidades Dibujar Desasignar

Se procede a seleccionar el lugar donde se da el ingreso del flujo y se procede a dar clic en terminar o presionar la tecla "esc".



Selección del sitio de salida del flujo.

Análisis 2D
Entrada 2D

Clic en el símbolo  que permita desplegar el ingreso a las opciones de salida del flujo.

Análisis 2D
Entrada 2D
Entrada 2D
Salida 2D

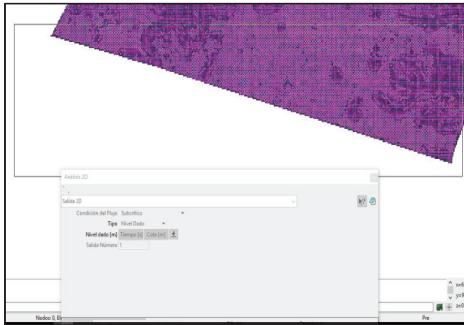
Una vez en la pestaña de la condición de salida se seleccionará:

- Condición de flujo: Subcrítico
- Tipo de salida: Nivel dado
- Número de salida: que corresponda en función del número de salidas de flujo que presente el modelo.

Análisis 2D	
Salida 2D	
Condición del Flujo	Subcrítico
Tipo	Nivel Dado
Nivel dado [m]	Tiempo [s]
Salida Número	1

Asignar Entidades Dibujar Desasignar

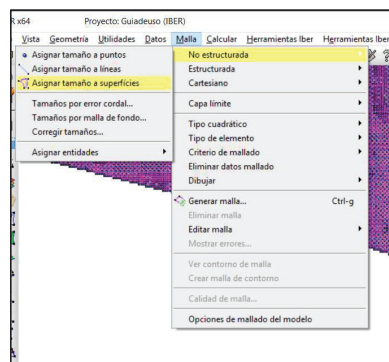
Para asignar el sitio de salida del modelo se debe dar clic en la opción de asignar.



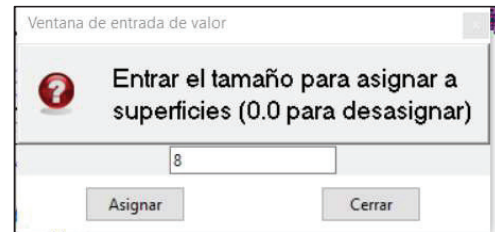
Se debe seleccionar el sitio localizándolo en la geometría ingresada y dar clic en la opción terminar o la tecla “esc”.

Construcción de la malla

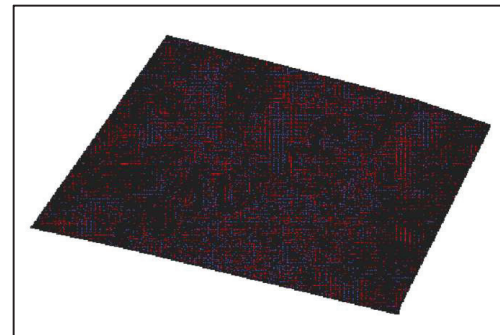
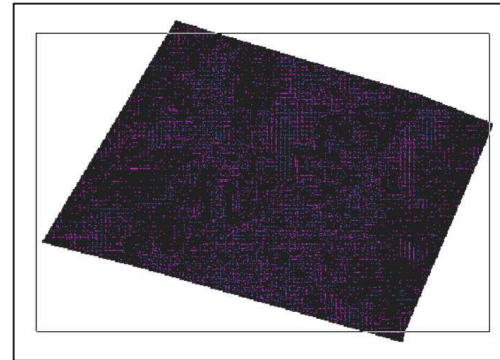
Malla/ No estructurada/ Clic en asignar tamaño a superficies.



Aparece la siguiente ventana donde se ingresa el tamaño de los elementos de la malla



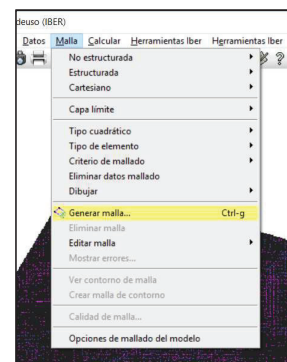
Clic en Asignar/seleccionar la geometría que corresponda al tamaño de malla asignada.



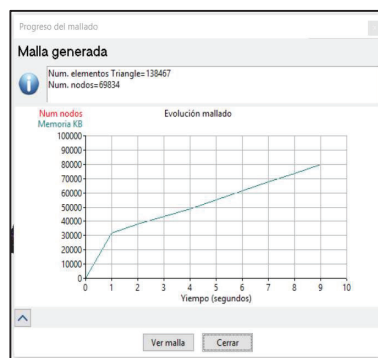
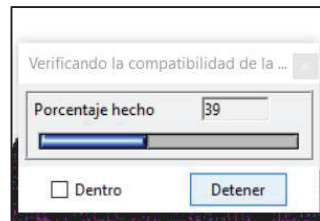
Una vez terminada la selección se presiona la tecla “esc”.

Para generar la malla se procede:

Malla/ Clic en generar malla.

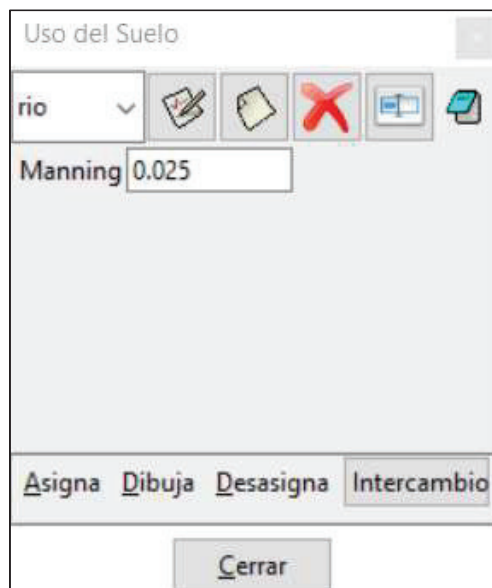


En la ventana que aparece se presiona el botón de aceptar, y esperar que se complete el porcentaje de construcción.



### Asignación de coeficientes de rugosidad

Datos/ Rugosidad / Clic en uso del suelo.

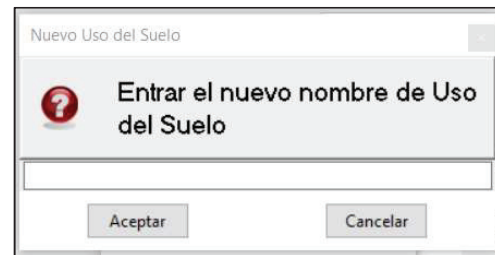


En el caso del presente modelo se debe ingresar materiales que no se encuentran asignados en la base del programa por ende es

necesario realizar el ingreso mediante el botón de nuevo uso de suelo correspondiente al símbolo



Se Ingresa el nombre que se le desea dar al Material y se procede a dar clic en aceptar.

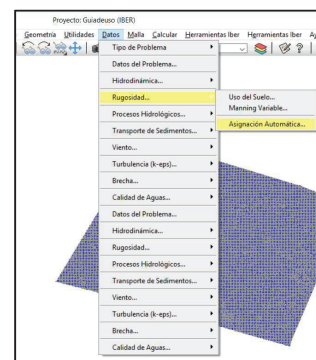


Se le asigna el valor correspondiente del coeficiente de rugosidad para el material añadido seleccionando el botón de edición



Para asignar el valor del coeficiente de rugosidad al modelo, en el caso de que presente varios se asigna mediante un archivo ASCII.

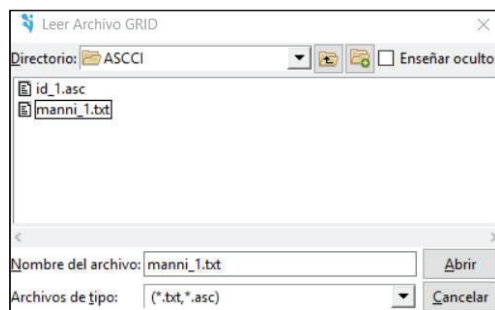
Datos/ Rugosidad / Clic en asignación automática.



Aparece una ventana donde se debe seleccionar la opción referente a un archivo ASCII y clic en aceptar.



De esta forma permite asignar el coeficiente de rugosidad a todo el modelo, asignando el valor para cada una de las zonas correspondiente a cada material.

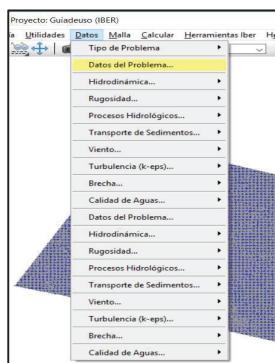


Seleccionar el archivo ASCII correspondiente y clic en abrir.

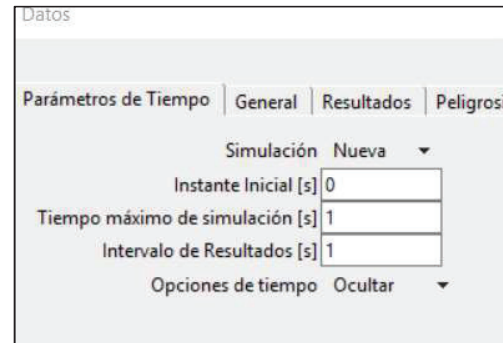
### Configuración de ejecución del Modelo

Para ingresar la configuración del modelo se procede de la siguiente forma.

Datos/ Clic en datos del problema

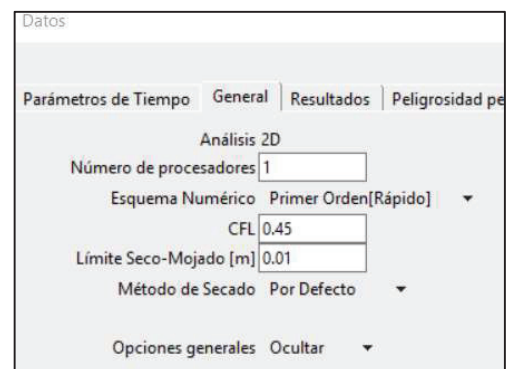


En la ventana que aparece damos clic en la pestaña referente a parámetros de tiempo



- Instante Inicial: 0 para todos los escenarios de simulación.
- Tiempo máx. de simulación: tiempo superior al tiempo ingresado en el hidrograma de entrada
- Intervalo de resultados: A criterio del usuario.

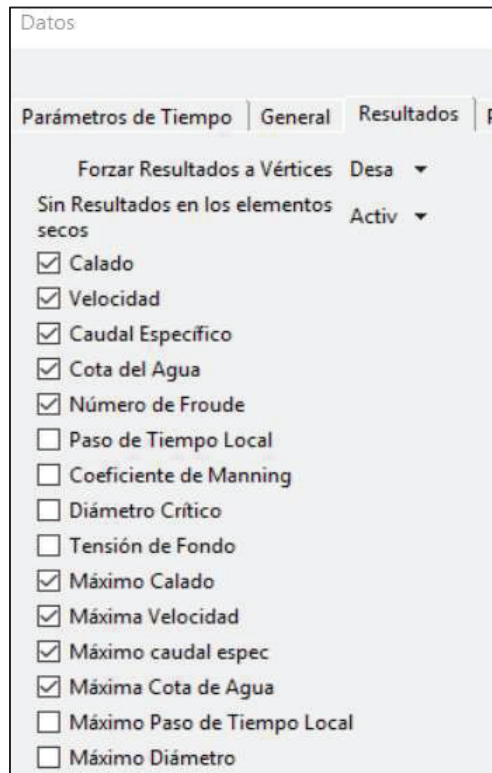
Una vez finalizada la configuración de los “parámetros de tiempo” se procede a configurar en la pestaña de “general”.



- Número de procesadores: el número máximo que disponga el ordenador para desarrollar la modelación en un tiempo óptimo.

El resto de los valores se deja configurado los establecidos por default.

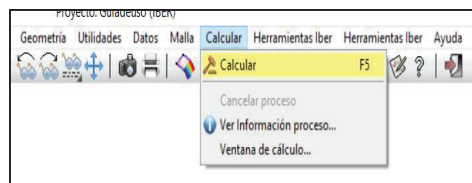
Finalmente se configura la pestaña de resultados, donde se selecciona los resultados que sean de nuestro interés.



### Cálculo de Resultados

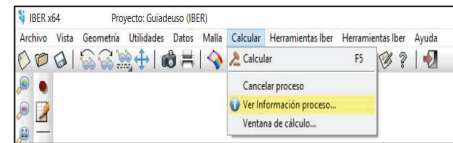
Para generar los resultados que se esperan del modelo se debe proceder a calcular resultados.

Calcular/ Calcular o presionar la tecla F5.



El avance del proceso se podrá observar ingresando a:

Calcular/ Ver información de proceso.



Información de salida para 'current' Wed Feb 21 00:02:29

90.0  
100.0

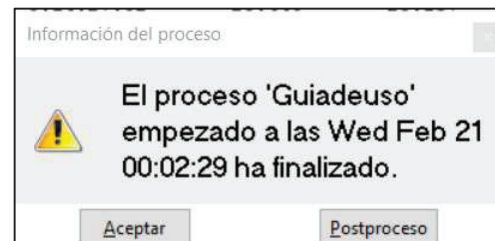
NUMERICAL SCHEME: Roe 1st Order

Initial volume: 0.64 m3

Simulation time	Time step	Time	Qin	Qout
0.000	1.00000	0:02:37:59	0.000	0.000
100.026	0.44235	0:02:41:59	28.440	0.000
200.353	0.47722	0:02:45:50	28.440	0.000
300.267	0.47850	0:02:49:56	28.440	0.000
400.183	0.48148	0:02:53:78	28.440	0.000
500.044	0.48274	0:02:57:55	28.440	0.000
600.314	0.48025	0:03:01:52	28.440	0.000
700.083	0.46611	0:03:05:45	28.440	0.000
800.305	0.45536	0:03:09:39	28.440	0.000
900.144	0.44252	0:03:13:46	28.440	0.000
1000.064	0.42840	0:03:17:58	28.440	0.000
1100.312	0.41677	0:03:22:14	28.440	0.000
1200.204	0.39520	0:03:26:68	28.440	0.000
1300.084	0.40017	0:03:31:04	28.440	0.000
1400.088	0.40462	0:03:35:28	28.440	0.000

Cerrar

Una vez finalizado el proceso de cálculo se puede visualizar los resultados seleccionando la opción correspondiente a postproceso en la siguiente ventana que aparece al finalizar el cálculo.



En la sección de postproceso se podrá observar y analizar los resultados que el usuario requiera.

**ANEXO N° VIII: DOCUMENTOS DE LEGALIDAD DE INFORMACIÓN**





ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

Quito, 1 de septiembre de 2017

Sr. Ing. Jaime Navarrete B.  
Coronel de Estado Mayor Conjunto  
Director del Instituto Geográfico Militar  
Presente.-

ASUNTO: PEDIDO DE INFORMACIÓN ACTUALIZADA.

De mi consideración:

Yo, Edison Andrés Montalván Alcívar con C.I.: 1721237137, es grato dirigirme a usted en mi calidad de estudiante de la Escuela Politécnica Nacional con el fin de solicitarle se sirva en disponer, se me proporcione la información lo más detallada posible que más adelante describo y que requiero para fines de investigación profesional correspondiente al trabajo de titulación cuyo tema es "Modelación numérica de los ríos afluentes al río Chone en la parroquia Santa Rita del cantón Chone para la generación de mapas de inundación" dentro del Proyecto.

- Cartografía del cantón Chone de la provincia de Manabí en formatos jpg. y cad.
- Ortofoto en formato sig. (shape) del polígono adjunto, sector de estudio a escala 1:5000.
- Curvas de nivel del cantón Chone, en formato sig. (shape) y cad.

Esperando su pronta respuesta le agradezco desde ya la atención a mi solicitud.

Atentamente,

Edison Andrés Montalván A.  
Ci.: 1721237137  
Telf.: 0995098777

INSTITUTO GEOGRÁFICO MILITAR  
SECRETARÍA GENERAL  
NOMBRE: VILMA CHANGOLUISA FIRMA:

FECHA: 01 SET. 2017 HORA: 12:05

ADJUNTO: SI  NO  3978100  
Cat 9103.  
H.T. 3031



ESCUELA POLITECNICA NACIONAL  
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y AMBIENTAL

Quito, 21 de Septiembre de 2017

Sr. Ing. Jaime Navarrete B.  
Coronel de Estado Mayor Conjunto  
Director del Instituto Geográfico Militar  
Presente.-

ASUNTO: PEDIDO DE INFORMACIÓN ACTUALIZADA.

De mi consideración:

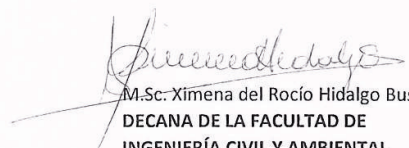
Mediante el presente me es grato dirigirme a usted en calidad de Decana de la Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental de la Escuela Politécnica Nacional, con la finalidad de solicitar información descrita a continuación:


- Cartografía del cantón Chone de la provincia de Manabí en formatos jpg.
- Ortofoto en formato sig. (shape) del polígono adjunto, sector de estudio a escala lo 1:5000.
- Curvas de nivel del cantón Chone, en formato sig. (shape).

Por lo cual solicito muy comedidamente se les proporcione a los estudiantes de la Carrera de Ingeniería Civil, Cristian Iván Guaya Caraguay con C.I.: 1105053480 y Edison Andrés Montalván Alcivar con C.I.: 1721237137, la información requerida para fines de investigación correspondiente al desarrollo del trabajo de titulación cuyo tema es "Modelación numérica de los ríos afluentes al río Chone en la parroquia Santa Rita del cantón Chone para la generación de mapas de inundación".

Esperando su pronta respuesta le agradezco desde ya la atención a mi solicitud.

Atentamente,

  
M.Sc. Ximena del Rocío Hidalgo Bustamante  
DECANA DE LA FACULTAD DE  
INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL  
FACULTAD DE INGENIERIA  
CIVIL Y AMBIENTAL  
  
DECANO  
Quito - Ecuador

INSTITUTO GEOGRAFICO MILITAR  
SECRETARIA GENERAL  
NOMBRE: .....  
FECHA: 21 SET. 2017  
ADJUNTO: SI  NO



**Acta de Entrega Recepción de información geográfica suscrita entre la Unidad Ejecutora MAGAP PRAT y la Escuela Politécnica Nacional**

En la ciudad de Quito, a los 26 días del mes de septiembre del año 2017, comparecen por una parte la Unidad Ejecutora MAGAP-PRAT, a través de Viviana Alarcón Urgilés; en su calidad de delegada de la UE; y, por otra parte la Escuela Politécnica Nacional, a través de Edison Andrés Montalván, en su calidad de estudiantes de la universidad; para la suscripción de la presente Acta de Entrega Recepción de información de geográfica generada y disponible dentro del Programa SIGTIERRAS.

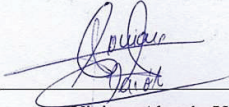
**CLÁUSULA PRIMERA.- OBJETO DE LA ENTREGA RECEPCIÓN:**

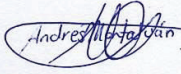
- 1.1 Cumpliendo con lo previsto en marco de los acuerdos y compromisos previstos en el Convenio de Cooperación celebrado entre la Unidad Ejecutora MAGAP PRAT y la Escuela Politécnica Nacional, esta Unidad entrega Ortofoto escala 1:5000 del área solicitada.
- 1.2 La Unidad Ejecutora entrega a la Escuela Politécnica Nacional información, sin costo alguno.
- 1.3 La Escuela Politécnica Nacional, deberá citar "*Ministerio de Agricultura y Ganadería; Proyecto Sistema Nacional de Información y Gestión de Tierras Rurales e Infraestructura Tecnológica –SIGTIERRAS*" como su correspondiente autor.
- 1.4 La información objeto de esta acta de entrega recepción no tiene el carácter de secreta, reservada o confidencial.

Después de revisar la información en las oficinas de la U.E. MAGAP-PRAT, la delegada de la Escuela Politécnica Nacional recibe a conformidad en el dispositivo de almacenamiento la información geográfica.

Unidad Ejecutora MAGAP-PRAT

Escuela Politécnica Nacional

  
 Viviana Alarcón Urgilés,  
 Delegada SIGTIERRAS  
 Ministerio de Agricultura, Ganadería,  
 Acuacultura y Pesca  
 SIGTIERRAS

  
 Edison Andrés Montalván  
 Estudiante  
 Escuela Politécnica Nacional

Adjunto copia de cédula y oficio de delegación



# INSTITUTO GEOGRÁFICO MILITAR

## ACTA ENTREGA - RECEPCIÓN

**SOLICITANTE:** ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL. FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y AMBIENTAL  
**PROVEEDOR:** Instituto Geográfico Militar

En la ciudad de Quito, a los 29 días del mes de noviembre del 2017, comparecen:

- El M.Sc. Ximena del Rocío Hidalgo Bustamante
- La Ing. Gabriela Chiriboga (Informador Geográfico I) por el Instituto Geográfico Militar

Conviene en celebrar la presente ACTA ENTREGA - RECEPCIÓN de los siguientes PRODUCTOS solicitados mediante oficio adjunto.

ORD	CANTIDAD	DETALLE	FORMATO	COSTO
1	-1-	CARTOGRAFIA ESCALA 1:5000	DIGITAL	0

\* Dando cumplimiento a la Ley Orgánica de Transparencia y Acceso a la Información Pública y siendo compromiso del IGM el apoyar con el desarrollo nacional a servicio del sector público

AREA: 6,6 km<sup>2</sup>

Los productos que por éste instrumento se entregan no podrán ser cedidos, ni difundidos a terceros por ningún medio conocido, entendiéndose como terceros a personas ajenas a la institución solicitante.

Para temas de estudio en el cual se utilice la información de los productos entregados, el representante de la institución solicitante, podrá entregar dichos productos exclusivamente a funcionarios de la misma.

Indicar que una vez terminado el proceso, debe ser remitido al IGM con la mención y fuente correspondiente

Se deja constancia que el material recibe el SOLICITANTE es de su entera satisfacción; ya que cumple con las características técnicas requeridas para el efecto.

Para ratificar de lo actuado, las partes firman el presente recibo, en dos ejemplares del mismo tenor y finalidad, en el lugar y fecha indicados.

Entrega:

Instituto Geográfico Militar

ING. GABRIELA CHIRIBOGA  
 GESTIÓN MERCADOTECNIA

Recibe:

DELEGADO RESPONSABLE

SR. EDISÓN MONTALVAN  
 DIRECTORA GESTIÓN DE LA INFORMACIÓN



ESCUELA POLITECNICA NACIONAL  
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y AMBIENTAL

Quito, 22 de Septiembre de 2017

Ing. Antonio Bermeo  
Director Ejecutivo SIG TIERRAS  
MAGAP  
Presente.-

ASUNTO: PEDIDO DE INFORMACIÓN ACTUALIZADA.

De mi consideración:

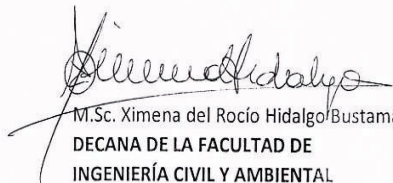
Mediante el presente me es grato dirigirme a usted en calidad de Decana de la Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental de la Escuela Politécnica Nacional, con la finalidad de solicitar información descrita a continuación:

- Ortofoto en formato sig. (shape) del polígono adjunto, sector de estudio a escala lo más detallada posible.

Por lo cual solicito muy comedidamente se les proporcione a los estudiantes de la Carrera de Ingeniería Civil, Cristian Iván Guaya Caraguay con C.I.: 1105053480 y Edison Andrés Montalván Alcivar con C.I.: 1721237137, la información requerida para fines de investigación correspondiente al desarrollo del trabajo de titulación cuyo tema es "Modelación numérica de los ríos afluentes al río Chone en la parroquia Santa Rita del cantón Chone para la generación de mapas de inundación".

Esperando su pronta respuesta le agradezco desde ya la atención a mi solicitud.

Atentamente,

  
M.Sc. Ximena del Rocío Hidalgo Bustamante  
DECANA DE LA FACULTAD DE  
INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

