



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIAPAS

“FACULTAD DE INGENIERIA CAMPUS I”

**“DETERMINACIÓN HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA DEL CAUCE DEL
RIO GRIJALVA DESDE LA UNIÓN DE LOS RÍOS SANTO DOMINGO
Y SUCHIAPA CON EL GRIJALVA HASTA EL PUENTE ÁNGEL
ALBINO CORZO, UTILIZANDO INFORMACIÓN ACTUALIZADA”**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

**MAESTRO EN INGENIERIA
(CON FORMACION EN HIDRAULICA)**

PRESENTA

RICARDO RODRIGUEZ DIAZ C140015

DIRECTORES DE TESIS

DR. MIGUEL ÁNGEL AGUILAR SUÁREZ

TUXTLA GUTIERREZ, CHIAPAS; AGOSTO 2023





Tuxtla Gutiérrez, Chiapas
07 de agosto del 2023
Oficio No. F.I.01.1341/2023

C. RICARDO RODRÍGUEZ DÍAZ
ALUMNO DE LA MAESTRÍA EN INGENIERÍA
CON FORMACIÓN EN HIDRÁULICA
PRESENTE.


Con base en el Reglamento de Evaluación Profesional para los egresados de la Universidad Autónoma de Chiapas, y habiéndose cumplido con las disposiciones en cuanto a la aprobación por parte de los integrantes del jurado en el contenido de su Tesis Titulada:

"DETERMINACIÓN HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA DEL CAUCE DEL RÍO GRIJALVA DESDE LA UNIÓN DE LOS RÍOS SANTO DOMINGO Y SUCHIAPA CON EL GRIJALVA HASTA EL PUENTE ÁNGEL ALBINO CORZO, UTILIZANDO INFORMACIÓN ACTUALIZADA"


CERTIFICO el **VOTO APROBATORIO** emitido por este jurado, y autorizo la impresión de dicho trabajo para que sea sustentado en su Examen Profesional para obtener el grado de Maestro en Ingeniería con Formación en Hidráulica.

Sin otro particular, reciba un cordial saludo.

ATENTAMENTE
"POR LA CONCIENCIA DE LA NECESIDAD DE SERVIR"


DR. OMAR ANTONIO DE LA CRUZ COURTIS
ENCARGADO DE DIRECCIÓN




Ccp. Dr. Humberto Miguel Sansebastián García. Coordinador de Investigación y Posgrado. Facultad de Ingeniería, Campus I. UNACH.
Asiivo/minutario
@ACCHMSG/tpg*



Código: FO-113-05-05

Revisión: 0

CARTA DE AUTORIZACIÓN PARA LA PUBLICACIÓN ELECTRÓNICA DE LA TESIS DE TÍTULO Y/O GRADO.

El (la) suscrito (a) Ricardo Rodríguez Díaz

Autor (a) de la tesis bajo el título de "~~Determinación hidrológica e hidráulica del cauce del río Cuzililla desde la unión de los ríos Santo Domingo y Suchapa con el grifalva hasta el puente Angel Albino Corzo, utilizando información actualizada~~" presentada y aprobada en el año 2023 como requisito para obtener el título o grado de Maestro en ingeniería (con formación en hidrología), autorizo licencia a la Dirección del Sistema de Bibliotecas Universidad Autónoma de Chiapas (SIBI-UNACH), para que realice la difusión de la creación intelectual mencionada, con fines académicos para su consulta, reproducción parcial y/o total, citando la fuente, que contribuya a la divulgación del conocimiento humanístico, científico, tecnológico y de innovación que se produce en la Universidad, mediante la visibilidad de su contenido de la siguiente manera:

- Consulta del trabajo de título o de grado a través de la Biblioteca Digital de Tesis (BIDITE) del Sistema de Bibliotecas de la Universidad Autónoma de Chiapas (SIBI-UNACH) que incluye tesis de pregrado de todos los programas educativos de la Universidad, así como de los posgrados no registrados ni reconocidos en el Programa Nacional de Posgrados de Calidad del CONACYT.
- En el caso de tratarse de tesis de maestría y/o doctorado de programas educativos que sí se encuentren registrados y reconocidos en el Programa Nacional de Posgrados de Calidad (PNPC) del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), podrán consultarse en el Repositorio Institucional de la Universidad Autónoma de Chiapas (RIUNACH).

Tuxtla Gutiérrez, Chiapas; a los 16 días del mes de Agosto del año 2023.


Ricardo Rodríguez Díaz

Nombre y firma del Tesista o Tesistas

DEDICATORIA

*A mis padres, Romeo y María Elena, por apoyarme, por sacarme adelante y enseñarme lo importante de la vida.
A mis padres*

A mi hermano David, por estar siempre conmigo en todos los momentos, por alentarme a seguir adelante y siempre cuidarme.

A mi familia; A mis abuelitos, tías, tíos, primos por todos esos recuerdos que me han hecho lo que soy.

A Dios, por la vida, por la salud, por la familia, gracias por todo.

AGRADECIMIENTOS

“A la Universidad Autónoma de Chiapas, por permitirme cursar y concluir mis estudios en la mejor universidad para alcanzar una meta más en mi vida”.

“A la Facultad de Ingeniería, por todo el apoyo brindado a lo largo de este trabajo”.

“Al Dr. Miguel Ángel Aguilar Suarez, por su tiempo, dedicación y atenciones brindadas para la elaboración de esta tesis”.

“Se agradece al Fondo Institucional de Fomento Regional para el Desarrollo Científico, Tecnológico y de Innovación (FORDECYT) del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo al proyecto 297606 “Análisis de riesgos hidrometeorológicos en una cuenca muy urbanizada con diferentes niveles de resiliencia, y de las tendencias de cambio climático de la región de su localización utilizando imágenes satelitales” por la beca brindada en el periodo de estudio 2019- 2020, para estudiar el posgrado denominado como “Maestría en ingeniería con terminación en Hidráulica”.

INDICE

INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVO GENERAL	3
OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	3
CAPÍTULO 1.- HIDROGRAFÍA Y LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA DE LA ZONA EN ESTUDIO	4
CAPÍTULO 2.- INFORMACIÓN HIDROMÉTRICA Y CLIMATOLÓGICA	10
2.1.- ESTACIONES HIDROMÉTRICAS DENTRO DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	10
2.2.- ESTACIONES CLIMATOLÓGICAS DENTRO DE LA ZONA DE ESTUDIO	11
CAPITULO 3.- ANÁLISIS DE LOS DATOS DE PRECIPITACIONES Y CAUDALES	12
3.1.- PROCESO DE SELECCIÓN DE ESTACIONES CLIMATOLÓGICAS	12
3.2.- ANÁLISIS DE HOMOGENEIDAD E INDEPENDENCIA DE LOS DATOS DE CAMPO.....	12
3.2.1.1.- Prueba de homogeneidad de Helmert.....	13
3.2.1.2.- Prueba de homogeneidad de las Secuencias	13
3.2.1.3.- Prueba de homogeneidad de Cramer	14
CAPÍTULO 4.- HIDROLOGÍA DE LA ZONA EN ESTUDIO	17
4.1.- AJUSTE DE LOS DATOS HIDROMÉTRICOS A UN MODELO DE PROBABILIDADES.....	17
4.2.- CÁLCULOS DE LOS GASTOS DE DISEÑO EN LA CUENCA SIN HIDROMETRÍA O NO AFORADAS	26
4.3.- RESULTADOS DE LOS MÉTODOS DE HOMOGENEIDAD REGIONAL	30
4.4.- RESULTADOS Y CONCLUSIONES DE LA REGIONALIZACIÓN	33
4.5.- ESTACIONES REGIONALIZADAS	35
4.6.- TRANSFORMACIÓN DE LA PRECIPITACIÓN EN GASTO.....	38
4.7.- RESULTADOS DE LA HIDROLOGÍA: GASTOS DE DISEÑO ASOCIADOS A LOS PERIODOS DE RETORNO DE 2, 5, 10, 20, 20, 50, 100, 200, 500 Y 1000 AÑOS DE TODA LA CUENCA DESDE LA PRESA LA ANGOSTURA HASTA EL CIUDAD DEL AGUA ..	43
4.8.- RESULTADOS DE LOS TRÁNSITOS DE LOS CAUDALES HASTA CIUDAD DEL AGUA	46
CAPÍTULO 5.- CREACION DE UN MODELO HIDRAULICO EN 2D CON EL SOFTWARE IBER 3.2.2.....	47
5.1 CREACIÓN DEL MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES.....	47
CAPÍTULO 6.- DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA IBER VERSIÓN 3.2.2	50
6.1.- PROGRAMA IBER 3.2.2	50
6.2.- PRE-PROCESOS.....	50
6.3.- CÁLCULOS	52
6.4.- POST-PROCESOS	53
6.5.- CONSIDERACIONES REALIZADAS EN LAS SIMULACIONES	54
CAPÍTULO 7.- SIMULACIÓN DE LOS CAUDALES ASOCIADOS A LOS PERIODOS DE RETORNO DE 2, 5, 20, 50, 100, 200, 500 Y 1000 AÑOS.	56
7.1.- RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES SIN ESTRUCTURA.....	56
7.1.- SIMULACIÓN PARA UN TR DE 2 AÑOS.....	57
7.2.- SIMULACIÓN PARA UN TR DE 5 AÑOS.....	58
7.3.- SIMULACIÓN PARA UN TR DE 10 AÑOS.....	59
7.4.- SIMULACIÓN PARA UN TR DE 20 AÑOS.....	60
7.5.- SIMULACIÓN PARA UN TR DE 50 AÑOS.....	61
7.6.- SIMULACIÓN PARA UN TR DE 100 AÑOS.....	62
7.7.- SIMULACIÓN PARA UN TR DE 200 AÑOS.....	63
7.8.- SIMULACIÓN PARA UN TR DE 500 AÑOS.....	64
7.9.- SIMULACIÓN PARA UN TR DE 1000 AÑOS.....	65
CAPITULO 8.- RESULTADOS DE LOS TIRANTES Y VELOCIDADES DE LAS SIMULACIONES EN EL PUNTO DE ENTRADA AL CAÑÓN DEL SUMIDERO	66
8.1.- CONSIDERACIONES DE LOS NIVELES ACTUALES Y DE OPERACIÓN MÍNIMA DE ENTRE LAS PRESAS LA ANGOSTURA Y CHICOASÉN.	66
8.2.- RESULTADOS DE TIRANTES.....	68
8.3.- RESULTADOS DE VELOCIDADES	70

CONCLUSIONES.....	77
REFERENCIAS	78
ANEXOS	81
ANEXO FOTOGRÁFICO	89

INDICE DE FIGURAS

FIGURA 1.1.- UBICACIÓN DE LA CUENCA TOTAL EN EL ESTADO DE CHIAPAS, CREACIÓN PROPIA 2023 MATERIAL INEGI (ELABORACIÓN PROPIA)	4
FIGURA 1.2.- MDE DE LA CUENCA TOTAL, DESDE LA PRESA ANGOSTURA HASTA CIUDAD DEL AGUA. MATERIAL INEGI (ELABORACIÓN PROPIA 2023).....	5
FIGURA 1.3.- HIDROGRAFÍA DE LA CUENCA EN ESTUDIO. MATERIAL INEGI (ELABORACIÓN PROPIA 2023)	5
FIGURA 1.4.- USOS DE SUELO Y VEGETACIÓN DE LA CARTA SERIE VI OBTENIDA DE INEGI (ELABORACIÓN PROPIA)	6
FIGURA 1.5.- EDAFOLOGÍA DE LA CARTA SERIE II OBTENIDA DE INEGI. (ELABORACIÓN PROPIA)	6
FIGURA 1.6.- CLIMATOLOGÍA DE LA CUENCA EN ESTUDIO OBTENIDA DE INEGI. (ELABORACIÓN PROPIA)	7
FIGURA 1.7.- ESTACIONES CLIMATOLÓGICAS ACTIVAS E INACTIVAS, OBTENIDA BASE DE DATOS INEGI Y CLICOM. (ELABORACIÓN PROPIA 2023)	8
FIGURA 1.8.- ESTACIONES HIDROMÉTRICAS LOCALIZADAS DENTRO DE LA CUENCA. OBTENIDA DE INEGI Y CLICOM (ELABORACIÓN PROPIA 2023).....	9
FIGURA 2.1. SE MUESTRA LA CUENCA ANGOSTURA-CHICOASÉN CON LAS ESTACIONES HIDROMÉTRICAS Y CLIMATOLÓGICAS OPERADAS POR LA COMISIÓN FEDERAL DE ELECTRICIDAD. FUENTE: COMISIÓN FEDERAL DE ELECTRICIDAD. IMAGEN OBTENIDA DE CFE EN 2014, ACTUALMENTE NO EXISTE LA LIGA.	10
FIGURA 2.2. ESTACIONES CLIMATOLÓGICAS DENTRO DE LA CUENCA EN ESTUDIO Y EN SUS CERCANÍAS, OBTENIDA DE INEGI Y CLICOM (ELABORACIÓN PROPIA 2023)	11
FIGURA 3.1 ESTACIONES CLIMATOLÓGICAS EN UN RADIO DE 30 KM DENTRO Y CERCANAS A LAS CUENCAS NO AFORADAS. OBTENIDA DE INEGI (ELABORACIÓN PROPIA)	12
FIGURA 4.1. FUNCIÓN DOBLE GUMBEL AJUSTADA CON EL PROGRAMA AX A LA MUESTRA DE DATOS DE LA ESTACIÓN HIDROMÉTRICA (30212) SANTO DOMINGO. (CREACIÓN PROPIA 2023)	18
FIGURA 4.2. FUNCIÓN DOBLE GUMBEL AJUSTADA CON EL PROGRAMA AX A LA MUESTRA DE DATOS DE LA ESTACIÓN HIDROMÉTRICA (30020) BOQUERÓN, SUCHIAPA. (ELABORACIÓN PROPIA 2023).....	20
FIGURA 4.3. FUNCIÓN DOBLE GUMBEL AJUSTADA CON EL PROGRAMA AX A LA MUESTRA DE DATOS DE LA ESTACIÓN HIDROMÉTRICA (30210) ACALA, RÍO GRIJALVA. (ELABORACIÓN PROPIA 2023).	22
FIGURA 4.4. FUNCIÓN GUMBEL AJUSTADA CON EL PROGRAMA AX A LA MUESTRA DE DATOS DE LA ESTACIÓN HIDROMÉTRICA PUENTE COLGANTE I. (ELABORACIÓN PROPIA 2023).....	24
FIGURA 4.5.- ERROR ESTÁNDAR DE LA FUNCIÓN DOBLE GUMBEL OBTENIDA DEL PROGRAMA AX. (SOFTWARE AX.EXE).	24
FIGURA 4.6. FUNCIÓN DOBLE GUMBEL AJUSTADA CON EL PROGRAMA AX A LA MUESTRA DE DATOS DE LA ESTACIÓN HIDROMÉTRICA PUENTE COLGANTE. (ELABORACIÓN PROPIA 2023).....	24
FIGURA 4.15 SUBCUENCAS QUE CONFORMAN LA CUENCA DE LA DEPRESIÓN CENTRAL DEL ESTADO CHIAPAS, ENTRE LA PRESA LA ANGOSTURA Y CIUDAD DEL AGUA. OBTENIDA DE INEGI (ELABORACIÓN PROPIA 2023).....	26
FIGURA 4.16. USOS DE SUELO Y VEGETACIÓN PARA LAS TRES SUBCUENCAS NO AFORADAS. OBTENIDA DE INEGI (ELABORACIÓN PROPIA 2023).....	27

FIGURA 4.17. EDAFOLOGÍA DE LAS TRES SUBCUENCAS NO AFORADAS. OBTENIDA DE INEGI (ELABORACIÓN PROPIA 2023).....	28
FIGURA 4.18.- CUATRO ZONAS DE HOMOGENEIDAD. (ELABORACIÓN PROPIA 2023)	32
FIGURA 4.19.- DATOS MODULADOS OBTENIDOS POR EL PROGRAMA AX, AX+B Y LOS OBTENIDOS POR EL CENAPRED. (ELABORACIÓN PROPIA 2023)	34
FIGURA 4.19.- POLÍGONOS DE THIESSEN CON LAS CUENCAS SIN AFORO	35
FIGURA 4.20.-TRAMOS TRANSITADOS Y LAS ESTACIONES HIDROMÉTRICAS, DE BOQUERÓN, DE SANTO DOMINGO Y DE ACALA. (ELABORACIÓN PROPIA 2023).....	46
FIGURA 5.1.- CURVAS DE NIVEL SIN PROCESAR EN *.DWG. (ELABORACIÓN PROPIA 2023).....	47
FIGURA 5.2.- CURVAS DE NIVEL LIMPIAS EN FORMATO *.DXF. (ELABORACIÓN PROPIA 2023).	48
FIGURA 5.3.- CURVAS DE NIVEL EN FORMATO SHAPE DE ESRI. (ELABORACIÓN PROPIA 2023).	48
EN LA FIGURA 5.4 SE MUESTRA EL MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES CREADO EN FORMATO *.ASC. 48	
FIGURA 5.4.- DEM EN FORMATO *.ASC. (ELABORACIÓN PROPIA 2023).	48
FIGURA 5.5.- MDE DEL TRAMO EN ESTUDIO CON IMAGEN SATELITAL, DESDE LA UNIÓN BOQUERÓN-SANTO DOMINGO-GRIJALVA, HASTA CIUDAD DEL AGUA. (ELABORACIÓN PROPIA 2023).....	49
EN LA FIGURA 5.6 SE MUESTRA EL MDE CON UN 50 % DE TRANSPARENCIA Y LAS CURVAS DE NIVEL CON LAS COTAS DEL LEVANTAMIENTO TOPOBATIMÉTRICO, EL CUADRO ROJO INDICA LA ZONA DONDE SE CONSTRUIRÁ LA ESTRUCTURA DE RETENCIÓN DE AZOLVES.	49
FIGURA. 5.6.- MDE CON UN 50 % DE TRANSPARENCIA Y LAS CURVAS DE NIVEL CON LAS COTAS DEL LEVANTAMIENTO TOPOBATIMÉTRICO. (ELABORACIÓN PROPIA 2023).	49
FIGURA 7.1.- MDE DENTRO DEL PROGRAMA IBER CON LAS COTAS DEL LEVANTAMIENTO TOPOBATIMÉTRICO. (CREACIÓN PROPIA 2023).	56
FIGURA 7.2.- SIMULACIÓN REALIZADA CON 700 M ³ /S Y UN CORTE TRANSVERSAL EN LA ZONA DE ESTUDIO (CREACIÓN PROPIA 2023).	56
FIGURA 7.3.- TIRANTES PARA UN TR DE 2 AÑOS. (CREACIÓN PROPIA 2023).	57
FIGURA 7.4.- VELOCIDADES PARA UN TR DE 2 AÑOS. (CREACIÓN PROPIA 2023).	57
FIGURA 7.5.- TIRANTES PARA UN TR DE 5 AÑOS	58
FIGURA 7.6.- VELOCIDADES PARA UN TR DE 5 AÑOS. (CREACIÓN PROPIA 2023).	58
FIGURA 7.7.- TIRANTES PARA UN TR DE 10 AÑOS. (CREACIÓN PROPIA 2023).	59
FIGURA 7.8.- VELOCIDADES PARA UN TR DE 10 AÑOS. (CREACIÓN PROPIA 2023).	59
FIGURA 7.9.- TIRANTES PARA UN TR DE 20 AÑOS. (CREACIÓN PROPIA 2023).	60
FIGURA 7.10.- VELOCIDADES PARA UN TR DE 20 AÑOS. (CREACIÓN PROPIA 2023).....	60
FIGURA 7.12.- TIRANTES PARA UN TR DE 50 AÑOS. (CREACIÓN PROPIA 2023).	61
FIGURA 7.13.- VELOCIDADES PARA UN TR DE 50 AÑOS. (CREACIÓN PROPIA 2023).....	61
FIGURA 7.14.- TIRANTES PARA UN TR DE 100 AÑOS. (CREACIÓN PROPIA 2023).	62
FIGURA 7.15.- VELOCIDADES PARA UN TR DE 100 AÑOS. (CREACIÓN PROPIA 2023).....	62
FIGURA 7.16.- TIRANTES PARA UN TR DE 200 AÑOS. (CREACIÓN PROPIA 2023).	63
FIGURA 7.17.- VELOCIDADES PARA UN TR DE 200 AÑOS. (CREACIÓN PROPIA 2023).....	63
FIGURA 7.18.- TIRANTES PARA UN TR DE 500 AÑOS. (CREACIÓN PROPIA 2023).	64
FIGURA 7.19.- VELOCIDADES PARA UN TR DE 500 AÑOS. (CREACIÓN PROPIA 2023).....	64
FIGURA 7.20.- TIRANTES PARA UN TR DE 1000 AÑOS. (CREACIÓN PROPIA 2023).	65
FIGURA 7.21.- VELOCIDADES PARA UN TR DE 1000 AÑOS. (CREACIÓN PROPIA 2023).....	65

FIGURA 8.1.- NIVELES DE AGUA DEL AÑO 2011. DATOS TOMADOS DE CFE (ELABORACIÓN PROPIA 2023).	66
FIGURA 8.2.- NIVELES DE AGUA DEL AÑO 2012. DATOS TOMADOS DE CFE (ELABORACIÓN PROPIA 2023).	67
FIGURA 8.3.- NIVELES DE AGUA DEL AÑO 2013. DATOS TOMADOS DE CFE (ELABORACIÓN PROPIA 2023).	67
FIGURA 8.4.- NIVELES DE AGUA DEL AÑO 2014. DATOS TOMADOS DE CFE (ELABORACIÓN PROPIA 2023).	67
FIGURA 8.5.- NIVELES DE AGUA DEL AÑO 2015. DATOS TOMADOS DE CFE (ELABORACIÓN PROPIA 2023).	68
FIGURA 8.6.- NIVELES DE AGUA DEL AÑO 2016. DATOS TOMADOS DE CFE (ELABORACIÓN PROPIA 2023).	68
FIGURA 8.7.- CORTE TRANSVERSAL DESDE EL PUNTO DE LA ENTRADA DE LA OBRA DE TOMA HASTA LA MARGEN DERECHA DEL RÍO GRIJALVA. (CREACIÓN PROPIA 2023).	69
FIGURA 8.9.- TIRANTES LOS PERIODOS DE RETORNO DE 2, 5, 10, 20, 50 Y 100 AÑOS. (CREACIÓN PROPIA 2023).	70
FIGURA 8.10.- VECTORES DE VELOCIDADES DEL PERIODO DE RETORNO DE 2 AÑOS. (SOFTWARE IBER 2023).	70
FIGURA 8.11.- VECTORES DE VELOCIDADES DEL PERIODO DE RETORNO DE 5 AÑOS. (SOFTWARE IBER 2023).	71
FIGURA 8.12.- VECTORES DE VELOCIDADES DEL PERIODO DE RETORNO DE 10 AÑOS. (SOFTWARE IBER 2023).	71
FIGURA 8.14.- VECTORES DE VELOCIDADES DEL PERIODO DE RETORNO DE 50 AÑOS. (SOFTWARE IBER 2023).	72
FIGURA 8.15.- VECTORES DE VELOCIDADES DEL PERIODO DE RETORNO DE 100 AÑOS. (SOFTWARE IBER 2023).	73
FIGURA 8.16.- VELOCIDADES PARA UN PERIODO DE RETORNO DE 2 AÑOS. (SOFTWARE IBER 2023).	73
FIGURA 8.17.- VELOCIDADES PARA UN PERIODO DE RETORNO DE 5 AÑOS. (SOFTWARE IBER 2023).	74
FIGURA 8.18.- VELOCIDADES PARA UN PERIODO DE RETORNO DE 10 AÑOS. (SOFTWARE IBER 2023).	74
FIGURA 8.19.- VELOCIDADES PARA UN PERIODO DE RETORNO DE 20 AÑOS. (SOFTWARE IBER 2023).	75
FIGURA 8.20.- VELOCIDADES PARA UN PERIODO DE RETORNO DE 50 AÑOS. (SOFTWARE IBER 2023).	75
FIGURA 8.21.- VELOCIDADES PARA UN PERIODO DE RETORNO DE 100 AÑOS. (SOFTWARE IBER 2023).	76

INDICE DE TABLAS

TABLA 1.1.- ESTACIONES CLIMATOLÓGICAS ACTIVAS E INACTIVAS EN LA CUENCA DE TRABAJO. OBTENIDA DE BASE DE DATOS CLICOM (ELABORACIÓN PROPIA 2023).	8
TABLA 2.1 ESTACIONES HIDROMÉTRICAS DEL ÁREA EN ESTUDIO, FUENTE: CONAGUA. (ELABORACIÓN PROPIA 2023).	10
TABLA 2.2 ESTACIONES CLIMATOLÓGICAS DEL ÁREA EN ESTUDIO FUENTE: CONAGUA, (ELABORACIÓN: PROPIA 2023).	11
TABLA 3. 1.RANGO DEL NÚMERO DE SECUENCIAS (U) PARA UN REGISTRO HOMOGÉNEO. (OBTENIDA DE CAMPOS 1998).	13

TABLA 3.2.- RESULTADOS DE LA HOMOGENEIDAD E INDEPENDENCIA DE LAS SERIES DE TIEMPO ANUALES. (ELABORACIÓN PROPIA 2023).	15
TABLA 3. 3. RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE HOMOGENEIDAD E INDEPENDENCIA DE LAS ESTACIONES HIDROMÉTRICAS	16
TABLA 4.1. REGISTROS DE GASTOS MÁXIMOS ANUALES (M ³ /S) DE LA ESTACIÓN HIDROMÉTRICA SANTO DOMINGO. (CREACIÓN PROPIA 2023).	17
TABLA 4.2. RESUMEN DE ERRORES ESTÁNDAR PROGRAMA AX. (SOFTWARE AX 2023)	18
TABLA 4.3. RESULTADOS OBTENIDOS DE LOS AJUSTES CON LOS PROGRAMAS AX. (CREACIÓN PROPIA 2023)	18
TABLA 4.4. GASTOS MÁXIMOS ANUALES (M ³ /S) DE LA ESTACIÓN HIDROMÉTRICA BOQUERÓN. (CREACIÓN PROPIA 2023).	19
TABLA 4.5 RESUMEN DE ERRORES ESTÁNDAR PROGRAMA AX. (CREACIÓN SOFTWARE AX).	20
TABLA 4.6. RESULTADOS OBTENIDOS DE LOS AJUSTES CON LOS PROGRAMAS AX. (ELABORACIÓN PROPIA 2023)	20
TABLA 4.7. REGISTROS DE GASTOS MÁXIMOS ANUALES (M ³ /S) DE LA ESTACIÓN HIDROMÉTRICA ACALA. (ELABORACIÓN PROPIA 2023)	21
TABLA 4.8. RESUMEN DE ERRORES ESTÁNDAR DEL PROGRAMA AX. (SOFTWARE AX).	21
TABLA 4.9. RESULTADOS OBTENIDOS DEL AJUSTE CON EL PROGRAMA AX. (ELABORACIÓN PROPIA 2023)	22
TABLA 4.10.- CAUDALES DE LA ESTACIÓN PUENTE COLGANTE I, OBTENIDOS DE LA BASE BANDAS, (ELABORACIÓN PROPIA 2023)	23
TABLA 4.11.- RESUMEN DE ERRORES ESTÁNDAR DEL SOFTWARE AX. (SOFTWARE AX)	23
TABLA 4.12.- CAUDALES DE LA ESTACIÓN PUENTE COLGANTE, OBTENIDOS DE LA BASE BANDAS. (ELABORACIÓN PROPIA 2023)	25
TABLA 4.13.- RESUMEN DE ERRORES ESTÁNDAR OBTENIDOS DEL SOFTWARE AX. (SOFTWARE AX).	25
TABLA 4.14. RESULTADOS OBTENIDOS DEL AJUSTE CON EL SOFTWARE AX. (ELABORACIÓN PROPIA 2023).	26
TABLA 4.15. PARÁMETROS DE LA CUENCA SIN HIDROMETRÍA.	27
TABLA 4.16.- VALORES DEL NÚMERO DE ESCURRIMIENTO N. (ELABORACIÓN PROPIA 2023)	28
TABLA 4.17 ESTACIONES CLIMATOLÓGICAS CERCANAS A LAS CUENCAS SIN AFOROS. (ELABORACIÓN PROPIA 2023)	29
TABLA 4.18.- RESULTADOS DEL TEST DE LANGBEIN. (ELABORACIÓN PROPIA 2023).	31
TABLA 4.19.- TABLA DE ESTACIONES ZONIFICADAS POR HOMOGENEIDAD. (ELABORACIÓN PROPIA 2023)	32
TABLA 4.20.- TABLA CON LAS ESTACIONES Y LAS ALTITUDES SOBRE MSNM. (ELABORACIÓN PROPIA 2023).	32
TABLA 4.21.- DATOS MODULADOS DE LAS ESTACIONES CLIMATOLÓGICAS OBTENIDAS DEL CLICOM. (ELABORACIÓN PROPIA 2023).	33
TABLA 4.22.- RESULTADOS OBTENIDOS CON LOS DATOS MODULADOS CON EL PROGRAMA AX Y AX+B Y LOS OBTENIDOS POR EL CENAPRED. (ELABORACIÓN PROPIA 2023).	34
TABLA 4.14. PRECIPITACIONES DE DISEÑO OBTENIDAS PARA DIFERENTES PERIODOS DE RETORNO. (ELABORACIÓN PROPIA).	35
TABLA 4.15.- ÁREAS Y FACTORES DE REDACCIÓN POR ÁREA (GUICHARD 1998, SÁNCHEZ, 2017.	36
TABLA 4.16.- PRECIPITACIÓN DE DISEÑO PARA LA CUENCA NO AFORADA DE ACALA. (ELABORACIÓN PROPIA 2023)	37

TABLA 4.17.- PRECIPITACIÓN DE DISEÑO PARA LA CUENCA NO AFORADA DE BOQUERÓN. (ELABORACIÓN PROPIA 2023).....	37
TABLA 4.18.- PRECIPITACIÓN DE DISEÑO PARA LA CUENCA NO AFORADA DE SANTO DOMINGO. (ELABORACIÓN PROPIA 2023).....	38
TABLA 4.16. DATOS PARA OBTENER EL HIDROGRAMA UNITARIO CURVILÍNEO. (ELABORACIÓN PROPIA 2023)	41
TABLA 4.17. GASTOS (M ³ /S) DE DISEÑO PARA LOS TRES MODELOS LLUVIA ESCURRIMIENTO DE SANTO DOMINGO SIN AFORO. (ELABORACIÓN PROPIA 2023).....	42
TABLA 4.18. GASTOS (M ³ /S) DE DISEÑO PARA LOS TRES MODELOS LLUVIA ESCURRIMIENTO DE SUCHIAPA SIN AFORO. (ELABORACIÓN PROPIA 2023)	42
TABLA 4.19. GASTOS (M ³ /S) DE DISEÑO PARA LOS TRES MODELOS LLUVIA ESCURRIMIENTO DE ACALA SIN AFORO. (ELABORACIÓN PROPIA 2023).	42
TABLA 4.20. GASTOS DE DISEÑO HASTA CIUDAD DEL AGUA. (ELABORACIÓN PROPIA 2023)	46
TABLA 8.1 SE PRESENTAN LAS VELOCIDADES MÁXIMAS SIMULADAS RESPECTO A LOS PERIODOS DE RETORNO CONSIDERADOS.....	76

INTRODUCCIÓN

La cuenca que abarca el estudio de los caudales para el diseño de la captación de agua, llamada “Ciudad del Agua”, que abastece a la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, tiene un área de 6373.37 km². Los estudios realizados para el diseño de esta obra se encuentran entre dos de las grandes presas de México, aguas arriba la presa la Angostura y aguas abajo la presa Chicoasén. Debido a esto se han realizado múltiples estudios de la cuenca Chicoasén, entre los primeros estudios se encuentra la “Regionalización de lluvias y escurrimientos en la cuenca del Alto Grijalva” realizada en 1998 presentada como tesis de maestría, el “Estudio de inundaciones fluviales y mapas de peligro para el Atlas Nacional de Riesgos por Inundaciones CNA-SGT-GASIR-04/2013. (XI) Grijalva, entre la Angostura y CH Chicoasén” en 2013. El “Estudio para regionalizar los gastos generados por avenidas máximas, como base de la elaboración de mapas de peligro por inundaciones fluviales en todas las cuencas de la república mexicana” Tomo II, realizada por el Instituto de Ingeniería en 2017, el Tomo III de este estudio tiene por título “Estudio para regionalizar los gastos generados por avenidas máximas, como base para la elaboración de mapas de peligro por inundaciones fluviales en todas las cuencas de la república mexicana: regionalización de gastos” realizada con fecha de 2017. El libro “Regionalización de Lluvias en la cuenca de Chicoasén, Chiapas” publicado por la UNACH en el año 2019.

La Información fue recopilada de la base de datos de Lluvias CLICOM, con información proporcionada por la Comisión Nacional de Agua (CONAGUA) y la Comisión Federal de Electricidad (CFE). Los caudales fueron completados por la información de la CFE y datos de trabajos realizados para la CONAGUA o el CENAPRED.

La regionalización tanto de precipitaciones como de caudales es importante en este estudio, ya que la información de estaciones climatológicas únicas, suelen tener pocos datos para determinar caudales con modelos lluvia escurrimiento con altos periodos de retorno, recurrir a la regionalización incluye todas las estaciones dentro de la cuenca o cercanas a ella, la determinación de la homogeneidad regional de los parámetros estadísticos de cada estación da certeza para determinar caudales con altos periodos de retorno y a través del texto se presentan algunas de estas técnicas. Los caudales también son utilizados para regionalizar gastos asociados a periodos de retorno altos, existen diferentes técnicas de homogeneidad regional, en este estudio se presentan algunas.

Es importante conocer las funciones de distribución de probabilidades (FDP), existen varias FDP y programas que calculan el mejor ajuste tanto de estaciones con una serie de tiempo o de datos modulados cuando se utiliza una regionalización, las funciones utilizadas son las de valores extremos como la función Gumbel o Doble Gumbel, estas se han aplicadas en múltiples estudios y resultan las funciones más utilizadas por Centro Nacional de Prevención de Desastres, así este desarrolló el software AX el cual incluye seis funciones dentro de las cuales se encuentran las dos funciones mencionadas. Existe otro programa que incluyen estas funciones además de la GVE, la función Doble Gumbel con diferente determinación de parámetros, como el método de momentos, de máxima verosimilitud, de momentos L, de probabilidad pesada o

momentos cuadráticos, en este estudio se utilizara el software AX para realizar el ajuste de las funciones.

Para determinar el área de las cuencas de estudio se utilizó información del Instituto de Estadística Geográfica e Informática (INEGI) con escala 1:50,000, para el caso del cálculo de áreas, longitudes del cauce principal y la pendiente media por el método de Taylor Schwarz, el uso de suelo y vegetación serie VII y la Edafología serie II.

La información obtenida de INEGI se trabajó con formato shape o raster en un Sistema de Información Geográfica, el SIG utilizado es Qgis, Global Mapper, Grapher, AutoCAD o Qcad. Una vez obtenidos los hidrogramas asociados a periodos de retorno se transitan hasta Ciudad del Agua, el transito se realiza con el Método de Muskingum, el cual tiene tres parámetros importantes por determinar; K , X y Dt , K se determina con la ecuación de Kirpich, las dimensiones son en horas, el valor de X determina si existe un volumen de almacenamiento en el tramo del cauce, este valor va de 0.0 a 0.5, y Dt es el tiempo de discretización de los hidrogramas. El proceso para calcular K se determina por la longitud del cauce a transitar, la pendiente media del cauce y el valor de X , la mayoría de los autores consideran que si desconoce las velocidades del tramo un valor promedio puede ser de 0.2. Finalmente se realiza la suma de lo hidrogramas de todos los tramos calculados y se obtiene un hidrograma final, cuyo pico del hidrograma este asociado a un periodo de retorno.

El estudio hidrológico es importante para la obra de toma, debido a que se realizaran los tránsitos de esos caudales con la topobatimetría levantada en el cauce, esto determinará el tamaño del muro de protección y el espigón en la parte final de la entrada en la obra de toma, el tamaño estará determinado para un periodo de retorno de asociado a 10, 20, 50 o 100 años dependiendo de la magnitud y el costo de la obra., en los capítulos de este texto se presenta el proceso realizado para realizar la regionalización.

Se creo un modelo hidráulico a partir del levantamiento topobatimétrico realizado en una sección de la zona de estudio para observar el comportamiento de los caudales de los diferentes periodos de retorno establecidos en el estudio y así complementar los resultados obtenidos de la regionalización.

OBJETIVO GENERAL

El objetivo del presente trabajo hidrológico, es encontrar los caudales asociados a los periodos de retorno de 2, 5, 20, 50, 100, 200, 500 y 1000 años, con las metodologías de los hidrogramas unitarios sintéticos Chow, HUT y SCS, para determinar los caudales, las precipitaciones deberán calcularse con una regionalización y ser utilizadas para obtener los caudales antes mencionados.

Los caudales se obtendrán de las cuatro estaciones hidro-climatológicas que se encuentran dentro de la cuenca, la estación Acala, Boquerón, Santo Domingo y Puente Colgante. Dentro de los objetivos se encuentran el análisis de precipitaciones de las estaciones climatológicas dentro de las cuencas y cercanas a ellas, las cuales, que no se encuentran aforadas, por lo tanto, se obtendrán por métodos indirectos como lo son el método de Chow, HUT y SCS.

OBJETIVOS ESPECIFICOS

El objetivo específico de este trabajo es lograr establecer parámetros que nos ayuden a predecir el comportamiento del cauce y así poder diseñar estructuras a los márgenes del río, a la entrada del cañón del Sumidero al puente Belisario Domínguez.

Esto para el abastecimiento de agua potable para la ciudad de Tuxtla Gutiérrez por ser la fuente principal más cercana a la ciudad capital del estado de Chiapas.

CAPÍTULO 1.- HIDROGRAFÍA Y LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA DE LA ZONA EN ESTUDIO

La cuenca de estudio inicia formada desde la presa hidroeléctrica Angostura hasta la zona de estudio correspondiente a Ciudad del Agua, tiene un área aproximada de 6373.370 km², desde la coordenada UTM (527493.9, 1815451.0) en la salida de la presa la Angostura y la coordenada UTM (496320.97,1850795.46) en Ciudad del Agua. La cuenca se encuentra en la región hidrológica número 30 llamada Grijalva-Usumacinta, en la depresión central del estado de Chiapas. Para determinar esta área se utilizó planos digitales escala 1:50,000 obtenidos de la página web de INEGI, correspondientes a la siguiente clasificación de subcuencas; RH30Eb (río Alto Grijalva), RH30Ei (río Suchiapa) y RH30Ej (río Santo Domingo) de la cuenca llamada río Grijalva-Tuxtla Gutiérrez, según clasificación de INEGI. <https://www.inegi.org.mx/temas/topografia/#Descargas>.

En la Figura 1.1. se observa la cuenca total del estudio ubicada en el estado de Chiapas.

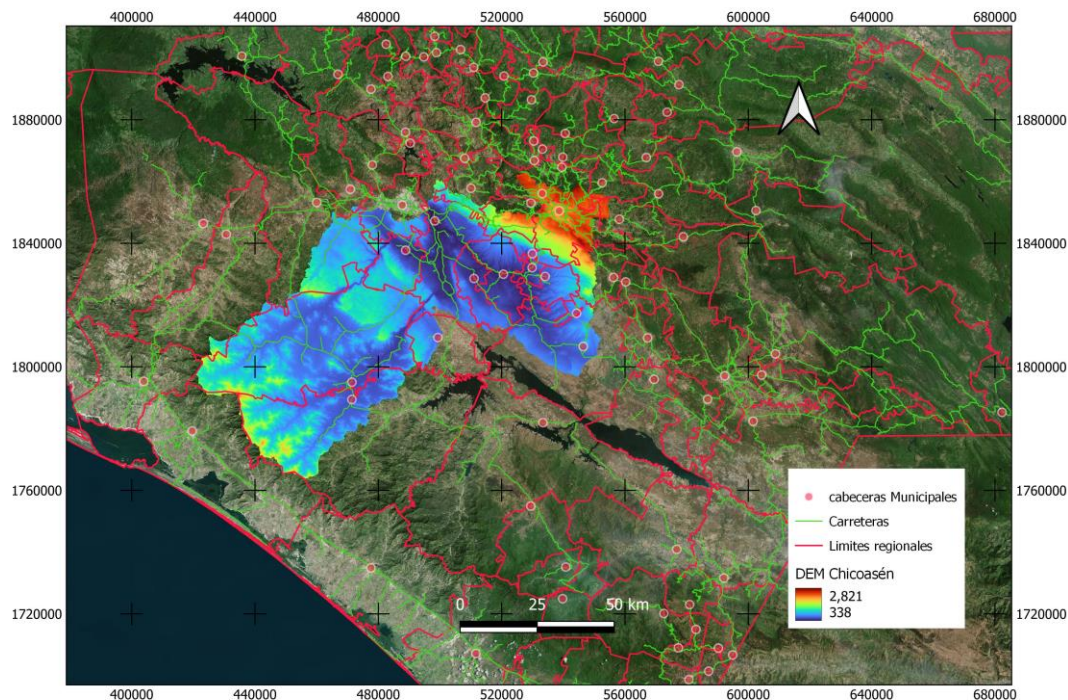


Figura 1.1- Ubicación de la cuenca total en el estado de Chiapas, creación propia 2023 Material INEGI (Elaboración propia)

En la Figura 1.2 se muestra el Modelo Digital de Elevaciones de la cuenca en su totalidad.

En la Figura 1.3 se observa la red de drenaje de la cuenca total, desde la salida de la presa la Angostura hasta Ciudad del Agua (CA) con una longitud de 75.69 km, los ríos más importantes son el río Grijalva o "Río Grande de Chiapas" desde la Angostura hasta Ciudad del Agua, se incorporan los ríos de Suchiapa y Santo Domingo aguas abajo de la estación hidrométrica de aforo Acala con una longitud de 6.96 km. Los ríos son de tipo dendrítico como se observa en la Figura 1.3.

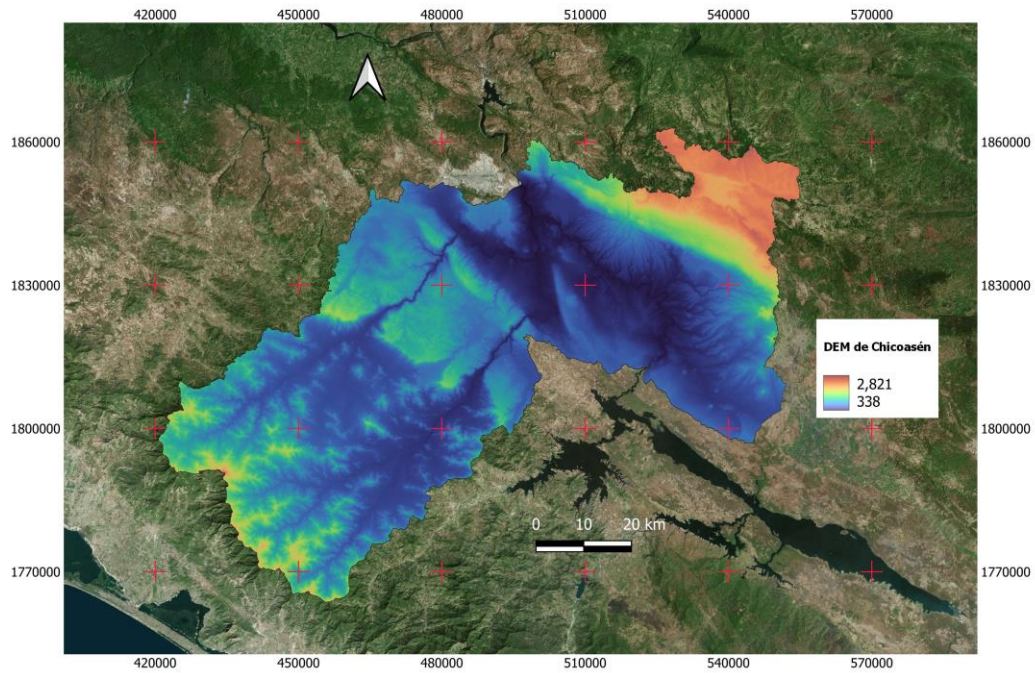


Figura 1.2.- MDE de la cuenca total, desde la presa Angostura hasta Ciudad del Agua. Material INEGI (elaboración propia 2023)

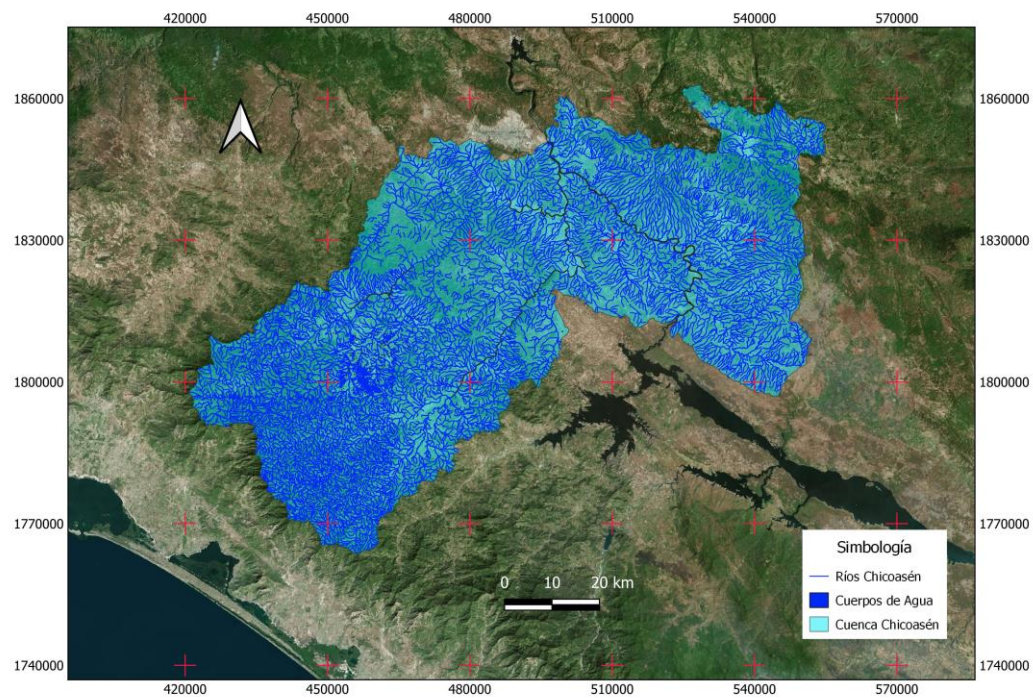


Figura 1.3.- Hidrografía de la cuenca en estudio. Material INEGI (Elaboración propia 2023)

En la Figura 1.4 se observan los usos de suelo y vegetación de la cuenca en estudio, la carta fue obtenida de INEGI y corresponde a la serie VI.

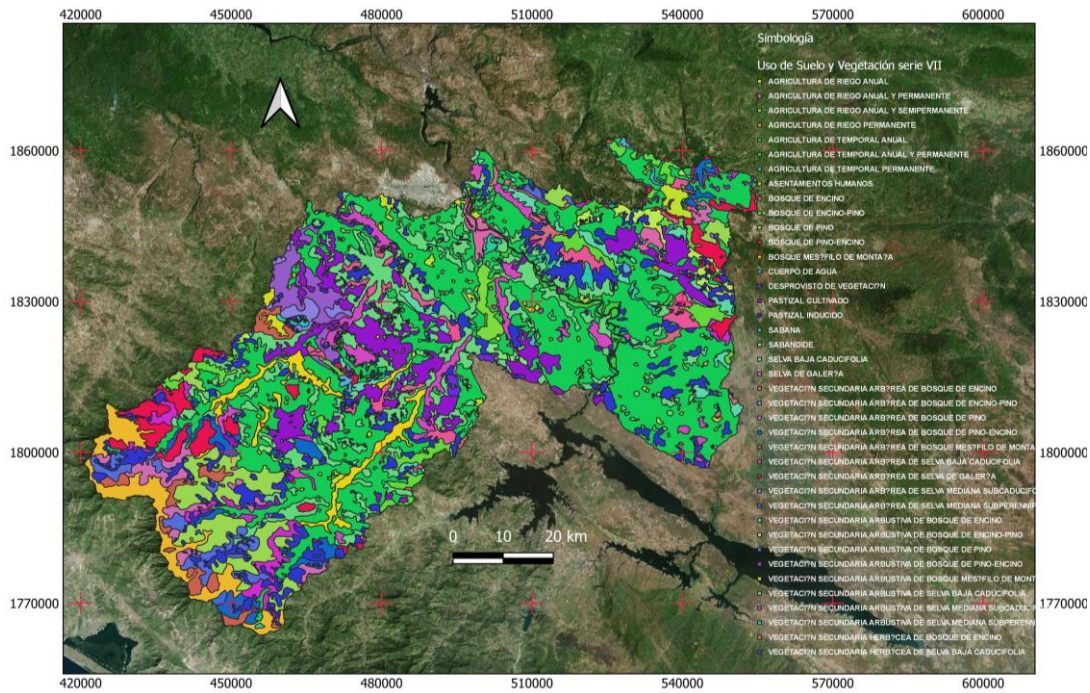


Figura 1.4.- Usos de suelo y vegetación de la carta serie VI obtenida de INEGI (Elaboración propia)

En la Figura 1.5 se observa la edafología de la cuenca en estudio, la carta fue obtenida de INEGI y corresponde a la serie II.

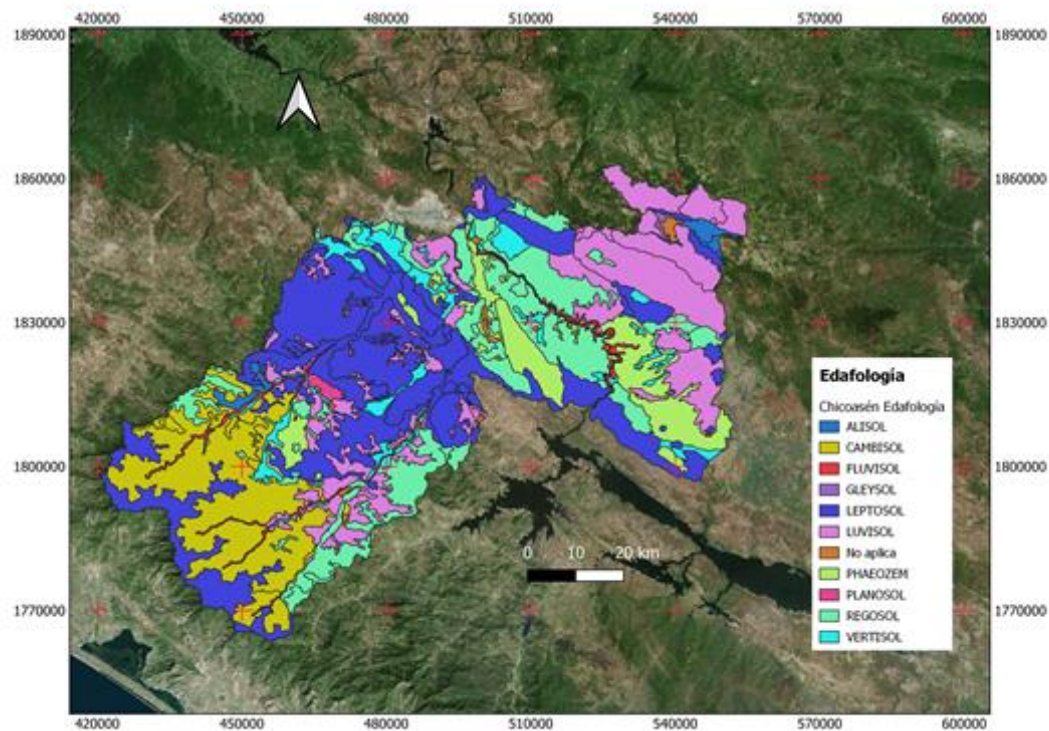


Figura 1.5.- Edafología de la carta serie II obtenida de INEGI. (Elaboración propia)

En la Figura 1.6 se observa la climatología de la cuenca en estudio, la carta fue bajada de INEGI.

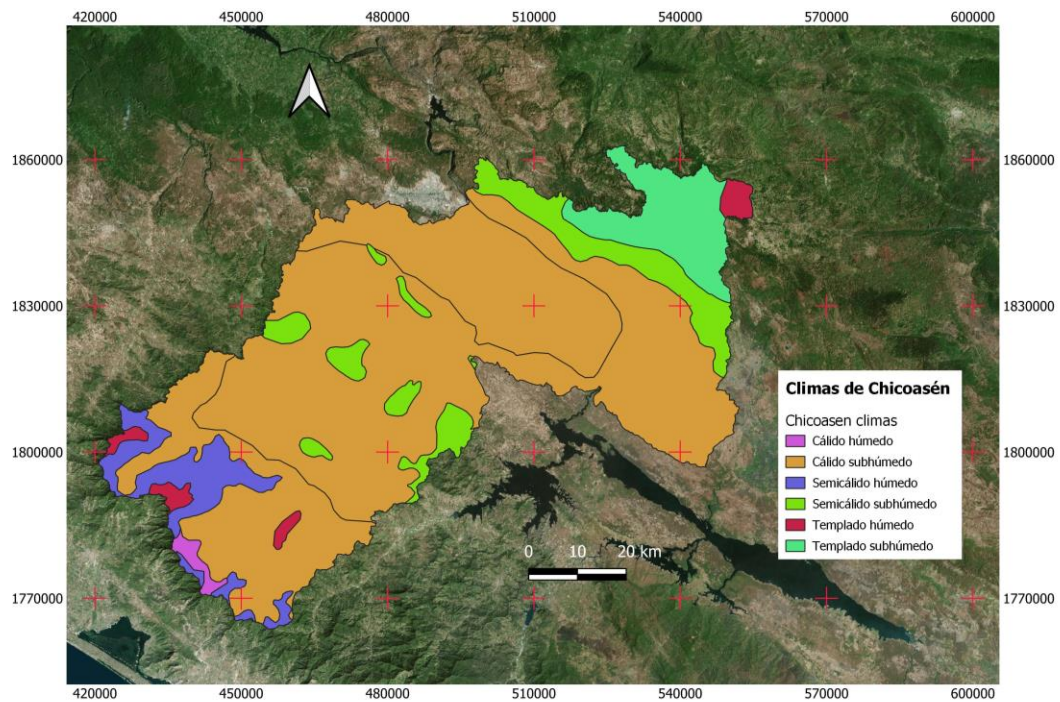


Figura 1.6.- Climatología de la cuenca en estudio obtenida de INEGI. (Elaboración propia)

La climatología de la cuenca comprende desde cálido húmedo hasta templado subhúmedo con altitudes que va desde 338 msnm hasta los 2821 msnm, las partes altas de la cuenca se localizan en la sierra madre de Chiapas, que divide la región hidrológica número (RH) 23 “Costa de Chiapas” y la RH 30 “Grijalva-Usumacinta”, y los altos de Chiapas que forma una barrera con altitudes por arriba de los 2200 msnm, esto hace que exista una variedad de climas diferentes.

En la Figura 1.7 se muestran las estaciones activas e inactivas dentro de la cuenca en estudio. Datos obtenidos de la base de datos nacionales CLICOM. <http://clicom-mex.cicese.mx/malla/index.php>

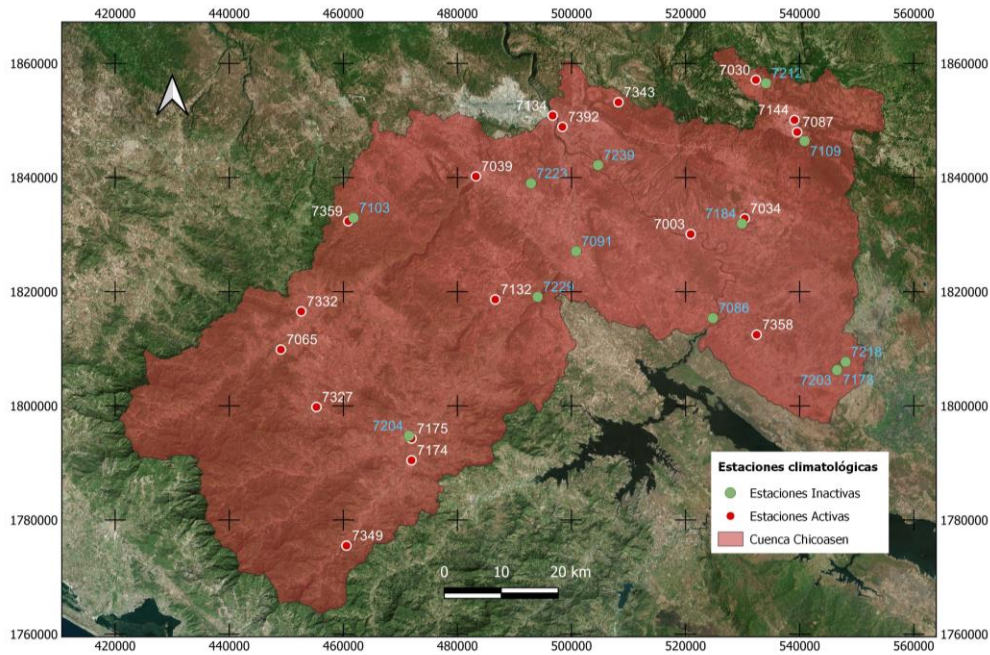


Figura 1.7.- Estaciones climatológicas activas e inactivas, Obtenida base de datos INEGI y CLICOM. (Elaboración propia 2023)

En la Tabla 1.1 se presentan las claves de las estaciones activas e inactivas que se encuentran dentro del área de estudio de la cuenca, más adelante se indicaran el número de estaciones que se tomaron en cuenta para realizar la regionalización de precipitaciones, con las coordenadas UTM, altitud sobre el nivel del mar, características estadísticas y series de tiempo anuales máximas de 24 horas. En la Tabla se presentan únicamente las claves y nombres de las estaciones climatológicas.

Tabla 1.1.- Estaciones climatológicas activas e inactivas en la cuenca de trabajo. Obtenida de base de datos CLICOM (Elaboración propia 2023)

CLAVE	EST. ACTIVAS	CLAVE	EST. INACTIVAS
7003	ACALA	7086	LA ANGOSTURA (CFE)
7030	SAN JUAN CHAMULA	7091	LA ESCALERA
7034	VILLA DE CHIAPILLA	7103	LAS LIMAS
7039	EL BOQUERON	7109	LOS ARCOS
7065	FINCA OCOTLAN	7173	VENUSTIANO CARRANZA (CFE)
7087	LA CABAÑA	7184	VILLA DE CHIAPILLA (CFE)
7132	PORTACELLI	7203	VENUSTIANO CARRANZA
7134	PUENTE COLGANTE	7204	VILLAFLORES (CFE)
7144	SAN CRISTOBAL (OBS)	7212	ZINACANTAN
7174	VILLA CORZO	7218	ETA 012 VENUSTIANO CARRANZA
7175	VILLAFLORES (CFE)	7223	SAN LUIS
7327	URSULO GALVAN	7229	SANTO DOMINGO (CFE)
7332	CRISTOBAL OBREGON	7239	VILLA DE ACALA (CFE)
7343	CUAUHTEMOC		
7349	MONTERREY		
7358	FLORES MAGON		
7359	GALEANA		
7392	ZOOMAT		

En la Figura 1.8 se muestran las estaciones hidrométricas localizadas dentro de la cuenca en estudio, en este caso son tres, la estación Boquerón; Santo Domingo y Acala. Existen otras estaciones hidrométricas que se utilizarán para realizar la regionalización que están cercanas a la cuenca y que aportan información valiosa para determinar los caudales de diseño, obtenidas de la comisión federal de electricidad (CFE).

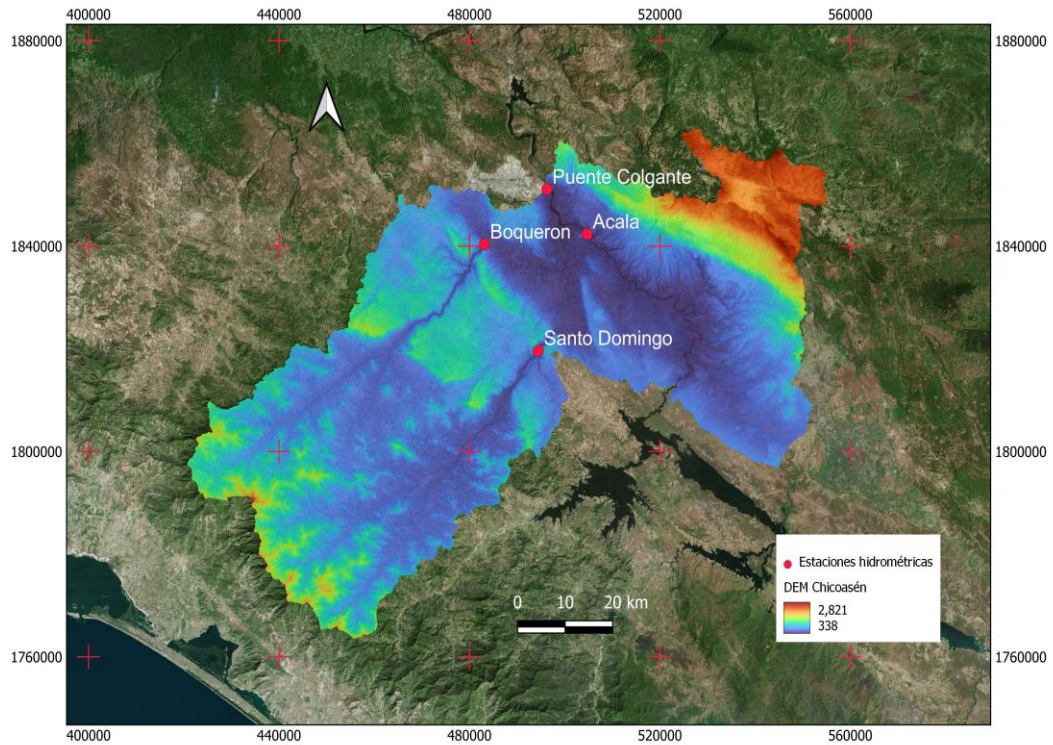


Figura 1.8.- Estaciones hidrométricas localizadas dentro de la cuenca. obtenida de INEGI y CLICOM (Elaboración propia 2023)

CAPÍTULO 2.- INFORMACIÓN HIDROMÉTRICA Y CLIMATOLÓGICA

2.1.- Estaciones hidrométricas dentro de la zona de estudio

En la cuenca se encuentran cuatro estaciones hidrométricas, en la Tabla 2.1 se muestran las claves, nombre, número de datos y ubicación de las estaciones hidrométricas en coordenadas UTM, obtenidas del Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales de la página de la Comisión Nacional del Agua y de la red Hidroclimatológica de Comisión Federal de Electricidad.

Tabla 2.1 Estaciones hidrométricas del área en estudio, Fuente: CONAGUA.
(Elaboración propia 2023).

Clave de estación	Nombre	Número de datos	Años	Ubicación	
				X	Y
30212	Santo Domingo	63	1953-2021	493980.629	1818990.3
30020	Boquerón	69	1952-2021	481897.715	1836972.89
30210	Acala	35	1983-2021	504798.995	1841421.32
30014	Puente Colgante	32	1948-1973	496280.15	1851070.1
30014	Cañón del Sumidero	11	2011-2021	496280.15	1851070.1

En la Figura 2.1. se muestra la localización de las estaciones hidrométricas y climatológicas.

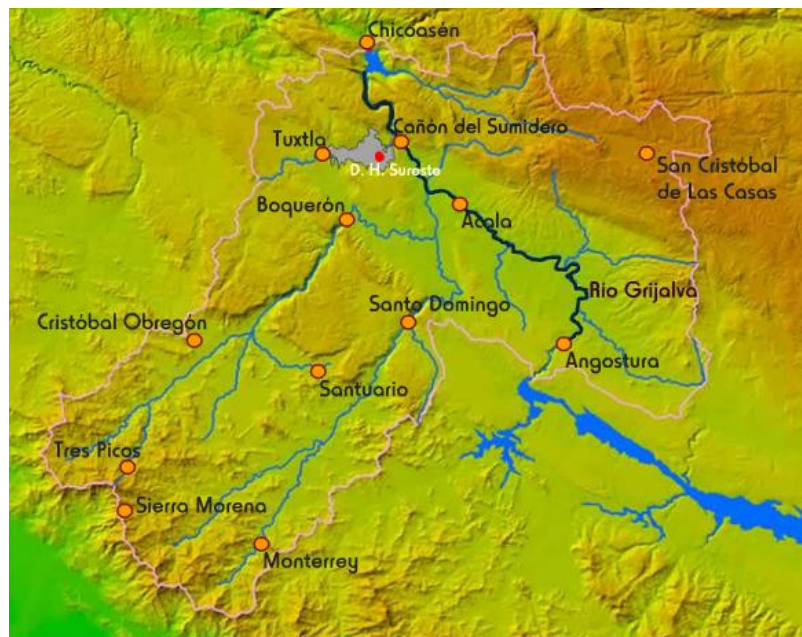


Figura 2.1. Se muestra la Cuenca Angostura-Chicoasén con las estaciones hidrométricas y climatológicas operadas por la Comisión Federal de Electricidad. Fuente: Comisión Federal de Electricidad. Imagen obtenida de CFE en 2014, actualmente no existe la liga.

En el anexo A se muestran los gastos máximos anuales de cuatro estaciones hidrométricas en la tabla A.1.

2.2.- Estaciones climatológicas dentro de la zona de estudio

En la cuenca de estudio se localizan 38 estaciones climatológicas en la Tabla 2.2 se muestran las claves, número de datos máximos anuales en 24 horas y su ubicación en coordenadas UTM, obtenidas de la base de datos CLICOM de la Comisión Nacional del Agua 2019.

Tabla 2.2 Estaciones climatológicas del área en estudio Fuente: CONAGUA, (Elaboración: Propia 2023)

Clave estación	Número de datos	Coordenadas		Clave estación	Número de datos	Coordenadas	
		X	Y			X	Y
7003	38	520882.27	1830041.48	7358	27	532350.87	1812503.7
7030	40	532319.28	1857136.03	7050	47	457091.86	1847430.89
7036	36	554502.55	1844011.08	7103	24	461679.86	1832990.31
7039	56	483211.37	1840152.99	7109	18	540873.61	1846395.05
7040	57	518312.76	1856144.89	7132	45	486671.26	1818549.06
7065	40	448959.4	1809924.02	7134	62	496625.32	1850871.61
7076	33	557808.37	1847957.23	7174	16	472022.65	1790554.9
7083	28	489342.588	1853745.51	7202	58	514211.125	1851903.88
7086	37	524797.44	1815294.15	7203	44	546542.88	1806232.04
7087	49	539563.35	1847970.35	7207	36	530299.85	1867049.21
7091	54	500874.02	1827057.13	7209	18	494100.87	1819143.33
7162	31	508132.54	1867432.93	7238	14	490534.3	1852970.03
7175	63	471884.54	1794232.97	7343	24	508167.13	1853215.53
7176	22	489054.25	1853348.76	7349	29	460728.7	1775435.82
7184	26	529861.95	1831942.01	7359	18	460868.74	1832458.91
7188	38	510179.1	1857750.99	7372	22	471659.31	1857395.07
7319	23	475833.45	1865516.79	7034	59	530360.78	1832830.51
7327	30	455145.69	1799817.38	7035	38	489472.28	1873149.62

En la Figura 2.2 se muestran la localización de las estaciones climatológicas dentro de la cuenca en estudio. Elaborado con el software Qgis a partir de los datos de la CONAGUA.

<https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacionclimatologica/informacion-estadistica-climatologica>.

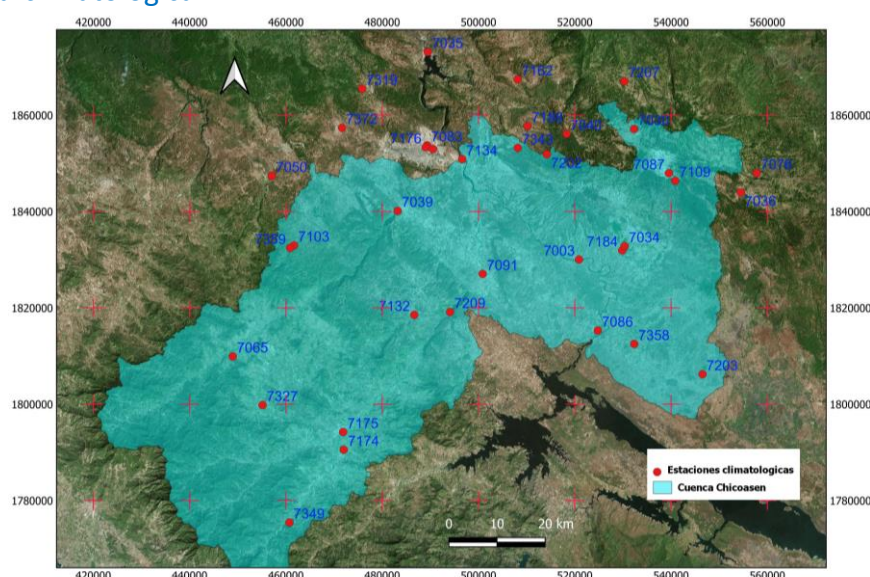


Figura 2.2. Estaciones climatológicas dentro de la cuenca en estudio y en sus cercanías, obtenida de INEGI y CLICOM (Elaboración propia 2023)

CAPITULO 3.- ANÁLISIS DE LOS DATOS DE PRECIPITACIONES Y CAUDALES

3.1.- Proceso de selección de estaciones climatológicas

Las estaciones climatológicas se seleccionaron a partir del siguiente criterio: las que se localizan en las inmediaciones de las cuencas sin aforo y están a una distancia menor a los 30 km de la zona de estudio, como se observa en la Figura 3.1. De tal manera que se localizaron 18 estaciones climatológicas que se observan en la Tabla 3.1. Para tal efecto se aplicaron pruebas de homogeneidad e independencia que se explican a continuación:

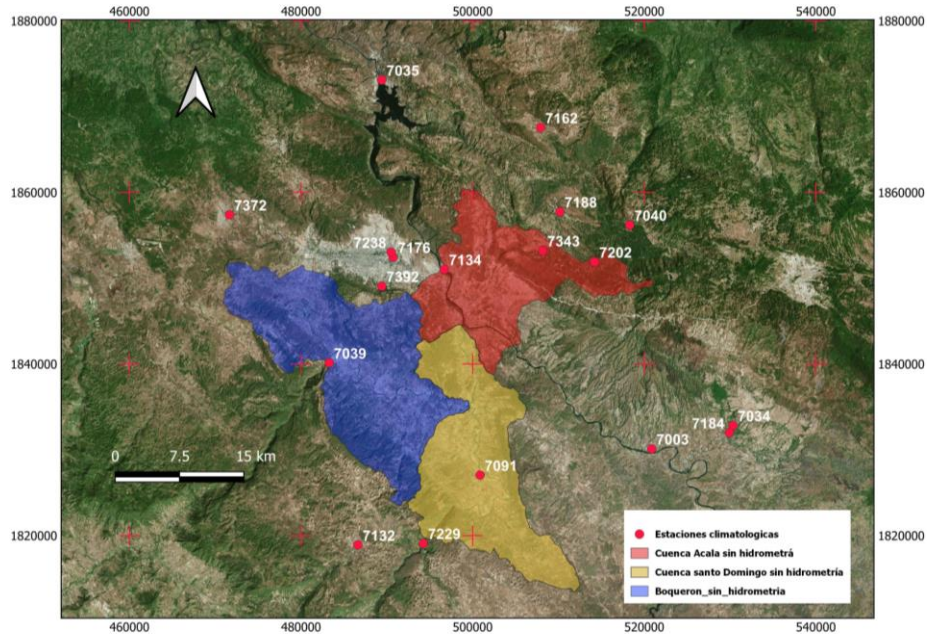


Figura 3.1 Estaciones climatológicas en un radio de 30 km dentro y cercanas a las cuencas no aforadas. Obtenida de INEGI (Elaboración propia)

3.2.- Análisis de homogeneidad e independencia de los datos de campo

Una serie de datos es llamada homogénea si es de una única población. La homogeneidad de una serie de datos de lluvias se puede perder por un sin número de causas, que pueden ser de dos tipos: primero, las debidas a cambios físicos en la propia estación pluviométrica y segundo, las originadas por las modificaciones o cambios en el medio ambiente. Algunas de las causas principales de pérdida de homogeneidad de una serie de lluvias pueden ser:

- 1.- Cambio en la localización del pluviómetro.
- 2.- Cambio en la forma de exposición, o reposición del aparato.
- 3.- Cambio en el procedimiento de observación, o remplazo del operador.
- 4.- Construcción de embalses en las cercanías.
- 5.- Deforestación y reforestación en la zona.
- 6.- Desección de pantanos.
- 7.- Aperturas de nuevas áreas de cultivo en los alrededores
- 8.- Industrialización en áreas circundantes, etc.

Para probar la homogeneidad de una muestra de datos de lluvia se tienen diferentes tipos de pruebas estadísticas como la de Helmer, de Secuencias y la de Cramer (Campos, 1998, p. 4-19).

“Para llevar a cabo un análisis de frecuencias se requiere que la muestra de datos de una serie está compuesta de variables aleatorias. Para probarlo se aplica la prueba de independencia de Anderson, la cual hace uso del coeficiente de correlación serial para diferentes tipos de retraso”. (Escalante, 2002, p. 132).

3.2.1.- PRUEBAS DE HOMOGENEIDAD

3.2.1.1.- PRUEBA DE HOMOGENEIDAD DE HELMERT

“Con fines prácticos se puede decir que una serie de lluvias anuales y en general una serie climatológica, presenta como alternativas a la homogeneidad, los cambios bruscos (saltos) de su valor medio, la tendencia o alguna forma de oscilación.” (Campos, 1998, p.4-20).

“La prueba de Helmert es bastante sencilla y consiste en analizar el signo de las desviaciones de cada evento de la serie con respecto a su valor medio. Si una desviación es de un cierto signo es seguida por otra del mismo signo, una secuencia (S) es creada. En contraste, si una desviación es seguida por otra de signo contrario, un cambio (C) será registrado. Cada año, excepto el primero, definirán una secuencia o un cambio.” (Campos, 1998, p.4-20).

“Si la serie es homogénea, la diferencia entre el número de secuencias (S) y el número de cambios (C) en el registro deberá ser cero, dentro de los límites de un error probable, el cual de hecho depende de la longitud del registro (n), esto es: “. (Campos, 1998, p.4-20).

$$S - C = 0 \pm \sqrt{n-1} \text{ o bien: } S - C = \pm \sqrt{n-1}$$

Los análisis realizados con la prueba de Helmert a los datos de lluvias de las 8 estaciones climatológicas realizadas con el programa AFA V.1.1 (Gómez, 2011), como se puede observar en los cálculos realizados, ver el anexo A.

3.2.1.2.- PRUEBA DE HOMOGENEIDAD DE LAS SECUENCIAS

“Esta prueba es bastante común y muy sensitiva; se realiza el número de secuencias o rachas (u) arriba o abajo la mediana de la serie. El valor de la mediana se obtiene ordenando los datos respecto a su magnitud y seleccionando el valor central, si n es impar, o la media aritmética de los dos valores centrales, si n es par. Usando el valor de la mediana, se marca con A si es mayor y con B si es menor, cada dato o evento de la serie; las secuencias o sucesión de valores A o B son contabilizadas y para concluir que la serie es homogénea el número de secuencias (u) debe estar comprendido entre el rango de la Tabla 3.1, para el número de años de registro (n)”. (Campos, 1998, p. 4-20).

Tabla 3. 1.Rango del número de secuencias (u) para un registro homogéneo. (Obtenida de Campos 1998)

Número de datos n	Rango de u	Número de datos n	Rango de u
12	5 - 8	32	13 - 20
14	5 - 10	34	14 - 21
16	6 - 11	36	15 - 22
18	7 - 12	38	16 - 23
20	8 - 13	40	16 - 25
22	9 - 14	50	22 - 30
24	9 - 16	60	26 - 36
26	10 - 17	70	31 - 41
28	11 - 18	80	35 - 47
30	12 - 19	100	45 - 57

Los análisis realizados con la prueba de las secuencias a los datos de lluvias de las 8 estaciones climatológicas realizadas con el programa AFA V.1.1, como se puede observar en los cálculos realizados, ver el anexo A.

3.2.1.3.- PRUEBA DE HOMOGENEIDAD DE CRAMER

“La prueba de Cramer es bastante útil, para investigar la homogeneidad de una muestra. En la prueba de Cramer, se utiliza la media (\bar{x}_k) y la desviación típica (S) del registro total de n valores. Por otra parte

$$\bar{x}_k = \frac{\sum_{i=k+1}^{i=k+n} x_i}{n'}$$

$$\bar{\tau}_k = \frac{(\bar{x}_k - \bar{X})}{S}$$

$$t_k = \left[\frac{n'(n-2)}{n - n'(1 - (\tau_k)^2)} \right]^{\frac{1}{2}} (\tau_k)$$

La estadística t_k tiene distribución t de Student de dos colas con $v = n-2$ grados de libertad y es utilizada en la misma forma que la estadística t_d “. (Campos, 1998, p.4-23)).

Los análisis realizados con la prueba de Cramer a los datos de lluvias de las 5 estaciones climatológicas realizadas con el programa AFA V.1.1, como se puede observar en los cálculos realizados, ver el anexo A.

3.2.1.4.- PRUEBA DE INDEPENDENCIA DE ANDERSON

Para llevar a cabo un ajuste a un modelo de probabilidades se requiere que la muestra este compuesta de variables aleatorias. Para probarlo se aplica la prueba de independencia de Anderson, la cual hace uso del coeficiente de autocorrelación serial para diferentes tipos de retraso k .

$$r_k^j = \frac{\sum_{i=1}^{n_j-k} (h_i^j - \bar{h}^j)(h_{i+k}^j - \bar{h}^j)}{\sum_{i=1}^{n_j} (h_i^j - \bar{h}^j)^2}$$

Donde

$$\bar{h}^j = \frac{\sum_{i=1}^{n_j} h_i^j}{n_j}$$

Además, los límites al 95% de confianza para r_k^j se pueden obtener como

$$r_k^j(95\%) = \frac{-1 \pm 1.96 \sqrt{n_j-k-1}}{n_j-k}$$

La gráfica de los valores estimados para r_k^j (ordenadas) contra los tiempos de retraso k (abscisas), junto con sus correspondientes límites de confianza, se llama correlograma de la muestra.

Si solo el 10 % de los valores r_k^j sobrepasan los límites de confianza se dice que la serie h_i^j es independiente y por lo tanto es una variable que sigue las leyes de la probabilidad". (Escalante, 2002, p.132).

Los análisis realizados con la prueba de Anderson lluvias de las 18 estaciones climatológicas realizadas con el programa AFA V.1.1, como se puede observar en los cálculos realizados, ver el anexo A.

3.2.2.- RESULTADOS HOMOGENEIDAD E INDEPENDENCIA

Al aplicar las pruebas descritas anteriormente se obtuvieron los resultados mostrados en la Tabla 3.2. Como puede observarse todas las muestras son independientes y en su mayoría son homogéneas, este análisis se llevó se realizó con el programa Análisis de Frecuencias AFA Versión 1.1 (Gómez, et al, 2010) para las estaciones climatológicas utilizadas en la regionalización.

Tabla 3.2.- Resultados de la homogeneidad e independencia de las series de tiempo anuales. (elaboración propia 2023).

No.	Clave	Helmert	t de Student	Secuencias	Cramer (60 %)	Cramer (30 %)	Anderson
1	ACALA	Homogénea	Homogénea	Homogénea	No Homogénea	Homogénea	si
2	BERRIOZABAL	Homogénea	Homogénea	Homogénea	No Homogénea	Homogénea	si
3	CHICOASEN (CFE)	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	si
4	CUAUHTEMOC	Homogénea	Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	si
5	EL BOQUERON	Homogénea	Homogénea	Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	si
6	EL BARRERO	No Homogénea	Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	si
12	EL SABINAL	Homogénea	Homogénea	Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	si
13	IXTAPA (CFE)	No Homogénea	Homogénea	No Homogénea	Homogénea	No Homogénea	si
14	LA ESCALERA	Homogénea	Homogénea	Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	si
15	PORTACELI	Homogénea	Homogénea	Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	si
16	PUENTE COLGANTE	Homogénea	Homogénea	Homogénea	No homogénea	No Homogénea	si
17	SANTO DOMINGO (CFE)	No Homogénea	Homogénea	Homogénea	No homogénea	No Homogénea	si
18	SOYALO (CFE)	No Homogénea	Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	si

Para el caso de las estaciones hidrométricas los resultados se presentan en la Tabla 3.3, también realizados con el programa AFA V.1.1.

Tabla 3. 3. Resultados de las pruebas de homogeneidad e independencia de las estaciones hidrométricas

No.	Clave	Helmert	t de Student	Secuencias	Cramer (60 %)	Cramer (30 %)	Anderson
1	ACALA	Homogénea	Homogénea	Homogénea	No Homogénea	Homogénea	si
2	SANTO DOMINGO	Homogénea	Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	Homogénea	si
3	BOQUERON	Homogénea	Homogénea	No Homogénea	Homogénea	Homogénea	si
4	PUENTE COLGANTE I	Homogénea	Homogénea	Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	si
5	PUENTE COLGANTE II	Homogénea	Homogénea	Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	si

CAPÍTULO 4.- HIDROLOGÍA DE LA ZONA EN ESTUDIO

4.1.- Ajuste de los datos hidrométricos a un modelo de probabilidades

4.1.1.- ESTACIÓN HIDROMÉTRICA SANTO DOMINGO

La información de caudales instantáneos nuevos fue proporcionada por la CFE con oficio "CCeIH-DPR-DPAyS-1324-2022_03Nov2022". La cuenca de Santo Domingo tiene un área de 2016.63 km² obtenida de la cartografía escala 1:50,000 de la subcuenca RH30EI de INEGI. El número de años de registro de caudales, es de 63 años, que va de 1953-2021. En la Tabla 4 se muestran los datos máximos anuales. El área hasta la estación de aforo es de 1741.01 km² y el área no aforada es de 275.623 km².

Tabla 4.1. Registros de gastos máximos anuales (m³/s) de la estación hidrométrica Santo Domingo. (Creación propia 2023).

NÚMERO	AÑO	GASTOS	NÚMERO	AÑO	GASTOS	NÚMERO	AÑO	GASTOS
1	1953	177	22	1980	1418	43	2001	63.1
2	1954	486	23	1981	256	44	2002	315
3	1955	610	24	1982	287	45	2003	345
4	1956	278	25	1983	204	46	2004	235
5	1957	246	26	1984	325	47	2005	5980
6	1958	255	27	1985	191	48	2006	132
7	1959	295	28	1986	141	49	2007	238
8	1960	353	29	1987	147	50	2008	250
9	1961	300	30	1988	474	51	2009	191
10	1962	265	31	1989	534	52	2010	733
11	1963	1740	32	1990	187	53	2011	391
12	1964	675	33	1991	40.8	54	2012	264
13	1965	625	34	1992	276	55	2013	663.8
14	1966	898	35	1993	200	56	2014	156.7
15	1967	475	36	1994	35.4	57	2015	48.3
16	1968	665	37	1995	153	58	2016	131.1
17	1969	587	38	1996	111	59	2017	172.2
18	1976	88.1	39	1997	228	60	2018	189.2
19	1977	118	40	1998	2552	61	2019	91.8
20	1978	276	41	1999	177	62	2020	185
21	1979	280	42	2000	148	63	2021	172

Con el registro de gastos máximas anuales, Tabla 4.1, se realizó un análisis estadístico empleando los modelos probabilísticos Normal, Lognormal, Gumbel, Exponencial, Gamma y Doble Gumbel, con el paquete AX. EXE (Jiménez, 2015). A continuación, en la Tabla 4.2 se presenta un resumen de los errores estándar proporcionados por el software AX, el cual nos indica el mejor ajuste.

Tabla 4.2. Resumen de errores estándar programa AX. (Software AX 2023)

Función	Momentos		Máxima Verosimilitud	
	2 parámetros	3 parámetros	2 parámetros	3 parámetros
Normal	710.693	-----	710.693	-----
Lognormal	408.876	419.374	558.977	561.454
Gumbel	594.378	-----	639.289	-----
Exponencial	514.079	-----	556.636	-----
Gamma	454.090	475.716	580.112	11111.000
Doble Gumbel	337.974			
Mínimo error estándar: 337.974				
Calculado por la función: Doble Gumbel				
<input type="button" value="Aceptar"/>				

De acuerdo al resumen de errores presentados en la Tabla 4.2 del programa AX la función de mejor ajuste es la Doble Gumbel, de datos de la población de gastos extremos, con el mínimo error estándar de 337.974.



Figura 4.1. Función Doble Gumbel ajustada con el programa AX a la muestra de datos de la estación hidrométrica (30212) Santo Domingo. (Creación propia 2023)

Tabla 4.3. Resultados obtenidos de los ajustes con los programas AX. (Creación propia 2023)

Tr	Gastos (m³/s)
2	274.6
5	500.5
10	735.0
20	1941.0
50	4444.3
100	6102.6
200	7693.7
500	9754.2
1000	11289.2

4.1.2.- ESTACIÓN HIDROMÉTRICA BOQUERÓN

La información de caudales instantáneos nuevos fue proporcionada por la CFE con oficio "CCeIH-DPR-DPAyS-1324-2022_03Nov2022". La cuenca de Boquerón o Suchiapa tiene un área de 2046.43 km² obtenida de la cartografía escala 1:50,000 de la subcuenca RH30Ei de INEGI. El número de años de registro es de 69 años, que va de 1952-2021. En la Tabla 4.4 se muestran los datos máximos anuales. El área hasta la estación de aforo es de 1700.65 km² y el área no aforada es de 375.48 km².

Tabla 4.4. Gastos máximos anuales (m³/s) de la estación hidrométrica Boquerón. (Creación propia 2023).

NÚMERO	AÑO	GASTOS	NÚMERO	AÑO	GASTOS	NÚMERO	AÑO	GASTOS
1	1952	282	24	1975	151.02	47	1999	355
2	1953	181	25	1976	242.4	48	2000	268
3	1954	260	26	1977	82.34	49	2001	173
4	1955	272	27	1978	263.3	50	2002	255
5	1956	222	28	1979	218	51	2003	443
6	1957	80	29	1980	545	52	2004	203
7	1958	299	30	1981	316.3	53	2005	1200
8	1959	168	31	1982	342	54	2006	177
9	1960	239	32	1983	276.5	55	2007	239
10	1961	139	33	1985	165.9	56	2008	264
11	1962	290	34	1986	306.39	57	2009	181
12	1963	623	35	1987	173.28	58	2010	520
13	1964	158	36	1988	270.45	59	2011	382
14	1965	129.6	37	1989	767.72	60	2012	300
15	1966	238	38	1990	99.84	61	2013	333
16	1967	185.4	39	1991	111.50	62	2014	262.5
17	1968	181.3	40	1992	183.818	63	2015	82.5
18	1969	296	41	1993	259.92	64	2016	154.5
19	1970	323.36	42	1994	75.1	65	2017	270.8
20	1971	268.6	43	1995	209	66	2018	213
21	1972	266.5	44	1996	166	67	2019	113
22	1973	501	45	1997	336.25	68	2020	126
23	1974	285.5	46	1998	1191	69	2021	129

Con el registro de gastos máximas anuales, Tabla 4.4, se realizó un análisis estadístico empleando los modelos probabilísticos Normal, Lognormal, Gumbel, Exponencial, Gamma y Doble Gumbel, con el paquete AX. EXE (Jiménez, 2015). A continuación, en la Tabla 4.5 se presenta un resumen de los errores estándar proporcionados por el software AX, el cual nos indica el mejor ajuste.

Tabla 4.5 Resumen de errores estándar programa AX. (Creación software AX).

Función	Momentos		Máxima Verosimilitud	
	2 parámetros	3 parámetros	2 parámetros	3 parámetros
Normal	121.881	-----	121.881	-----
Lognormal	70.565	67.624	87.847	88.429
Gumbel	90.627	-----	105.319	-----
Exponencial	73.397	-----	98.025	-----
Gamma	85.337	75.103	97.977	86.189
Doble Gumbel	52.405			
Mínimo error estándar: 52.405				
Calculado por la función: Doble Gumbel				
<input type="button" value="Aceptar"/>				

De acuerdo al resumen de errores presentados en la Tabla 4.4 del programa AX la función de mejor ajuste es la Doble Gumbel, de datos de la población de gastos extremos, con el mínimo error estándar de 52.405.

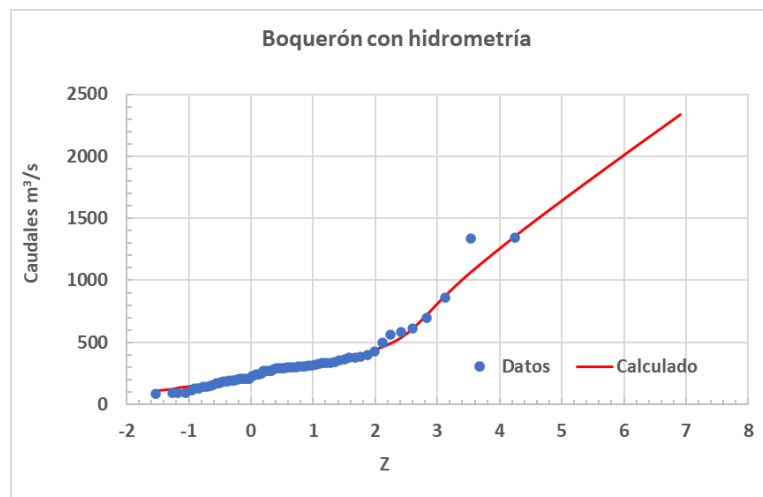


Figura 4.2. Función Doble Gumbel ajustada con el programa AX a la muestra de datos de la estación hidrométrica (30020) Boquerón, Suchiapa. (Elaboración propia 2023).

Tabla 4.6. Resultados obtenidos de los ajustes con los programas Ax. (Elaboración propia 2023)

Tr	Gastos (m³/s)
2	225
5	335
10	467
20	762
50	1125
100	1368
200	1600
500	1900
1000	2127

4.1.3.- ESTACIÓN HIDROMÉTRICA ACALA

La información de caudales instantáneos nuevos fue proporcionada por la CFE con oficio “CCeIH-DPR-DPAyS-1324-2022_03Nov2022”. La estación hidrométrica Acala tiene un área de cuenca de 2082.33 km² obtenida de la cartografía escala 1:50,000 de la subcuenca RH30Eb de INEGI. El número de años de registro es de 39 años, que va de 1983-2021. En la tabla 4.7 se muestran los datos máximos anuales.

Tabla 4.7. Registros de gastos máximos anuales (m³/s) de la estación hidrométrica Acala. (Elaboración propia 2023)

NÚMERO	AÑO	GASTOS	NÚMERO	AÑO	GASTOS
1	1983	1591	21	2003	909
2	1984	1022	22	2004	778
3	1985	1048	23	2005	873
4	1986	869	24	2006	944
5	1987	813	25	2007	925
6	1988	765	26	2008	1350
7	1989	1003	27	2009	823
8	1990	967	28	2010	3148
9	1991	770	29	2011	1292
10	1992	847	30	2012	975
11	1993	849	31	2013	940
12	1994	700	32	2014	1121
13	1995	953	33	2015	929
14	1996	855	34	2016	943.5
15	1997	898	35	2017	1074
16	1998	835	36	2018	1205
17	1999	1161	37	2019	1031
18	2000	1049	38	2020	1238
19	2001	1044	39	2021	1121
20	2002	863			

Con el registro de gastos máximas anuales, Tabla 4.8, se realizó un análisis estadístico empleando los modelos probabilísticos Normal, Lognormal, Gumbel, Exponencial, Gamma y Doble Gumbel, con el paquete AX. EXE (Jiménez, 2015). A continuación, en la Tabla 4.8 se presenta un resumen de los errores estándar proporcionados por el software AX, el cual indica el mejor ajuste.

Tabla 4.8. Resumen de errores estándar del programa AX. (Software AX).

Función	Momentos		Máxima Verosimilitud	
	2 parámetros	3 parámetros	2 parámetros	3 parámetros
Normal	290.486	-----	290.486	-----
Lognormal	244.777	193.516	262.021	262.090
Gumbel	241.623	-----	266.289	-----
Exponencial	211.728	-----	621.956	-----
Gamma	262.513	216.665	294.002	242.655
Doble Gumbel	161.971			

Mínimo error estándar: 161.971

Calculado por la función: Doble Gumbel

De acuerdo al resumen de errores presentados en la Tabla 4.8 del programa AX la función de mejor ajuste es la Doble Gumbel, con el mínimo error estándar de 161.971.

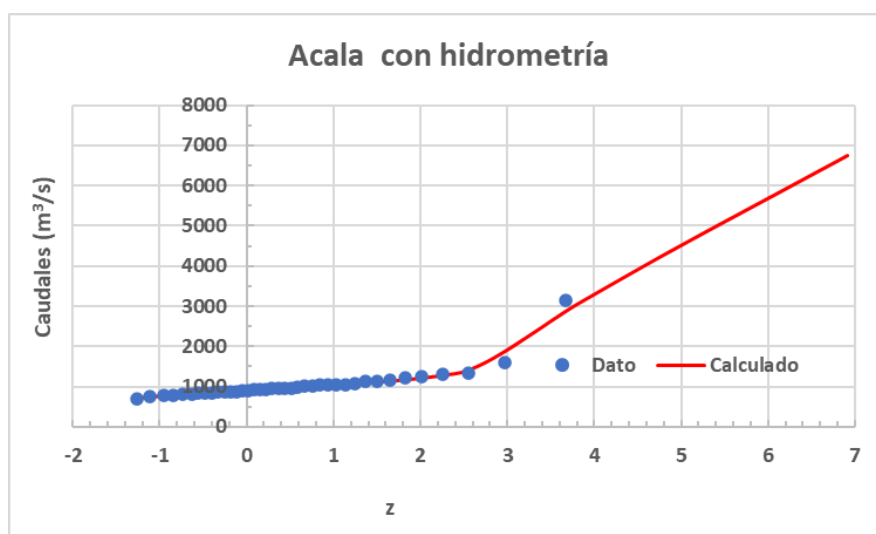


Figura 4.3. Función Doble Gumbel ajustada con el programa AX a la muestra de datos de la estación hidrométrica (30210) Acala, río Grijalva. (Elaboración propia 2023).

Tabla 4.9. Resultados obtenidos del ajuste con el programa AX. (Elaboración propia 2023)

Tr	Gastos (m ³ /s)
2	947.4
5	1115.1
10	1284.8
20	1880.7
50	3176.4
100	4038.6
200	4866.1
500	5934.6
1000	6741.3

4.1.4.- ESTACIÓN HIDROMÉTRICA PUENTE COLGANTE I Y II

La estación hidrométrica Puente Colgante, se localizaba en el antiguo puente que cruzaba el río Grijalva desde la zona de la parte norte de la cuenca del río hacia la parte sur, la operación inicio en 1948 y finalizó en el año 1973, cuando entra en operación la presa la Angostura. En la estación Puente Colgante se obtuvieron 26 años de registros. El área de la cuenca hasta este punto es de aproximadamente 25,210 km².

En la Tabla 4.10 se presentan los caudales de la estación Puente Colgante obtenidos de la Base de datos de Aguas Superficiales, con 32 datos, del año 1948-1979, le llamaremos Puente Colgante I, sin embargo, en la Tabla 4.11 se presentan datos de la estación Puente Colgante obtenidos de la regionalización de caudales de la tesis de maestría “Regionalización de lluvias y escurrimientos en la cuenca del alto río Grijalva” presentada por Delva Guichard Romero y dirigida por Ramón Domínguez Mora, presentada en el año 1998, le llamaremos Puente Colgante II.

<https://tesiunam.dgb.unam.mx/F/NQSPYK7KIBNR7LM647EMKFJDS9CQUXBI9V59H6XP M2YPP52B6J-16147?func=full-set-set&set number=962069&set entry=000088&format=999>.

Tabla 4.10.- Caudales de la estación Puente Colgante I, obtenidos de la base BANDAS, (Elaboración propia 2023).

NÚMERO	AÑO	GASTOS	NÚMERO	AÑO	GASTOS
1	1948	978	17	1964	1651
2	1949	1688	18	1965	2708
3	1950	1429	19	1966	2475
4	1951	1201	20	1967	1472
5	1952	1849	21	1968	2158
6	1953	2030	22	1969	2519
7	1954	1537	23	1970	2732
8	1955	2830	24	1971	2013
9	1956	2297	25	1972	1465
10	1957	1241	26	1973	3799
11	1958	1734	27	1974	459
12	1959	1581	28	1975	271
13	1960	2166	29	1976	956
14	1961	1479	30	1977	805
15	1962	2293	31	1978	939
16	1963	4302	32	1979	1165

Con el registro de gastos máximas anuales, Tabla 4.10, se realizó un análisis estadístico empleando los modelos probabilísticos Normal, Lognormal, Gumbel, Exponencial, Gamma y Doble Gumbel, con el paquete AX. EXE (Jiménez, 2015). A continuación, en la Tabla 4.11 se presenta un resumen de los errores estándar proporcionados por el software AX, el cual indica el mejor ajuste.

Tabla 4.11.- Resumen de errores estándar del Software AX. (Software AX).

Función	Momentos		Máxima Verosimilitud	
	2 parámetros	3 parámetros	2 parámetros	3 parámetros
Normal	215.366	-----	215.366	-----
Lognormal	180.260	164.222	173.288	235.773
Gumbel	161.027	-----	138.959	-----
Exponencial	234.795	-----	751.847	-----
Gamma	164.892	164.821	153.667	11111.000
Doble Gumbel	200.387			
Mínimo error estándar: 138.959				
Calculado por la función: Gumbel (máx. ver)				
<input type="button" value="Aceptar"/>				

De acuerdo al resumen de errores presentados en la Tabla 4.8 del programa AX la función de mejor ajuste es la Gumbel, con el mínimo error estándar de 138.959.

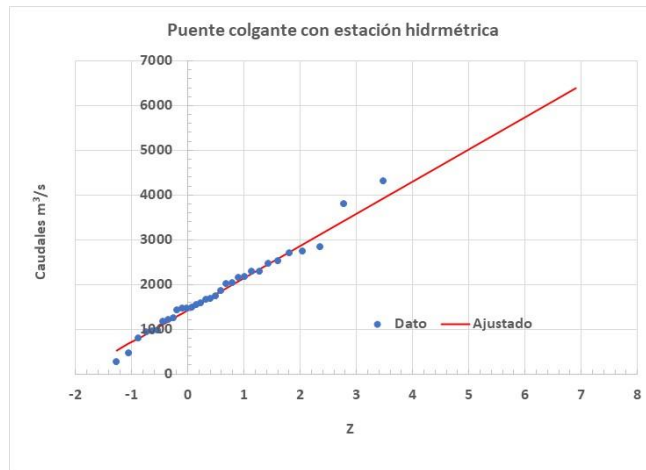


Figura 4.4. Función Gumbel ajustada con el programa AX a la muestra de datos de la estación hidrométrica Puente Colgante I. (Elaboración propia 2023).

Si ajustamos los datos con la función doble Gumbel disminuye el error estandar a 158.22 como se muestra en la Figura 4.5.

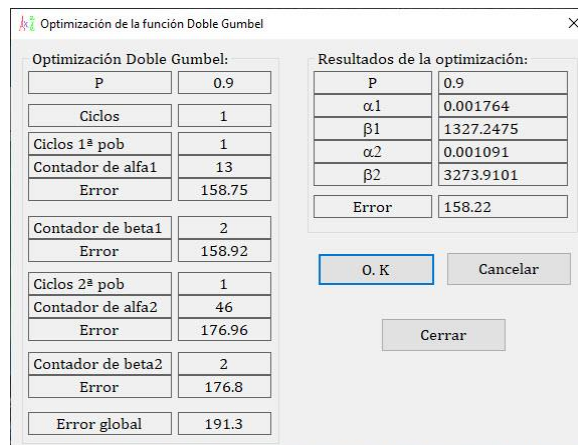


Figura 4.5.- Error estándar de la función Doble Gumbel obtenida del programa AX. (Software AX.EXE).

Finalmente, la función ajustada a Doble Gumbel se presenta en la Figura 4.6.

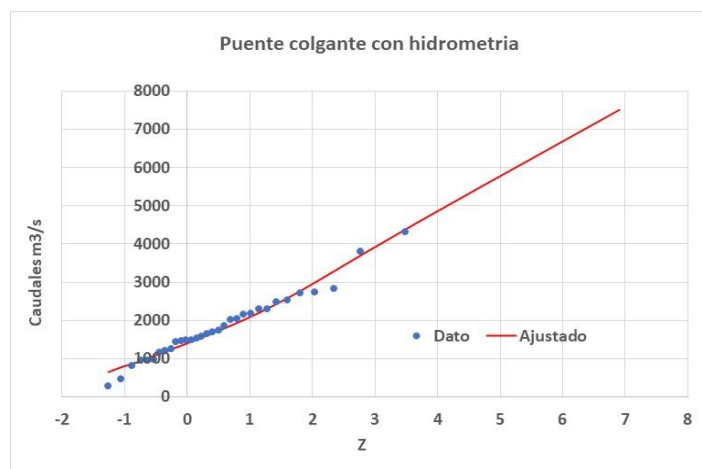


Figura 4.6. Función Doble Gumbel ajustada con el programa AX a la muestra de datos de la estación hidrométrica Puente Colgante. (Elaboración propia 2023).

Como se mencionó la estación hidrométrica Puente Colgante II, se encontraron datos desde 1948-1973, con 26 años de registros que difieren de la base de datos BANDAS. Se presentan en la Tabla 4.12.

Tabla 4.12.- Caudales de la estación Puente Colgante, obtenidos de la base BANDAS. (Elaboración propia 2023)

NÚMERO	AÑO	GASTOS	NÚMERO	AÑO	GASTOS
1	1948	1256	14	1961	1702
2	1949	1896	15	1962	2422
3	1950	1754	16	1963	5908
4	1951	1420	17	1964	1868
5	1952	2116	18	1965	2810
6	1953	2056	19	1966	2515
7	1954	1751	20	1967	1579
8	1955	3449	21	1968	2347
9	1956	2367	22	1969	2715
10	1957	1590	23	1970	3156
11	1958	2003	24	1971	2164
12	1959	1684	25	1972	1733
13	1960	2479	26	1973	3825

Con el registro de gastos máximas anuales, Tabla 4.12, se realizó un análisis estadístico empleando los modelos probabilísticos Normal, Lognormal, Gumbel, Exponencial, Gamma y Doble Gumbel, con el paquete AX. EXE (Jiménez, 2015). A continuación, en la Tabla 4.13 se presenta un resumen de los errores estándar proporcionados por el software AX, el cual indica el mejor ajuste.

Tabla 4.13.- Resumen de errores estándar obtenidos del software AX. (software AX).

Función	Momentos		Máxima Verosimilitud	
	2 parámetros	3 parámetros	2 parámetros	3 parámetros
Normal	483.034	-----	483.034	-----
Lognormal	353.294	315.951	424.677	424.880
Gumbel	356.003	-----	445.049	-----
Exponencial	293.072	-----	1089.103	-----
Gamma	393.305	317.108	434.183	362.213
Doble Gumbel	264.110			

Mínimo error estándar: 264.110

Calculado por la función: Doble Gumbel

Si ajustamos los datos con la función Doble Gumbel disminuye el error estándar a 264.11 como se muestra en la Figura 4.7.

Figura 4.7. Función Doble Gumbel ajustada con el programa AX a la muestra de datos de la estación hidrométrica Puente Colgante. (Elaboración propia 2023)

En la Tabla 4.14 se muestran los resultados de ambos ajustes con diferentes datos localizados de Puente Colgante II.

Tabla 4.14. Resultados obtenidos del ajuste con el software AX. (Elaboración propia 2023).

Tr	Gastos (m ³ /s) BANDAS Puente Colgante I	Gastos (m ³ /s) Guichard, 1998 Puente Colgante II
2	1628.1	2097.7
5	2485.7	2794.5
10	3186.3	3496.1
20	3885	5088.4
50	4762.6	8016.4
100	5405.5	10009.6
200	6039.7	11920.9
500	6877.2	14401.8
1000	7507.8	16252.6

4.2.- Cálculos de los gastos de diseño en la cuenca sin hidrometría o no aforadas

El área desde la presa La Angostura hasta a Ciudad del Agua es de 6373.37 km², en la Figura 4.15 se muestra las subcuencas formadas hasta las estaciones hidrométricas, las subcuencas aguas abajo de las estaciones hidrométricas de Boquerón y Santo Domingo, que no tienen estaciones de aforo, la subcuenca hasta la estación hidrométrica Acala y un área que no tiene estación hidrométrica.

Los gastos de las áreas no aforadas diseño se determinaron por medio de modelos lluvia escurrimiento, estas áreas corresponden a las que están aguas abajo de las 3 estaciones hidrométricas. Obtenidas a partir del programa Qgis, con la información de la CFE.

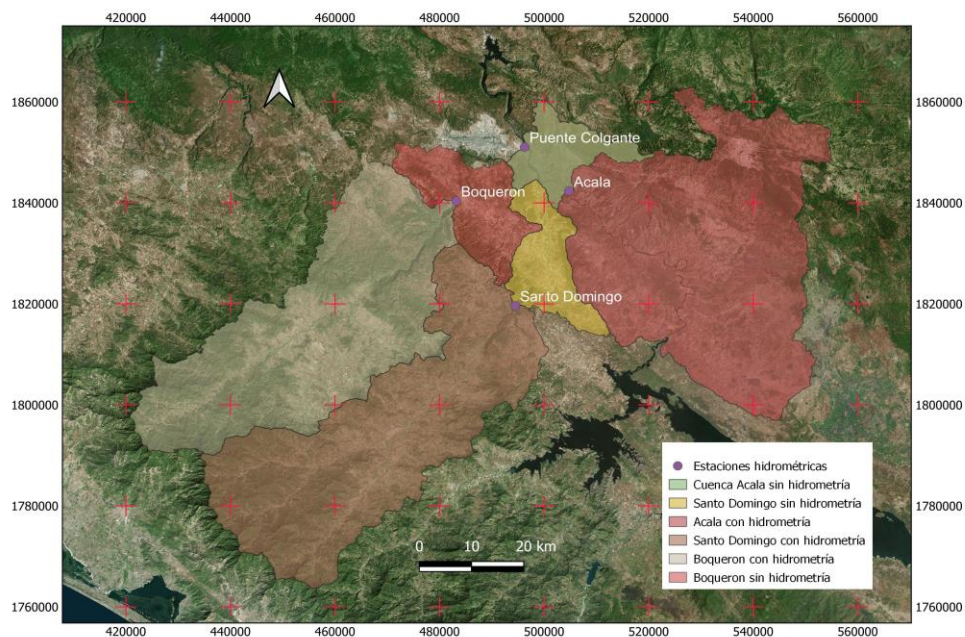


Figura 4.15 Subcuencas que conforman la cuenca de la depresión central del estado Chiapas, entre la presa la Angostura y Ciudad del Agua. Obtenida de INEGI (Elaboración propia 2023).

4.2.1.- Subcuencas sin hidrometría

Las cuencas sin hidrometría se muestran sus características geomorfológicas en la tabla 4.15 se muestran los parámetros fisiográficos.

Tabla 4.15. Parámetros de la cuenca sin hidrometría

No. de cuenca	Río	Área (km ²)	Long. de cauce (m)	Pendiente	Tiempo de concentración (h)
1	Suchiapa no aforada	345.778	67908.21	0.0044	13.8
2	Santo Domingo no aforada	275.623	42153.38	0.0024	12.0
3	Acala no aforada	227.976	36947.20	0.0460	3.5

Para aplicar los tres modelos lluvia escurrimiento se determinó el tipo de uso de suelo de las tres cuencas obtenida de la carta de uso de suelo y vegetación serie VII obtenida de INEGI a escala 1:250,000. También se realizaron los recortes de edafología de la serie II de cada una de las cuencas sin aforos.

En las Figura 4.16 muestran los usos de suelo de la serie VII y la Figura 4.17 edafología serie II de INEGI de las tres subcuencas no aforadas.

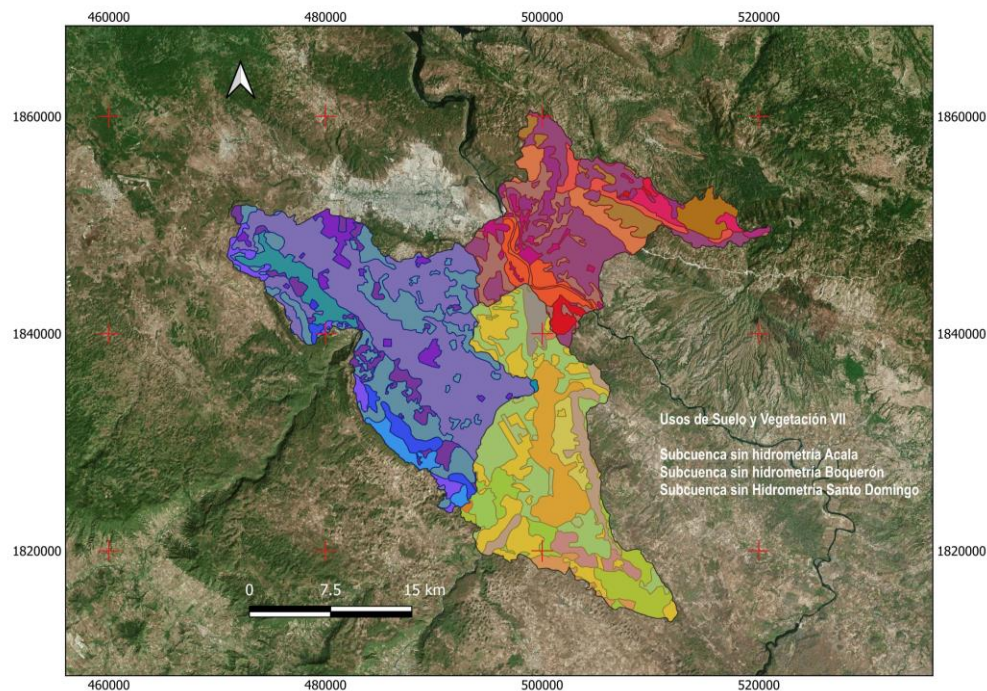


Figura 4.16. Usos de suelo y Vegetación para las tres subcuencas no aforadas. Obtenida de INEGI (Elaboración propia 2023).

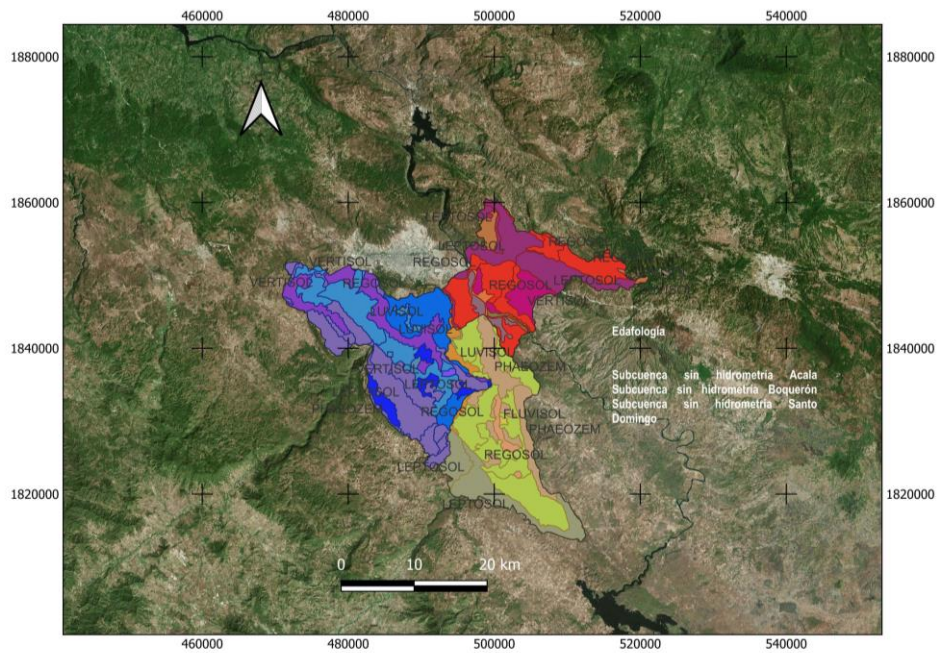


Figura 4.17. Edafología de las tres subcuencas no aforadas. Obtenida de INEGI (Elaboración propia 2023).

Las cuencas con los usos de suelo y vegetación se traslaparon con la edafología para obtener el valor de N ponderada para ser utilizada en el cálculo de la precipitación en exceso, con la cual se obtendrán los caudales asociados a los diferentes periodos de retorno, utilizando modelos lluvia escurrimiento.

En la Tabla 4.16 se muestran los valores de N encontradas para cada cuenca no aforada.

Tabla 4.16.- Valores del número de escurrimiento N . (Elaboración propia 2023)

No. de cuenca	Río	N
1	Suchiapa no aforada	80
2	Santo Domingo no aforada	77
3	Acala no aforada	77

Las precipitaciones asociadas a periodos de retorno se utilizaron las estaciones más cercanas a las subcuencas son las que se presentan en la Tabla 4.17, las precipitaciones se les aplico el factor de L. Weiss de 1.13 (Campos, 2014).

4.3.- Resultados de los métodos de homogeneidad regional

4.3.1.- MÉTODO DE LANGBEIN (MODIFICADO)

TEST DE LANBEIN MODIFICADO		
	0.3684	57
	0.5735	70
	0.3198	54
	0.3187	73
	0.3474	70
	0.2325	55
	0.2751	51
	0.2859	65
cv :=	0.2733	50
	0.3041	37
	0.2817	28
	0.4546	60
	0.2652	70
	0.3551	43
	0.3163	25
	0.4286	30
	0.4539	28
	0.2204	17
n := rows (cv)	ORIGIN := 1	i := [1..n]
n := 18		
	$CVr := \frac{\sum_{i=1}^n (ndat_i \cdot cv_i)}{\sum_{i=1}^n ndat_i}$	
	CVr = 0.3426	
	$\psi := CVr^2 - 0.57 \cdot CVr - 0.55$	
	$\psi = -0.6279$	
	$sesgo := \frac{CVr \cdot \psi}{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n ndat_i}$	
	sesgo = -0.0044	
	$\varphi_i := (cv_i)^2 - 1.14 \cdot cv_i + 1.10$	
	$var10_i := 2.8 \cdot \varphi_i \cdot \left(\frac{1}{ndat_i} - \frac{1}{\sum_{i=1}^n ndat_i} \right)$	
	var10 ₁ = 0.0375	
	$sesgo10_i := 1.6732 \cdot \left(\frac{\varphi_i - \psi}{ndat_i} - \frac{\varphi_i - n \cdot \psi}{\sum_{i=1}^n ndat_i} \right)$	

$$T_{s_i} := \frac{1}{\left(1 - e^{-e^{-\left(-2.2504 + \text{sesgo10}_i + 1.96 \cdot \left(\sqrt{\text{var10}_i}\right)\right)}}\right)}$$

$$T_{inf_i} := \frac{1}{\left(1 - e^{-e^{-\left(-2.2504 + \text{sesgo10}_i - 1.96 \cdot \left(\sqrt{\text{var10}_i}\right)\right)}}\right)}$$

$$y_{d_i} := 1.6732 \cdot \left(\frac{CV_r}{CV_i}\right) + 0.5772$$

$$TQ_i := \frac{1}{\left(1 - e^{-e^{-y_{d_i}}}\right)}$$

$\text{sesgo10}_i =$

0.0194
0.0107
0.0224
0.0106
0.0117
0.023
0.0258
0.0152
0.0268
0.0436
0.0658
0.0166
0.0127
0.0334
0.0752
0.0564
0.0617
0.127

En la Tabla 4.18 se muestran las estaciones que el test de Langbein considera que pertenecen a una región homogénea, elaborada con el software Smath Studio®. (Elaboración propia 2023). <https://smath.com/en-US/view/SMathStudio/download/>

Tabla 4.18.- Resultados del test de Langbein. (Elaboración propia 2023).

RESULTADO DE METODO DE LANGBEIN				
	NOMBRE	CLAVE	CV	No. DATOS
1	ACALA	7003	0.3684	57
2	CHICOASEN (CFE)	7035	0.3198	54
3	EL BOQUERON	7039	0.3187	73
4	EL BARRERO	7040	0.3474	70
5	PORTACELI	7132	0.2751	51
6	PUENTE COLGANTE	7134	0.2859	65
7	SOYALO (CFE)	7162	0.2733	50
8	TUXTLA GUTIERREZ (CFE)	7176	0.3041	37
9	VILLA DE CHIAPILLA (CFE)	7184	0.2817	28
10	SANTO DOMINGO (CFE)	7229	0.3551	43
11	EL SABINAL	7238	0.3163	25

4.3.2.- MÉTODO DE FISHER

Los resultados del método de Fisher se presentan en la Figura 4.18 se muestran cuatro zonas de homogeneidad, como puede observarse. En la Tabla 4.19 se presenta las estaciones por zona y en la Tabla 4.20 se presenta las estaciones y las altitudes en

msnm, la zona 2 es la que tiene 9 estaciones y la que se puede utilizar para aplicar la técnica de las estaciones años, para obtener las precipitaciones regionalizadas.

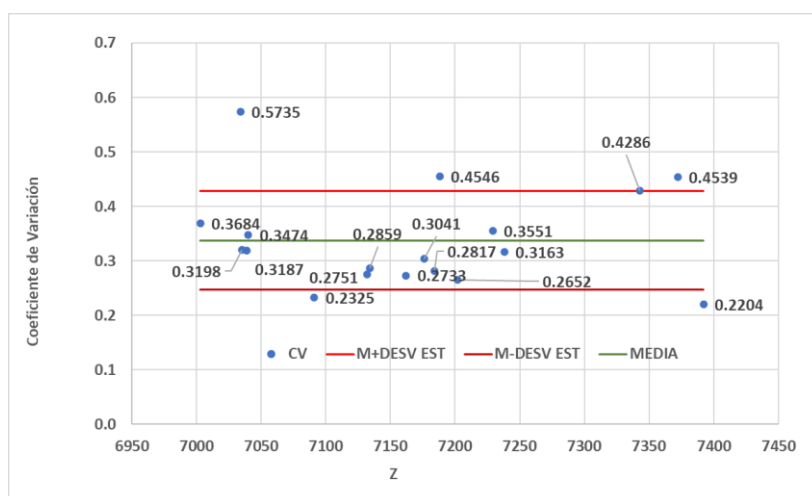


Figura 4.18.- Cuatro zonas de homogeneidad. (Elaboración propia 2023)

Tabla 4.19.- Tabla de estaciones zonificadas por homogeneidad. (Elaboración propia 2023)

ZONA 1	ZONA 2	ZONA 3	ZONA 4
7392	7035	7229	7372
7091	7039	7040	7343
	7132	7003	7188
	7134		7034
	7162		
	7176		
	7184		
	7202		
	7238		

Tabla 4.20.- Tabla con las estaciones y las altitudes sobre msnm. (Elaboración propia 2023).

No	ZONA 1			
	NOMBRE	CLAVE	CV	ALTITUD
1	ZOOMAT	7392	0.2204	420
2	LA ESCALERA	7091	0.2325	700
	ZONA 2			
	NOMBRE	CLAVE	CV	ALTITUD
1	CHICOASEN (CFE)	7035	0.3198	1240
2	EL BOQUERON	7039	0.3187	500
3	PORTACELI	7132	0.2751	780
4	PUENTE COLGANTE	7134	0.2859	418
5	SOYALO (CFE)	7162	0.2733	1175
6	TUXTLA GUTIERREZ (CFE)	7176	0.3041	532
7	VILLA DE CHIAPILLA (CFE)	7184	0.2817	552
8	TUXTLA GUTIERREZ (DGE)	7202	0.2652	543
9	EL SABINAL	7238	0.3163	498
	ZONA 3			
	NOMBRE	CLAVE	CV	ALTITUD

A los datos modulados se les ajusto la mejor función de probabilidades, con el programa AX.

4.4.2.- DATOS MODULADOS AJUSTADOS A UNA FUNCIÓN DE DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDADES CON EL PROGRAMA AX Y AX+B.

Los datos modulados se ajustaron en dos programas el Ax y el programa Ax+b (Merlos, 2015) los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 4.22, también se presentan los datos modulados obtenidos por el Instituto de Ingeniería de la UNAM, realizado para el Centro Nacional de Prevención de Desastres en el año 2017. En la Figura 4.19 se presentan los datos en forma gráfica.

Tabla 4.22.- Resultados obtenidos con los datos modulados con el programa Ax y Ax+b y los obtenidos por el CENAPRED. (elaboración propia 2023).

Tr	Dato AX	Dato Ax+b	CENAPRED 2017
2	0.81	0.81	0.93
5	1.06	1.04	1.19
10	1.28	1.24	1.38
20	1.47	1.49	1.6
50	1.71	1.76	1.98
100	1.88	1.93	2.33
200	2.05	2.10	2.69
500	2.27	2.32	3.17
1000	2.44	2.47	3.53

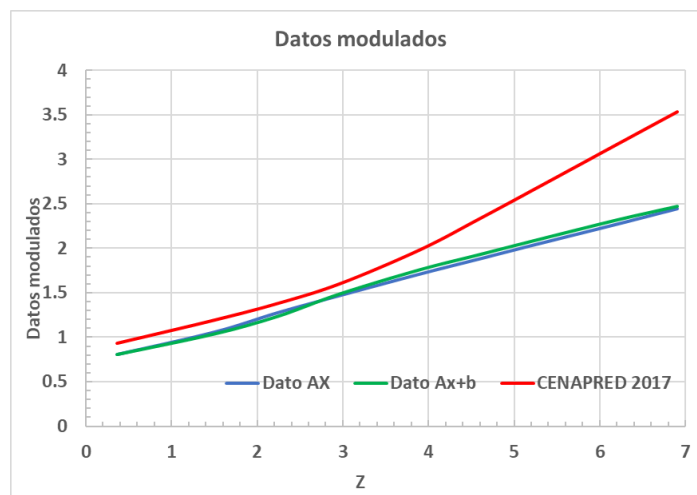


Figura 4.19.- Datos modulados obtenidos por el programa Ax, Ax+b y los obtenidos por el CENAPRED. (Elaboración propia 2023)

Se observa que los datos modulados por el estudio del Instituto de Ingeniería son más altos que los presentados por la regionalización realizada con las 11 estaciones cercanas a las cuencas sin aforos, por lo tanto, se decidió tomar estos valores para obtener las precipitaciones asociadas a un periodo de retorno de las cuencas no aforadas.

4.5.- Estaciones regionalizadas

Los resultados de las precipitaciones de las estaciones cercanas a las cuencas no aforadas se presentan en la Tabla 4.23.

Tabla 4.23.- Estaciones regionalizadas con los datos modulados del Instituto de Ingeniería. (Elaboración propia).

		ACALA	CHICOASEN (CFE)	EL BOQUERON	EL BARRERO	PORTACELI	PUENTE COLGANTE	SOYALO (CFE)	TUXTLA GUTIERREZ (CFE)	VILLA DE CHIAPILLA (CFE)	SANTO DOMINGO (CFE)	EL SABINAL
		7003	7035	7039	7040	7132	7134	7162	7176	7184	7229	7238
Tr	Inst Ing	86.64	74.26	72.81	73.98	76.43	73.87	64.85	77.69	77.45	88.69	67.77
2	0.93	80.58	69.07	67.72	68.80	71.08	68.70	60.31	72.25	72.03	82.48	63.03
5	1.19	103.10	88.38	86.65	88.03	90.95	87.90	77.18	92.45	92.17	105.54	80.65
10	1.38	119.57	102.49	100.48	102.09	105.48	101.94	89.50	107.21	106.89	122.40	93.53
20	1.6	138.63	118.82	116.50	118.36	122.29	118.19	103.77	124.30	123.93	141.91	108.44
50	1.98	171.55	147.04	144.17	146.47	151.33	146.25	128.41	153.82	153.36	175.61	134.19
100	2.33	201.88	169.65	169.65	172.37	178.09	172.11	151.11	181.01	180.47	206.65	157.91
200	2.69	233.07	199.77	199.77	195.87	199.00	198.70	174.46	208.98	208.35	238.58	182.31
500	3.17	274.66	235.42	230.82	234.51	242.29	234.16	205.59	246.27	245.53	281.16	214.84
1000	3.53	305.85	262.15	257.03	261.14	269.80	260.75	228.93	274.23	273.41	313.09	239.24
2000	3.89	337.04	288.89	283.24	287.77	297.32	287.34	252.28	302.20	301.29	345.02	263.63
5000	4.35	376.89	323.05	316.73	321.80	332.48	321.32	282.11	337.94	336.92	385.81	294.81
10000	4.72	408.95	350.53	343.67	349.17	360.76	348.65	306.11	366.68	365.58	418.63	319.88

Con la Tabla 4.23 se generaron los polígonos de Thiessen para encontrar las precipitaciones máximas medias asociadas a los periodos de retorno de 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500 y 1000 años.

En la Figura 4.19 se muestran los polígonos de Thiessen con las cuencas sin aforo, elaborados con la ayuda del software Qgis y los datos de precipitación de las diferentes estaciones climatológicas. (creación propia 2023)

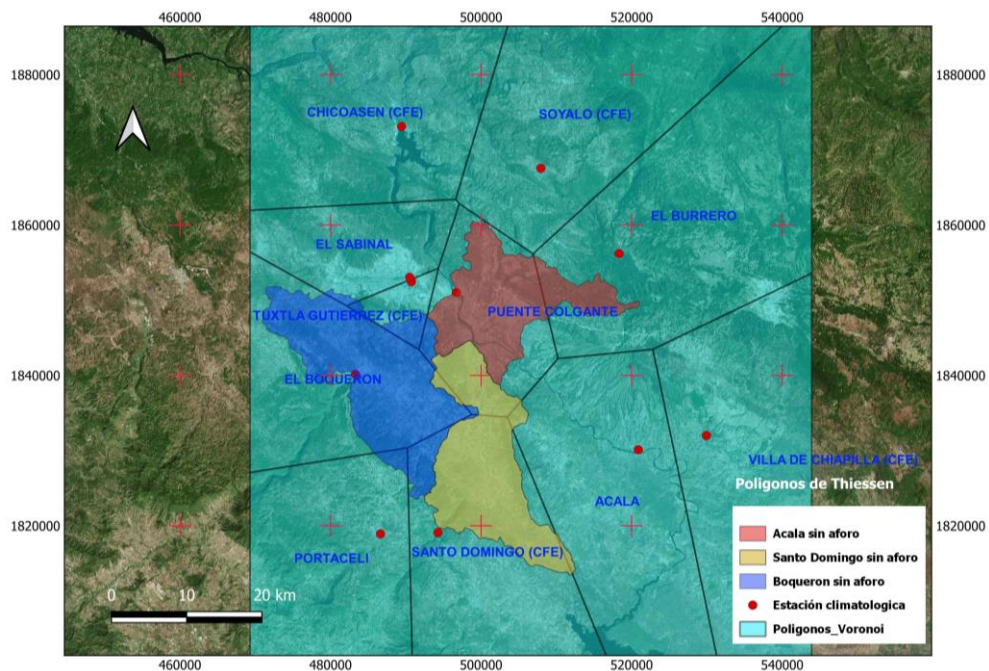


Figura 4.19.- Polígonos de Thiessen con las cuencas sin aforo

En la Tabla 4.24 muestra las precipitaciones de diseño obtenidos con los polígonos de Thiessen de cada subcuenca sin aforo.

Tabla 4.14. Precipitaciones de diseño obtenidas para diferentes periodos de retorno. (Elaboración propia).

Tr	P media (mm) Acala	P media (mm) Santo Domingo	P media (mm) Boquerón
2	68.72	79.26	69.25
5	87.93	101.41	88.61
10	101.97	117.60	102.76
20	118.22	136.35	119.14
50	146.30	168.74	147.44
100	172.16	198.56	173.50
200	198.76	229.24	200.31
500	234.23	270.15	236.05
1000	260.83	300.83	262.86

4.5.1.- FACTORES DE REDUCCIÓN POR ÁREA (FRA) DE LA CUENCA GRIJALVA

Para transformar las precipitaciones en gastos, se tienen que tener en cuenta los Factores de Reducción por Área (FRA).

Para determinar los FRA se utilizó el trabajo realizado por Guichard 1998, Sánchez, 2017. En tesis de posgrado de la Facultad de Ingeniería de la UNAM y la UNACH. En la tabla 4.15 se pueden observar los valores de las áreas y los coeficientes de FRA, son los valores promedios de los obtenidos por periodo de retorno.

En la figura 4.20 se muestra la curva formada por los FRA en el eje de las ordenadas y las áreas en el eje de las abscisas.

Tabla 4.15 Valores de las áreas y los coeficientes de FRA (Guichard 1998, Sánchez,2017).

Tabla 4.15.- Áreas y Factores de Redacción por Área (Guichard 1998, Sánchez, 2017).

Área	RH 30
10	0.865
50	0.788
100	0.754
500	0.677
1000	0.644
5000	0.567
10000	0.533
100000	0.423

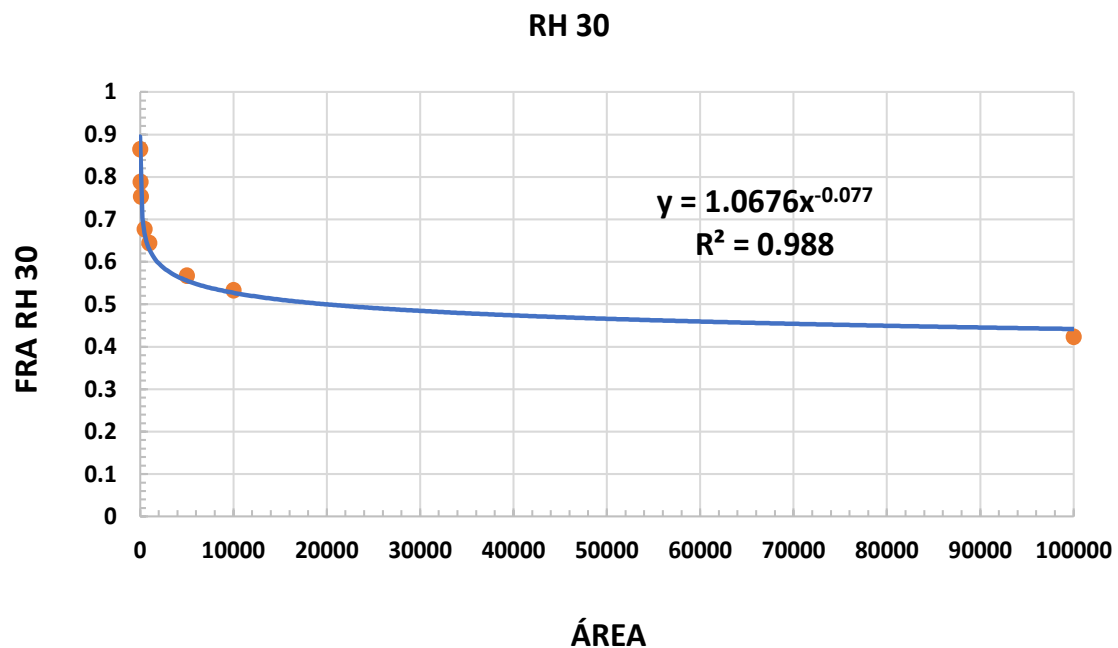


Figura 4.20. Curva formada por los FRA. (Sánchez, 2017)

La ecuación general de ajuste es potencial como puede observarse en la Figura 4.20 y en la siguiente ecuación:

$$FRA=1.0676x^{-0.077}$$

Con las precipitaciones de diseño de cada cuenca sin aforo se aplicó el factor de reducción por área.

En la Tabla 4.16, 4.17 y 4.18 se encuentran las precipitaciones aplicando el FRA presentada por la ecuación de la Figura 4.20.

Tabla 4.16.- Precipitación de diseño para la cuenca no aforada de Acala. (Elaboración propia 2023)

Tr	P (mm)	P (mm)*FRA
2	68.7	48.30
5	87.9	61.80
10	102.0	71.67
20	118.2	83.09
50	146.3	102.82
100	172.2	121.00
200	198.8	139.70
500	234.2	164.62
1000	260.8	183.32

Tabla 4.17.- Precipitación de diseño para la cuenca no aforada de Boquerón. (Elaboración propia 2023)

Tr	P (mm)	P (mm)*FRA
2	69.3	47.14
5	88.6	60.31
10	102.8	69.94
20	119.1	81.09
50	147.4	100.35
100	173.5	118.09
200	200.3	136.34
500	236.1	160.67
1000	262.9	178.91

Tabla 4.18.- Precipitación de diseño para la cuenca no aforada de Santo Domingo.
(Elaboración propia 2023)

Tr	P (mm)	P (mm)*FRA
2	79.3	54.89
5	101.4	70.24
10	117.6	81.46
20	136.4	94.44
50	168.7	116.87
100	198.6	137.53
200	229.2	158.78
500	270.1	187.11
1000	300.8	208.36

4.6.- Transformación de la precipitación en gasto

Para transformar las precipitaciones en escurrimiento se utilizaron los modelos lluvia-escurrimiento de Chow, Hidrograma Unitario Triangular y del servicio de Conservación de Suelos (Aparicio, 1994). A continuación, se describen los métodos.

4.6.1.- El método de chow

Este método se aplica a cuencas menores a 24.3 km², está basado en la teoría del hidrograma unitario y de la curva S la cual permite obtener otros hidrogramas unitarios con duraciones diferentes. También es un método de los llamados sintéticos. (Aparicio, 1994).

Se determina mediante la fórmula:

$$Q = \frac{0.278P_e A}{d_e} Z$$

Donde:

P_e es la lluvia en exceso del intervalo, en mm

d_e es la duración en exceso de la lluvia en horas

$Z=d/T_r$ es el factor de reducción

A es el área de la cuenca, en km^2

“Este método se aplica para cuencas en las cuales no se cuenta con información, menores a 24.3 km^2 , por lo tanto, el procedimiento conveniente para evaluar P_e a partir de la lluvia máxima de diseño con el método de los números de escurrimiento del SCS. El factor de reducción de pico Z se calcula, según Chow, como una función del tiempo de retraso y la altura de lluvia en exceso como se muestra en la ecuación siguiente” (Aparicio,1994, Campos, 2010):

$$Z_1 = 9.046411 E10^{-4} + 0.7623037 (d/T_r) + 0.09239033 (d/T_r)^2 - 0.2785835 (d/T_r)^3$$
$$Z = Z_1 + 0.08334881 (d/T_r)$$

El tiempo de retraso se calcula según Chow

$$T_r = 0.005 \left[\frac{L}{\sqrt{S}} \right]^{0.64}$$

Donde:

L es la longitud del cauce principal, en metros

S es la pendiente del cauce, en %

T_r es el tiempo de retraso, en h

Procedimiento cálculo:

a). - Se calcula la precipitación en exceso P_e con el método de los números de escurrimientos asociados a un periodo de retorno.

b). - Se calcula el tiempo de concentración con la fórmula de Kirpich

$t_c = 0.0663 \left[\frac{L}{\sqrt{S}} \right]^{0.77}$ si es una microcuenca, entonces $d_e = t_c$. Además, se calcula el

tiempo de retraso T_r

c). - Se determina el valor de Z

d). - Se aplica la fórmula de Chow y se obtiene un gasto de diseño Q asociado a un periodo de retorno.

e). - Se repite el procedimiento para otros periodos de retorno

4.6.2.- EL MÉTODO DEL HIDROGRAMA UNITARIO TRIANGULAR

“El método del hidrograma unitario triangular ha sido desarrollado para cuencas pequeñas y al igual que el método de Chow y el SCS se requiere conocer las características fisiográficas de la cuenca.”

“Los gastos de diseño también se calcularon con el método del hidrograma unitario triangular:”

$$Q = 0.208 \frac{P_e A}{T_p}$$

Donde:

Q gasto pico, en m^3/s

P_e lluvia en exceso del intervalo, en mm

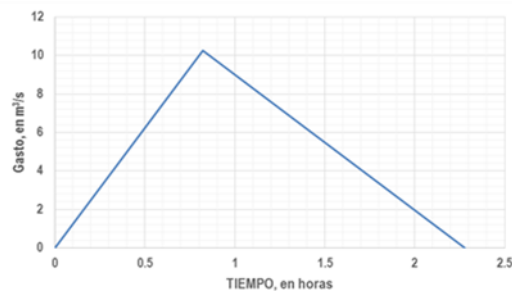
A área de la cuenca, en km^2 .

T_p tiempo pico, en h

“En el método del HUT se utiliza la altura de precipitación en exceso calculada por el método SCS y el tiempo pico calculado con la siguiente fórmula:”

$$t_p = \sqrt{t_c} + 0.6t_c \text{ donde } t_c = 0.0663 \left[\frac{L}{\sqrt{S}} \right]^{0.77}$$

“ t_c es el tiempo de concentración, en horas, L es la longitud principal en metros y S su pendiente en %. La figura siguiente muestra la forma que tendría el HUT”



“Para determinar el valor de la altura de precipitación en exceso por medio del método de SCS (U.S. Soil Conservation Service) se necesita determinar el valor del número de escurrimiento N , para esto se necesita conocer el uso de suelo de la zona de estudio” (Aparicio, 1994).

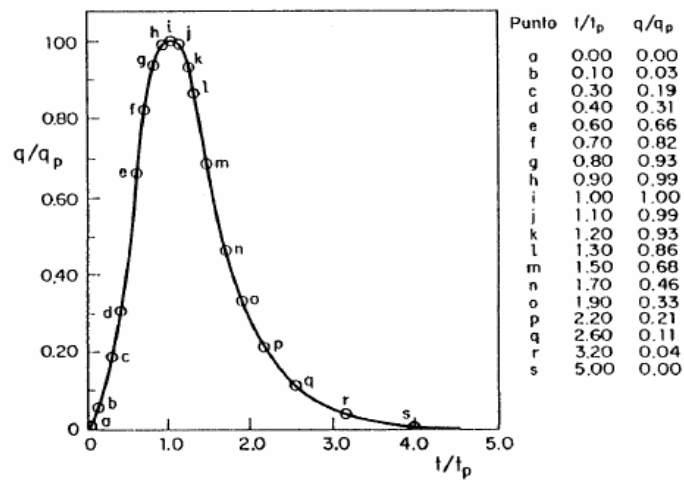
Procedimiento cálculo:

- Se calcula la precipitación en exceso P_e con el método de los números de escurrimientos asociados a un periodo de retorno.
- Se calcula el tiempo de concentración con la fórmula de Kirpich $t_c = 0.0663 \left[\frac{L}{\sqrt{S}} \right]^{0.77}$ si es una microcuenca, entonces $d_e = t_c$.
- Se calcula el tiempo pico t_p
- Se aplica la fórmula del HUT y se obtiene un gasto de diseño Q asociado a un periodo de retorno.
- Se repite el procedimiento para otros periodos de retorno

4.6.3.- MÉTODO DEL SERVICIO DE CONSERVACIÓN DE SUELOS

“La fórmula del SCS de los E.U. fue propuesta en 1975 y propone utilizar un hidrograma unitario adimensional como se observa en la figura siguiente, este

tipo de modelo lluvia escurrimiento se le llama sintético puesto que únicamente se utilizan las precipitaciones en exceso para determinar los gastos de diseño” (Aparicio, 1994).



Se determina por medio de la fórmula:

$$q_p = \frac{0.208A}{t_p}$$

Donde:

$$t_p = \sqrt{t_c} + 0.6t_c$$

q_p Gasto unitario en m³/s/mm

A Área de la zona de estudio, en km²

t_p Tiempo pico, en h

En la tabla 4.16 se tiene las abscisas y ordenadas del hidrograma unitario curvilíneo (Aparicio, 1994).

Tabla 4.16. Datos para obtener el hidrograma unitario curvilíneo. (Elaboración propia 2023)

t/t _p hr	q/q _p m ³ /s	t/t _p hr	q/q _p m ³ /s
0.00	0.00	1.50	0.68
0.10	0.03	1.70	0.46
0.30	0.19	1.90	0.33
0.40	0.31	2.20	0.21
0.60	0.66	2.60	0.11
0.70	0.82	3.20	0.04
0.80	0.93	5.00	0.00
0.90	0.99		
1.00	1.00		
1.10	0.99		
1.20	0.93		
1.30	0.86		

Procedimiento de cálculo:

- a). - Se calcula q_p y t_p con las fórmulas del método.
- b). - Se multiplica t_p por t/t_p y q_p por q/q_p y se obtienen las abscisas t y las ordenadas q
- c). - Se repite el procedimiento para cada valor de las líneas de la tabla 4.16, así se obtiene el hidrograma unitario.
- d). - Los valores de q se multiplican por la precipitación en exceso Pe asociada a un periodo de retorno obteniendo el hidrograma de diseño.
- e). - Se repite el procedimiento para determinar el gasto de diseño Q para los periodos de retorno requeridos.

4.6.4.- Resultados hidrológicos de la cuenca sin hidrometría

Aplicados los tres modelos lluvia escurrimiento y con los parámetros de las cuencas se obtuvieron los resultados de los gastos de diseño para diferentes periodos de retorno, en las tablas 4.17, 4.18 y 4.19, se presentan los caudales de cada una de las tres cuencas sin aforo.

Tabla 4.17. Gastos (m^3/s) de diseño para los tres modelos lluvia escurrimiento de Santo Domingo sin aforo. (Elaboración propia 2023)

Tr (años)	CHOW	HUT	SCS
2	126.0	82.0	82.1
5	212.3	138.2	138.3
10	282.4	183.8	183.9
20	369.1	240.2	240.4
50	529.0	344.3	344.5
100	684.5	445.5	445.7
200	850.1	553.3	553.6
500	1077.5	701.3	701.7
1000	1251.7	814.6	815.1

Tabla 4.18. Gastos (m^3/s) de diseño para los tres modelos lluvia escurrimiento de Suchiapa sin aforo. (Elaboración propia 2023)

Tr(años)	CHOW	HUT	SCS
2	125.2	82.5	82.5
5	212.4	139.9	140.0
10	283.5	186.7	186.9
20	371.5	244.7	244.9
50	534.3	351.9	352.2
100	692.8	456.4	456.7
200	861.9	567.8	568.1
500	1094.3	720.8	721.3
1000	1272.3	838.2	838.7

Tabla 4.19. Gastos (m^3/s) de diseño para los tres modelos lluvia escurrimiento de Acala sin aforo. (Elaboración propia 2023).

Tr(años)	CHOW	HUT	SCS
2	206.6	135.8	135.9
5	364.3	239.5	239.6
10	495.0	325.3	325.5
20	658.6	432.9	433.1
50	964.5	633.9	634.3
100	1265.3	831.7	832.2
200	1588.5	1044.0	1044.7
500	2034.9	1337.5	1338.4
1000	2378.6	1563.3	1564.4

De los tres métodos utilizados se eligió para llevar a cabo las simulaciones el método del hidrograma del Servicio de Conservaciones de Suelos (SCS) con todos los periodos de retorno, es un método hidrológico agregado ampliamente usado en México y en el mundo, específicamente, en el estado de Chiapas, en estudios hidrológicos desarrollados tanto por el consultor, como por la Universidad Autónoma de Chiapas (Guichard et al, 1998) y el Instituto de Ingeniería de la UNAM demostrando ser un método robusto (Domínguez et al, 2017,2018).

En el anexo A.2 se muestran los cálculos hidrológicos.

4.7.- Resultados de la hidrología: Gastos de diseño asociados a los periodos de retorno de 2, 5, 10, 20, 20, 50, 100, 200, 500 y 1000 años de toda la cuenca desde la presa la Angostura hasta el Ciudad del Agua

Los hidrogramas totales asociados a un periodo de retorno hasta Ciudad del Agua se transitaron con el método de Muskingum.

El transitó una avenida o hidrograma a través de un tramo de río desde un punto A (entrada) a un punto B (salida), hace que el pico del hidrograma (caudal máximo) al fluir por un tramo de un cauce éste pico disminuya aguas abajo.

Para ello existe el problema se plantea de la siguiente manera; existe un caudal de entrada Q_i y un caudal de salida Q_s y un almacenamiento en el tramo D a través del tiempo Dt , como se expresa en la siguiente ecuación (Solís, 2003, p. 40-45):

$$Q_{salida} - Q_{entrada} = \Delta \text{almacenamiento} / \Delta t$$

La ecuación anterior se expresa así:

$$I - O = \frac{S_i - S_{i-1}}{\Delta t}$$

Donde:

I = Caudal medio de entrada (durante el intervalo Dt)

O = Caudal medio de salida (durante el intervalo Dt)

S_i = Volumen al final del tiempo del Δt (tiempo t_2)

S_{i-1} = Volumen almacenado en el comienzo del Δt (tiempo t_1)

Δt = intervalo de tiempo entre los tiempos t_{i-1} y t_i

Es posible que el caudal de entrada o el de salida I o no sean constantes a largo del tiempo, por ello se pueden considerar las medias de las entradas y salidas.

$$\frac{I_{i-1} + I_i}{2} - \frac{O_{i-1} + O_i}{2} = \frac{S_i - S_{i-1}}{\Delta t}$$

El volumen o almacenamiento (S) en un tramo del cauce puede descomponerse en dos partes:

Almacenamiento en prisma que sería proporcional al caudal de salida (O)

Almacenamiento en cuña, que es la diferencia entre el caudal de entrada y el de salida, cuanto mayor sea la diferencia más pronunciada será la cuña:

$$S_{prisma} = K \cdot O$$

$$S_{cuña} = b \cdot (I - O)$$

Donde K es una constante para el cauce referente al almacenamiento en prisma y b es la constante para el cauce referente al almacenamiento en cuña.

Sumando las dos expresiones anteriores, se obtiene:

$$S = S_{prisma} + S_{cuña} = KO + b(I - O) = bI + (K - b)O$$

$$K \left[\frac{b}{K} I + \frac{(K-b)}{K} O \right] = K \left[\frac{b}{K} I + \left(1 - \frac{b}{K} \right) O \right]$$

Si $X = b/K$ entonces

$$S = K[XI + [I - X]O]$$

$$S_{i-1} = K[XI_{i-1} + [I - X]O_{i-1}]$$

$$S_i = K[XI_i + [I - X]O_i]$$

$$\frac{I_{i-1} + I_i}{2} - \frac{O_{i-1} + O_i}{2} = \frac{K[XI_i + [I - X]O_i] - K[XI_{i-1} + [I - X]O_{i-1}]}{\Delta t}$$

Por lo tanto

$$O_i = I_i \frac{-KX + 0.5\Delta t}{K - KX + 0.5\Delta t} + I_{i-1} \frac{KX + 0.5\Delta t}{K - KX + 0.5\Delta t} + O_{i-1} \frac{K - KX - 0.5\Delta t}{K - KX + 0.5\Delta t}$$

$$O_i = I_i C_0 + I_{i-1} C_1 + O_{i-1} C_2$$

Donde K y X son constantes que dependen del tramo del cauce con el que se trabaje y C_0 , C_1 y C_2 deben sumar 1.

En los siguientes textos se presenta los valores que pueden tomar los valores de K , X y Δt , se realizaron los tránsitos de los caudales generados en cada cuenca.

El parámetro K tiene unidades de tiempo y su valor es de aproximadamente igual al tiempo de viaje del pico de la avenida a lo largo del tramo:

$$K = L / w$$

Donde L es la longitud del tramo en metros y w es la velocidad promedio del pico de la avenida, w puede estimarse en relación con la velocidad media del agua v , como:

$$w = 1.5v$$

El parámetro x puede oscilar entre 0.0 y 0.5 , si $X=0.0$, el volumen de almacenamiento en el tramo sólo es una función de salida O , lo que significa que no existe un almacenamiento en cuña y el tramo se comporta como un vaso, si $X=0.5$, las entradas y las salidas tienen la misma importancia y no habría ningún abatimiento en el pico. En términos muy generales se puede decir que x se aproxima a cero en cauces muy caudalosos y de pendiente muy pequeña, y a 0.5 en caso contrario. Cuando no se tengan todos los datos es recomendable tomar $x=0.2$ como valor medio. (Solís, 2003, p. 40-45):

El método de Muskingum, según Campos Aranda, dice:

“Cuando el almacenamiento es solo función del gasto de salida, como en los embalses, $x=0$ y puede llegar a 0.5 cuando ambos casos tienen el mismo peso. En la mayoría de las corrientes naturales x varía de 0.3 a 0.5 , pero la presencia de planicies de inundación lo reducen a 0.2 o menos. Debido a que la estimación convencional de los parámetros K y X del método es bastante subjetiva, al ser gráfica y por tanteos, se han desarrollado procedimientos numéricos objetivos” (Campos, p.113)

Otra forma de determinar el valor de K es utilizando la fórmula de Kirpich, la fórmula es:

$$K = 0.0078 * L^{(0.77)} * S^{(-0.385)}$$

L = longitud del cauce en pies

S = pendiente del cauce adimensional

En la Fotografía satelital 4.1 se observan los tramos que hay que transitar y las estaciones hidrométricas, la de Boquerón, la de Santo Domingo y la de Acala.

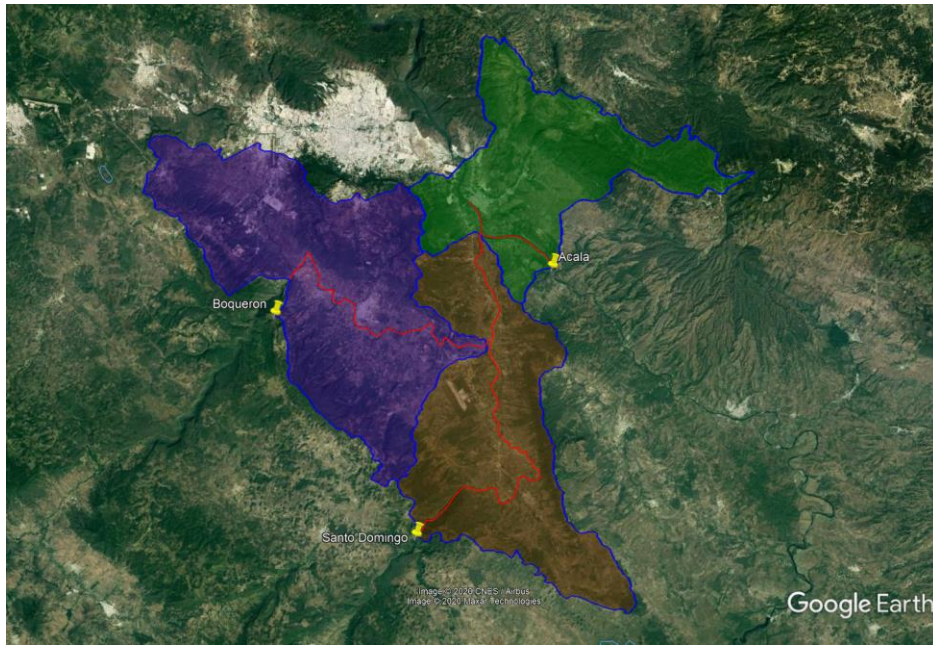


Figura 4.20.-Tramos transitados y las estaciones hidrométricas, de Boquerón, de Santo Domingo y de Acala. (Elaboración propia 2023).

4.8.- Resultados de los tránsitos de los caudales hasta Ciudad del Agua

En la Tabla 4.20 se muestran los caudales asociados a periodos de retorno hasta Ciudad del Agua de todas las cuencas aforadas y no aforadas, la forma de los hidrogramas fue del SCS, se utilizó el Método de Muskingum para transitarlos hasta el lugar de la obra de toma.

Tabla 4.20. Gastos de diseño hasta Ciudad del agua. (Elaboración propia 2023)

Tr (años)	GASTO TOTAL (m ³ /s)
2	1,464.0
5	2,008.0
10	2,650.0
20	4,525.0
50	6,350.0
100	10,753.0
200	13,211.0
500	16,450.0
1000	18,886.0

En el Anexo A.3 se presentan los hidrogramas con los picos transitados hasta Ciudad del Agua.

CAPÍTULO 5.- CREACION DE UN MODELO HIDRAULICO EN 2D CON EL SOFTWARE IBER 3.2.2

5.1 CREACIÓN DEL MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES

Se realizó el levantamiento topobatemétrico con una longitud de 8.3 km, iniciando en la coordenada (496298.98, 1851085.08) y finalizando en la coordenada (498926.95, 1844367.77).

Se elimino todas las capas que no son curvas maestras y secundarias, ya que con ellas se creó el Modelo Digital de Elevaciones (MDE), esto se realizó con el programa ZWCAD®. En la Figura 1.1 se muestra el levantamiento topobatemétrico en el programa ZWCAD®.

En la Figura 5.1. Se observa las curvas de nivel del tramo de 8.3 km.

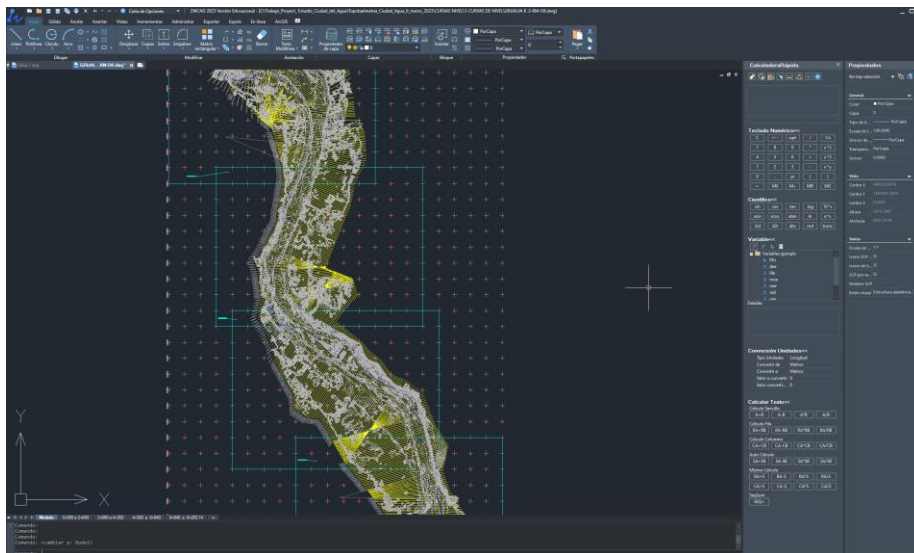


Figura 5.1.- Curvas de nivel sin procesar en *.dwg. (Elaboración propia 2023).

Figura 5.2 se muestra las curvas de nivel limpias en formato *.dxf.

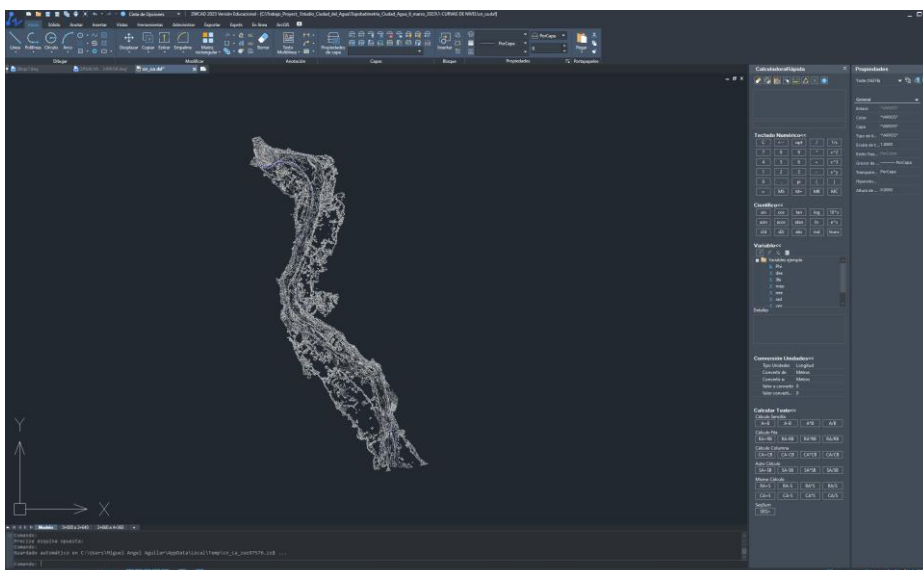


Figura 5.2.- Curvas de nivel limpias en formato *.dxf. (Elaboración propia 2023).

Para crear el MDE se utiliza software de información geográfica Qgis®, en la Figura 5.3 se observa las curvas de nivel transformadas en formato shape de ESRI.

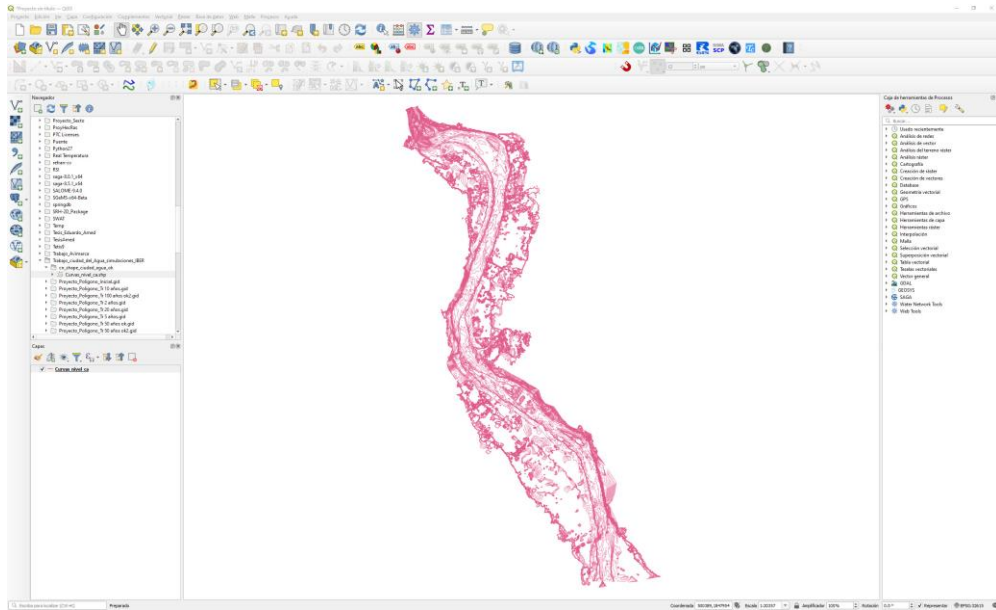


Figura 5.3.- Curvas de nivel en formato shape de ESRI. (Elaboración propia 2023).

En la Figura 5.4 se muestra el modelo digital de elevaciones creado en formato *.asc.

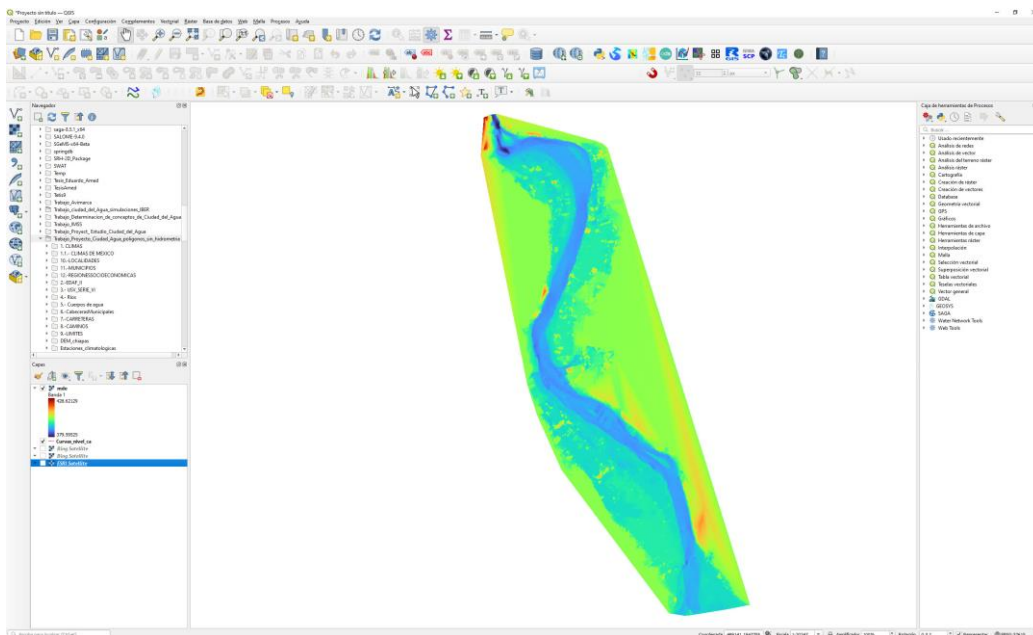


Figura 5.4.- DEM en formato *.asc. (Elaboración propia 2023).

En la Figura 5.5 se observa el DEM junto al mapa satelital donde se observa la zona de estudio de Ciudad del Agua aguas abajo de la unión del río Grijalva con las cuencas de Suchiapa y Santo Domingo.

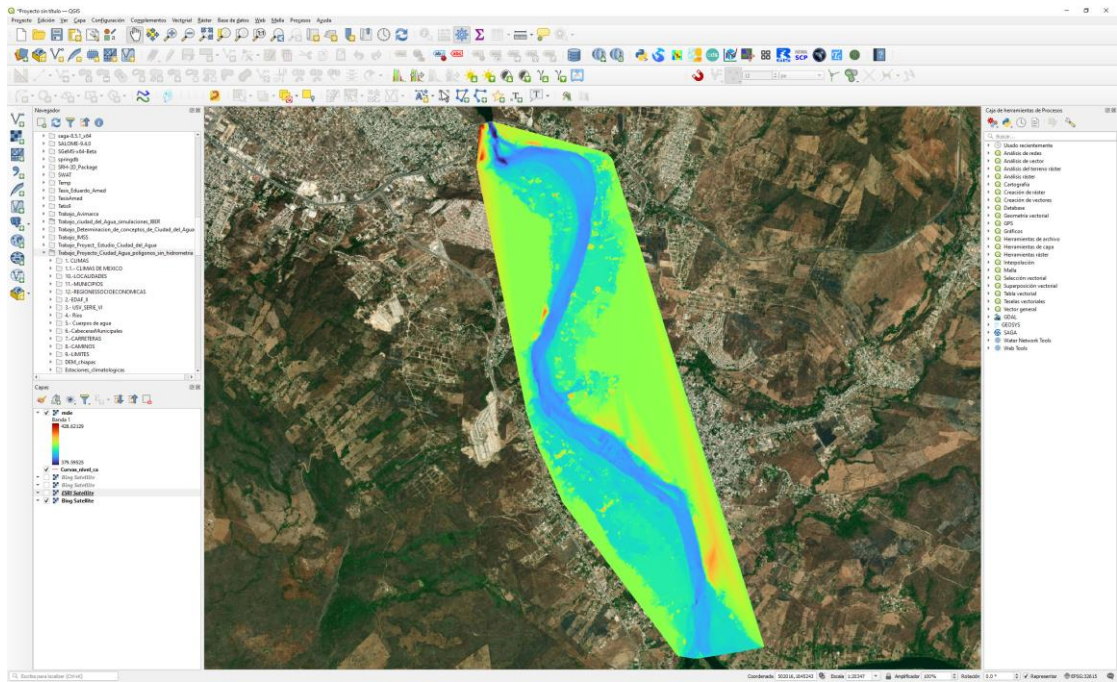


Figura 5.5.- MDE del tramo en estudio con imagen satelital, desde la unión Boquerón-Santo Domingo-Grijalva, hasta Ciudad del Agua. (Elaboración propia 2023).

En la Figura 5.6 se muestra el MDE con un 50 % de transparencia y las curvas de nivel con las cotas del levantamiento topobatimétrico, el cuadro rojo indica la zona donde se construirá la estructura de retención de azolves.

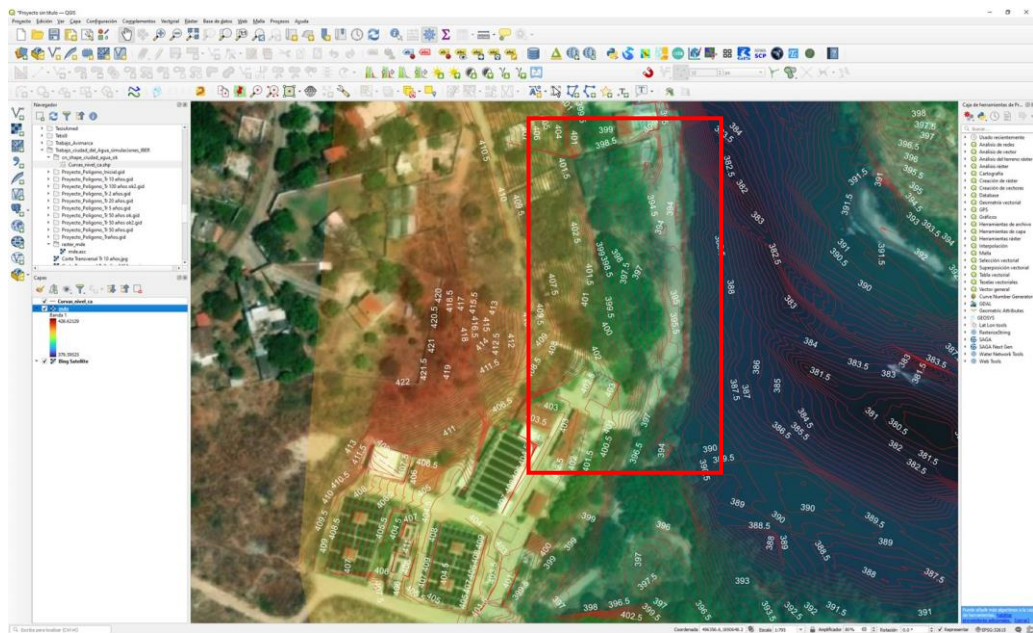


Figura. 5.6.- MDE con un 50 % de transparencia y las curvas de nivel con las cotas del levantamiento topobatimétrico. (Elaboración propia 2023).

CAPÍTULO 6.- DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA IBER VERSIÓN 3.2.2

6.1.- Programa IBER 3.2.2

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 rotura de presas, la evaluación de zonas inundables, el cálculo de transporte de sedimentos, y el flujo de marea en estuarios. El modelo Iber consta actualmente de 3 módulos de cálculo principales: un módulo hidrodinámico, un módulo de turbulencia y un módulo de transporte de sedimentos. Todos los módulos trabajan sobre una malla no estructurada de volúmenes finitos formada por elementos triangulares y/o cuadriláteros (Blade et al, 2014).

6.2.- PRE-PROCESOS

6.2.1.- CREAR O IMPORTAR GEOMETRÍA

Para importar una geometría es necesario en primer lugar guardar el proyecto con un nombre. El proyecto se guarda en el ordenador como una carpeta con el nombre del proyecto y extensión *.gid. Iber dispone de una interfaz en la cual se puede crear una geometría desde el inicio, dibujando puntos (directamente o entrando coordenadas), líneas y superficies. Por otro lado, desde el menú "Archivo>Importar" se pueden importar distintos formatos estándar (dxf, shapefile, entre otros). Asimismo, a través del menú "Iber-Herramientas" se pueden importar modelos digitales del terreno en formato ASCII de Arc/Info. Creando superficies las cuales se les agrega la superficie NURB, en esta se agregarán las condiciones de frontera, la rugosidad, si el tramo se encuentra sin ningún tirante, el mallado finalmente se importa el MDE. (Manual básico de usuario, 2012, p. 4)

6.2.2.- CREAR CELDAS O MALLAS EN LAS SUPERFICIES NURBS

Con la creación de las mallas o celdas en las superficies NURB, deberá ser de acuerdo a la precisión que se deseé, el mallado puede ser no estructurada, es decir, crea triángulos de tres lados, mientras la estructurada crea cuadros de dimensiones uniformas. Hay que tener en cuenta que entre más fino sea el mallado el tiempo de cálculo se incrementa. IBER presenta dos esquemas uno de orden uno y de orden dos, por su rapidez se prefiere el de orden uno, ya que para ríos de gran tamaño es suficiente el de orden uno. (Manual básico de usuario, 2012, p. 7)

6.2.3.- CONDICIONES DE CONTORNO DE ENTRADA Y SALIDA

En el caso de la entrada se ingresa un hidrograma con un caudal total, de cualquier forma, sea triangular, o tenga otra forma, se puede ingresar un caudal específico (caudal por unidad de ancho) o una cota de agua. En cada caso se exigirán los parámetros necesarios en función de si el régimen es subcrítico, crítico, o supercrítico. (Manual básico de usuario, 2012, p. 8-9)

En el caso de la salida sólo se deben especificar parámetros adicionales si el régimen es subcrítico, en cuyo caso es posible utilizar una condición tipo vertedero, una condición de nivel dado (cota o calado) o una curva de gasto. En caso de régimen supercrítico o

crítico no es necesario asignar parámetros adicionales. (Manual básico de usuario, 2012, p. 8-9)

6.2.4.- Condiciones internas rugosidad

En Iber la rugosidad se asigna a través de un coeficiente de rugosidad de Manning. La asignación automática del coeficiente de rugosidad se realiza desde el menú: “Datos > Rugosidad > Asignación automática”. (Manual básico de usuario, 2012, p. 9)

6.2.5.- TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

A través del menú “Datos > Transporte de sedimentos” se accede a los submenús que permiten asignar condiciones a la geometría o a la malla para el cálculo del transporte de sedimentos. La activación de los distintos módulos de cálculo y la declaración de los parámetros generales se debe hacer desde el menú “Datos > Datos del problema”.

Con el submenú Posición capa de roca se puede fijar una cota o profundidad del lecho no erosionable. Sirve tanto para transporte de fondo como para transporte en suspensión.

Con el submenú Cond Cont Transp Sed Fondo se accede a la condición de contorno aguas arriba para caudal sólido por arrastre de fondo. La condición se asigna a las líneas del contorno, o lados de elementos del contorno. Se puede escoger entre: (Manual básico de usuario, 2012, p. 12-13).

Agua limpia: caudal sólido nulo en la entrada

Capacidad de arrastre: el caudal sólido de entrada corresponde a la capacidad de arrastre del flujo en dicha entrada, que a su vez depende del modelo de transporte de fondo escogido en “Datos > Datos de problema”, Dependiente del tiempo: permite asignar un sedimentograma

El submenú Entrada Sed Suspensión asigna una concentración de sedimento en suspensión (puede ser variable en el tiempo) a una entrada de caudal.

El submenú Fuente Sed Suspensión permite asignar un aporte de caudal con una determinada concentración de sedimento, a cualquier superficie o elemento de la malla.

El submenú Cond Inicial Sed Suspensión permite asignar una concentración inicial de sedimento en suspensión. (Manual básico de usuario, 2012, p. 12-13)

6.2.6.- MALLADO

La malla de cálculo es un elemento fundamental para conseguir buenos resultados. Iber dispone de multitud de maneras de obtener una buena malla de cálculo, y en función de las características del problema un tipo de malla será mejor que otro.

Iber puede trabajar tanto con elementos triangulares como con cuadriláteros, o con mallas mixtas de triángulos y cuadriláteros. Las mallas de cálculo pueden ser a su vez regulares o irregulares, así como estructuradas o no estructuradas. (Manual básico de usuario, 2012, p. 15)

6.3.- CÁLCULOS

6.3.1- EJECUCIÓN DE UN CÁLCULO

Para lanzar un cálculo, en primer lugar, se deben fijar los parámetros de cálculo, o datos del problema, mediante las distintas pestañas del menú “Datos > Datos del problema”. En el siguiente sub apartado se explican las distintas opciones de dicho menú.

El cálculo se lanza con el menú Calcular. A través de dicho menú es posible lanzar directamente el cálculo (“Calcular > Calcular”) o acceder a la ventana de cálculo (“Calcular > Ventana de cálculo”). Esta segunda opción permite tener un mejor control del proceso de cálculo, o acceder al archivo que muestra el estado del proceso (Botón Ver salida), mientras el cálculo se está ejecutando.

La ventana de información del proceso también se abre, durante el proceso o cuando éste ha finalizado, con el menú “Calcular > Ver información del proceso”. Es conveniente consultar dicha información para detectar posibles avisos de errores. (Manual básico de usuario, 2012, p. 17)

6.3.2.- PARÁMETROS DE CÁLCULO

Se accede a través del menú “Datos > Datos del problema”.

Simulación: Con el botón Nueva/Continuar se puede escoger entre lanzar una simulación nueva o continuar una que ya se ha ejecutado hasta un cierto instante.

Incremento de tiempo máximo: Iber ajusta automáticamente el incremento de cálculo para satisfacer la condición de Courant. Adicionalmente es posible fijar un incremento de tiempo de cálculo máximo.

Instante inicial: Valor del instante de tiempo de inicio del cálculo.

Tiempo máximo de simulación: Valor del instante de tiempo final del cálculo.

Intervalo de resultados: Fija el incremento de tiempo entre instantes de escritura de resultados. (Manual básico de usuario, 2012, p. 17)

6.3.3.- PARÁMETROS DE CÁLCULO

Con esta pestaña se fijan algunos parámetros de cálculo y del esquema numérico.

Número de procesadores: Iber puede lanzar un cálculo paralelo con el número de procesadores que se desee. Si se indica un número de procesadores mayor al existente Iber utilizará el máximo de procesadores posibles.

Función limitadora de flujo: Permite escoger entre un esquema numérico de primer orden, o uno de segundo orden con diferentes limitadores de flujo: Minmod, Superbee o Van Leer (ver Manual de referencia).

CFL: Valor del número de Courant-Friedrichs-Levy para conseguir un esquema numérico estable.

Límite seco-mojado: Umbral para considerar que un elemento está seco y no se realice ningún cálculo hidrodinámico en él.

Método de secado: Existen tres opciones:

- Normal: Cuando en un instante de tiempo un elemento tiene un calado negativo, Iber por defecto lo considera seco, y guarda en memoria el valor de dicho calado negativo. Para volver a estar mojado, el elemento debe llenar antes este “calado negativo”. Es un método robusto y con el cual el tiempo de cálculo no depende del proceso de secado-mojado.
- Estricto: en este caso se impide que exista el calado negativo mencionado. Con ello se ganará precisión en el proceso de mojado y secado, pero se reducirá el incremento de tiempo de cálculo y aumentará, por lo tanto, el tiempo de cálculo total. Si el umbral de secado-mojado es muy pequeño, esta opción puede incrementar considerablemente el tiempo de las simulaciones.
- Hidrológico: En cálculos hidrológicos, los calados pueden ser muy pequeños, del orden del milímetro o menos. Por ello el método “normal”, en un cálculo de transformación lluvia escorrentía puede producir inestabilidades en el hidrograma. El método estricto puede dar buenos resultados, pero a base de un tiempo de simulación muy grande. El método hidrológico consiste en el proceso siguiente: en cada instante se comprueba si los caudales de salida de un elemento pueden producir el secado del mismo (sin considerar el caudal de entrada). Si éste es el caso, se escalan los caudales de salida, reduciéndolos, con un factor igual a V_{out}/V , siendo V el volumen de agua del elemento, y V_{out} la suma de los caudales de salida multiplicada por el incremento de tiempo. Con este método se evitan las inestabilidades del método normal, sin reducirse el paso de tiempo ni por lo tanto el tiempo de la simulación.

Fricción en las paredes: Permite decidir si se considera, o no, la rugosidad en las paredes verticales del contorno, así como el valor de dicha rugosidad. (Manual básico de usuario, 2012, p. 17)

6.3.4.- SELECCIÓN DE UN MODELO DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

La pestaña Sedimentos permite activar o desactivar los módulos de cálculo de transporte de sedimentos por arrastre de fondo y en suspensión, así como fijar los parámetros de los mismos. Los detalles de los modelos se presentan en el Manual de Referencia.

Tanto para transporte en suspensión, como para transporte de fondo, es posible activar o desactivar el modelo de avalancha.

Es posible fijar un instante de inicio de cálculo del transporte de sedimentos distinto al del cálculo hidrodinámico. De esta manera se puede, por ejemplo, obviar los procesos de erosión y sedimentación hasta que las condiciones de velocidad y calado se estabilicen. (Manual básico de usuario, 2012, p. 19)

6.4.- POST-PROCESOS

Una vez finalizado el cálculo, o durante el mismo, se puede acceder al post-proceso para visualizar y analizar los resultados. El cambio entre las interfaces de pre-proceso y post-proceso se realiza mediante el menú “Archivo > postproceso” y “Archivo > pre-proceso”, o mediante los botones correspondientes de la barra de herramientas.

Iber dispone de multitud de opciones para visualizar y analizar los resultados, personalizar los colores, las leyendas, mostrar etiquetas de valores, etc. Una opción para visualizar resultados es mediante el menú “Ventana > ver resultados”. La ventana que se abre permite acceder a los distintos grupos de resultados (o Análisis) que se pueden visualizar en cada instante de tiempo, como áreas coloreadas, áreas coloreadas suavizadas, o vectores. (Manual básico de usuario, 2012, p. 21)

6.4.1.- CREACIÓN DE GRÁFICOS

Con los distintos botones de creación de gráficos de la barra de visualización de resultados (botones evolución de punto, gráfico de línea, gráfico punto y gráfico de borde) es posible crear gráficos de utilidad para el análisis de resultados. Los gráficos creados se pueden gestionar con la ventana de gráficos (“Ventana > ver gráficos”) y se pueden exportar para abrirlos, por ejemplo, en Excel con “Archivo > Exportar > Gráfico”.

Iber permite exportar la mayoría de resultados en formato ASCII grid de Arc Info a través del menú “Iber Herramientas > Resultados en Grid”. Sólo se debe seleccionar un resultado, introducir el valor de un instante de tiempo y un tamaño de celda.

Iber creará una carpeta dentro de la carpeta del proyecto actual (carpeta Grids of results), y dentro de la misma los archivos en formato ASCII de los resultados seleccionados en el instante de tiempo más próximo al solicitado. (Manual básico de usuario, 2012, p. 22)

6.5.- CONSIDERACIONES REALIZADAS EN LAS SIMULACIONES

De acuerdo a lo anteriormente explicado las simulaciones se realizaron bajo las siguientes consideraciones: El tramo de 8.3 km se simuló como un río donde fluye el hidrograma en condiciones sin flujo, utilizando el módulo seco-mojado de Iber, aunque el tramo corresponde al vaso de la presa de la Angostura, esta consideración se realizó suponiendo que la condición crítica funcione como un río que fluye y no como la entrada a un embalse.

Por otro lado, las condiciones de frontera se tomaron como sigue; la de aguas arriba el hidrograma de entrada asociado a un periodo de retorno determinado por el estudio hidrológico, mientras que la condición de salida se tomó la condición supercrítico-crítico, en Iber existen la condición subcrítica que contiene las condiciones de vertedero, nivel dado, curva de gasto, Curva de gasto Q, las cuales no aplican para estas condiciones debido a que no contamos con las curvas y un nivel dado correspondería a un tirante que provocaría un remanso aguas arriba.

La rugosidad de todo el tramo en general se tomó una sola considerando el valor de n de Manning de 0.023, aunque esto conduce a que las velocidades del tramo no sean las adecuadas, se considera cierto grado de seguridad en cuanto a las velocidades, ya que estas tienden a incrementarse y los tirantes tienden a ser menores, esto se compensa con los valores extremos de caudales obtenidos en el estudio hidrológico, que tienden a ser sobre estimados al utilizar solo los caudales extremos en todas las cuencas, que por lo general no se presentan en el mismo instante.

En cuanto al mallado para reducir los tiempos de cálculo se realizaron tres o dos seccionamientos en el modelo digital de elevaciones con mallas irregulares de 5, 10 m en el tramo de Ciudad del Agua y de 25, 50 o 100 m aguas arriba de esta, esto redujo los tiempos de simulación, para el tramo de 8.3 km. Se utilizó un tramo más corto cercano a Ciudad del Agua con una longitud de 1500 m, con un mallado más fino cercano a ciudad del agua, esto con el fin de obtener tirantes y velocidades más próximas a un posible evento extremo.

Es importante mencionar que a partir del periodo de retorno de 100 años las fronteras de la simulación en algunos puntos empiezan a tener contacto con los resultados de tirantes y velocidades, esto se debe a que la topografía que representa las llanuras de inundación es rebasada y el software Iber tiende a formar una pared-frontera, esto puede alterar resultados de tirantes y velocidades, para periodos más grandes al mencionado.

Para corroborar lo anteriormente descrito se presentan las simulaciones realizadas en con Iber. Además de las simulaciones en el software Iber.

CAPÍTULO 7.- SIMULACIÓN DE LOS CAUDALES ASOCIADOS A LOS PERIODOS DE RETORNO DE 2, 5, 20, 50, 100, 200, 500 y 1000 AÑOS.

7.1.- Resultados de las simulaciones sin estructura

Los resultados presentados se refieren a las simulaciones realizadas para los caudales obtenidos en el estudio hidrológico con periodos de retorno de 2, 5, 20, 50, 100, 200, 500 y 1000 años. En la Figura 7.1 se observa el MDE dentro del programa IBER V 3.2.2, con las cotas en la parte inferior izquierda, la cota más alta es de 425.5 y la más baja de 369.76 msnm. En la Figura 7.2 se observa una simulación realizada con 700 m³/s, un corte en la zona de estudio con los tirantes de agua alcanzados.

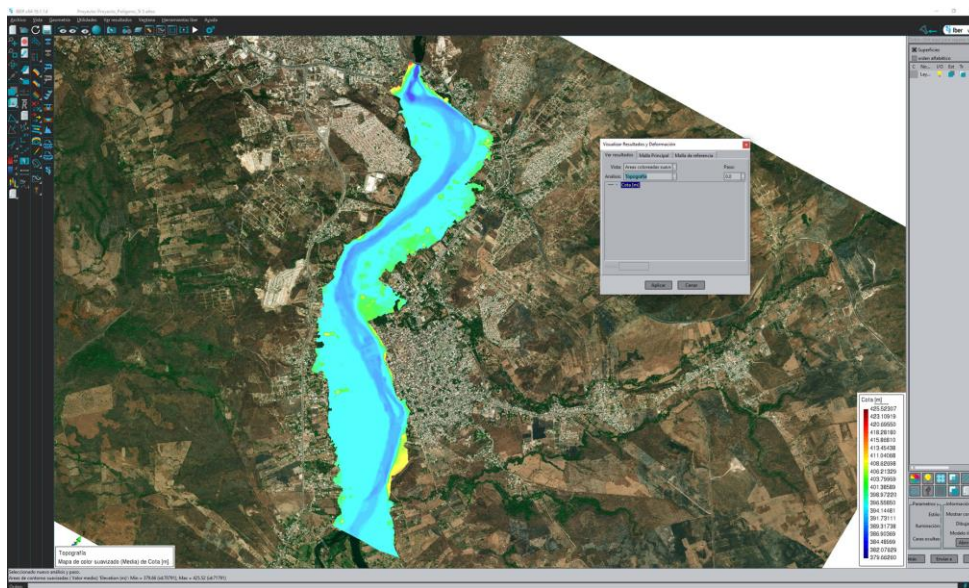


Figura 7.1.- MDE dentro del programa IBER con las cotas del levantamiento topobatemétrico. (Creación propia 2023).

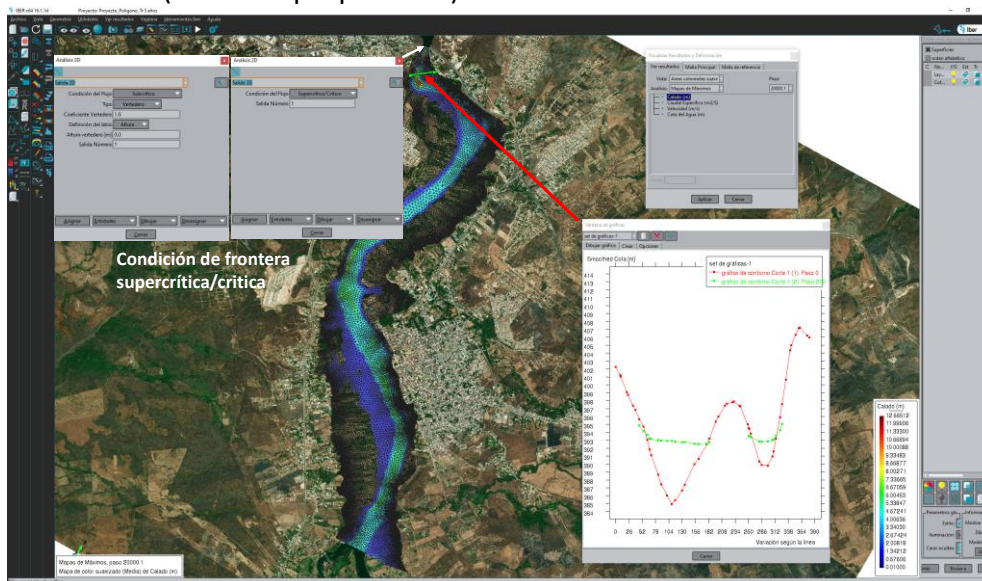


Figura 7.2.- Simulación realizada con 700 m³/s y un corte transversal en la zona de estudio (Creación propia 2023).

7.1.- Simulación para un Tr de 2 años

La simulación para un Tr de 2 años se realizó con el caudal determinado para este periodo de retorno en el estudio hidrológico, el caudal es de $1464.0 \text{ m}^3/\text{s}$. La cual es la condición de entrada. La condición de salida aguas abajo fue supercrítico/crítico.

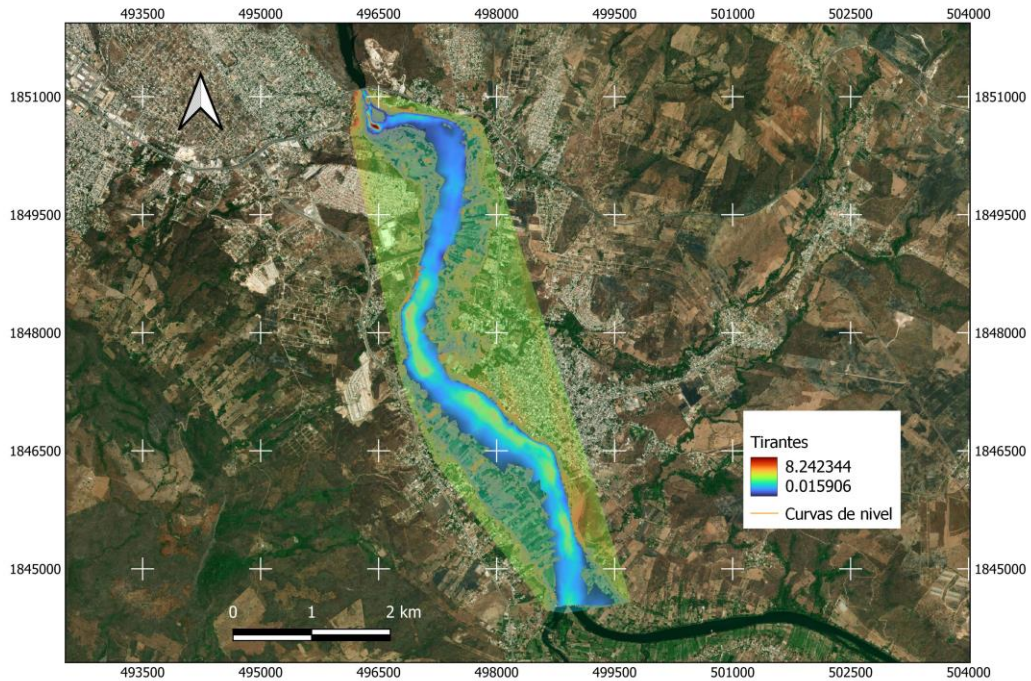


Figura 7.3.- Tirantes para un Tr de 2 años. (Creación propia 2023).

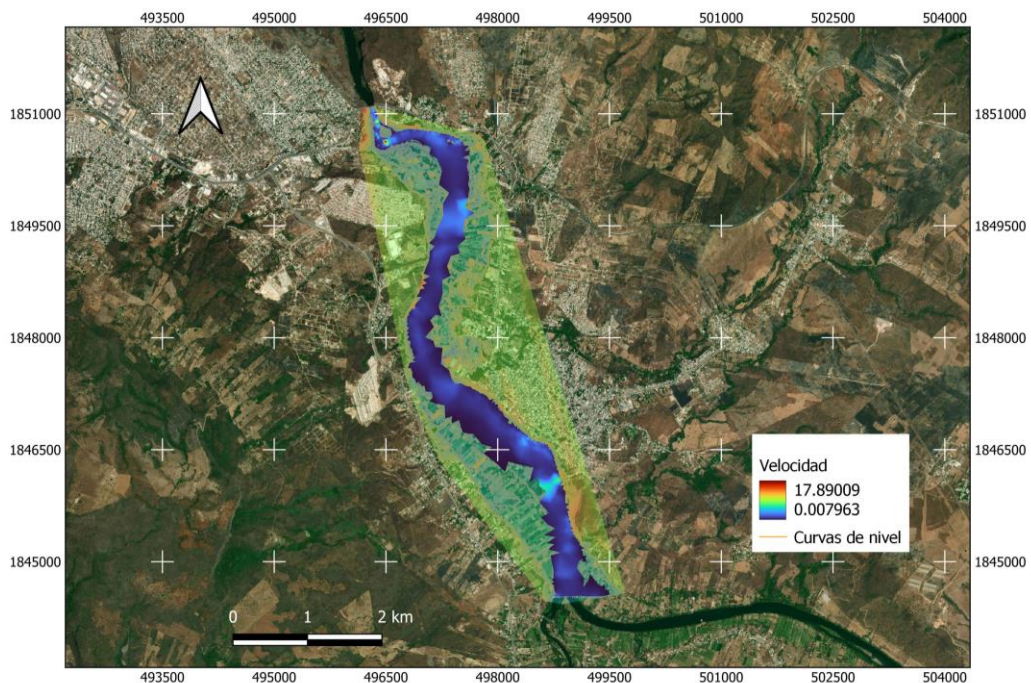


Figura 7.4.- Velocidades para un Tr de 2 años. (Creación propia 2023).

7.2.- Simulación para un Tr de 5 años

La simulación para un Tr de 5 años se realizó con el caudal determinado para este periodo de retorno en el estudio hidrológico, el caudal es de 2008.0 m³/s. La cual es la condición de entrada. La condición de salida aguas abajo fue supercrítico/crítico. En la Figura 7.5 y 7.6 se presentan los tirantes y velocidades.

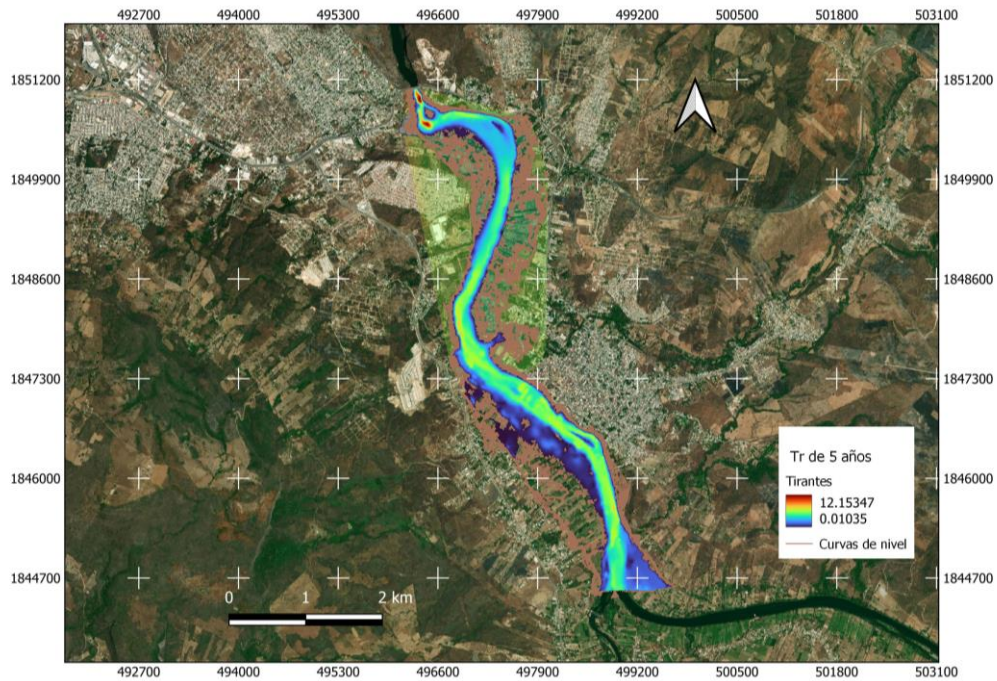


Figura 7.5.- Tirantes para un Tr de 5 años

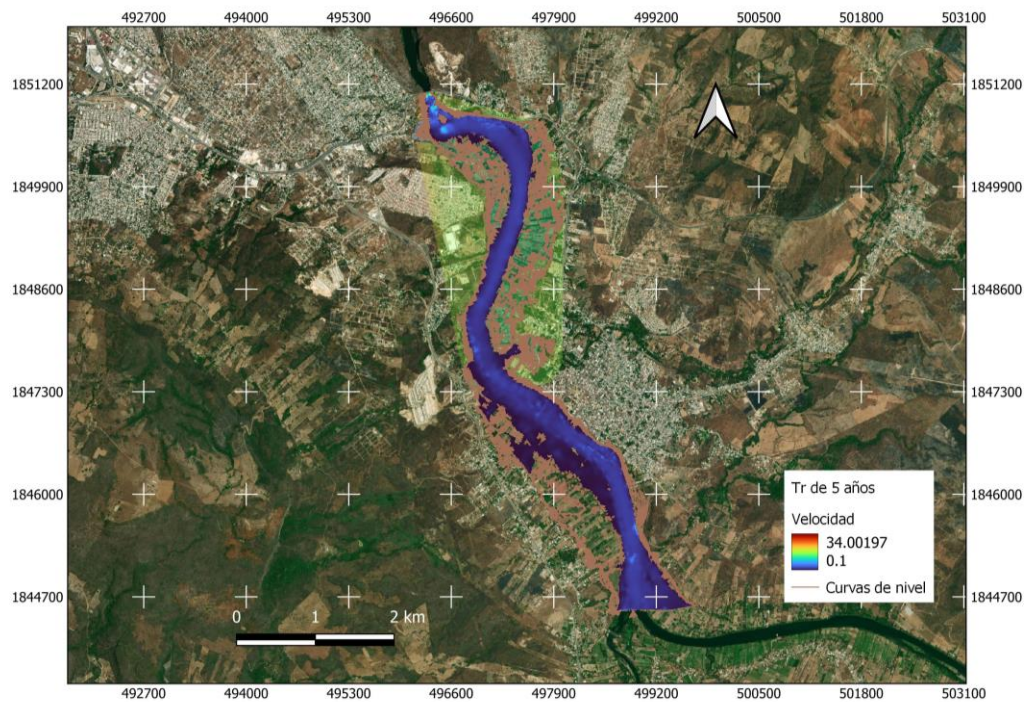


Figura 7.6.- Velocidades para un Tr de 5 años. (Creación propia 2023).

7.3.- Simulación para un Tr de 10 años

La simulación para un Tr de 10 años se realizó con el caudal determinado para este periodo de retorno en el estudio hidrológico, el caudal es de $2,650.0 \text{ m}^3/\text{s}$. La cual es la condición de entrada. La condición de salida aguas abajo fue supercrítico/crítico. En la Figura 7.7 y 7.8 se presentan los tirantes y velocidades.

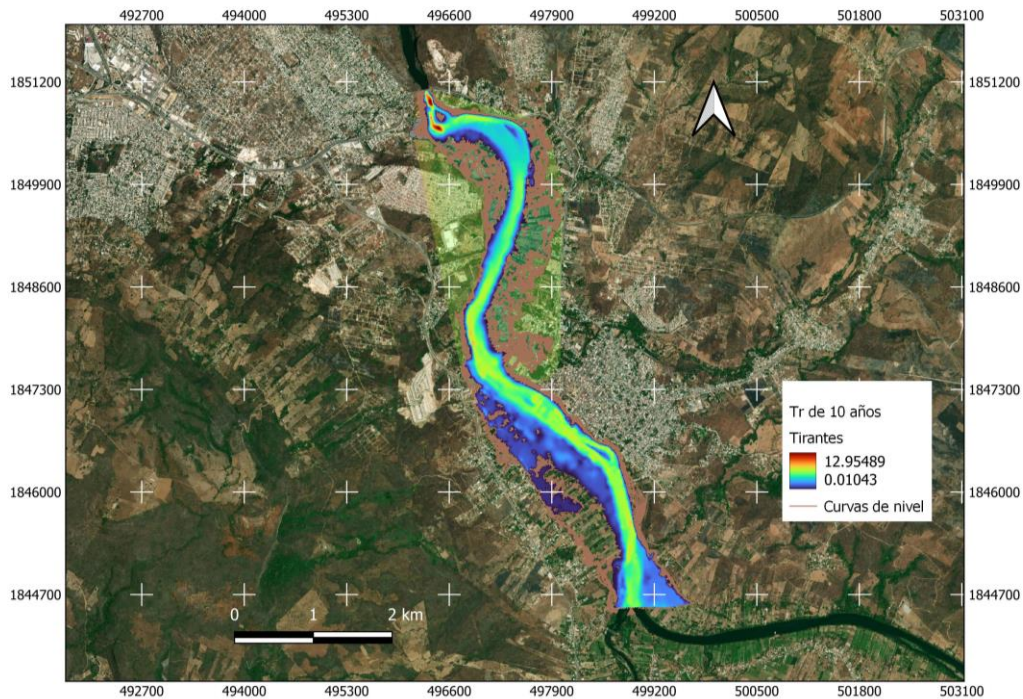


Figura 7.7.- Tirantes para un Tr de 10 años. (Creación propia 2023).

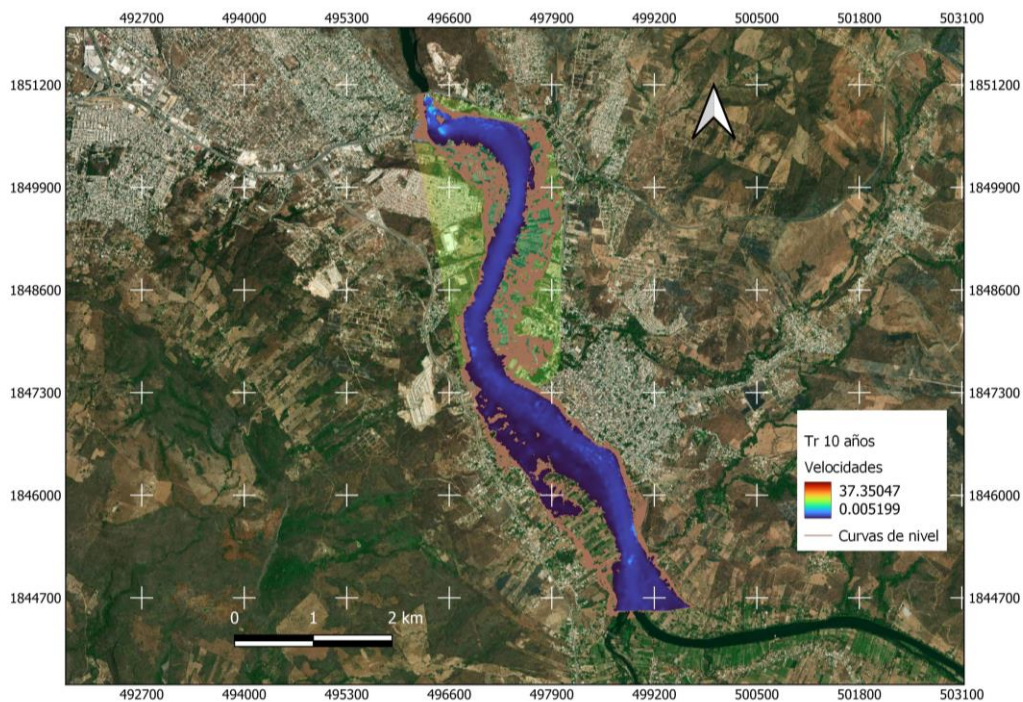


Figura 7.8.- Velocidades para un Tr de 10 años. (Creación propia 2023).

7.4.- Simulación para un Tr de 20 años

La simulación para un Tr de 20 años se realizó con el caudal determinado para este periodo de retorno en el estudio hidrológico, el caudal es de 4,525.0 m³/s. La cual es la condición de entrada. La condición de salida aguas abajo fue supercrítico/crítico. En la Figura 7.9 y 7.10 se presentan los tirantes y velocidades.

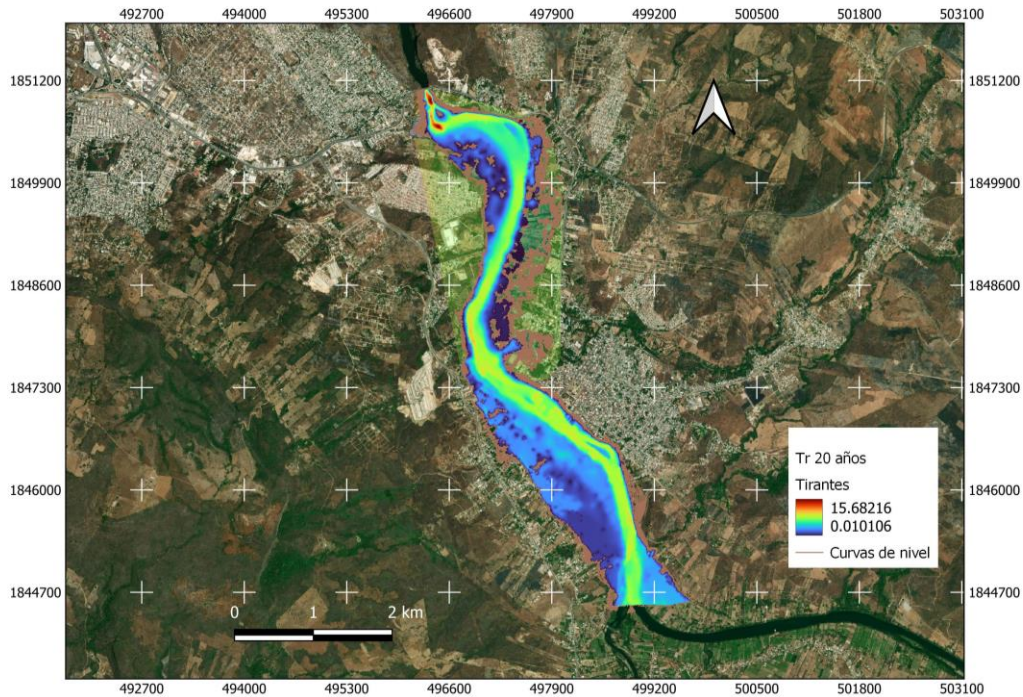


Figura 7.9.- Tirantes para un Tr de 20 años. (Creación propia 2023).

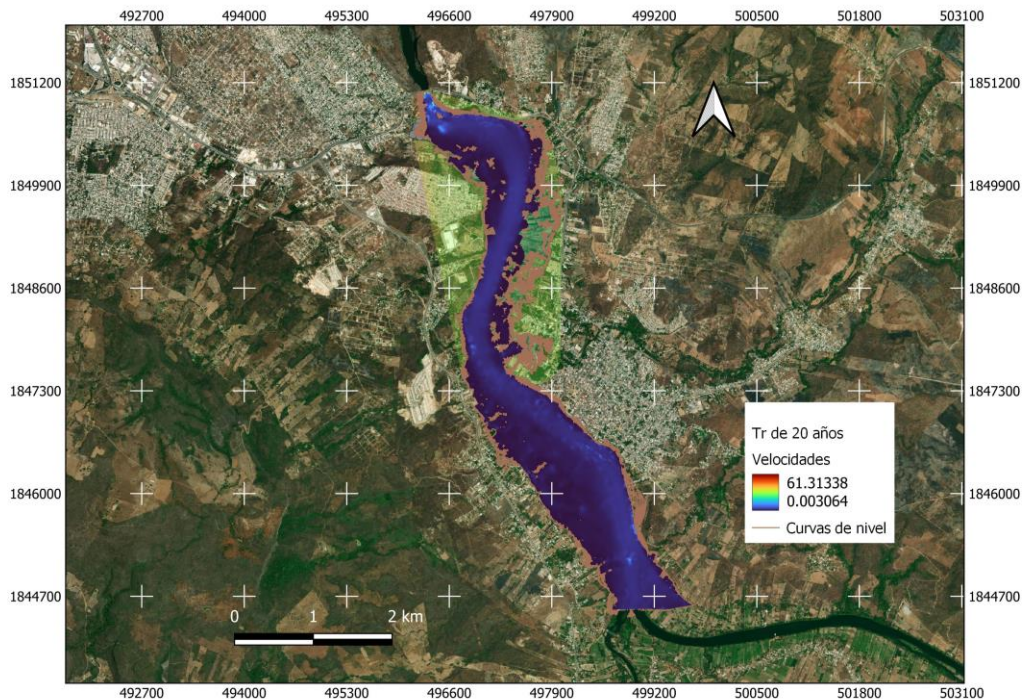


Figura 7.10.- Velocidades para un Tr de 20 años. (Creación propia 2023).

7.5.- Simulación para un Tr de 50 años

La simulación para un Tr de 50 años se realizó con el caudal determinado para este periodo de retorno en el estudio hidrológico, el caudal es de $6,350.0 \text{ m}^3/\text{s}$. La cual es la condición de entrada. La condición de salida aguas abajo fue supercrítico/crítico. En la Figura 7.12 y 7.13 se presentan los tirantes y velocidades

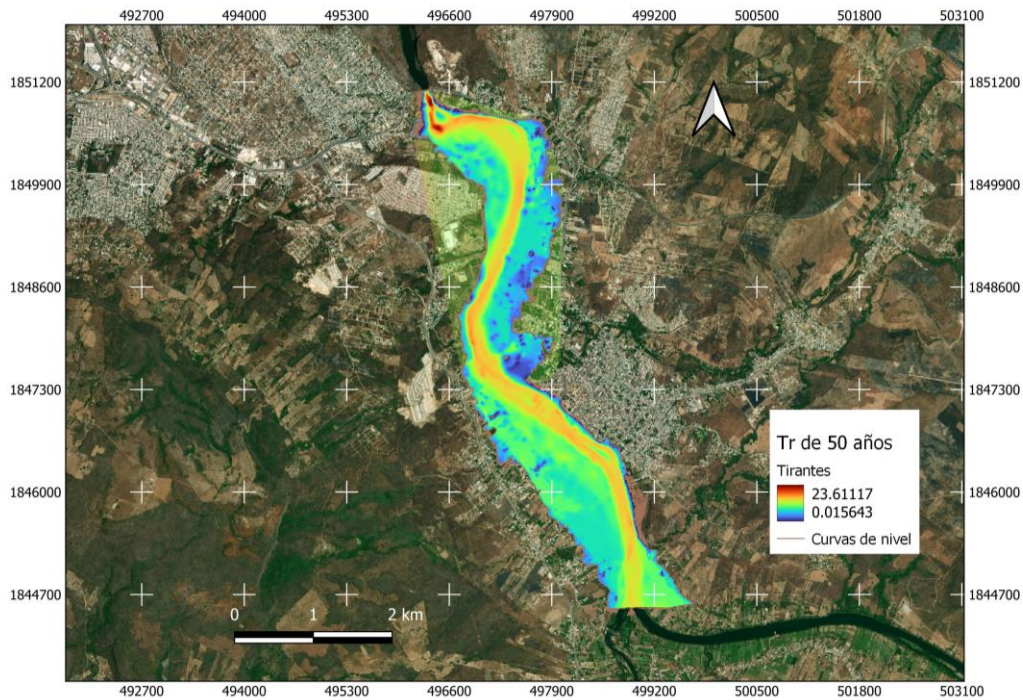


Figura 7.12.- Tirantes para un Tr de 50 años. (Creación propia 2023).

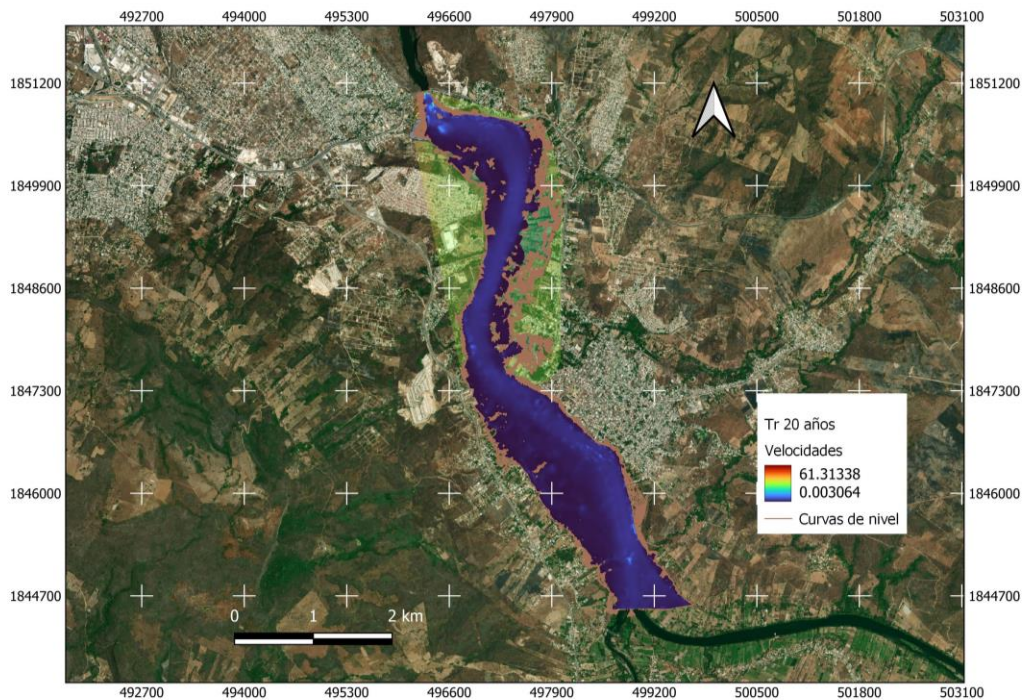


Figura 7.13.- Velocidades para un Tr de 50 años. (Creación propia 2023).

7.6.- Simulación para un Tr de 100 años

La simulación para un Tr de 100 años se realizó con el caudal determinado para este periodo de retorno en el estudio hidrológico, el caudal es de 10,753.0 m³/s. La cual es la condición de entrada. La condición de salida aguas abajo fue supercrítico/crítico. En la Figura 7.14 y 7.15 se presentan los tirantes y velocidades.

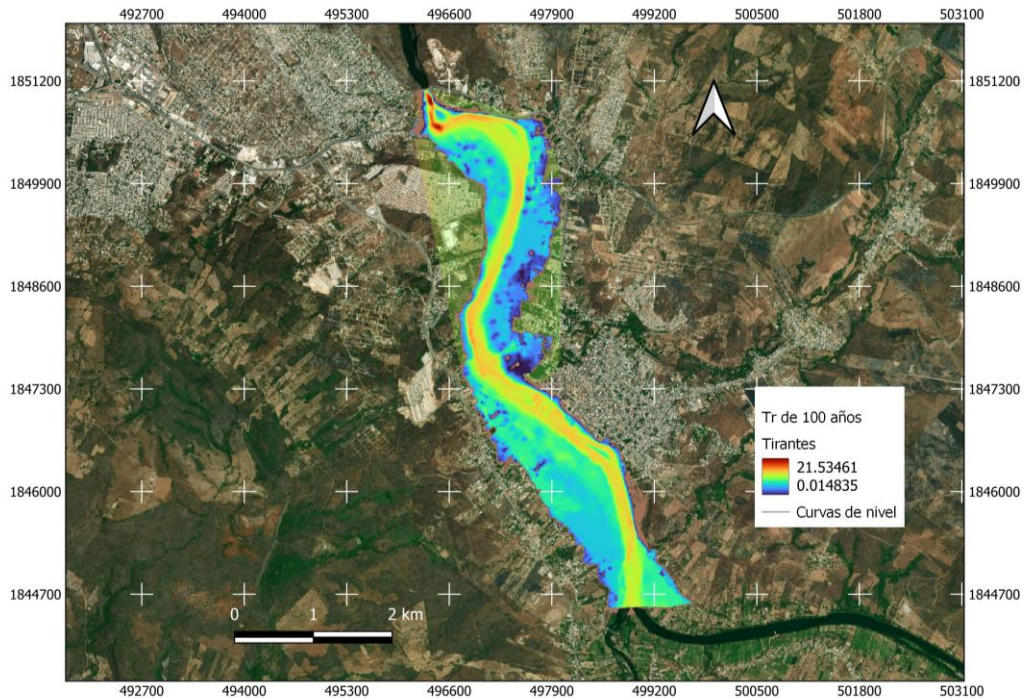


Figura 7.14.- Tirantes para un Tr de 100 años. (Creación propia 2023).

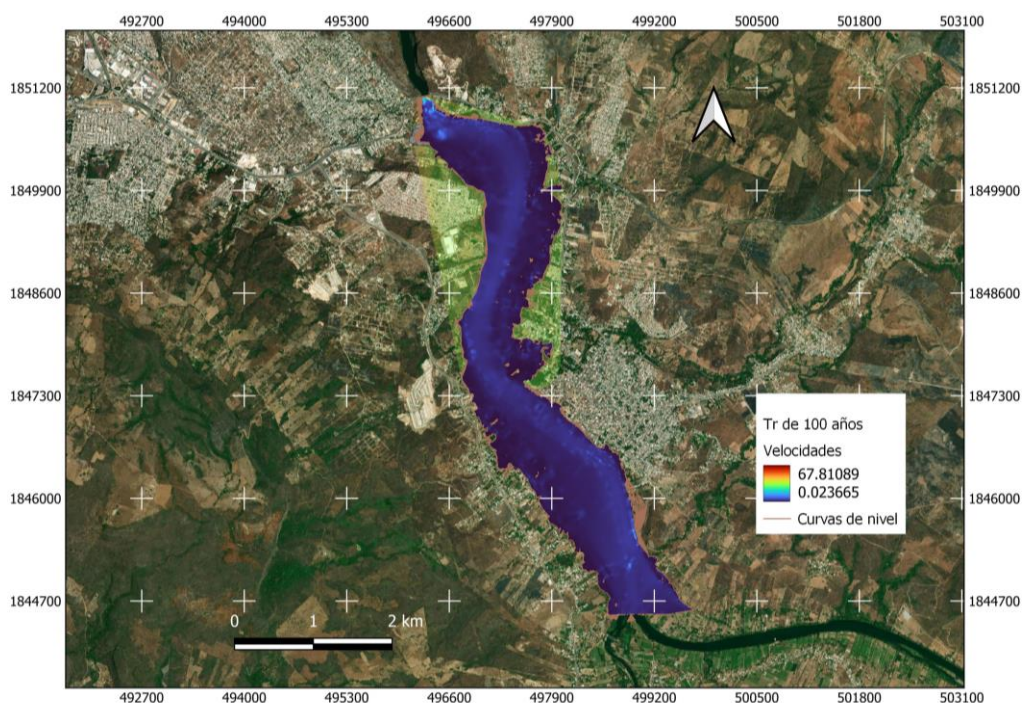


Figura 7.15.- Velocidades para un Tr de 100 años. (Creación propia 2023).

7.7.- Simulación para un Tr de 200 años

La simulación para un Tr de 200 años se realizó con el caudal determinado para este periodo de retorno en el estudio hidrológico, el caudal es de 13,211.0 m³/s. La cual es la condición de entrada. La condición de salida aguas abajo fue supercrítico/crítico. En la Figura 3.16 y 3.17 se presentan los tirantes y velocidades

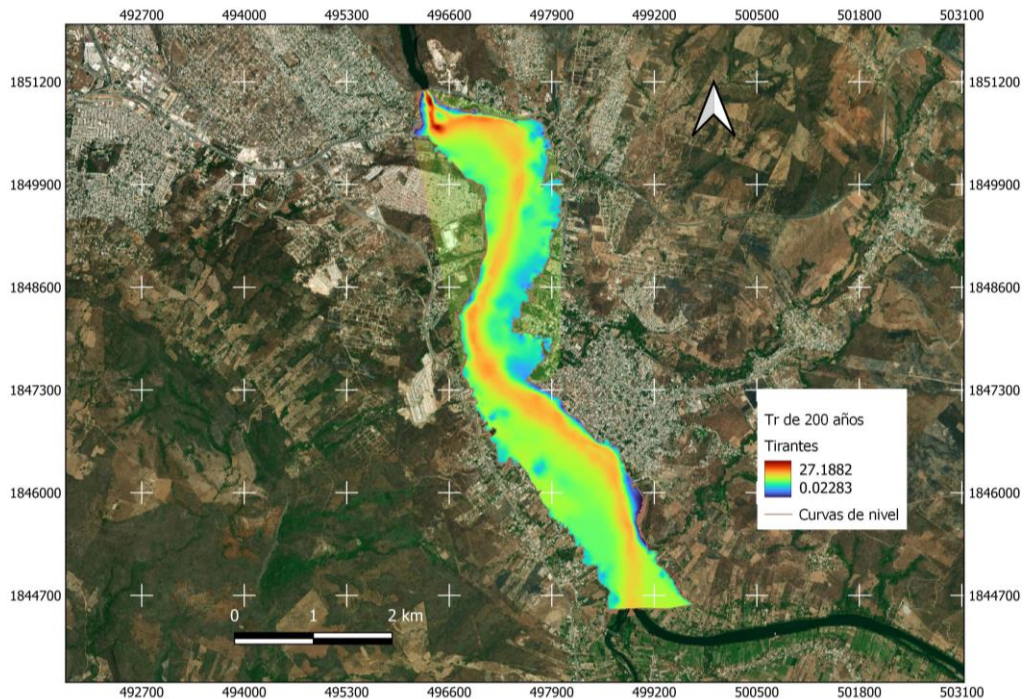


Figura 7.16.- Tirantes para un Tr de 200 años. (Creación propia 2023).

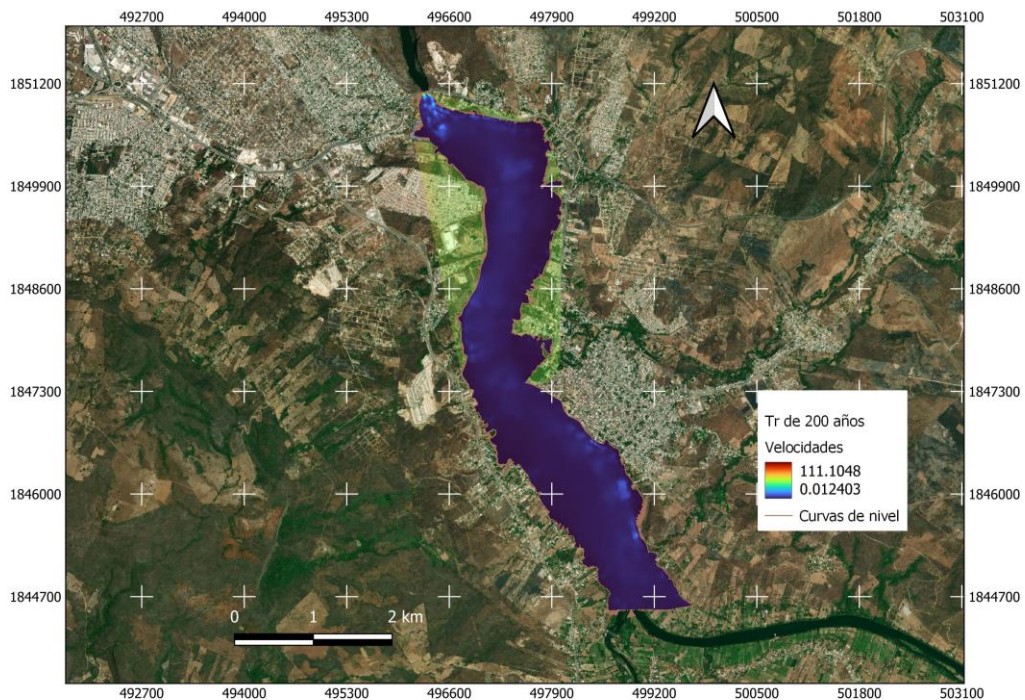


Figura 7.17.- Velocidades para un Tr de 200 años. (Creación propia 2023).

7.8.- Simulación para un Tr de 500 años

La simulación para un Tr de 500 años se realizó con el caudal determinado para este periodo de retorno en el estudio hidrológico, el caudal es de 16,450.0 m³/s. La cual es la condición de entrada. La condición de salida aguas abajo fue supercrítico/crítico. En la Figura 7.18 y 7.19 se presentan los tirantes y velocidades

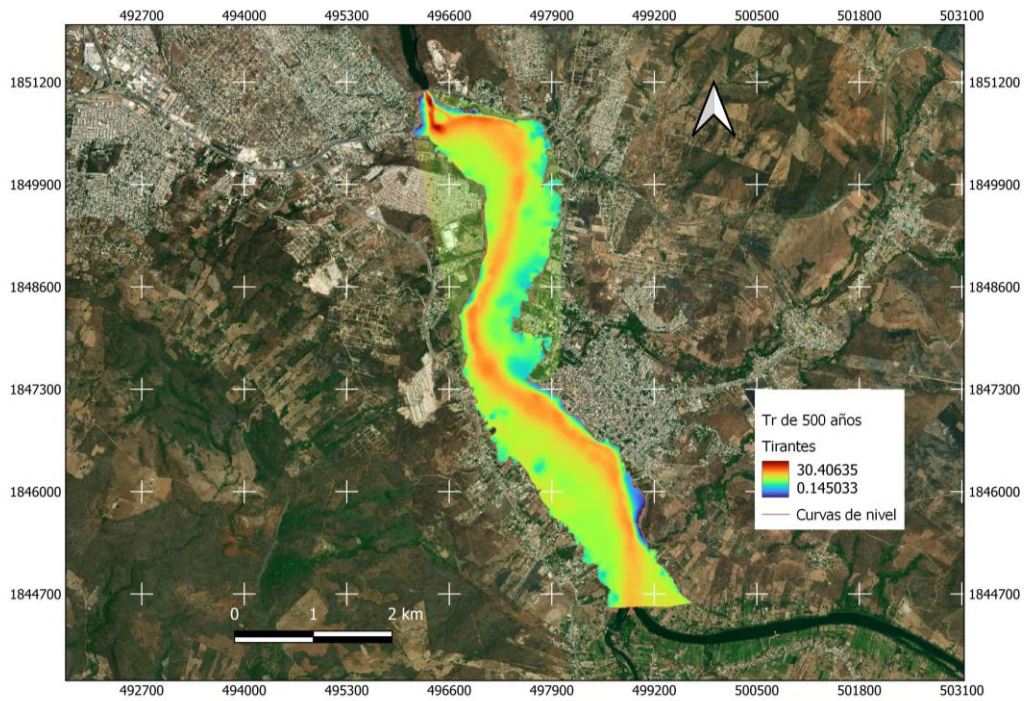


Figura 7.18.- Tirantes para un Tr de 500 años. (Creación propia 2023).

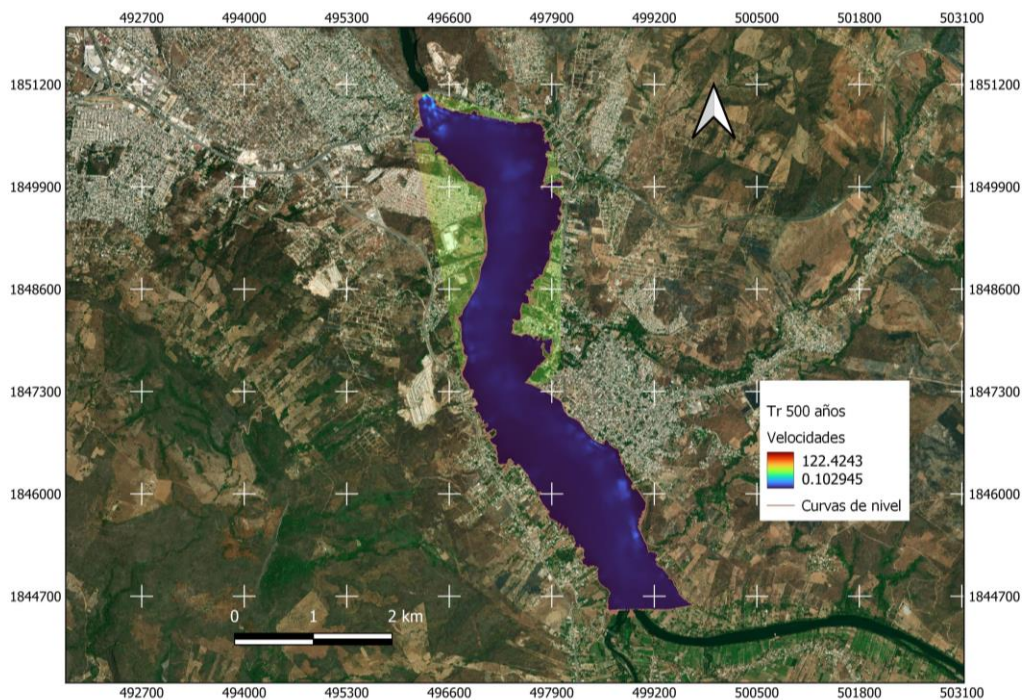


Figura 7.19.- Velocidades para un Tr de 500 años. (Creación propia 2023).

7.9.- Simulación para un Tr de 1000 años

La simulación para un Tr de 1000 años se realizó con el caudal determinado para este periodo de retorno en el estudio hidrológico, el caudal es de 18,886.0 m³/s. La cual es la condición de entrada. La condición de salida aguas abajo fue supercrítico/crítico. En la Figura 7.20 y 7.21 se presentan los tirantes y velocidades.

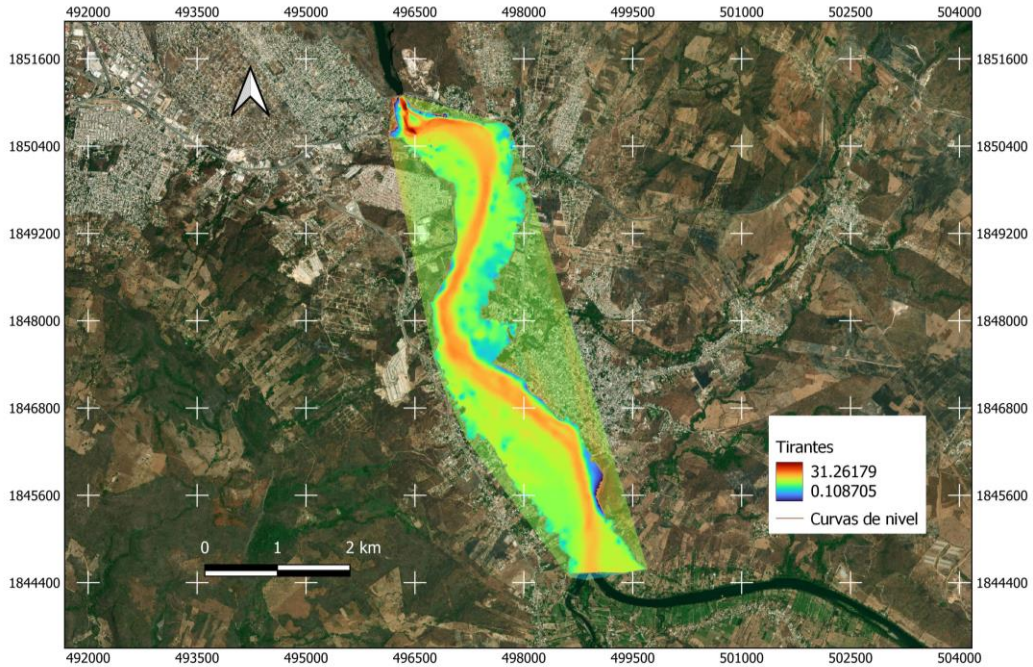


Figura 7.20.- Tirantes para un Tr de 1000 años. (Creación propia 2023).

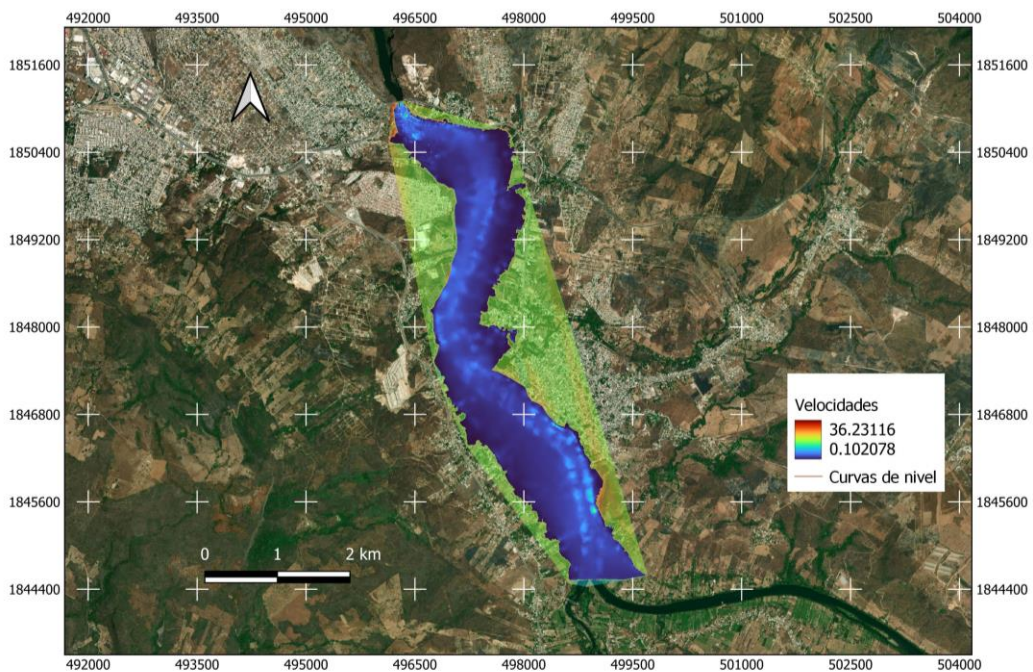


Figura 7.21.- Velocidades para un Tr de 1000 años. (Creación propia 2023).

CAPITULO 8.- RESULTADOS DE LOS TIRANTES Y VELOCIDADES DE LAS SIMULACIONES EN EL PUNTO DE ENTRADA AL CAÑÓN DEL SUMIDERO

8.1.- Consideraciones de los niveles actuales y de operación mínima de entre las presas La Angostura y Chicoasén.

La Comisión Federal de Electricidad mantiene una estación climatológica en la entrada del cañón del Sumidero en la cual se miden variables como temperatura, precipitación, velocidad de ráfaga, dirección del viento, punto de rocío, humedad relativa, radiación solar, precipitación acumulada y nivel del agua.

La entrada al cañón se da justo donde se encuentra el puente viejo y el puente nuevo, ya que es el punto de menor distancia entre ambas márgenes, donde se encuentra el empotramiento que sostienen ambas estructuras, muy por arriba del nivel del agua, en ese punto es todavía parte del vaso de Chicoasén.

En las siguientes Figuras se muestran los niveles de agua en la estación Cañón del sumidero desde los años 2011 a 2016. Los datos fueron proporcionados por CFE del Visor básico de datos IGSCLOUD (Aguilar, 2023)

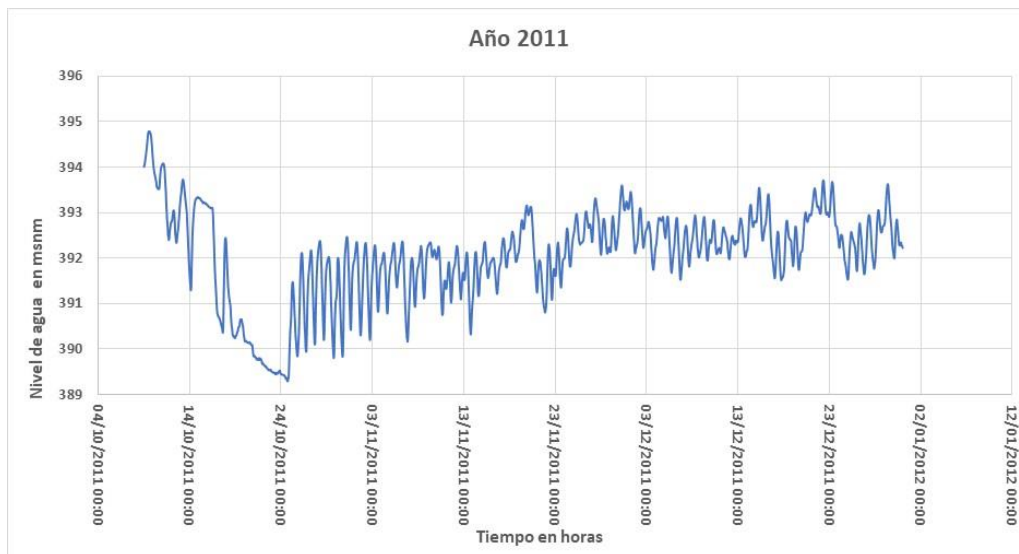


Figura 8.1.- Niveles de agua del año 2011. Datos tomados de CFE (Elaboración propia 2023).

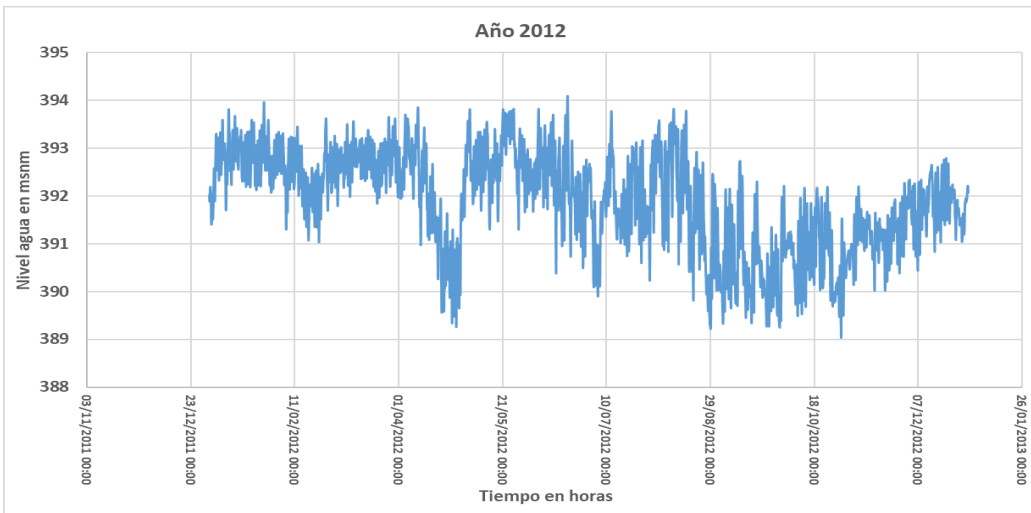


Figura 8.2.- Niveles de agua del año 2012. Datos tomados de CFE (Elaboración propia 2023).

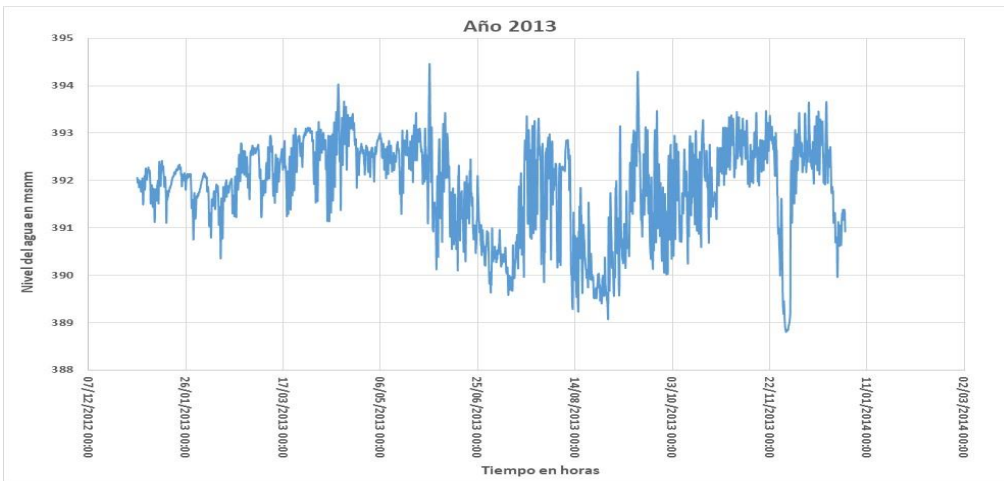


Figura 8.3.- Niveles de agua del año 2013. Datos tomados de CFE (Elaboración propia 2023).

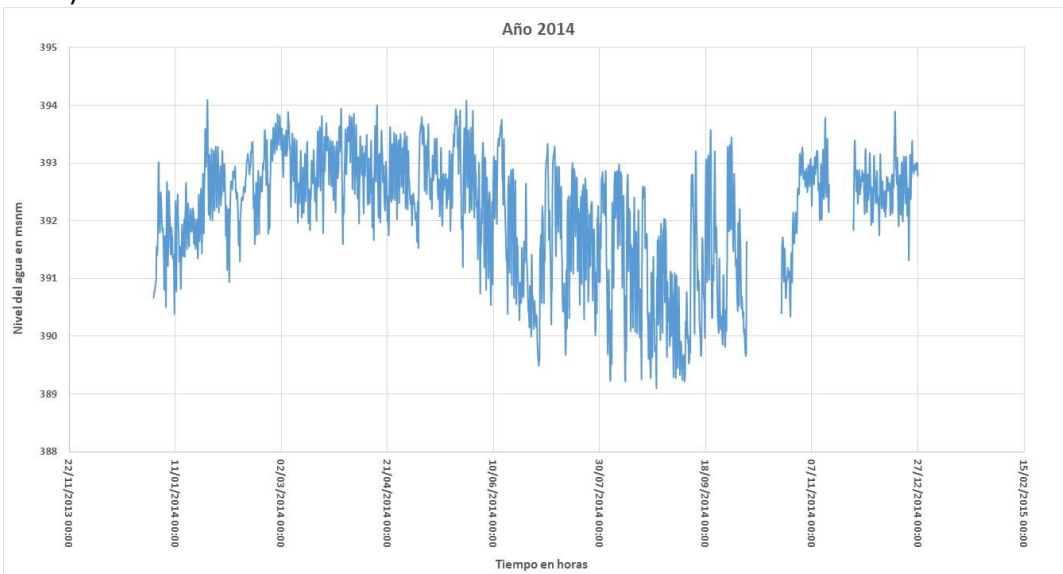


Figura 8.4.- Niveles de agua del año 2014. Datos tomados de CFE (Elaboración propia 2023).

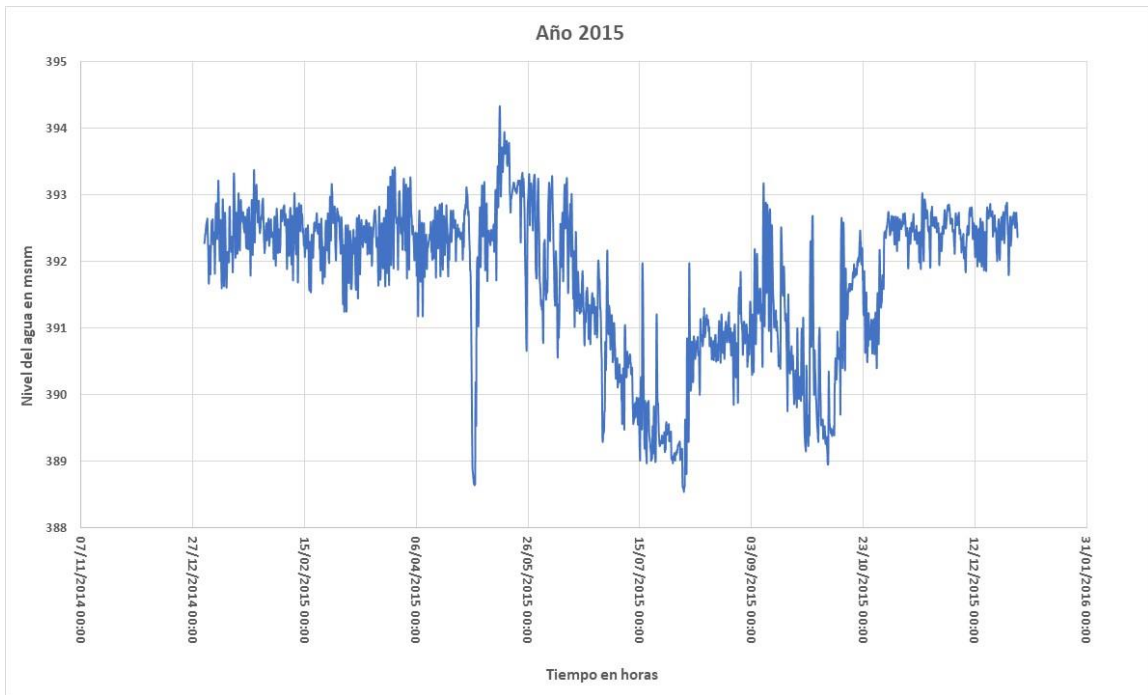


Figura 8.5.- Niveles de agua del año 2015. Datos tomados de CFE (Elaboración propia 2023).

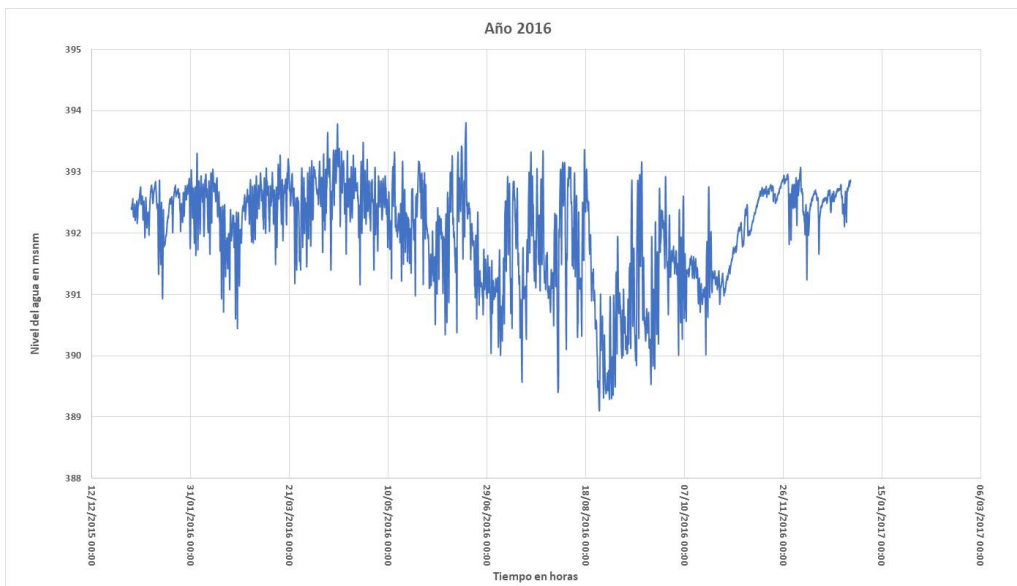


Figura 8.6.- Niveles de agua del año 2016. Datos tomados de CFE (Elaboración propia 2023).

De acuerdo a las Figuras presentadas los niveles más bajos se presentaron dos puntos con niveles más bajo 388.64 y 388.54 msnm en año 2015.

8.2.- Resultados de Tirantes

En las Figura 8.7 se muestra el corte transversal desde el punto de la entrada de la obra de toma hasta la margen derecha del río Grijalva, con los niveles de los caudales transitados con periodos de retorno de 2, 5, 10, 20, 50 y 100 años.

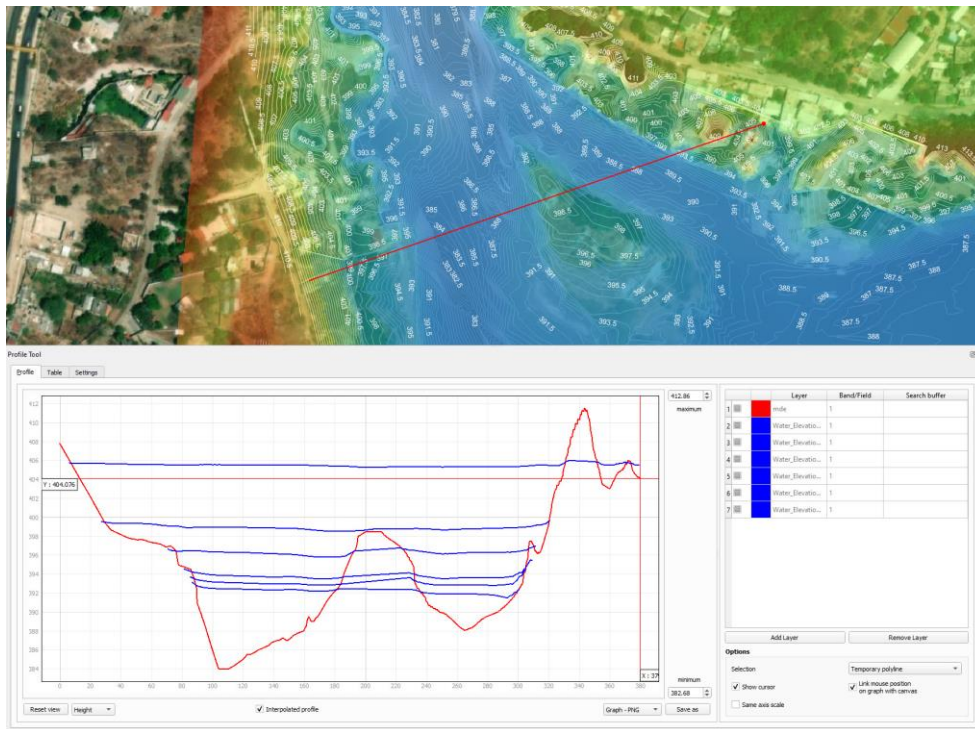


Figura 8.7.- Corte transversal desde el punto de la entrada de la obra de toma hasta la margen derecha del río Grijalva. (Creación propia 2023).

En las Figura 8.8 se muestra el corte transversal desde la planta de bombeo hasta la margen derecha del río Grijalva, con los niveles de los caudales transitados con periodos de retorno de 2, 5, 10, 20, 50 y 100 años.

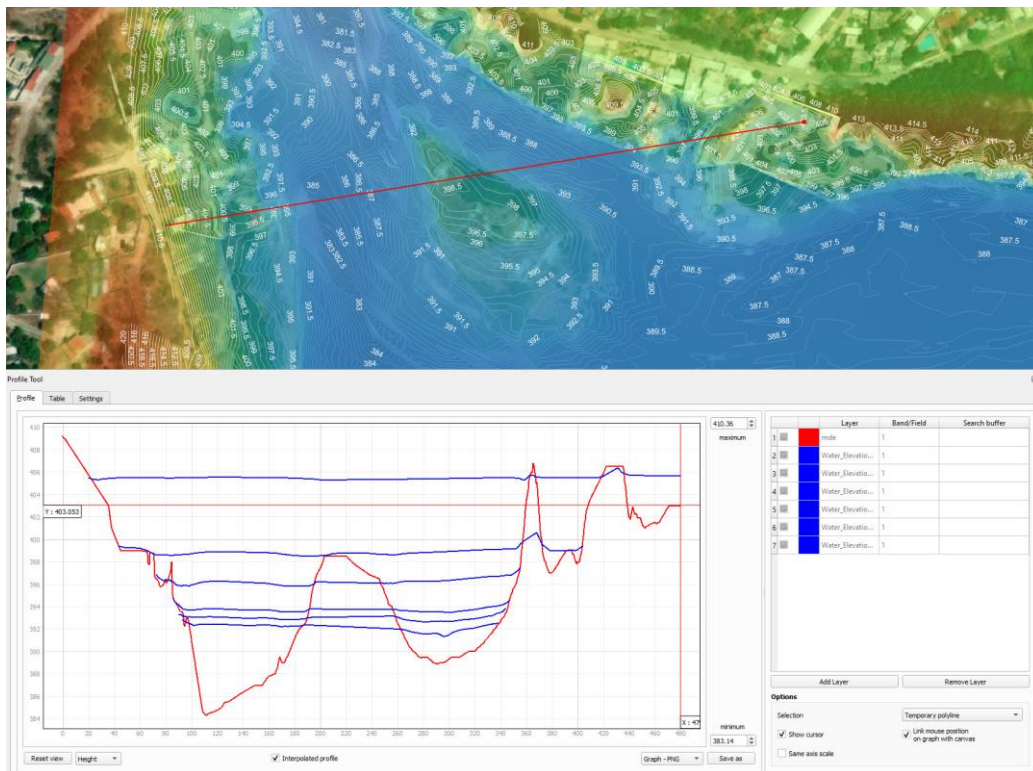


Figura 8.8.- Corte transversal desde la planta de bombeo hasta la margen derecha del río Grijalva. (Creación propia 2023).

En la Figura 8.9 se observa el corte con los periodos de retorno de 2, 5, 10, 20, 50 y 100 años.

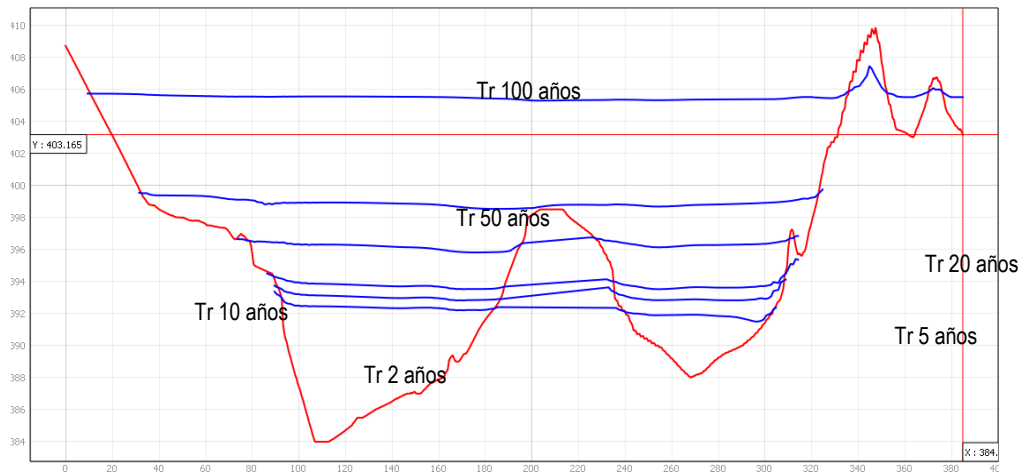


Figura 8.9.- Tirantes los periodos de retorno de 2, 5, 10, 20, 50 y 100 años. (Creación propia 2023).

La profundidad mínima de la sección es la cota 383.5 msnm en la sección donde se localizaría la entrada de la obra de toma.

8.3.- Resultados de Velocidades

En las Figuras 8.10 a 8.16 se presentan los vectores de velocidades de los periodos de retorno de 2, 5, 10, 20, 50 y 100 años. A partir de las visualizaciones del software IBER.

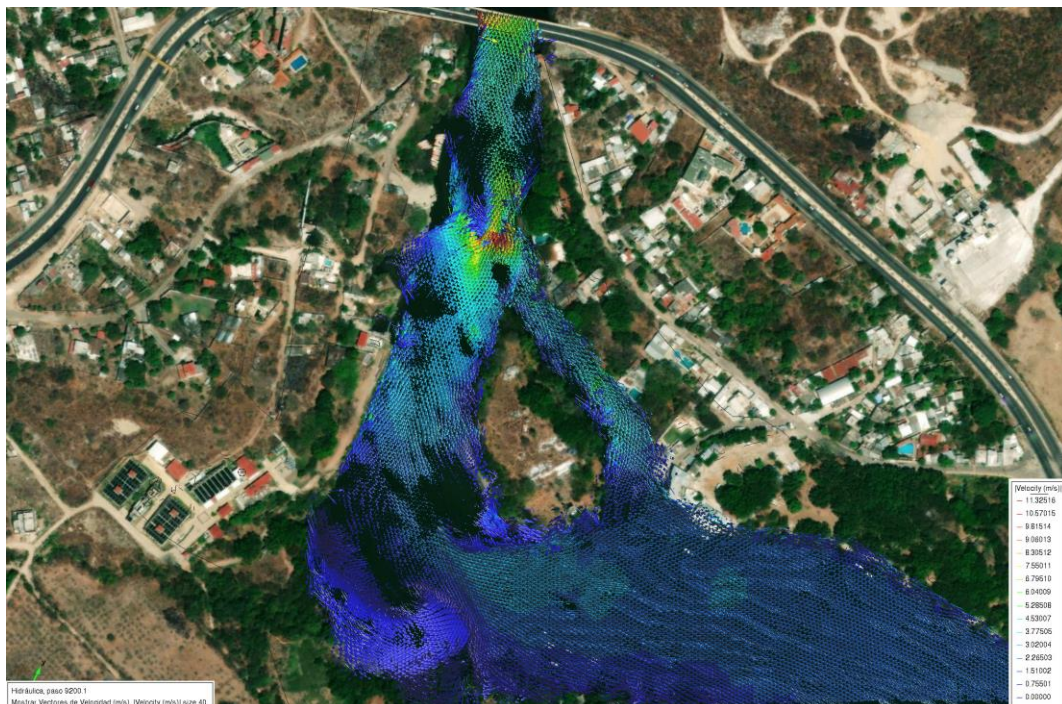


Figura 8.10.- Vectores de velocidades del periodo de retorno de 2 años. (software IBER 2023).

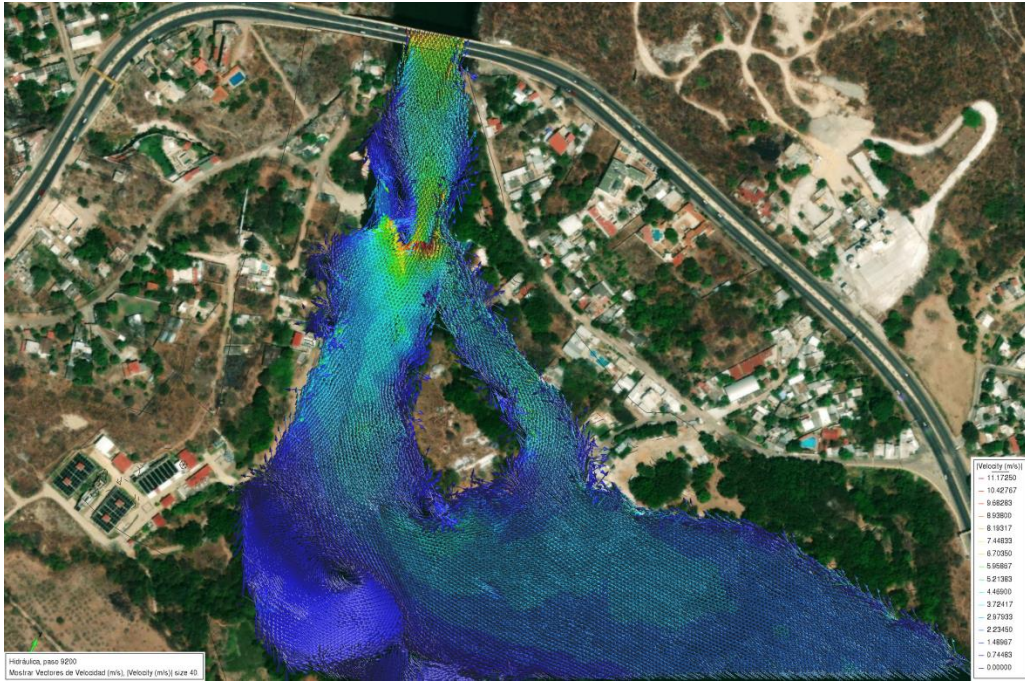


Figura 8.11.- Vectores de velocidades del periodo de retorno de 5 años. (software IBER 2023).

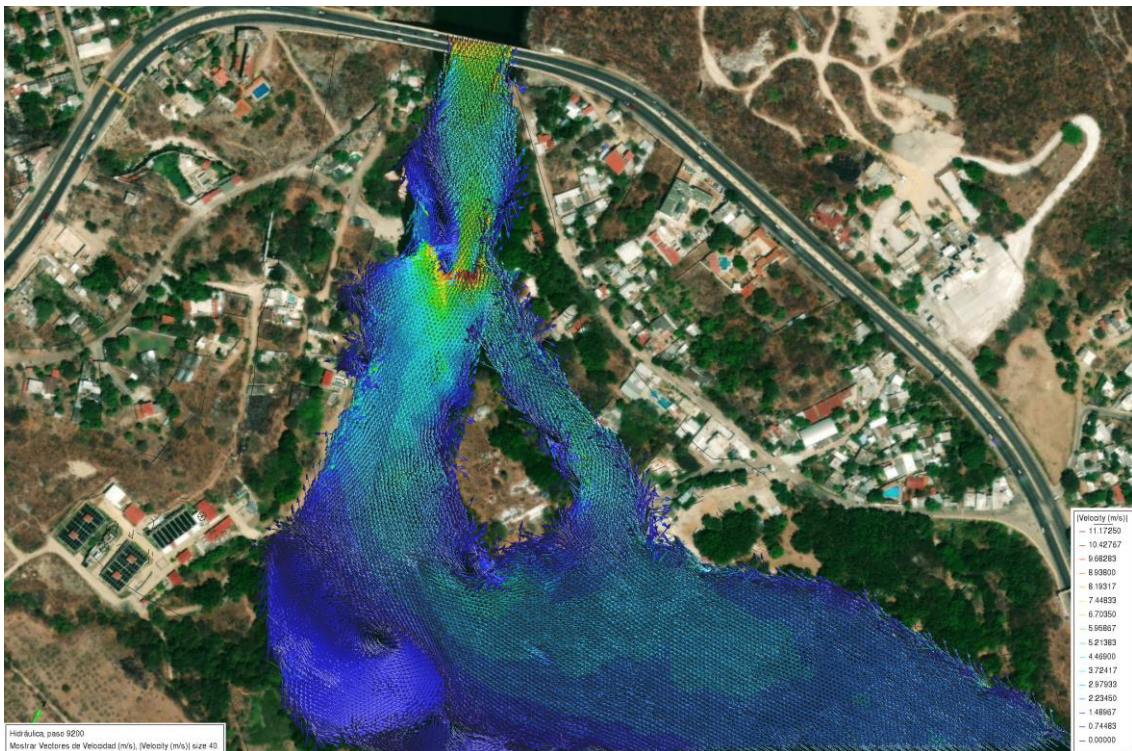


Figura 8.12.- Vectores de velocidades del periodo de retorno de 10 años. (software IBER 2023).

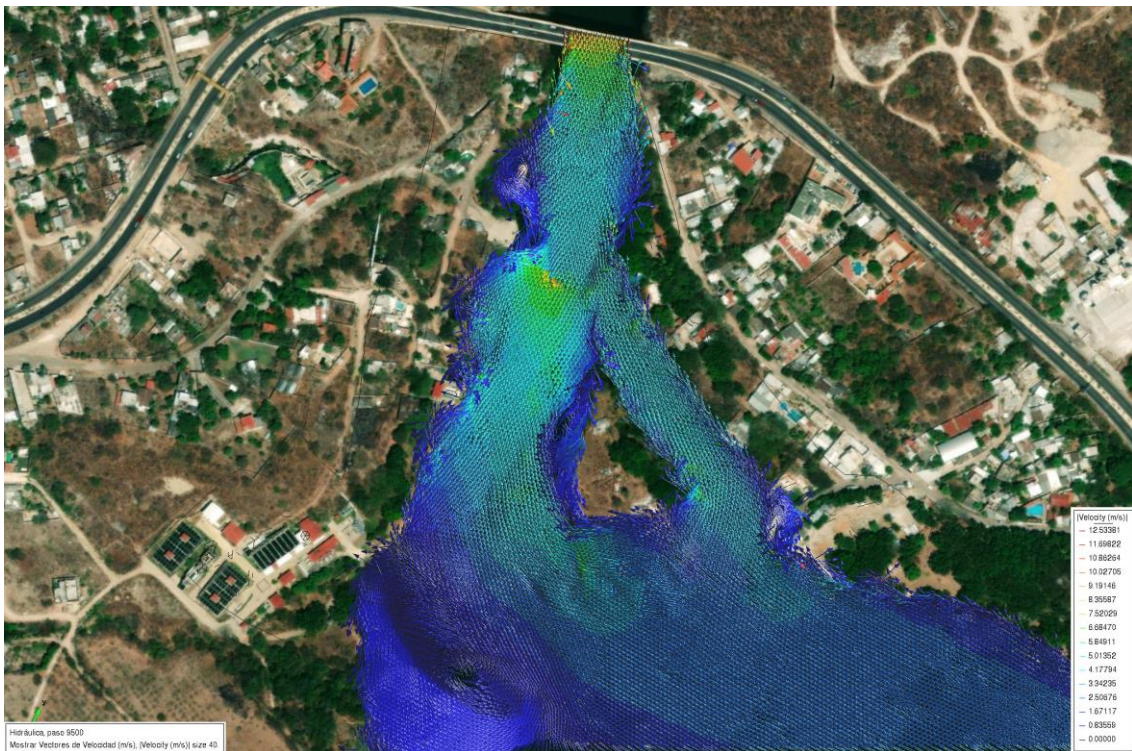


Figura 8.13.- Vectores de velocidades del periodo de retorno de 20 años. (software IBER 2023).

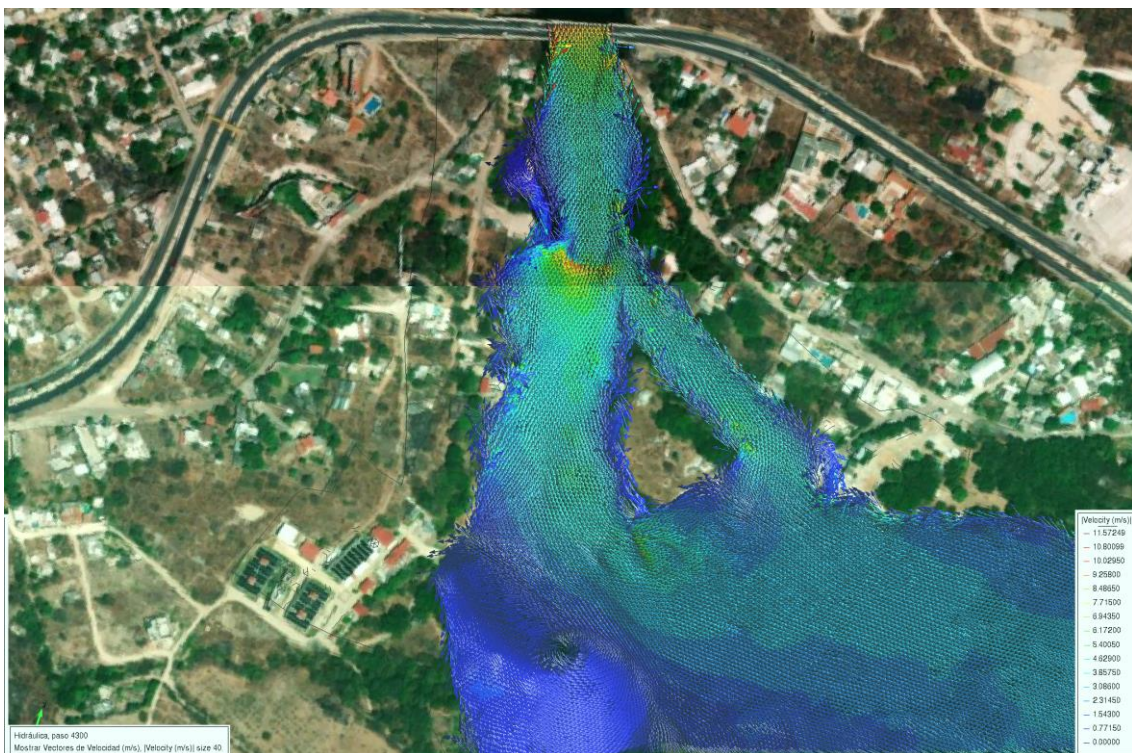


Figura 8.14.- Vectores de velocidades del periodo de retorno de 50 años. (software IBER 2023).

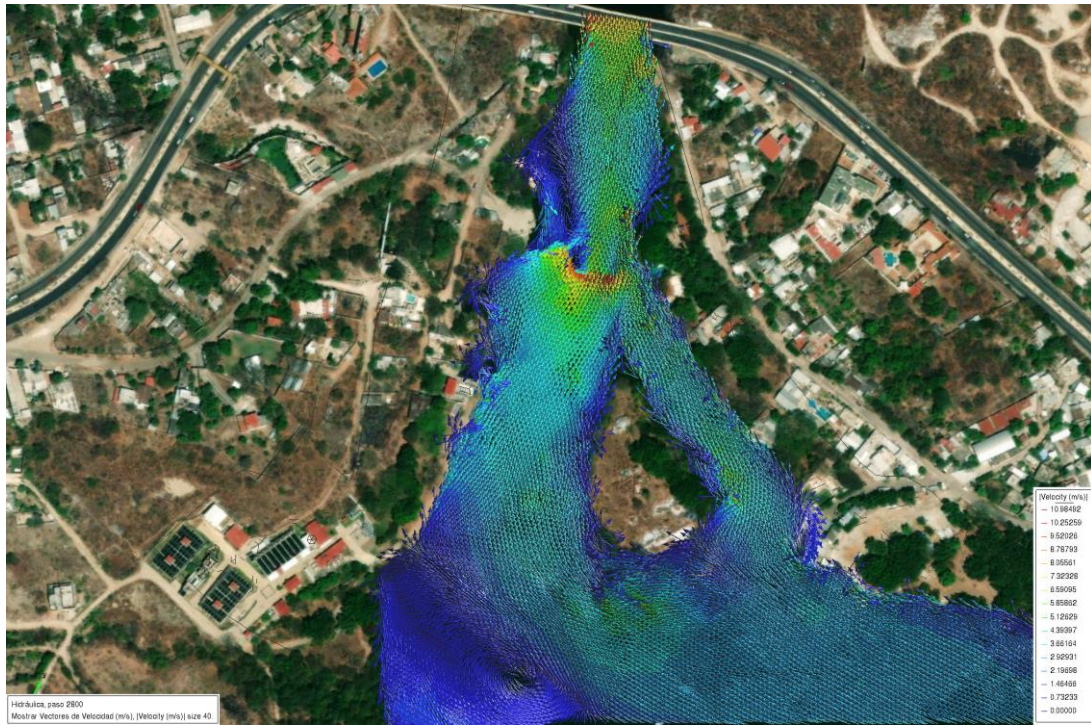


Figura 8.15.- Vectores de velocidades del periodo de retorno de 100 años. (software IBER 2023).

En las Figuras 8. 16 a 8.21 se presentan las velocidades máximas en la zona de la toma de la planta de tratamiento, para los periodos de retorno de 2, 5, 10, 20, 50 y 100 años.

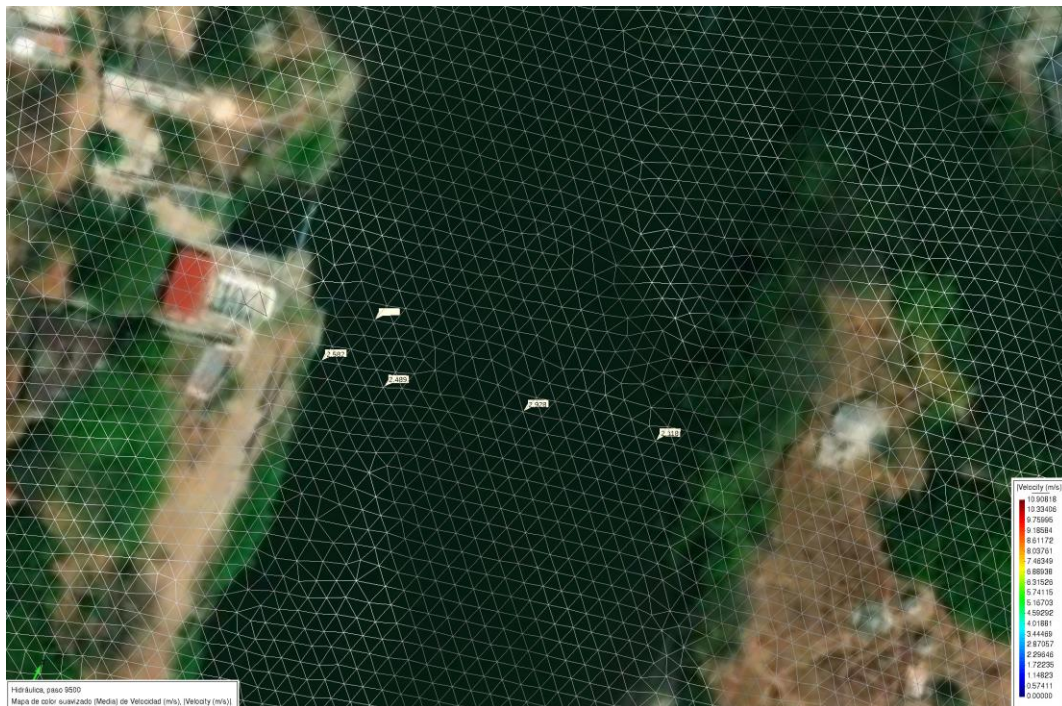


Figura 8.16.- Velocidades para un periodo de retorno de 2 años. (software IBER 2023).



Figura 8.17.- Velocidades para un periodo de retorno de 5 años. (software IBER 2023).

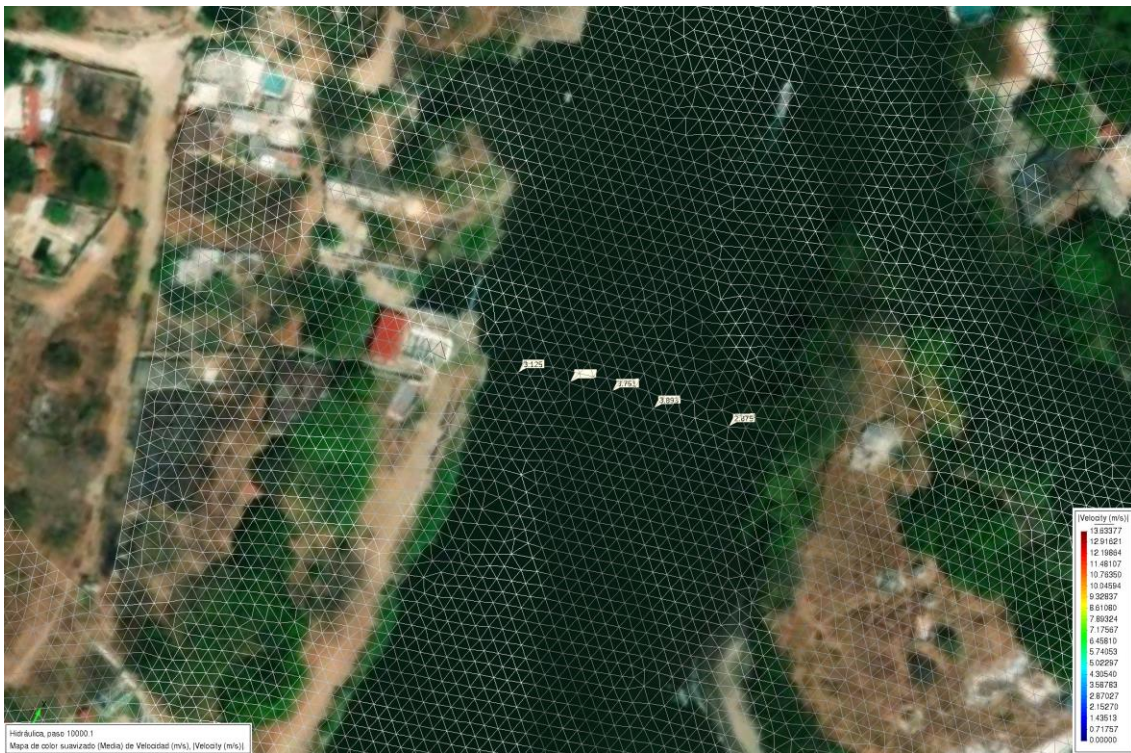


Figura 8.18.- Velocidades para un periodo de retorno de 10 años. (software IBER 2023).

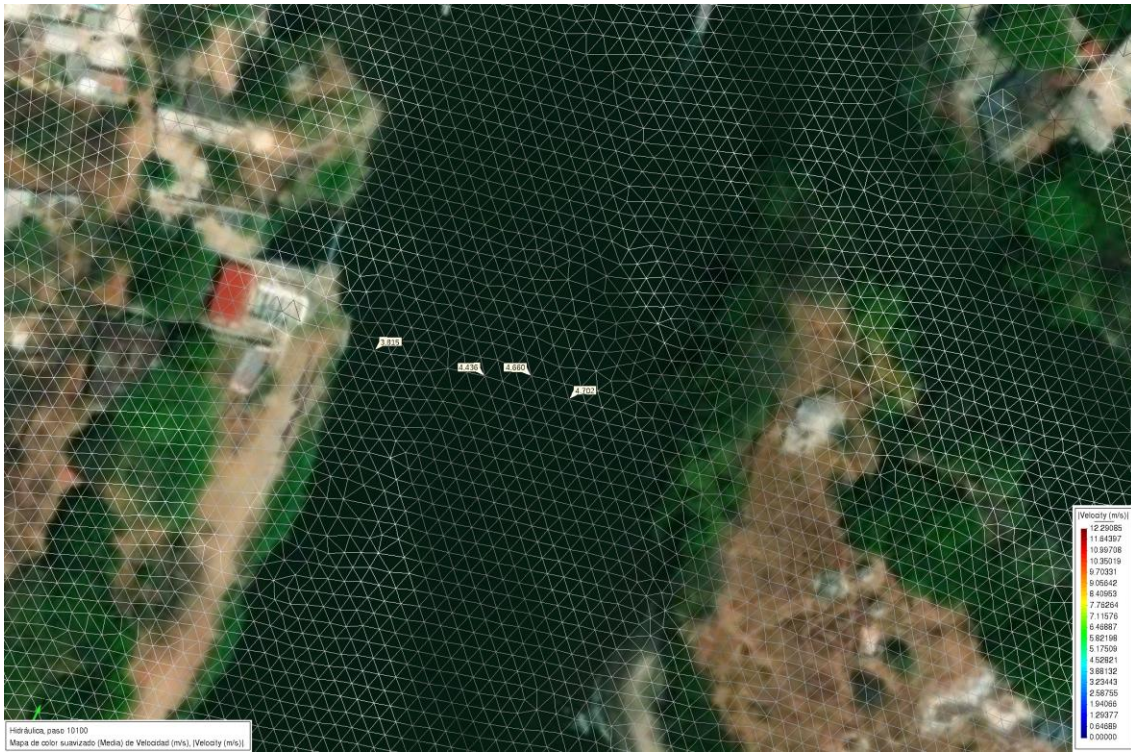


Figura 8.19.- Velocidades para un periodo de retorno de 20 años. (software IBER 2023).

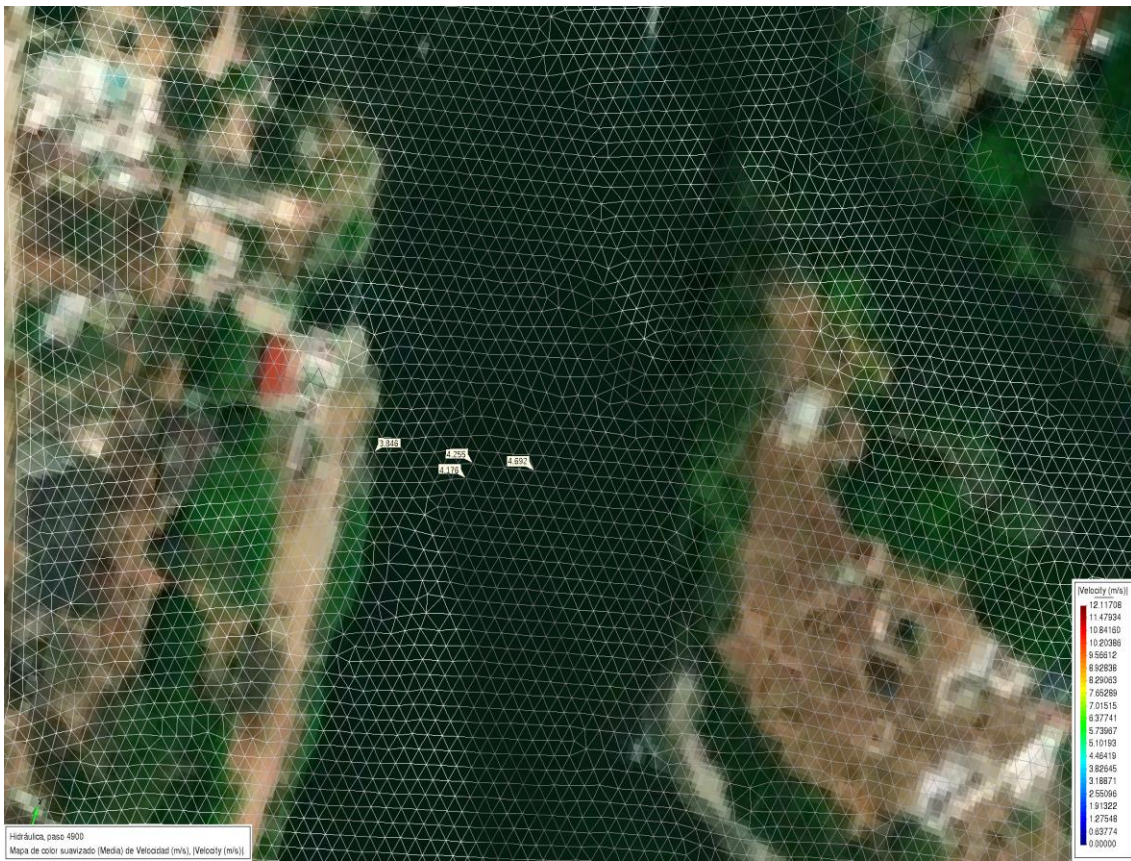


Figura 8.20.- Velocidades para un periodo de retorno de 50 años. (software IBER 2023).

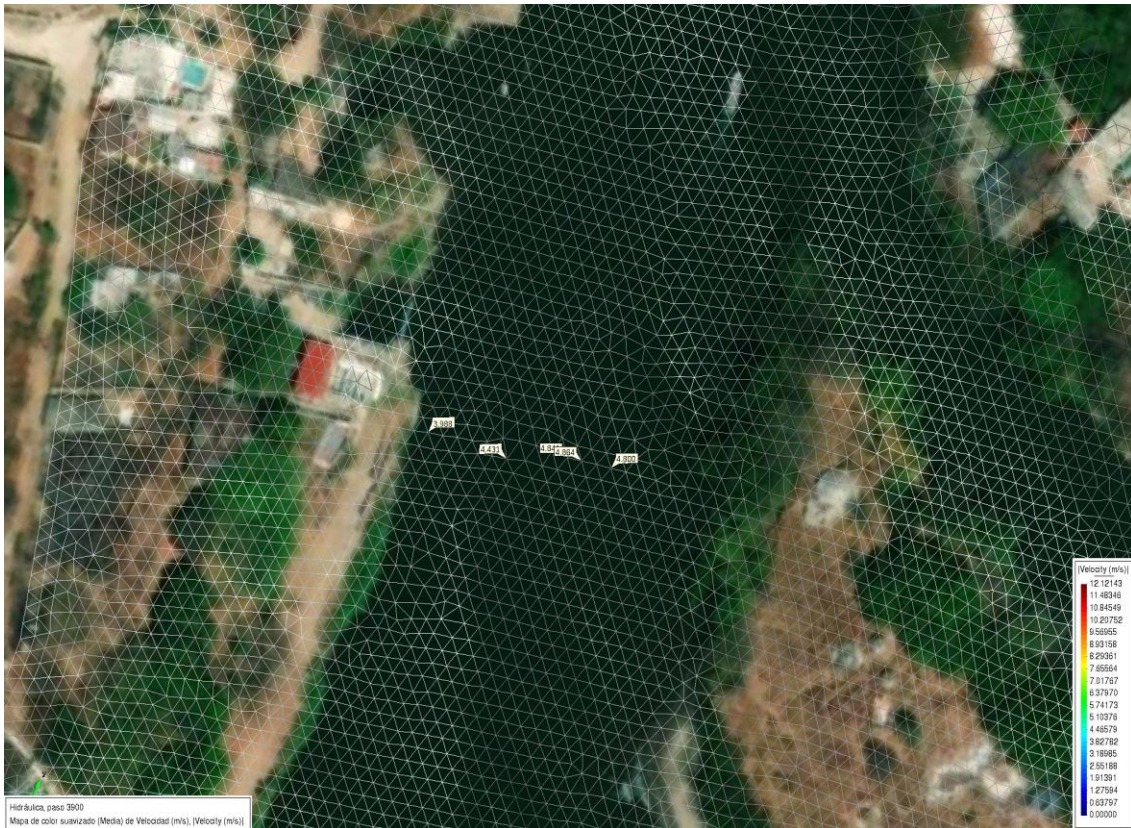


Figura 8.21.- Velocidades para un periodo de retorno de 100 años. (software IBER 2023).

En la Tabla 8.1 se presentan las velocidades máximas simuladas en l zona de la obra de toma de Ciudad del Agua con periodos de retorno de 2, 5, 10, 20, 50 y 100 años. En la columna. (Elaboración propia 2023)

Tabla 8.1 se presentan las velocidades máximas simuladas respecto a los periodos de retorno considerados

Tr	Velocidades (m/s)	Velocidades (m/s)
2	2.58	2.92
5	2.81	3.43
10	3.12	3.89
20	3.81	4.66
50	3.84	4.69
100	3.98	4.86

En la columna 2 se observan las velocidades cercanas a la margen del río donde estará la entrada de la obra de toma, mientras la segunda columna corresponde a las velocidades en el centro del cauce en la misma sección del tramo.

CONCLUSIONES

Se realizó un análisis hidrológico e hidráulico, a la entrada al cañón del Sumidero. Para llevar a cabo el estudio hidrológico se recabo información hidrométrica en la base de datos del Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales, llamado BANDAS, se encontró información de cuatro estaciones hidrométricas importantes para este estudio, la estación Boquerón, Santo Domingo, Acala y Puente Colgante. Cada una de ellas cuenta con información de gastos máximos anuales los cuales se procedieron a ajustar a diferentes funciones de distribución de probabilidades con el programa AX, también se tomó el valor del caudal aforado en la estación hidrométrica de Acala en el año 2010, que junto con los caudales de Boquerón, Santos Domingo y Acala los caudales calculados con modelos lluvia escurrimiento de tres cuencas sin aforo se obtuvo los caudales asociados a los Tr de 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500 y 1000 años..

Para obtener los caudales asociados a periodos de retorno se transitaron estos mismos a través de los tramos correspondientes hasta llegar al lugar del estudio, el método utilizado fue el de Muskingum.

El NAMIN se considera la cota más baja y depende de la presa de Angostura y de la época del año, para poder en la siguiente figura se presentan los caudales de la estación hidrométrica Acala desde el año 2001 a principios del 2020.

Los caudales más bajos se presentan entre enero y abril con caudales menores a 100 m³/s, más los caudales del gasto base de toda el área de aporte son en promedio 200 m³/s. La cota se encuentra entre el 387 y 389 msnm.

Se recomienda utilizar el periodo de retorno intermedio entre 20 y 50 años, ya que entre estos dos caudales se encuentra el nivel alcanzado en el año 2010 en el cárcamo de bombeo actual, recordando que las centrales hidroeléctricas de La Angostura y Chicoasén tuvieron que abrir vertedores. Sin que este nivel afectara al equipo de bombeo.

La recomendación de estos periodos de retorno indica que la altura del muro de protección va de 3 a 4 m de altura. Sin llegar al extremo de 100 años de periodo de retorno en el cual el muro va de los 9 a 10 m de altura. Para determinar con mayor exactitud estas alturas se realiza el estudio hidráulico.

REFERENCIAS

Aguilar S. M. A. (2023) "Software de datos de estaciones en tiempo real" Universidad Autónoma de Chiapas, CONAGUA, CFE, facultad de Ingeniería de la UNACH, Mexico.

Andrey Ivashov (2022) "Software Smath Studio Versión 2022" Russia, Saint-Petersburg, 193230, Dal'nevostochnyj pr., d. 12, k. 2, str. 1, kv. 113. <https://smath.com/en-US/view/SMathStudio/download/>

Aparicio Mijares F. J., (1994) "Fundamentos de hidrología de superficie", Editorial Limusa, México.

Blade, E., Cea L., Corestein, G., Escolano, E., Puertas, J., Vázquez-Cendón, M.E., Dolz, J. Coll, A. (2014). "Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos". Revista internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería. Vol. 30 (1) pp. 1-10.

Campos Aranda, D. F., (2010) "Introducción la hidrología Urbana" Universidad Autónoma de San Luis Potosí, México.

Campos Aranda, D. F., (2012) "Description and application of the corrected Langbein test for regional homogeneity verification", Ingeniería Investigación y Tecnología, Volumen XIII (número 4). Octubre-diciembre, pág. 411-416.

Campos Aranda, D. F., (2014) "Predicciones extremas de lluvias en 24 horas en el estado de Zacatecas, México", Tecnología y Ciencias del Agua, Nota Técnica, Volumen V (número 5). Septiembre-octubre 2014, pág. 199-225.

Campos Aranda, D. F., "Procesos del ciclo hidrológico" Tercera edición, Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí. México 1998.

CLICOM, "Base de datos meteorológicos de la CONAGUA" <https://smn.conagua.gob.mx/tools/RECURSOS/estacion/EstacionesClimatologicas.kmz>, fecha de consulta agosto, 2023.

CONAGUA, "Servicio Meteorológico Nacional" <https://smn.conagua.gob.mx/es/observando-el-tiempo/estaciones-meteorologicas-automaticas-ema-s>, fecha de consulta octubre 2023.

Domínguez M. R., Arganis J. M. L., Carrizosa E., Esquivel G., Herrera A., Mariles G., Roldán L., Santana S., Ponce S., Juan Diego, E., "Estudio para regionalizar los gastos generados por avenidas máximas, como base para la elaboración de mapas de peligro por inundaciones fluviales en todas las cuencas de la república mexicana: regionalización de gastos". CENAPRED, 2017.

Domínguez Mora R., "Análisis regional de tormentas y avenidas de diseño. Aplicación a la cuenca del Papaloapan", tesis que para obtener el grado de Maestro en Ingeniería (Hidráulica), UNAM (1988).

Domínguez Mora, Ramón; Arganis Juárez, Maritza L., (2018). "Manual de Diseño de Obras Civiles Cap. A.1.8 Avenidas de Diseño: Sección A: Hidrotecnia Tema 6: Hidrología.

Domínguez R., Carrizosa E., Fuentes G, Fuentes. Arganis Maritza, Osnaya J. y Galván Andrés "Análisis regional para estimar precipitaciones de diseño en la república mexicana" Revista de Tecnología y Ciencias del Agua, Instituto de Mexicano de Tecnología y Ciencias del Agua, 2018.

Escalante, C., y L. Reyes. "Técnicas Estadísticas en Hidrología". Facultad de Ingeniería, UNAM. México. 2005.

Fuentes Mariles, Víctor Franco, Faustino de Luna Cruz, Laura Vélez Morales, Judith Guadalupe Ramos Hernández (2013) "Estudio de inundaciones fluviales y mapas de peligro para el Atlas Nacional de Riesgos por Inundaciones CNA-SGT-GASIR-04/2013. (XI) Grijalva, entre la Angostura y CH Chicoasén, Informe Final. Para la CONAGUA, Instituto de Ingeniería de la UNAM.

Gómez. J.F., Aparicio, J., Patiño, C. (2011) "Análisis de Frecuencias AFA V.1.", Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Jiutepec, Morelos, México.

Guía técnica para realizar el levantamiento topográfico, estudio hidrológico e hidráulico, análisis de socavación para obras de cruces en cauces naturales. Organismo de Cuenca Frontera Sur, Dirección Técnica. Jefatura de Proyectos de aguas superficiales e ingeniería de ríos, 2011.

Guichard R, D.R, Domínguez M., R (1996). "Análisis hidrológico e hidráulico del río Sabinal y sus afluentes" UNACH-INSTITUTO DE INGENIERÍA DE LA UNAM.

Guichard Romero, D. R. (1998)"Regionalización de lluvias y escurrimientos en la cuenca del Alto Grijalva". Tesis de Maestría presentada en la Facultad de Ingeniería de la UNAM.

INEGI <https://www.inegi.org.mx/temas/topografia/#Descargas> fecha de consulta octubre 2023.

Jiménez Espinosa, M., "Programa AX.EXE ", CENAPRED, Facultad de Ingeniería de la UNAM, 1997.

Jiménez, E. M. (2015) "AX-2015 Ajuste de funciones de probabilidad, Versión 2.0.0.1" Subdirección de riesgos hidrometeorológicos, Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), México.

Manual básico de usuario (2012). "Modelización bidimensional del flujo en lámina libre en aguas poco profundas" Ministerio del Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, Centro de Estudios y Experimentación en obras Públicas (CEDEX), Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente, Grupo FLUMEN, Universidad Politécnica de Valencia, España.

Merlos Villegas F. (2015) “Software AX+b para el ajuste de distribución de probabilidades” Manual de usuario final.

Sánchez Martínez, S.A. (2017) “Actualización de los factores de reducción por área para distintas regiones de la república mexicana” Tesis de maestría en Hidráulica-Aprovechamientos hidráulicos. Facultad de Ingeniería de la UNAM, México.

Sanz-Ramos, M., Cea, L., Bladé, E., López-Gómez, D., Sañudo, E., Corestein, G., García-Alén, G., Aragón-Hernández, J.L., (2022). Iber v3. Manual de referencia e interfaz de usuario de las nuevas implementaciones. Centre Internacional de Mètodes Numèrics a l'Enginyeria (CIMNE), Barcelona, Spain. DOI: [10.23967/iber.2022.01](https://doi.org/10.23967/iber.2022.01)

Solís Montero, J. (2003) “Paquete interactivo para análisis hidrológico” Tesis de pregrado, Facultad de Ingeniería de la Universidad de las Américas Puebla, Cholula, Puebla.

Solís Montero, Jadir. “Paquete interactivo para análisis hidrológico” Tesis de Ingeniería civil, Departamento de Ingeniería Civil. Escuela de Ingeniería. Universidad de las Américas, Puebla. Mayo 2003.

ANEXOS

Anexo A.1.- DATOS HIDROMÉTRICOS DE LAS ESTACIONES BOQUERÓN, SANTO DOMINGO, ACALA Y LA ESCALERA (GASTOS EN m³/s)

AÑO	BOQUERONN	STO. DOM.	ACALA	AÑO	BOQUERON	STO. DOM.	ACALA
1952	282	177		1986	306	141	869
1953	181	486		1987	173	147	813
1954	260	610		1988	270	474	765
1955	272	278		1989	768	534	1003
1956	222	246		1990	100	187	967
1957	80	255		1991	112	40.8	770
1958	299	295		1992	184	276	847
1959	168	353		1993	260	200	849
1960	239	300		1994	76	35.4	700
1961	139	265		1995	247	153	953
1962	290	1740		1996	166	111	855
1963	623	675		1997	336	228	898
1964	158	625		1998	727	2552	835
1965	130	898		1999	307	177	1161
1966	238	475		2000		148	1049
1967	185	665		2001	173	63.1	1044
1968	181	587		2002	255	315	863
1969	296			2003	443	345	909
1970	323			2004	203	235	778
1971	269			2005	1200	5980	873
1972	267			2006	177	132	944
1973	501			2007	239	238	925
1974	286			2008	263	250	1350
1975	151			2009	192		687
1976	242	88.1		2010	543	884	2140
1977	82	118		2011	478	540	995
1978	263	276		2012	299	335	1033
1979	218	280		2013	385	927	866
1980	545	1418		2014	249	220	920.25
1981	316	256		2015	103	166.5	1230
1982	342	287		2016	234	148.39	955
1983	277	204		2017	199	239.2	1105
1984		325		2018	122	192	918.7
1985	166	191	1048	2019	95	93.95	1115

Anexo A.2.- HIDROGRAMAS DE LOS GASTOS DE DISEÑO DE LAS TRES CUENCA TOTAL EN m³/s

CUENCA BOQUERÓN SIN HIDROMÉTRIA

METODO DEL HIDROGRAMA UNITARIO TRIANGULAR				
	Área de cuenca	A =	345.78	km ²
	Número de escurrimiento	N =	80	adimensional
	Longitud del cauce	L=	67908.21	m
	Pendiente del cauce	S=	0.0044	adimensional
	Tiempo de concentración	Tc =	13.80	hr
	Tiempo de retraso	Tr=	8.28	hr
	Duración en exceso	de=	7.43	hr
	Tiempo pico	Tp =	12.0	hr
	Tiempo base	Tb=	32.0	hr
Tr	Precipitacion	P máx efectiva (mm)	Ce	Qmax HUT
2	47.14	12.11	0.26	72.58
5	60.31	20.40	0.34	122.29
10	69.94	27.14	0.39	162.67
20	81.09	35.47	0.44	212.58
50	100.35	50.83	0.51	304.67
100	118.09	65.77	0.56	394.20
200	136.34	81.69	0.60	489.62
500	160.67	103.54	0.64	620.58
1000	178.91	120.27	0.67	720.87

METODO DEL HIDROGRAMA UNITARIO ADIMENSIONAL				
	Área de cuenca	A =	345.78	km ²
	Número de escurrimiento	N =	80	adimensional
	Longitud del cauce	L=	67908.21	m
	Pendiente del cauce	S=	0.0044	adimensional
	Tiempo de concentración	Tc =	13.795	hr
	Tiempo de retraso	Tr=	8.28	hr
	Duración en exceso	de=	7.43	hr
	Tiempo pico	Tp =	12.0	hr
	Tiempo base	Tb=	32	hr
Tr	Precipitacion	P máx efectiva (mm)	Ce	Qmax HUT
2	47.14	12.11	0.26	72.62
5	60.31	20.40	0.34	122.37
10	69.94	27.14	0.39	162.77
20	81.09	35.47	0.44	212.72
50	100.35	50.83	0.51	304.87
100	118.09	65.77	0.56	394.46
200	136.34	81.69	0.60	489.93
500	160.67	103.54	0.64	620.98
1000	178.91	120.27	0.67	721.33

METODO DE CHOW				
	Área de cuenca	A =	345.78	km ²
	Número de escurrimiento	N =	80	adimensional
	Longitud del cauce	L=	67908.21	m
	Pendiente del cauce	S=	0.4400	adimensional
	Tiempo de concentración	Tc =	2.34	hr
	Tiempo de retraso	Tr=	8.04	hr
	Duración en exceso	de=	2.34	hr
	Tiempo pico	Tp =	9.22	hr
	Tiempo base	Tb=	24.61	hr
		de/tr =	0.29	adimensional
		Z1 =	0.2239	
		Z=	0.22	
Tr	Precipitacion	P máx efectiva (mm)	Ce	Qmax (m ³ /s)
2	47.14	12.11	0.26	111.52
5	60.31	20.40	0.34	187.91
10	69.94	27.14	0.39	249.95
20	81.09	35.47	0.44	326.64
50	100.35	50.83	0.51	468.15
100	118.09	65.77	0.56	605.72
200	136.34	81.69	0.60	752.33
500	160.67	103.54	0.64	953.56
1000	178.91	120.27	0.67	1107.66

CUENCA SANTO DOMINGO SIN HIDROMÉTRIA

METODO DEL HIDROGRAMA UNITARIO TRIANGULAR				
	Área de cuenca	A =	275.62	km ²
	Número de escurrimiento	N =	77	adimensional
	Longitud del cauce	L=	42153.38	m
	Pendiente del cauce	S=	0.0024	adimensional
	Tiempo de concentración	Tc =	12.07	hr
	Tiempo de retraso	Tr=	7.24	hr
	Duración en exceso	de=	6.95	hr
	Tiempo pico	Tp =	10.7	hr
	Tiempo base	Tb=	28.6	hr
Tr	Precipitacion	P máx efectiva (mm)	Ce	Qmax HUT
2	54.89	13.65	0.25	72.99
5	70.24	23.16	0.33	123.84
10	81.46	30.91	0.38	165.26
20	94.44	40.50	0.43	216.58
50	116.87	58.25	0.50	311.45
100	137.53	75.53	0.55	403.86
200	158.78	93.97	0.59	502.45
500	187.11	119.30	0.64	637.92
1000	208.36	138.71	0.67	741.74

METODO DEL HIDROGRAMA UNITARIO ADIMENSIONAL				
	Área de cuenca	A =	275.62	km ²
	Número de escurrimiento	N =	77	adimensional
	Longitud del cauce	L=	42153.38	m
	Pendiente del cauce	S=	0.0024	adimensional
	Tiempo de concentración	Tc =	12.068	hr
	Tiempo de retraso	Tr=	7.24	hr
	Duración en exceso	de=	6.95	hr
	Tiempo pico	Tp =	10.7	hr
	Tiempo base	Tb=	29	hr
Tr	Precipitacion	P máx efectiva (mm)	Ce	Qmax HUT
2	54.89	13.65	0.25	73.03
5	70.24	23.16	0.33	123.92
10	81.46	30.91	0.38	165.37
20	94.44	40.50	0.43	216.72
50	116.87	58.25	0.50	311.66
100	137.53	75.53	0.55	404.12
200	158.78	93.97	0.59	502.78
500	187.11	119.30	0.64	638.33
1000	208.36	138.71	0.67	742.22

METODO DE CHOW				
	Área de cuenca	A =	275.62	km ²
	Número de escurrimiento	N =	77	adimensional
	Longitud del cauce	L=	42153.38	m
	Pendiente del cauce	S=	0.2400	adimensional
	Tiempo de concentración	Tc =	2.05	hr
	Tiempo de retraso	Tr=	7.20	hr
	Duración en exceso	de=	2.86	hr
	Tiempo pico	Tp =	8.63	hr
	Tiempo base	Tb=	23.04	hr
		de/tr =	0.40	adimensional
		Z1 =	0.3012	
		Z=	0.30	
Tr	Precipitacion	P máx efectiva (mm)	Ce	Qmax (m ³ /s)
2	54.89	13.65	0.25	110.79
5	70.24	23.16	0.33	187.99
10	81.46	30.91	0.38	250.87
20	94.44	40.50	0.43	328.77
50	116.87	58.25	0.50	472.79
100	137.53	75.53	0.55	613.06
200	158.78	93.97	0.59	762.73
500	187.11	119.30	0.64	968.37
1000	208.36	138.71	0.67	1125.96

CUENCA ACALA SIN HIDROMÉTRIA

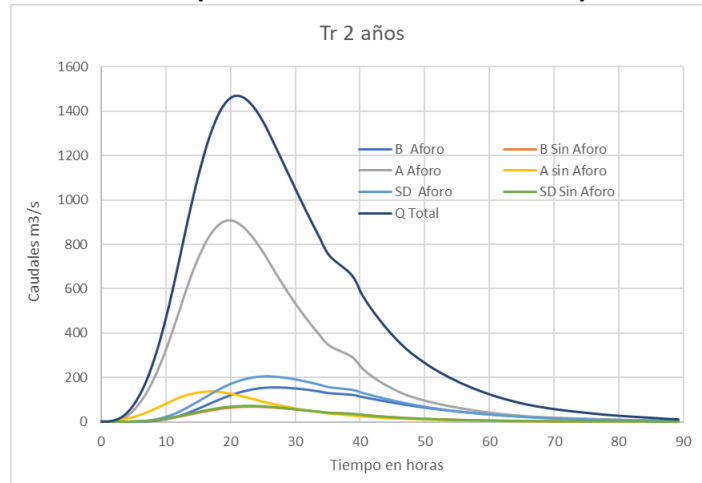
METODO DEL HIDROGRAMA UNITARIO TRIANGULAR				
	Área de cuenca	A =	227.98	km ²
	Número de escurrimiento	N =	77	adimensional
	Longitud del cauce	L=	36947.2	m
	Pendiente del cauce	S=	0.0460	adimensional
	Tiempo de concentración	Tc =	3.50	hr
	Tiempo de retraso	Tr=	2.10	hr
	Duración en exceso	de=	3.74	hr
	Tiempo pico	Tp =	4.0	hr
	Tiempo base	Tb=	10.6	hr
Tr	Precipitación	P máx efectiva (mm)	Ce	Qmax HUT
2	48.30	10.07	0.21	120.19
5	61.80	17.75	0.29	211.90
10	71.67	24.11	0.34	287.89
20	83.09	32.08	0.39	383.05
50	102.82	46.98	0.46	561.00
100	121.00	61.64	0.51	735.99
200	139.70	77.38	0.55	923.93
500	164.62	99.13	0.60	1183.63
1000	183.32	115.86	0.63	1383.49

METODO DEL HIDROGRAMA UNITARIO ADIMENSIONAL				
	Área de cuenca	A =	227.98	km ²
	Número de escurrimiento	N =	77	adimensional
	Longitud del cauce	L=	36947.2	m
	Pendiente del cauce	S=	0.0460	adimensional
	Tiempo de concentración	Tc =	3.498	hr
	Tiempo de retraso	Tr=	2.10	hr
	Duración en exceso	de=	3.74	hr
	Tiempo pico	Tp =	4.0	hr
	Tiempo base	Tb=	11	hr
Tr	Precipitación	P máx efectiva (mm)	Ce	Qmax HUT
2	48.30	10.07	0.21	120.27
5	61.80	17.75	0.29	212.04
10	71.67	24.11	0.34	288.08
20	83.09	32.08	0.39	383.30
50	102.82	46.98	0.46	561.36
100	121.00	61.64	0.51	736.46
200	139.70	77.38	0.55	924.53
500	164.62	99.13	0.60	1184.40
1000	183.32	115.86	0.63	1384.39

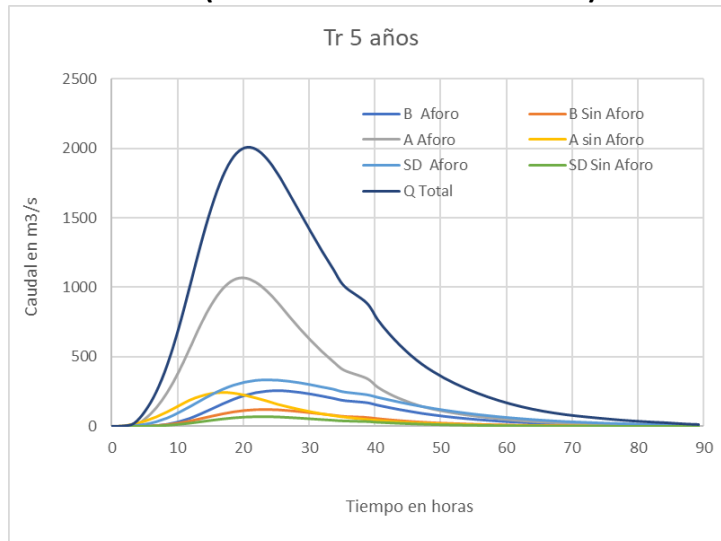
METODO DE CHOW				
	Área de cuenca	A =	227.98	km ²
	Número de escurrimiento	N =	77	adimensional
	Longitud del cauce	L=	36947.2	m
	Pendiente del cauce	S=	4.6000	adimensional
	Tiempo de concentración	Tc =	0.59	hr
	Tiempo de retraso	Tr=	2.57	hr
	Duración en exceso	de=	1.54	hr
	Tiempo pico	Tp =	3.34	hr
	Tiempo base	Tb=	8.92	hr
		de/tr =	0.60	adimensional
		Z1 =	0.4311	
		Z=	0.44	
Tr	Precipitación	P máx efectiva (mm)	Ce	Qmax (m ³ /s)
2	48.30	10.07	0.21	182.87
5	61.80	17.75	0.29	322.40
10	71.67	24.11	0.34	438.02
20	83.09	32.08	0.39	582.80
50	102.82	46.98	0.46	853.54
100	121.00	61.64	0.51	1119.77
200	139.70	77.38	0.55	1405.72
500	164.62	99.13	0.60	1800.84
1000	183.32	115.86	0.63	2104.92

Anexo A.3.- HIDROGRAMAS DE TRANSITADOS HASTA CIUDAD DEL AGUA EN m³/s

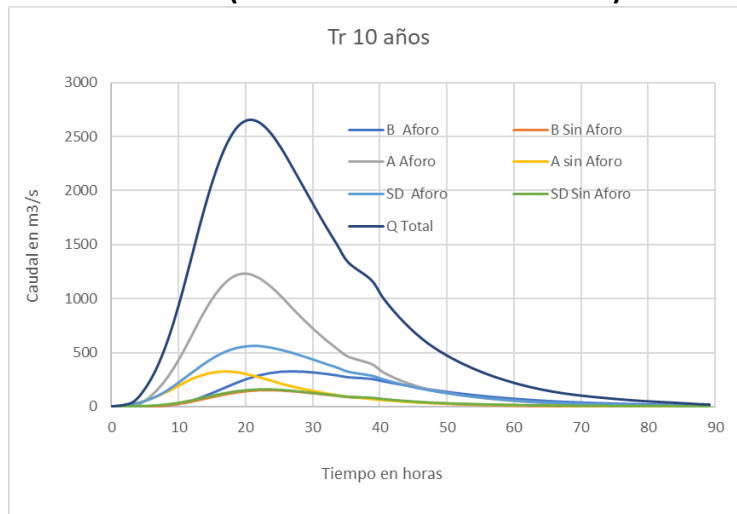
CAUDAL PARA TR DE 2 AÑOS. (ELABORACION PROPIA 2023)



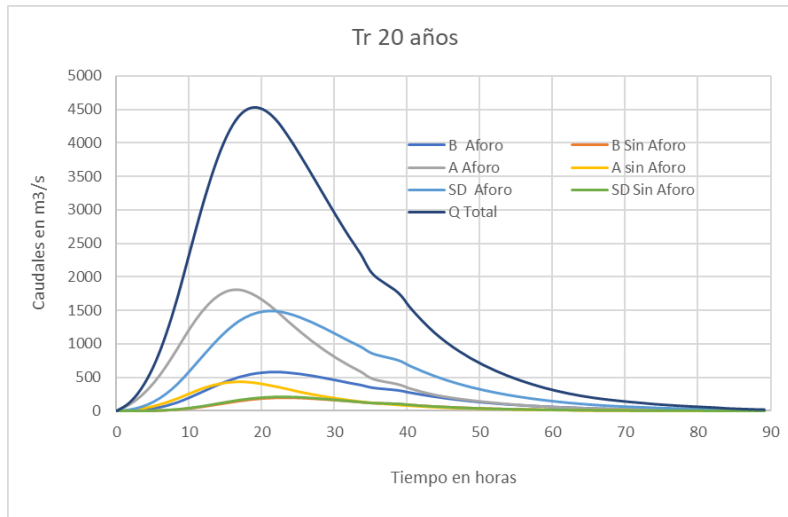
CAUDAL PARA TR DE 5 AÑOS. (ELABORACION PROPIA 2023)



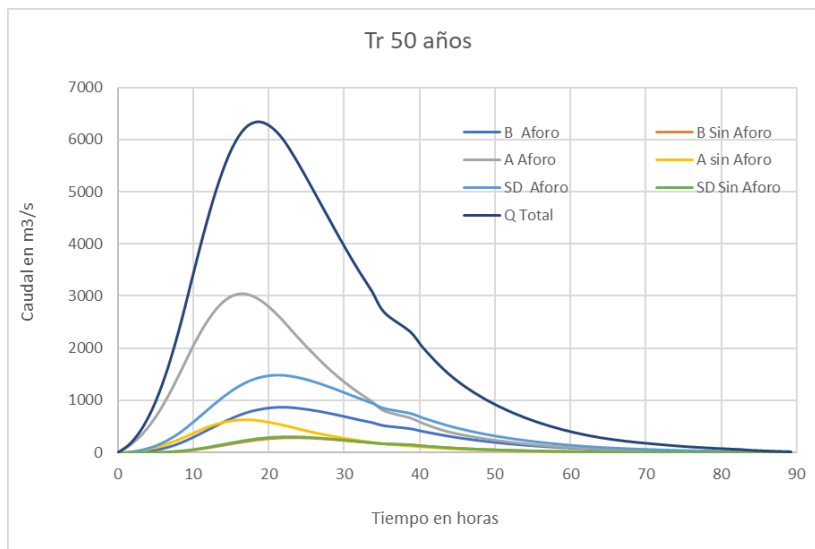
CAUDAL PARA TR DE 10 AÑOS. (ELABORACION PROPIA 2023)



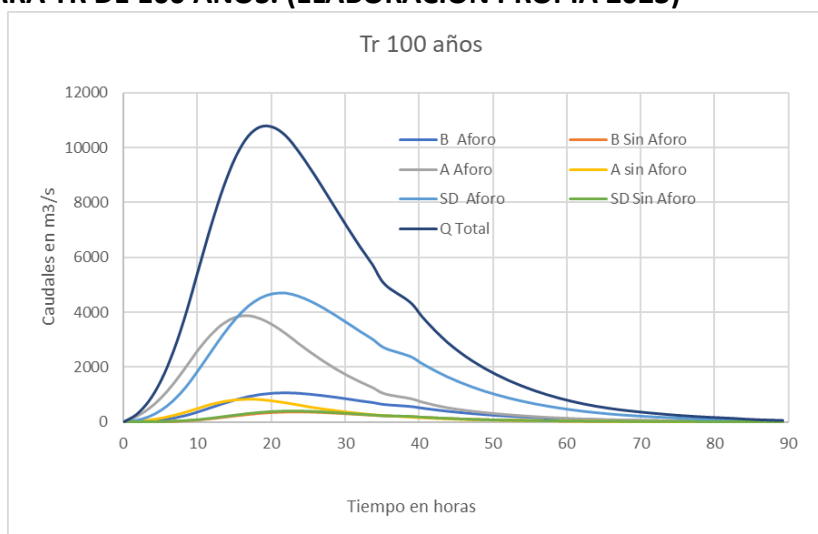
CAUDAL PARA TR DE 20 AÑOS. (ELABORACION PROPIA 2023)



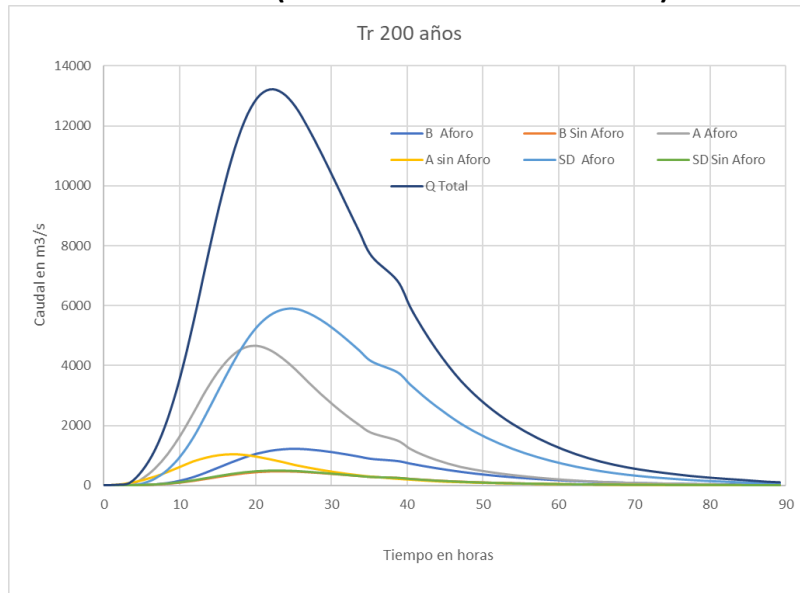
CAUDAL PARA TR DE 50 AÑOS. (ELABORACION PROPIA 2023)



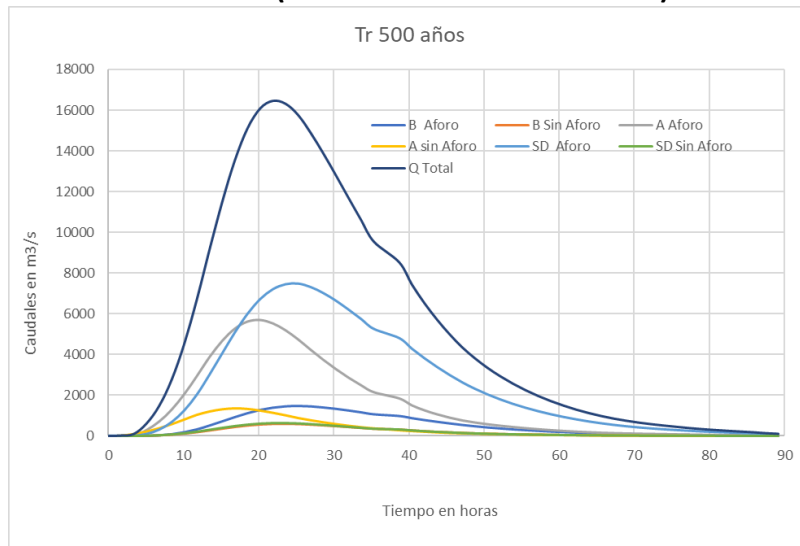
CAUDAL PARA TR DE 100 AÑOS. (ELABORACION PROPIA 2023)



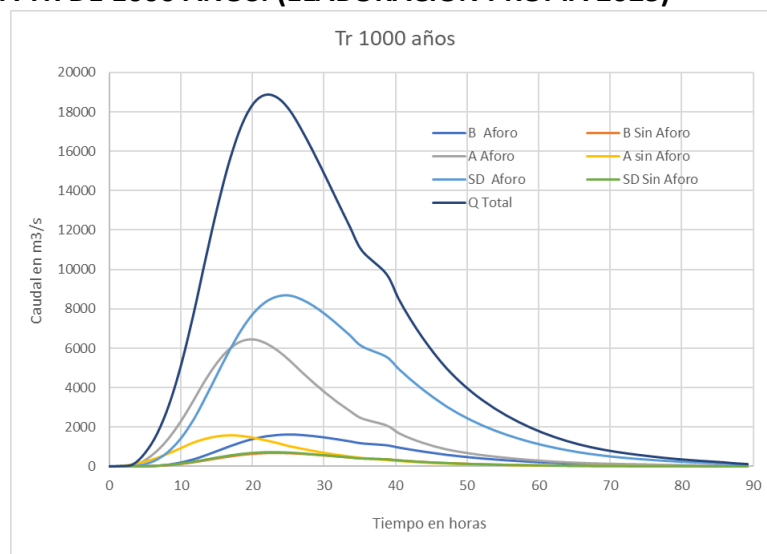
CAUDAL PARA TR DE 200 AÑOS. (ELABORACION PROPIA 2023)



CAUDAL PARA TR DE 500 AÑOS. (ELABORACION PROPIA 2023)



CAUDAL PARA TR DE 1000 AÑOS. (ELABORACION PROPIA 2023)



ANEXO FOTOGRÁFICO

El presente Anexo Fotográfico corresponde a las visitas de campo realizadas en la zona de estudio. Las Fotografías muestran algunos aspectos importantes de la zona de estudio, como son la entrada de la obra de toma actual, las cotas de la obra de toma, el flujo del meandro en la parte oriente del predio, zona de construcción de la obra de toma y algunas fotografías donde se observa el río Grijalva



Obra de toma actual de Ciudad del Agua. (Fuente propia 2023).



Nivel de cota de entrada en la obra de toma. (Fuente propia 2023).



Entrada actual de la obra de toma. (Fuente propia 2023).



Curvatura del meandro que esta en la parte oriente de Ciudad del Agua. (Fuente propia 2023).



Fotografía del meandro más cercana en parte Oriente de Ciudad del Agua. (Fuente propia 2023).



Parte interna del meandro, donde comienza la isla de Cachuaré se observan una playa pequeña formada por los sedimentos de la zona. (Fuente propia 2023).



Fotografía área de la zona cercana al estudio se observa la planta de moscas del gusano barrenador, foto tomada en 2010, por personal de la CONAGUA.



Fotografía área de Chiapa de Corzo aguas arriba a la zona estudio, se observa la isla llamada Manaos, foto tomada en 2010, por personal de la CONAGUA.



Se observa la entrada de la obra de toma y el Puesto Belisario Domínguez, en el puente Colgante se encuentra instalada la estación hidrométrica Cañón del Sumidero. (Fuente propia 2023).



Sedimentos en la obra de toma actual. (Fuente propia 2023).



Sedimentos y basura dentro de obra de toma actual. (Fuente propia 2023).



Zona donde se planea construir la obra de toma de Ciudad del Agua. (Fuente propia 2023).



Orilla de la zona donde se planea construir la obra de toma. (Fuente propia 2023).