

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA
VICERRECTORÍA DE DOCENCIA
ESCUELA DE INGENIERÍA AGRÍCOLA



Informe de Trabajo Final de Graduación presentado a la
Escuela de Ingeniería Agrícola como requisito parcial para
optar al grado de Licenciado en Ingeniería Agrícola

CREACIÓN DEL MODELO HIDRÁULICO BIDIMENSIONAL CALIBRADO
MEDIANTE EL ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO PARA LA DETERMINACIÓN DEL
COEFICIENTE DE RUGOSIDAD EN DOS TRAYECTOS DE CONTROL UBICADOS EN
EL RÍO AHOGADOS Y RÍO TEMPISQUITO DE LA CUENCA DEL RÍO TEMPISQUE,
PARA APLICACIONES DE HIDROMETRÍA Y SIMULACIÓN DE HÁBITAT

VALERIA SERRANO NÚÑEZ

CARTAGO, 2021

CREACIÓN DEL MODELO HIDRÁULICO BIDIMENSIONAL CALIBRADO
MEDIANTE EL ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO PARA LA DETERMINACIÓN DEL
COEFICIENTE DE RUGOSIDAD EN DOS TRAYECTOS DE CONTROL UBICADOS EN
EL RÍO AHOGADOS Y RÍO TEMPISQUITO DE LA CUENCA DEL RÍO TEMPISQUE,
PARA APLICACIONES DE HIDROMETRÍA Y SIMULACIÓN DE HÁBITAT

VALERIA SERRANO NÚÑEZ

Informe de Trabajo Final de Graduación presentado a la
Escuela de Ingeniería Agrícola como requisito parcial para
optar al grado de Licenciado en Ingeniería Agrícola

Fernando Watson Hernández

Asesor - Lector

Isabel Guzmán Arias

Director Escuela
Ingeniería Agrícola

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
CARTAGO, COSTA RICA
2021



This work is licensed under a
Creative Commons Attribution-Non-Commercial
4.0 International License

ACTA DE CALIFICACION DE TRABAJOS DE GRADUACION

A las 11:00 horas del día 15 del mes de Noviembre del año 2021 la estudiante:
Valeria Serrano Núñez

presenta y defiende su trabajo de graduación titulado:

Creación del Modelo Hidráulico Bidimensional Calibrado Mediante el Análisis
Granulométrico para la Determinación del Coeficiente de Rugosidad en Dos
Trayectos de Control Ubicados en el Río Ahogados y Río Tempisquito de la Cuenca
Del Río Tempisque, para Aplicaciones de Hidrometría y Simulación de Hábitat

ante el Tribunal de Evaluación compuesto por los siguientes miembros: +

Presidente (a): Laura Segura Serrano

Asesor (a) de la Escuela: Fernando Watson Hernández

Asesor (a) Externo (a): Milton Pérez Matamoros

firman conforme lo dispone el Reglamento de Trabajos Finales de Graduación:

LAURA PATRICIA
SEGURA
SERRANO (FIRMA)

Firmado digitalmente por
LAURA PATRICIA SEGURA
SERRANO (FIRMA)
Fecha: 2021.11.15 13:08:03
-06'00'

PRESIDENTE (A)

FERNANDO
WATSON
HERNANDEZ
(FIRMA)

Firmado digitalmente por
FERNANDO WATSON
HERNANDEZ (FIRMA)
Fecha: 2021.11.15
12:32:44 -06'00'

ASESOR (A) DE LA ESCUELA

MILTON
GERARDO PEREZ
MATAMOROS
(FIRMA)

Firmado digitalmente
por MILTON GERARDO
PEREZ MATAMOROS
(FIRMA)
Fecha: 2021.11.15
12:33:52 -06'00'

ASESOR (A) EXTERNA(A)

ESTUDIANTE

Dedicatoria

*En primer lugar a Dios, quien ha guiado e iluminado mi camino,
por ayudarme a terminar esta etapa de mi vida con éxito.*

*A mi esposo, por su amor y apoyo incondicional
por sus palabras de aliento.*

*A mi mamá, quien es mi ejemplo a seguir,
espero enorgullecerte siempre.*

Agradecimientos

*Agradezco a Dios por dirigir mis pasos durante esta etapa
por escuchar y responder mis oraciones.*

*A mi esposo, Esteban, quien con amor y paciencia
me ha apoyado en todo lo que he emprendido.*

*A mi familia, a mi mamá por ser la mujer que es,
por ser un gran ejemplo de superación y excelencia en mi vida.*

A mi hermana, por su ejemplo de perseverancia.

A mi papá, por siempre velar por mi educación.

*A mis profesores,
al profesor Fernando Watson por orientarme y ayudarme en la realización de este trabajo
por enseñarme, por sus consejos y oportunidades de crecimiento.*

*a la profesora Isabel Guzmán y al profesor Marvin Villalobos
por incentivarne a ser una mejor estudiante.*

*a los profesores de la Escuela de Ingeniería Agrícola,
por compartir sus conocimientos.*

*A mis compañeros,
Rosmery Quesada y Julio Araya por compartir conmigo estos años,
y poder formar una amistad, prometo no olvidarme de sus nombres.
A Sergio Guillén, por ser un gran compañero y su ayuda durante estos años de estudio.*

A Susana Miranda por su amistad.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1.	INTRODUCCIÓN	1
	Objetivo general	3
	Objetivos específicos	3
2.	REVISIÓN DE LITERATURA	4
2.1.	Antecedentes: Cuenca del río Tempisque	5
2.1.1.	Características generales	5
2.1.2.	Uso del recurso hídrico	6
2.1.3.	Caudal ambiental.....	7
2.2.	Hidráulica fluvial.....	8
2.2.1.	Flujos.....	8
2.2.2.	Distribución de la velocidad	10
2.2.3.	Pendiente hidráulica	11
2.2.4.	Resistencia al flujo	11
2.2.5.	Modelación hidráulica.....	13
2.3.	Morfología fluvial	16
2.3.1.	Vistas.....	16
2.3.2.	Patrones de canales	17
2.3.3.	Sustrato.....	18
2.3.4.	Ríos de lecho gravoso	22
2.4.	Topografía	22
2.4.1.	Levantamiento topográfico	23
2.4.2.	Fotogrametría	24
2.4.3.	Sistema de Información Geográfica (SIG).....	26
2.4.4.	Batimetría.....	26
2.5.	Hidrometría.....	27
2.5.1.	Aforos.....	27
2.6.	Herramientas de análisis y procesamiento	28
2.6.1.	QGIS	28

2.6.2. Pix4Dmapper	28
2.6.3. Iber	29
3. METODOLOGÍA.....	32
3.1. Visitas de campo.....	33
3.1.1. Levantamiento topográfico y fotogramétrico.....	33
3.1.2. Muestreo granulométrico	34
3.2. Procesamiento y análisis de datos de campo	34
3.2.1. Elaboración del Modelo Digital de Elevación (MDE).....	34
3.2.2. Análisis granulométrico	35
3.3. Modelación hidráulica bidimensional	36
3.3.1. Preproceso	36
3.3.2. Postproceso	39
3.3.3. Proceso de calibración.....	39
3.4. Modificación de las ecuaciones empíricas	40
4. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	42
4.1. Procesamiento y análisis de datos de campo	43
4.1.1. Elaboración del Modelo Digital de Elevación (MDE).....	44
4.1.2. Análisis granulométrico	45
4.2. Modelación hidráulica bidimensional	52
4.2.1. Preproceso	52
4.2.2. Proceso de calibración.....	53
4.2.3. Postproceso	59
4.4. Modificación de las ecuaciones empíricas	59
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	61
5.1. Conclusiones.....	62
5.2. Recomendaciones	63
6. BIBLIOGRAFÍA	64
7. ANEXOS	72

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Tipo de material particulado según su diámetro.....	19
Tabla 2 Fórmulas empíricas: “Strickler-type”	39
Tabla 3 Principales resultados del análisis granulométrico de los puntos de muestreo en el trayecto de control del río Ahogados	47
Tabla 4 Principales resultados del análisis granulométrico de los puntos de muestreo en el trayecto de control del río Tempisquito	50
Tabla 5 Datos para el preproceso de las modelaciones en Iber	53
Tabla 6 Ecuaciones empíricas modificadas para cada trayecto de control.....	60

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Cuenca del río Tempisque.....	6
Figura 2 Distribución de las velocidades del flujo en una sección transversal asimétrica	11
Figura 3 Vistas del cauce de un río.....	16
Figura 4 Patrones del cauce de un río	18
Figura 5 Ejes de una partícula.....	20
Figura 6 Unión de la planimetría y altimetría.....	23
Figura 7 Parámetros del vuelo fotogramétrico	25
Figura 8 Molinete de copas con encallado.....	28
Figura 9 Ubicación de los trayectos de control dentro del río Ahogados y el río Tempisquito	33
Figura 10 Trayectos de control del cauce del río Ahogados y el río Tempisquito	44
Figura 11 Modelo Digital de Elevación (MDE) de los trayectos de control del cauce del río Ahogados y el río Tempisquito.....	45
Figura 12 Rangos de los valores granulométricos d_{50} y d_{90} en el trayecto de control del río Ahogados	46
Figura 13 Curvas de granulometría de los puntos de muestreo en el trayecto de control del río Ahogados	48
Figura 14 Rangos de los valores granulométricos d_{50} y d_{90} en el trayecto de control del río Tempisquito	49
Figura 15 Curvas de granulometría de los puntos de muestreo en el trayecto de control del río Tempisquito	51
Figura 16 Áreas y valores de rugosidad del proceso de calibración en el trayecto de control del río Ahogados.....	57
Figura 17 Áreas y valores de rugosidad del proceso de calibración en el trayecto de control del río Tempisque	58

RESUMEN

En el uso de modelos numéricos para la simulación hidráulica de ríos la calibración es fundamental para poder reflejar con precisión la interacción del flujo de agua en el cauce y que este se asemeje a lo observado. En este estudio se realizó la creación del modelo hidráulico bidimensional calibrado de dos trayectos de control ubicados en el cauce del río Ahogados y el río Tempisquito. Se analizaron morfológicamente mediante un análisis granulométrico y se calcularon los coeficientes de rugosidad a través de un modelo numérico empleado las ecuaciones empíricas conocidas como “*Strickler-type*” como una primera aproximación y posteriormente ajustarlas por medio de un factor obtenido de comparar el dato observado y el simulado.

Se identificaron que ambos trayectos son ríos de montaña con lechos de material grueso, mayoritariamente de cantos rodados y grava. De forma general, el trayecto del río Ahogados cuenta con un diámetro promedio de 190,74 mm (rango: 1000-10 mm y SD: 182,23 mm) y en el trayecto del río Tempisquito un promedio de 58,37 mm (rango: 500-5 mm y SD: 46,44 mm). Se determinaron los coeficientes de rugosidad calibrados para un porcentaje de error entre el área del patrón formado por el espejo de agua simulado y observado menor a un 10%, asimismo se formularon las nuevas ecuaciones empíricas ajustadas a las características del lecho.

Palabras clave

Calibración, granulometría, modelación numérica, ríos, rugosidad.

ABSTRACT

When using numerical models for hydraulic simulations of rivers, calibration is key to be able to reflect accurately the interaction of water flow in the channel, and to make it resemble to what is observed. In this study, a calibrated two-dimensional hydraulic model was created for two control paths located in the Ahogados and Tempisquito rivers. Paths were analyzed morphologically from a grain-size analysis and the different roughness coefficients were calculated through a numerical model using the empirical equations known as "Strickler-type" as a first approximation and later adjustment by a factor obtained from comparing the observed and simulated data.

It was identified that both paths are mountain rivers with beds of coarse material, mostly boulders (cobble gravel) and pebble gravel. In general, the Ahogados river course has an average diameter of 190,74 mm (range: 1000-10 mm y SD: 182,23 mm), and the Tempisquito river course has an average of 58,37 mm (range: 500-5 mm y SD: 46,44 mm). Calibrated roughness coefficients were determined with an error percentage between the area of the pattern formed by the simulated and observed of less than 10%, and new empirical equations adjusted to the characteristics of the riverbeds were formulated.

Keywords

Calibration, grain-size, numerical modeling, rivers, roughness.

1. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo forma parte de las actividades del proyecto de investigación llamado: “Mejoramiento de la gestión integrada del recurso hídrico en la cuenca del río Tempisque mediante la determinación del caudal ambiental bajo una perspectiva holística”, de la Escuela de Ingeniería Agrícola y la Escuela de Biología del Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR), junto con la colaboración de un convenio con la Dirección de Agua del Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE) y el Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA).

Por medio de este trabajo se desarrolló el modelo hidráulico calibrado de dos trayectos de control de la cuenca del río Tempisque, pertenecientes al cauce del río Ahogados y el río Tempisquito; estos serán la base para realizar el post proceso del modelo para obtener la curva de preferencia de caudal de cada sección de control y para la modelación de escenarios que se construirán en función del régimen hidrológico, lo anterior forma parte del primer objetivo específico de dicho proyecto de investigación para evaluar el comportamiento hidrológico de la cuenca.

La cuenca del río Tempisque provee de agua para consumo humano, actividades productivas y de turismo así como para el desarrollo de funciones ecológicas. Sin embargo, el crecimiento de la región amenaza su integridad social, económica y ecológica (Carvajal Vanegas, 2017; Jiménez et al., 2005). En este aspecto el concepto de caudal ambiental toma relevancia para conservar un equilibrio en el aprovechamiento del recurso hídrico, y mediante el modelado hidráulico es posible estimar las velocidades y profundidades del flujo, y relacionar el caudal con el índice de hábitat de ciertos organismos (Chaves Quirós, 2020)

A través del uso de modelos numéricos es posible ejecutar simulaciones hidráulicas con un alto nivel de precisión en tramos de ríos (Sanz-Ramos et al., 2019), y su calibración es clave para representar con mayor precisión el comportamiento real del cauce, así como para obtener resultados que sean confiables.

Como se explicó anteriormente, la obtención del modelo hidráulico calibrado de los dos trayectos de control será utilizados en un proyecto de investigación del ITCR para determinar el régimen de caudal ambiental de la cuenca del río Tempisque, con el fin de preservar la biodiversidad de la cuenca, así como de las actividades humanas y de las comunidades que se

ven beneficiadas por el recurso hídrico. Por otra parte, con la determinación de este régimen, la Dirección de Agua del MINAE, el cual es el ente encargado de realizar la concesiones sobre el uso de agua, podrá gestionar de manera más adecuada el recurso hídrico de la cuenca y resguardar el caudal ambiental requerido para ella.

Asimismo, los resultados del trabajo aparte de ser utilizados para determinar el caudal ambiental de la cuenca del río Tempisque y contribuir a la conservación y protección del agua; los modelos hidráulicos calibrados permitirán un mejor análisis del comportamiento morfológico de los cauces de los ríos, los cuales se pueden utilizar para aplicaciones de hidrometría.

Objetivo general

Crear el modelo hidráulico bidimensional calibrado de dos trayectos de control ubicados en el cauce del río Ahogados y del río Tempisquito de la cuenca del río Tempisque, por medio del análisis morfológico del lecho para la determinación de la rugosidad, de manera que sean un recurso para posteriores aplicaciones de hidrometría y simulación de hábitat.

Objetivos específicos

1. Analizar morfológicamente los trayectos de los cauces en estudio mediante análisis granulométricos para la determinación cuantitativa y espacial de los coeficientes teóricos de rugosidad.
2. Determinar los coeficientes de rugosidad de calibración del modelo hidráulico aplicados a la rugosidad del sistema por medio de la comparación del espejo de agua observado y simulado.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Antecedentes: Cuenca del río Tempisque

2.1.1. Características generales

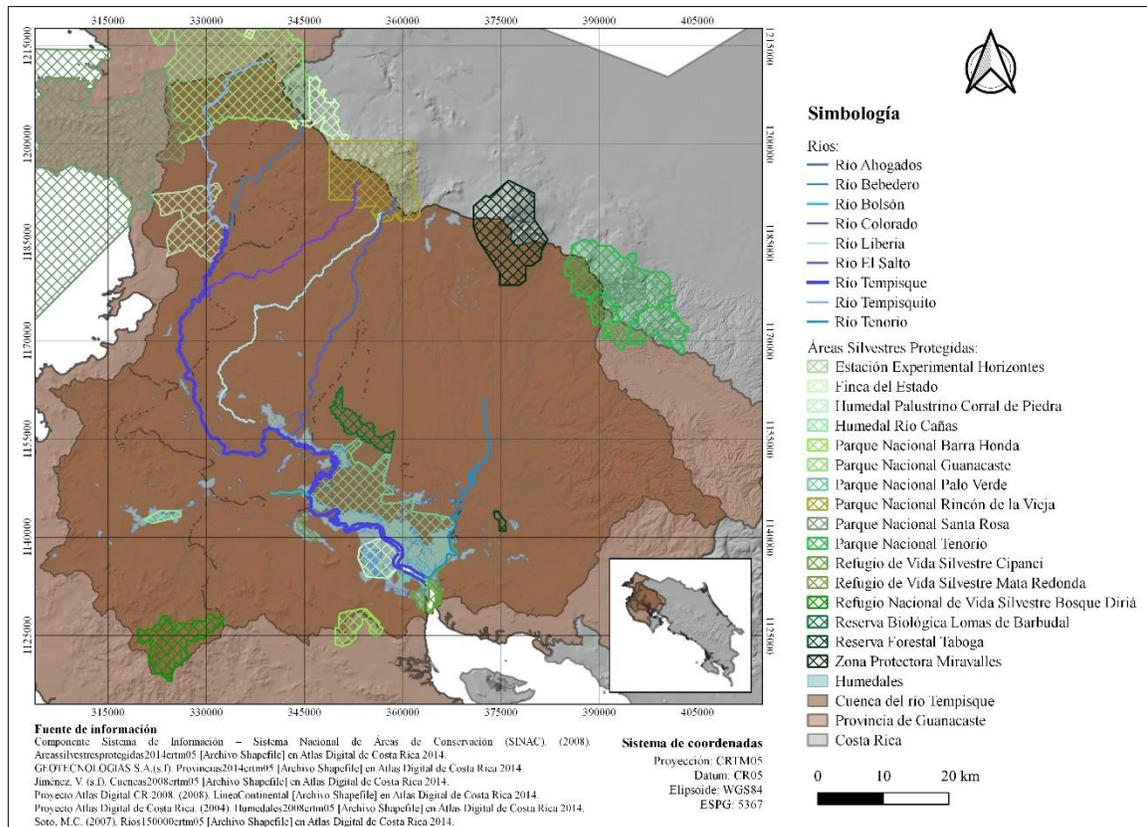
La cuenca del río Tempisque posee un área total de 5404,6 km², siendo la más grande de Costa Rica, esta cuenca abarca el 53% de la superficie de la provincia de Guanacaste y drena el agua de un 10,6% del área a nivel nacional; dicha cuenca está conformada por dos subcuencas: el río Bebedero (de 2047,3 km²) y el río Tempisque (de 3357,3 km²), de las cuales esta última se enfoca el presente trabajo, este río posee el tercer caudal más grande del país, por debajo del río Grande de Térraba y el río Reventazón-Parismina, además, el río Tempisque capta las aguas de los ríos Tempisquito, Ahogados, Colorado, Liberia, El Salto, Bolsón, Palmas y Cañas; donde el río Bebedero es el principal afluente, drenando en la desembocadura de este (ver Figura 1) (Mateo-Vega, 2001).

En la cuenca del río Tempisque se encuentran 20 áreas silvestres protegidas (algunas de ellas se muestran en la Figura 1) sujetas a distintas categorías de manejo y protección, estas corresponden a 730,02 km², es decir, un 13,5 % del área total de la cuenca. Las áreas silvestres protegidas son de suma importancia para la protección de biodiversidad y ecosistemas naturales dentro de la cuenca; varias de las áreas protegidas son humedales, los cuales son ecosistemas que permiten la conservación de especies y el abastecimiento de agua, asimismo propician el desarrollo de actividades económicas, e incluso la mitigación de los impactos ocasionados por inundaciones (Mateo-Vega, 2001).

Debido a su ubicación en la vertiente pacífica del país, las condiciones climáticas en la cuenca se caracterizan por una época seca prolongada, durante la cual muchos ríos se secan completamente, mientras que, en la época lluviosa, los ríos se desbordan; la temperatura media anual de la cuenca es de aproximadamente 26,78 °C y una elevación media de 220 m.s.n.m, además esta cuenca presenta una gran variedad edafológica (Barrantes Moreno, 2010).

Figura 1

Cuenca del río Tempisque



2.1.2. Uso del recurso hídrico

La cuenca del río Tempisque provee agua para consumo humano, como también para actividades productivas tales como riego, principalmente para cultivos intensivos (caña de azúcar, arroz, melón, etc.), acuicultura, pesca, generación eléctrica y para la industria turística, lo que lo convierte en una región importante económicamente para el país; asimismo esta cuenca tiene funciones ecológicas como son la recarga de aguas subterráneas y hábitat de vida silvestre; no obstante, con el tiempo, el desarrollo de la región ha provocado un aumento descontrolado del uso del agua superficial y subterránea, lo cual ha afectado el comportamiento natural del río, amenazando la integridad social, económica y ecológica de la región, especialmente durante la estación seca, donde las condiciones de caudal se van reduciendo, e inclusive se forman sectores del cauce del río que permanecen secos, ocasionando la eliminación de la fauna acuática y la desaparición de humedales (Carvajal Vanegas, 2017; Jiménez et al., 2005).

De acuerdo con Barrantes Moreno (2010) la disponibilidad del recurso hídrico de la cuenca del río Tempisque presenta varias amenazas, entre ellas la deforestación en sitios de importancia hídrica para el desarrollo de otras actividades, y la sobreexplotación del recurso hídrico que sobrepasa el uso sostenible de los acuíferos y de los cuerpos de agua, limitando la adjudicación de nuevas concesiones en el río.

2.1.3. Caudal ambiental

Mediante el caudal ambiental es posible determinar el patrón de agua necesario para mantener un nivel tal que se conserven los ecosistemas naturales de la cuenca, así como los servicios que la sociedad recibe del mismo (Jiménez et al., 2005). En Costa Rica este caudal se calcula como un 10% del aforo del caudal medio del río, el cual carece de fundamento científico y que lo hace no apto para poder preservar los ecosistemas en los cauces (Guzmán Arias et al., 2019).

Existen varios métodos para establecer el caudal ambiental de una cuenca, estas se clasifican en metodologías normativas, las cuales buscan determinar el régimen específico del caudal sobre la base de un objetivo dado, y las metodologías interactivas, que buscan generar varios regímenes de caudal para poder satisfacer diferentes intereses (Jiménez et al., 2005).

Chavarría Pizarro et al. (2020) explican los cuatro métodos para establecer el valor de caudal ambiental:

- a. Método hidrológico: consiste en el cálculo del caudal ambiental mediante el tratamiento de series de datos hidrológicos históricos de la cuenca.
- b. Método de valoración hidráulica: el caudal ambiental se define a partir de la relación que hay entre el caudal y los parámetros hidráulicos del cauce en donde se desarrollen las interacciones entre el medio biótico y abiótico.
- c. Método hidrobiológico: se determinan los escenarios de caudal ambiental idóneos para ciertos organismos, mediante la relación del caudal con el índice de hábitat, para ello es necesario la obtención de datos hidrológicos, hidráulicos y biológicos.

- d. Método holístico: es un método integral en cual se toma en cuenta los componentes hidrológicos, hidráulicos, biológicos y sociales en la determinación del régimen de caudal ambiental.

En lo que respecta a la cuenca del río Tempisque, Jiménez et al. (2005) utilizaron un enfoque hidrobiológico para determinar varios escenarios de caudal ambiental en la subcuenca de Guardia – La Guinea (que abarca parte de la cuenca media y toda la cuenca alta). Por otro lado, Calvo Alvarado et al. (2008) evaluaron el efecto de diferentes caudales ambientales y las características hidráulicas del río, y propusieron tres caudales ambientales (máximo, promedio y mínimo) los cuales evaluaron con el régimen actual y las demandas de hábitat de especies seleccionadas.

El proyecto de investigación llamado: “Mejoramiento de la gestión integrada del recurso hídrico en la cuenca del río Tempisque mediante la determinación del caudal ambiental bajo una perspectiva holística” del Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR), busca determinar el régimen de caudal ambiental para el río Tempisque y de esta manera asegurar el aprovechamiento sostenible del recurso hídrico de la cuenca.

2.2. Hidráulica fluvial

La hidráulica fluvial, también conocida como hidráulica de ríos o mecánica de ríos, es la parte de la hidráulica general que se encarga del estudio de los ríos, en la cual se toma en cuenta el movimiento del agua, los sedimentos transportados por el flujo, el efecto de la presencia de vegetación en los cauces y las deformaciones que se producen en los ríos; asimismo utiliza los conceptos de la dinámica fluvial, la hidrología, la geomorfología y la ecología (Ochoa Rubio, 2011).

2.2.1. Flujos

En relación con el movimiento del agua existen diferentes tipos de flujo que se pueden presentar en canales naturales y artificiales.

Se puede clasificar de acuerdo con la variable del tiempo, en flujo permanente si los parámetros hidráulicos no cambian con el tiempo, si estos parámetros cambian es un flujo no permanente (Villón Béjar, 2008).

También se puede clasificar según la variable del espacio, en flujo uniforme si los parámetros del flujo no varían de un punto a otro, caso contrario se le conoce como flujo no uniforme o variado, este a su vez se clasifica en gradualmente variado, si los parámetros hidráulicos cambian de forma gradual, o en rápidamente variado si estos parámetros se alteran instantáneamente en una distancia muy corta (Villón Béjar, 2008).

Asimismo se pueden clasificar conforme a los patrones del interior del fluido, este tipo de flujo está en función de la relación entre las fuerzas de inercia del flujo y de la fuerza de la viscosidad del fluido, calculándose así el “número de Reynolds” (ver Ecuación 1), se presenta el flujo laminar ($Re < 500$) cuando las fuerzas de viscosidad son dominantes, en este flujo las partículas del fluido se mueven en dirección lineal y en capas paralelas unas sobre otras sin mezclarse, y el flujo turbulento ($Re > 2000$), en donde las partículas se mueven siguiendo trayectorias irregulares, formando remolinos con movimientos circulares y rotatorios; también se puede presentar un estado mixto conocido como flujo de transición ($500 < Re < 2000$) (Elliot Munro, 2010).

$$Re = \frac{uR}{\nu} \dots \text{Ecuación 1}$$

Donde,

Re = Número de Reynolds

u = Velocidad media

R = Radio hidráulico

ν = Viscosidad cinemática

Referente a la relación entre las fuerzas de inercia de velocidad y las fuerzas gravitacionales se tiene el “número de Froude” (ver Ecuación 2), de manera que el flujo se puede clasificar en flujo supercrítico ($Fr > 1$) si las fuerzas de inercia predominan, por lo cual el flujo es más rápido y torrentoso, y las singularidades o perturbaciones tienen efectos aguas

abajo, en cambio, si las fuerzas gravitacionales son las que predominan el flujo es subcrítico ($Fr < 1$), por lo que se caracteriza por ser un flujo tranquilo con baja velocidad, y donde las singularidades tienen efectos aguas arriba, cabe agregar que en canales naturales el flujo casi siempre es subcrítico. Cuando las fuerzas de inercia y de gravedad están en equilibrio el flujo es crítico ($Fr = 1$) (Elliot Munro, 2010).

$$Fr = \frac{u}{\sqrt{gd}} \dots \text{Ecuación 2}$$

Donde,

Fr = Número de Froude

u = Velocidad media

g = Constante gravitacional

d = Profundidad del flujo

Si se pasa de un flujo subcrítico a uno supercrítico se genera una “caída hidráulica”, mientras que si se pasa de flujo supercrítico a uno subcrítico se produce un “resalto hidráulico” (Dingman, 2009).

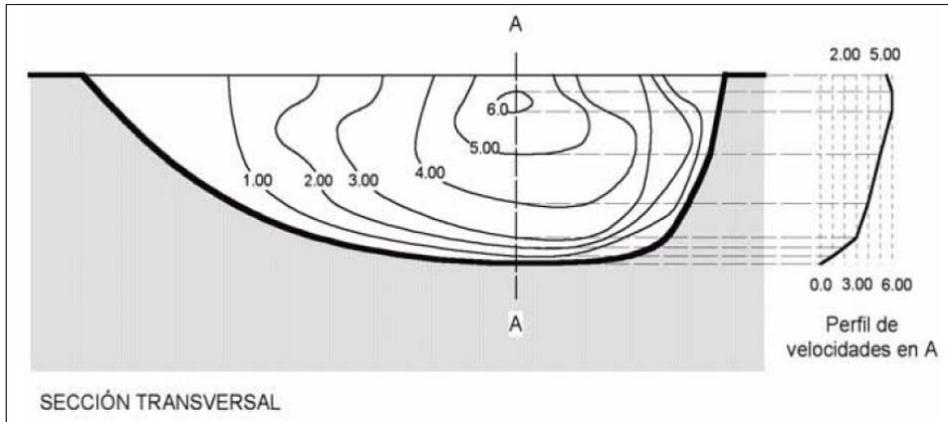
En el caso de los ríos, el flujo es variado, turbulento y no es constante, además de que difícilmente es uniforme (Elliot Munro, 2010).

2.2.2. Distribución de la velocidad

Como se puede observar en la Figura 2 en una sección transversal asimétrica la velocidad del flujo varía transversalmente y en profundidad, esto se debe a que en el movimiento de una capa de agua actúa al mismo tiempo y en sentido contrario las fuerzas gravitacionales y las fuerzas de fricción, cuya diferencia resulta en la velocidad en cada punto del fluido, por lo que la distribución de velocidades en una vertical tiene la forma de una parábola, donde la velocidad máxima suele presentarse por debajo de la superficie del agua y la velocidad media a una profundidad de aproximadamente 0,6 de la profundidad total, aunque existen varias formas de calcular dicho valor (Elliot Munro, 2010; Villón Béjar, 2004).

Figura 2

Distribución de las velocidades del flujo en una sección transversal asimétrica



Nota. De *El río y la forma: Introducción a la geomorfología fluvial* [Imagen], por Elliot Munro, 2010, RIL editores. Derechos reservados.

2.2.3. Pendiente hidráulica

Conocida también como pendiente de línea de energía o gradiente hidráulico, esta define el comportamiento del flujo y refleja la tasa de expendio de energía potencial. Por razones de practicidad, esta se toma como la pendiente del perfil de la superficie de agua, es decir, su inclinación, y que es muy similar a la pendiente del fondo del canal (Ochoa Rubio, 2011).

Según Elliot Munro (2010), los ríos disminuyen sustancialmente su pendiente longitudinal a lo largo de su recorrido, estos son de montaña cuando poseen pendientes mayores a 0,005 (0,5%), al pie del monte cuando tienen pendientes entre 0,001 (0,1%) y 0,005 (0,5%) y de llanura con pendientes menores a 0,001 (0,1%).

2.2.4. Resistencia al flujo

La resistencia al flujo o resistencia hidráulica es causada por la textura del sustrato, el material del lecho y de las paredes del cauce, y que forman un factor de rugosidad; de modo que fuerzan cambiar la dirección del flujo ocasionando una disminución de la velocidad y el consumo de energía (generando turbulencias y saltos hidráulicos), así como provocar la

separación del flujo, las cuales ocurren detrás de obstrucciones como son rocas o troncos (Elliot Munro, 2010).

De acuerdo con Powell (2014) la resistencia hidráulica controla cuatro parámetros del flujo, los cuales son: la velocidad, la profundidad, la pendiente de fricción o energía y el esfuerzo cortante límite (este último influye en la magnitud y la distribución de la erosión en el lecho y las paredes del cauce); de manera que existen ecuaciones que definen la relación entre la resistencia hidráulica y estos cuatro parámetros bajo el supuesto de que el flujo es uniforme y constante, a las cuales se le conocen como ecuaciones de resistencia al flujo, las más utilizadas son: Darcy-Weisbach, Chezy y Manning, las tres fórmulas poseen una forma similar a la mostrada en la Ecuación 3, y donde el coeficiente de proporcionalidad es un coeficiente de resistencia al flujo (factor de fricción) que define la rugosidad del canal, siendo la ecuación de Manning la más conocida y utilizada.

$$U \propto R^{a_1} S_f^{a_2} \dots \text{Ecuación 3}$$

Donde,

U = Velocidad del flujo

R = Radio hidráulico

S_f = Pendiente de energía

a_1 y a_2 = Exponentes empíricos

Determinar la rugosidad total de un canal es complejo y presenta ciertas incertidumbres, ya que esta debe reflejar la resistencia del flujo en el canal; generalmente el valor del coeficiente de rugosidad se puede estimar mediante tablas o fotografías con valores de rugosidad predeterminados (como Chow 1959), también se puede estimar mediante diversas metodologías empíricas y fórmulas analíticas en función de los parámetros del flujo; entre estos se encuentra ecuaciones que relacionan el coeficiente de rugosidad con el material del lecho, clasificadas como las “*Strickler-type*” (como Strickler 1923, Meyer-Peter and Muller 1948, Keulegan 1938 y Bray 1979) o con la profundidad relativa, clasificadas en fórmulas “*power-based*” y “*semi-logarithmic-based*” (como Charlton 1978, Bray 1979, Griffiths 1981 y Limerinos 1970), por otro lado, existe el método de Cowan (1956), donde el coeficiente se define a partir de seis

componentes o elementos de la rugosidad identificados y evaluados por separado y posteriormente integrados para formar una rugosidad final, este método requiere de experiencia de parte de quien lo realiza (Kim et al., 2010; Powell, 2014).

Cabe agregar que en cuanto a cauces naturales, la mayoría son hidráulicamente rugosos, la rugosidad aumenta con el tamaño del grano del sustrato (Elliot Munro, 2010).

2.2.5. Modelación hidráulica

Para poder realizar un estudio de flujos de agua en lámina libre en régimen no permanente y con geometrías complicadas, como son los ríos, se utilizan modelos físicos (a escala reducida) o modelaciones numéricas o computacionales (Bladé Castellet, 2005).

Debido a la complejidad de los fenómenos de la naturaleza en flujos a superficie libre se emplean modelos y simulaciones con el uso de técnicas experimentales y numéricas con el fin de determinar las variables que caracterizan el flujo en ríos, y de esta manera lograr una representación cercana de la realidad del comportamiento del agua (Ochoa et al., 2016).

Los modelos hidráulicos de ríos se pueden ejecutar mediante herramientas de modelización numérica, como son los modelos hidrodinámicos unidimensionales (1D), bidimensionales (2D) o tridimensionales (3D) (Ochoa et al., 2016), los cuales se basan en las ecuaciones de Saint Venant derivadas a partir de las leyes físicas de la conservación de la masa (continuidad) y momentum (ver Ecuación 4 y 5), además de la primera y segunda leyes de la termodinámica; donde para un fluido incompresible e isótropo como el agua se obtienen las ecuaciones de Navier-Stokes, para el movimiento instantáneo, y de las cuales se deducen las ecuaciones de Reynolds, tomando en cuenta las variables medias en el tiempo (Bladé Castellet, 2005).

$$\frac{\partial A}{\partial \tau} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \dots \text{Ecuación 4}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial \tau} + \frac{\partial \left(\frac{Q^2}{A} \right)}{\partial x} + gA \frac{\partial y}{\partial x} + gA(S_f - S_o) = qV \dots \text{Ecuación 5}$$

Donde,

A = Área hidráulica

Q = Gasto

V = Velocidad media

q = Descarga lateral

y = Tirante hidráulico

S_f = Pendiente de fricción

g = Gravedad

De esta manera, en un modelo hidrodinámico unidimensional, el río se analiza como una línea recta, con secciones transversales que son series de puntos de cálculo, en la cual se utilizan las ecuaciones de Saint Venant, las cuales se pueden resolver, usando el método de diferencias finitas, o inclusive, mediante elementos finitos o volúmenes finitos, en un esquema implícito.

Por otra parte, los modelos hidrodinámicos bidimensionales, utilizan las ecuaciones de Saint Venant expresadas en dos dimensiones, las cuales pueden resolverse mediante el método de los elementos finitos, y cuyos resultados se calculan en cada punto de una malla formada por una serie de celdas poligonales (Timbe Castro y Willems, 2011; Ochoa et al., 2016).

De acuerdo con Sanz-Ramos et al. (2019) mediante el uso de modelos numéricos bidimensionales se posibilita la realización de simulaciones hidráulicas que tengan un alto grado de precisión en tramos de ríos; para ello es fundamental conocer la información disponible del cauce, como es la topografía y las condiciones hidráulicas; u obtenerlos mediante visitas de campo, con el fin de alimentar y calibrar el modelo numérico; inclusive el uso de datos geoespaciales como modelos digitales de terrenos, vuelos y LIDAR pueden ser empleados.

Powell (2014) destaca que en los modelos hidráulicos es importante que la resistencia del flujo sea representada apropiadamente en canales naturales como arroyos y ríos.

2.2.5.1. Calibración del modelo

La calibración consiste en identificar los valores de ciertos parámetros del modelo, para los cuales los datos simulados se ajustan de la manera más óptima a los datos observados. Este proceso puede realizarse de dos formas, la primera mediante “prueba y error”, el cual se realiza mediante un ajuste manual de los parámetros a criterio del investigador, y la segunda que es de forma automática, en este se optimizan los valores de los parámetros empleando técnicas numéricas, lo cual lo hace un método más rápido pero complejo numéricamente (Cabrera, 2012).

Para calibrar los parámetros de un modelo se busca minimizar el error entre la observación y la simulación, este error nace de las diferencias entre la estructura del modelo y el sistema siendo modelado y de las incertidumbres existentes en la información disponible; y se puede medir mediante el cálculo numérico de la diferencia entre la salida del modelo y las observaciones (Aronica et al., 1998).

Según Maurad Villizhañay (2020) “calibrar los modelos hidráulicos de manera adecuada, resulta importante porque ajustar los parámetros que definen el comportamiento del modelo, ayudarán a reflejar con mayor precisión el posible funcionamiento, de esa manera se podrán obtener resultados similares a la realidad” (p.2); es decir, la calibración es clave para representar con mayor precisión el comportamiento real del cauce, así como para obtener resultados que sean confiables.

En lo que concierne de modelos de cauces naturales, la calibración es un proceso iterativo en el cual se varía el coeficiente de rugosidad del cauce, con el fin de disminuir la diferencia entre los datos observados y los datos simulados (Rios Varillas, 2014).

2.3. Morfología fluvial

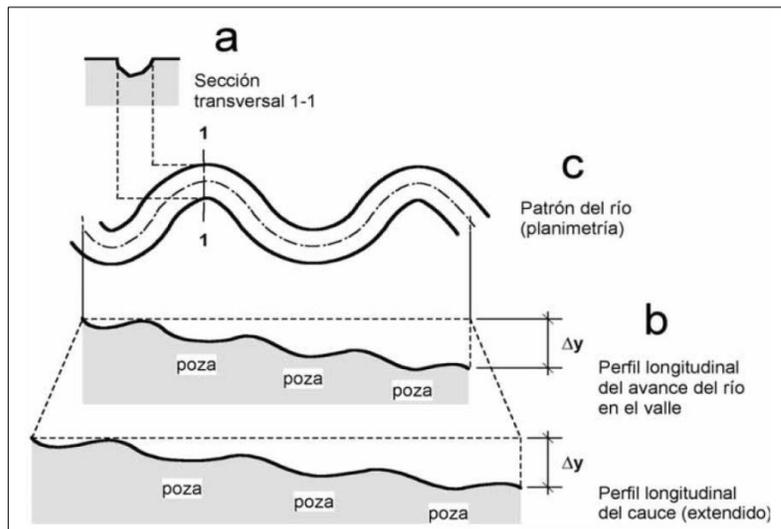
La morfología es la ciencia de la estructura y la forma; la morfología fluvial es una rama de la geomorfología que estudia las formas del terreno producidas por la acción de los ríos, como son la erosión, el transporte y la deposición de sedimentos por la corriente del agua (Garde, 2000).

2.3.1. Vistas

Un canal fluvial es tridimensional, para su representación se recurre a tres vistas las cuales se complementan entre sí, esta se muestran en la Figura 3; donde (a) es la sección transversal del río, que es perpendicular al canal, en esta vista se puede observar la hendidura que el río crea en el terreno, (b) el perfil longitudinal, la cual es una vista imaginaria de un corte longitudinal a lo largo del río, e informa acerca del expendio energético en el sistema, y (c) el patrón del canal que es una vista en planta del río desde lo alto, como una fotografía aérea (Elliot Munro, 2010).

Figura 3

Vistas del cauce de un río



Nota. *El río y la forma: Introducción a la geomorfología fluvial* [Imagen], por Elliot Munro, 2010, RIL editores. Derechos reservados.

2.3.2. Patrones de canales

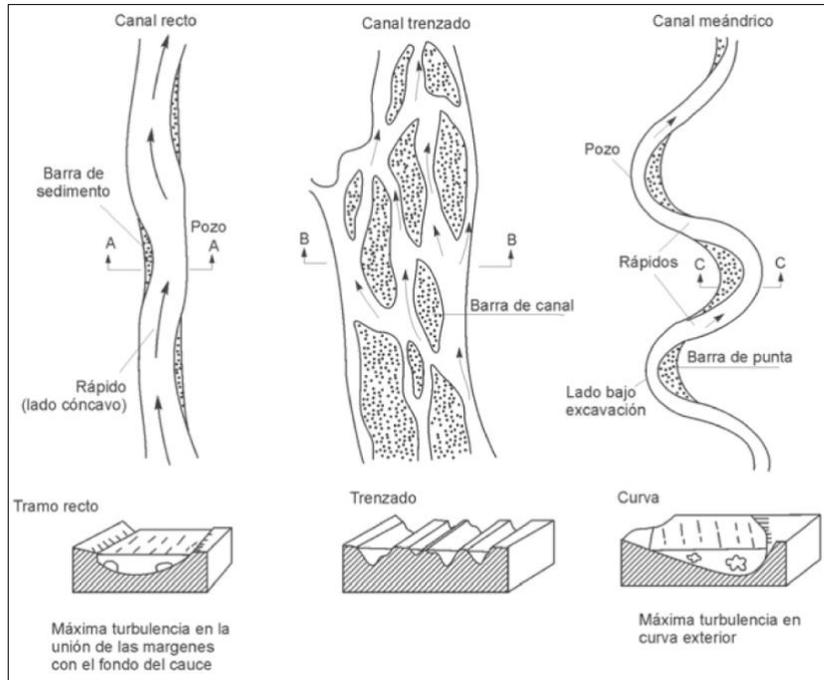
Desde la perspectiva de la vista en planta, un río puede presentar distintos patrones del cauce (ver Figura 4), de acuerdo con Leopold y Wolman (1957, citado en Mangelsdorf et al., 1990 y Ochoa Rubio, 2011) estos se clasifican con base en la relación entre la pendiente y la descarga de la orilla (caudal), y se diferencian:

- a. Cauces rectos: son canales poco comunes, presentan una evolución fluvial muy pequeña a lo largo de una determinada distancia. Son ríos con escasas irregularidades, levemente sinuosos, aunque en el fondo del cauce pueden serlo, y se caracterizan por tener una pendiente pronunciada y un curso estrecho. Generalmente la erosión se sitúa en los pozos y la sedimentación en playones o barras.
- b. Cauces trenzados: son ríos que se dividen en canales entrelazados (divergen y se vuelven a unir) presentándose barras e islas por la acumulación de grava, su patrón trenzado se desarrolla tras la deposición de partículas gruesas en el centro, formando una barra central inicial que se convierte en una isla. Se ubican en zonas con un alto transporte de carga del lecho y con pendientes medianas o grandes, son más anchos y relativamente poco profundos.
- c. Cauces meándricos: son cauces sinuosos (forman curvas u ondulaciones en el canal), poseen depresiones (posas) y crestas con depósitos de sedimentos, dichas crestas son mejor conocidas como barras de punta y son la principal característica de la sedimentación fluvial. Son ríos más profundos en el extremo del cauce, y menos profundos en el cruce o punto de inflexión de los meandros. Se presentan en planicies, donde hay bajas velocidades, su cauce está conformado por materiales finos.

Cabe agregar, que es posible que un cauce trenzado pueda transformarse en un tramo relativamente corto a un cauce meándrico, y viceversa; un aumento del flujo podría dar lugar a que un curso meándrico se convierta en trenzado, y una disminución, de un curso trenzado a uno meándrico.

Figura 4

Patrones del cauce de un río



Nota. *Hidráulica de ríos y procesos morfológicos* [Imagen], por Ochoa Rubio, 2011, ECOE Ediciones. Derechos reservados.

2.3.3. Sustrato

El sustrato de un río es el material situado en el lecho y las paredes del cauce, de acuerdo con Elliot Munro (2010) existen cinco tipos básicos de sustrato:

- Coluvio:** material que se desprende de las laderas, transportados por gravedad hasta el fondo de los valles y sus canales, por lo general son rocas sedimentarias de diversos tamaños, también podría incluir residuos leñosos en donde haya bosque.
- Roca:** material de alta resistencia, la cual solo puede ser erosionada por grandes eventos hidrológicos, se pueden presentar de diferentes tamaños y pueden determinar el curso de un río, así como los rasgos y la textura de sus paredes.
- Sustrato aluvial grueso:** material transportado por el río que se caracteriza por no ser cohesivo (desagregado), formando por partículas monolíticas y de cantos redondeados,

heterogéneo (desde grandes bloques hasta gravas), sus lechos se separan en gravas y cantos y arenas.

- d. Arenas: materiales aluviales pedregosos de pequeño tamaño, fácilmente erosionables y más homogéneos, se presentan en canales poco inclinados y generalmente hacia al final del cauce.
- e. Limos y arcillas: materiales aluviales cohesivos, compuesto por partículas minerales minúsculas que se atraen mutuamente, son más resistentes a la erosión pero más propensas a ser transportadas en suspensión, se presentan en zonas poco pendiente y en suelos desarrollados con cobertura vegetal.

En la Tabla 1 se observa un resumen de la escala de Wentworth (1922) para distintos diámetros del material particulado y que posteriormente Gallegos (1996) propone un cambio en la escala para los granos con diámetros mayores a 2 mm y sugiere que para los granos con diámetro entre los 16 y 256 mm utilizar el término de “cantos” o “cantos rodados”, ambas son clasificaciones muy utilizadas en la hidráulica fluvial.

Tabla 1

Tipo de material particulado según su diámetro

Clase		Wentworth (1922)	Gallegos (1997)
		Diámetro (mm)	Diámetro (mm)
Bloques	Bloques	> 256	> 256
Cantos	Cantos	256 – 64	256 – 16
Gravas	Gravilla	64 – 4	16 – 2
	Granular	4 – 2	
Arenas	Muy grueso	2 – 1	2 - 1/16
	Grueso	1 – 0,5	
	Medianas	0,5 – 0,25	
	Fina	0,25 – 0,125	
	Muy fina	0,125 – 1/16	
Limos	Limos	1/16 – 1/256	1/16 – 1/256
Arcillas	Arcillas	< 1/256	< 1/256

Nota: Adaptado de "A scale of grade and class terms for clastic", por C.K. Wentworth, 1922, *The Journal of Geology*, 30(5), p.385 (<https://www.jstor.org/stable/30063207>). Derechos reservados y "Una clasificación revisada de los materiales sedimentarios", por J.A. Gallegos, 1996, *Estudios Geológicos*, 52(3–4), p.117 (<https://doi.org/10.3989/egeol.96523-4259>). Derechos reservados.

2.3.3.1. Granulometría

En el cauce de un río se pueden presentar distintos materiales distribuidos a lo largo del mismo, y con diversas características, entre estas la variedad de tamaños de las partículas (amplio rango de diámetros).

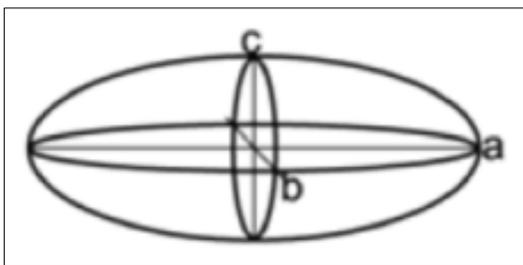
Según Crozzoli y Batalla (2003), la distribución granulométrica del lecho y de las paredes del río es fundamental para poder describir las características físicas en un cauce fluvial y analizar su dinámica.

A partir del análisis granulométrico, las distintas partículas puede ser representadas mediante curvas de granulometría para determinar el contenido porcentual de participación de los granos dependiendo de sus tamaños (Ochoa Rubio, 2011).

Tomando en cuenta la Figura 5, la cual tiene forma elipsoidal, las partícula poseen tres ejes o diámetros representativos, siendo (a) al eje mayor o más largo, (b) al eje medio y (c) el eje menor (Millanao Balboa, 2010).

Figura 5

Ejes de una partícula



Nota. *Hidráulica de ríos y procesos morfológicos* [Imágen], por Ochoa Rubio, 2011, ECOE Ediciones. Derechos reservados.

De acuerdo con Bunte y Abt (2001) los lechos de un río se pueden muestrear mediante dos métodos: la toma volumétrica de muestras (volumen de partículas preseleccionadas de una capa de sedimento predefinida en donde se hace un análisis granulométrico convencional por peso en laboratorio) y la toma de muestra superficiales (número preseleccionado de partículas

de la superficie en un área de estudio predefinido); de esta última existen las siguientes técnicas de muestreo granulométrico:

- a. Cuenta – cantos: mediante esta técnica se muestrea un número determinado de partículas, siendo más apropiado su uso en partículas como gravas y cantos rodados, con esta técnica se cubre un gran área de estudio, no obstante el trabajo de campo es largo ya que no requiere de trabajo de laboratorio.
- b. Cuenta – grilla: el número de partículas de la muestra depende de la medida de la grilla y de la cantidad de mediciones que se realicen, por lo que el área de estudio se reduce cubriendo áreas con partículas más homogéneas, lo cual lo hace apropiado para muestreo de gravas; por otro lado, la técnica se puede realizar manualmente, requiriendo más tiempo de trabajo de campo pero sin tiempo de trabajo en laboratorio, o por el contrario, por medio de fotografías, invirtiendo los tiempos de trabajo.
- c. Muestra de área: la muestra posee todas las partículas de una pequeña superficie, su uso se limita a arenas y gravas medias, por lo que se necesitan varias muestras en la misma área de estudio, lo cual se traduce en más tiempo de trabajo de campo y de laboratorio.

En cuanto al trabajo de campo y la toma de muestras de lechos de ríos (con materiales de diámetro mayor a 8 mm), Wolman (1954) (como se citó en Millanao Balboa, 2010) desarrolló el método de los transectos, el cual consiste en un muestreo alzar a lo largo del cauce siguiendo una ruta e intervalos determinados, tomando las partículas del lecho y midiendo el diámetro medio, si el material es demasiado grande para moverse, se mide el eje menor visible; de manera similar se lleva a cabo el método de retícula, midiendo las partículas que se encuentren dentro de la retícula móvil del área de estudio, esta técnica se puede realizar de forma directa (midiendo las partículas en campo) o indirecta (tomando fotografías que son tratadas posteriormente).

De acuerdo con Ochoa Rubio (2011) en el caso de que se encuentren gravas o arenas con materiales gruesos, éstas se pueden analizar con el método de toma volumétrica y los materiales gruesos con los métodos de toma superficiales, para posteriormente realizar un análisis granulométrico compuesto; asimismo, cabe agregar que el número de muestras totales

en el área de estudio depende de la homogeneidad del material y se recomienda analizar entre 75 y 100 partículas en cada muestreo para asegurar su representatividad.

2.3.4. Ríos de lecho gravoso

Son ríos que presentan en su lecho materiales de grava y cantos rodados, e inclusive arenas. Algunas de las principales características descritas por Garde (2000) son:

- Sus pendientes son más pronunciadas, de 0,001 a 0,05, o inclusive mayores.
- Gran parte del material del lecho es inmóvil, y solo se mueve durante crecidas.
- No se forman ondulaciones ni dunas, sino que se presentan barras, las cuales se mueven ocasionalmente, las barras son elementos del lecho que ofrecen resistencia al flujo, y actúan como espacios de almacenamiento de sedimentos.
- Tienden a ser cauces transicionales o trenzados; en los ríos de cantos rodados es poco común encontrar tramos que sean meándricos.
- Considerando la variedad de tamaños de granos en el lecho, deben utilizarse diferentes métodos para analizar las distintas fracciones de tamaños.
- Los lechos están compuestos por mezclas heterogéneas de grava y partículas más pequeñas formando una capa superficial con un espesor del tamaño de las partículas más gruesas, ocasionado la “pavimentación” o “acorazamiento” del lecho.

2.4. Topografía

De acuerdo con García Martín (2014) la topografía es “la ciencia que estudia los métodos para obtener la representación gráfica de una parte de la superficie terrestre con todos sus elementos, tanto naturales como artificiales” (p.1).

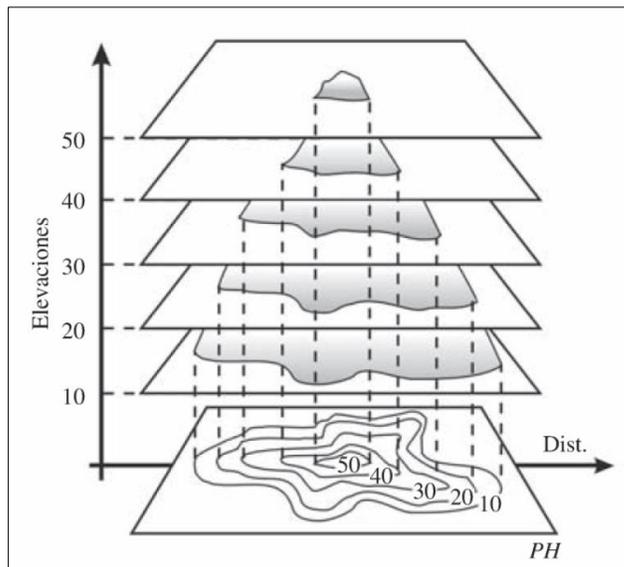
Mediante el uso de la topografía se pueden obtener las ubicaciones relativas o absolutas de puntos sobre la Tierra, realizar trazados sobre el terreno para diferentes obras ingenieriles, delimitar tierras, trabajos catastrales, entre otros, donde se requiere de conocimientos de matemática, física, astronomía, geología, cosmografía; asimismo, la topografía también se relaciona con la geodesia, encargada de determinar la forma y dimensiones de la Tierra y la

cartografía que permite representar gráficamente la superficie terrestre o una parte de ella sobre un mapa o plano (Alcántara García, 2014).

Par poder representar la realidad tridimensional de la Tierra, la topografía se divide en, planimetría, la cual se encarga de proyectar ortogonalmente en un plano horizontal (x, y) los puntos de un terreno, y la altimetría, en la cual se determina la elevación de los puntos del terreno sobre un plano vertical (z) en referencia a algún plano de comparación, usualmente un resultado de información altimétrica que se incorpora y complementa a la representación planimétrica son las curvas de nivel (García Martín, 2014), como se puede observar en la Figura 6.

Figura 6

Unión de la planimetría y altimetría



Nota. *Topografía y sus aplicaciones* [Imágen], por Alcántara García, 2014, Grupo Editorial Patria. Derechos reservados.

2.4.1. Levantamiento topográfico

Un levantamiento topográfico consiste en la captura de los elementos existentes en una superficie, a partir de la información obtenida se pueden trazar mapas o planos que representen tanto características físicas como diferencias de alturas del relieve del terreno (Corredor Daza, 2015).

Según del Río Santana et al. (2020) gracias al avance tecnológico, las técnicas, instrumentos de medición y métodos asociadas a la topografía han cambiado considerablemente, emergiendo equipos cada vez más tecnológicos como el teodolito, seguido de la estación total que permite la medición de ángulos horizontales y verticales, distancias y pendientes. Hoy por hoy también se da el uso de instrumentos que utilizan el Sistema Global de Posicionamiento por Satélites (GNSS, por sus siglas en inglés) para la ubicación de puntos o áreas georreferenciadas, y de Vehículos Aéreos No Tripulados (VANT) (Pedraza Santos, 2019).

Los VANT, también conocidos como drones o RPAS (del inglés *Remotely Piloted Aircraft System*), son equipos aéreos autónomos o piloteados a distancia por medio de un control remoto, y se clasifican de acuerdo con el tipo (avión, helicóptero y multirrotor) o el peso (pequeñas, menor o igual a 25 kg o grandes, mayor a 25 kg), al realizar un levantamiento topográfico con un VANT se debe llevar a cabo la asignación de puntos de control ya sea con una estación total o un equipo geodésico GNSS, de manera que se pueda obtener las coordenadas reales de dichos puntos y encontrar el error obtenido por el dron, y mejorar la precisión del levantamiento, para ello se recomienda un mínimo de tres puntos de control planimétrico y altimétrico (Ibáñez Ramírez et al., 2019).

El uso de VANT en la topografía permite la captura de un mayor número de puntos para elaborar planimetrías, proporcionando más información que con un levantamiento tradicional, además de reducir significativamente el tiempo en el cual se lleva a cabo (del Río Santana et al., 2020).

2.4.2. Fotogrametría

La fotogrametría es una técnica de medición indirecta a partir de fotografías, posibilitando el cálculo de dimensiones y posiciones de objetos en el espacio (Santos Clavero, 2014).

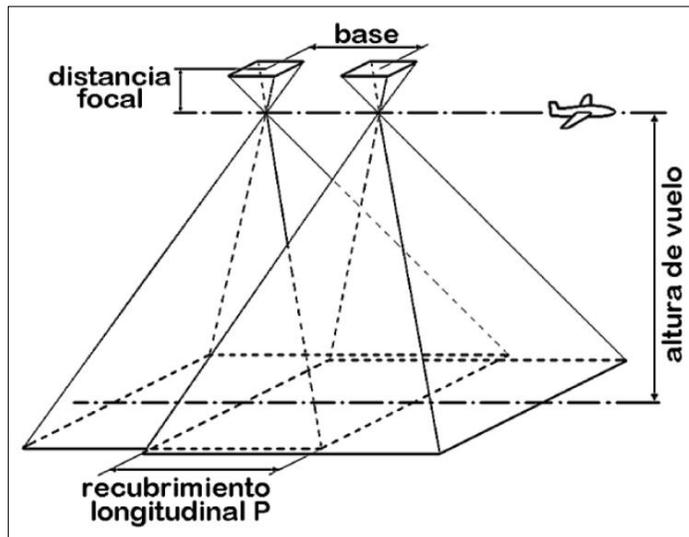
De acuerdo con Jauregui (2001, como se citó en Ibáñez Ramírez et al., 2019) algunas de las ventajas de la fotogrametría son la optimización del tiempo, captación de terrenos complicados, registro multitemporal de un terreno y por ende una mejora en el análisis espacial

(observación de cambios y comparación); mientras que las desventajas de esta técnica son la escasa captación de detalle en presencia de cobertura vegetal densa y altos costos por el tipo de equipo que se maneja.

En la actualidad, se trabaja con fotografías digitales, y existe la fotogrametría terrestre y la aérea, esta última consiste en realizar vuelos fotogramétricos para la obtención de imágenes aéreas y de ejes verticales, para posteriores aplicaciones cartográficas; algunos parámetros del vuelo fotogramétrico son (ver Figura 7): la altura del vuelo la cual es el producto de la escala del vuelo y la distancia focal de la cámara fotográfica, y el recubrimiento, el cual es el traslape entre cada dos fotogramas continuos, se recomienda que este recubrimiento sea de un 60% longitudinalmente y 30% transversalmente, por lo que para favorecer dicho solapamiento es necesario ejecutar diversas pasadas con trayectorias paralelas entre sí, así como evitar inclinar excesivamente cada toma, reducir repentinamente la altura de vuelo o el abrupto cambio del relieve; mientras que la base es la distancia que hay entre una toma y otra consecutiva (García Martín, 2014).

Figura 7

Parámetros del vuelo fotogramétrico



Nota. *Topografía* [Imágen], por García Martín, 2014, Universidad Politécnica de Cartagena. Derechos reservados.

2.4.3. Sistema de Información Geográfica (SIG)

Un Sistema de Información Geográfica (SIG) es una herramienta informática para almacenar, visualizar, gestionar y analizar información geográfica, dicha información son datos georreferenciados, esto es que los datos poseen información alfanumérica junto con su localización, la cual puede ser directa (geográficas o UTM) o indirecta (unidades territoriales administrativas) (García Martín, 2014).

Un SIG también es un modelo que reproduce una parte del mundo real; existen dos modelos de estructura de datos según Ortega Pérez y Martín Ramos (2016):

- a. El modelo vectorial: en los cuales los datos están vinculados a elementos geométricos como puntos, líneas y polígonos, con propiedades cualitativas o cuantitativas.
- b. El modelo ráster: en donde la información se maneja de forma matricial y está organizada en cuadrículas o píxeles regulares, donde cada uno contiene un número como identificador del objeto o del valor de una variable.

Para poder representar características de la superficie terrestre se pueden utilizar los modelos digitales, entre ellos el Modelo Digital de Terreno (MDT), que es una representación de una variable cuantitativa y continua, esta se diferencia del Modelo Digital de Elevación (MDE) que es un modelo cuantitativo del relieve y que contiene información de posición (x , y) y de altitud (z) de los elementos en la superficie (Santos Preciados, 2004).

2.4.4. Batimetría

La batimetría se encarga de estudiar y medir la profundidad y las formas del terreno de cuerpos de agua, tales como océanos, ríos, arroyos y lagos. Al igual que un mapa topográfico este muestra el terreno que se encuentra bajo el agua, donde se pueden representar el relieve del fondo mediante líneas de contorno que muestran la forma y la elevación, o en este caso, profundidad y las características del terreno (National Oceanic and Atmospheric Administration [NOAA], 2021).

2.5. Hidrometría

La hidrometría se encarga de medir el volumen de agua que se desplaza en un momento determinado a través de un canal natural o artificial, así como evaluar la disponibilidad y distribución espacial y temporal de este recurso (Flores Saira, 2018), por lo que la hidrometría es clave para poder realizar un análisis integral sobre el uso y explotación del agua, y por ende obtener importantes beneficios a nivel técnico (cálculo de eficiencias del uso), económico (cobranza) y ambientales (control de la calidad y explotación) (Ortega Gaucin, 2012).

2.5.1. Aforos

De acuerdo con Villón Béjar (2004) los aforos son la base para un correcto y eficaz manejo del recurso hídrico, consiste en determinar el caudal que pasa por una sección transversal en un periodo determinado mediante mediciones que se pueden realizar por varios métodos.

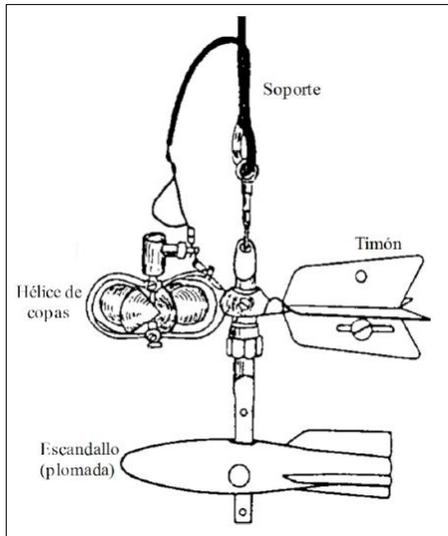
Uno de estos métodos es el aforo con correntómetro o molinete, también conocido como “área y velocidad promedio”, este método utiliza instrumentos llamados correntómetros o molinetes, el cual mide la velocidad en un punto del curso del agua, esta es medida por medio de una pieza móvil que capta la velocidad del flujo y transmite la información a un interruptor que cierra el circuito, cuando este ha dado un cierto número de vuelta, sobre un contador (Villón Béjar, 2004).

En la Figura 8 se observa un ejemplo de un molinete o correntómetro, las principales partes de este instrumento son: la hélice de aspas o copas, las cuales giran por el movimiento del agua; el timón, el cual guía al molinete de forma paralela al flujo de agua, un encallado o plomada, y un soporte para sumergir al instrumento, por último, un dispositivo que cuenta el número de revoluciones de la hélice en un intervalo establecido (esta no se muestra en la figura) (Ortega Gaucin, 2012)

Cabe agregar que un correntómetro no mide velocidades sino las revoluciones en las que gira la hélice en un tiempo determinado, además, el cálculo de la velocidad va a estar dado por el fabricante del instrumento.

Figura 8

Molinete de copas con encallado



Nota. Hidrometría básica aplicada la operación de distritos y unidades de riego [Imágen], por Ortega Gaucin, 2012, Instituto del Agua del Estado de Nuevo León (IANL), (<https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4047.4963>). Derechos reservados.

2.6. Herramientas de análisis y procesamiento

2.6.1. QGIS

QGIS es un software gratuito y de código abierto, disponible para múltiples plataformas de computadora, desarrollado con los lenguajes C++ y Python, además integra bibliotecas, algoritmos y programas libres como SAGA, GRASS y GDAL. QGIS ha crecido en popularidad como sistema de información geográfico, permitiendo el procesamiento y análisis de datos vectoriales y ráster (modelos digitales), y de la visualización de los mismos por medio de la creación y composición de mapas (Graser, 2016).

2.6.2. Pix4Dmapper

Pix4Dmapper es un software de fotogrametría que transforma imágenes 2D tomadas por cámaras en vuelos de dron, en mosaicos georreferenciados y modelos espaciales digitales

precisos y personalizables, convirtiéndolo en una herramienta utilizada en aplicaciones para la agricultura de precisión, topografía, GIS y CAD (Kharuf Gutierrez et al., 2018).

El procesamiento de las imágenes en Pix4Dmapper es operado automáticamente, llevándose a cabo en tres etapas que son: primero el proceso inicial, en el cual se da el emparejamiento de los componentes y donde se genera una dispersa nube de puntos, en segundo lugar la nube de puntos y la malla, en este paso se aumenta la densidad de la nube y permite que el usuario cambie la opciones de procesamiento de acuerdo con las salidas que desee, asimismo Pix4Dmapper incluye la opción de incluir puntos de control y de marcarlos en el proyecto, y por último la obtención de salidas tales como Modelos Digitales de Superficie (MDS) y orto mosaicos (Schwind, 2016).

Según Suziedelyte Visockiene et al. (2014) algunas de las principales características de esta herramienta son:

- Auto calibración de la cámara fotográfica, mediante el cálculo de la distancia focal de la cámara, la ubicación del punto principal y distorsiones radiales y tangenciales, lo cual optimiza y garantiza la precisión de cada vuelo en cualquier condición climática.
- Cálculo de un punto 3D y una elevación para cada píxel de las imágenes originales, mejorando la precisión del MDS y una orto-rectificación de los mosaicos.
- Edición de los mosaicos y de la nube de puntos.
- Generación automática de un informe después del procesamiento para evaluar la calidad del proyecto, en este se muestran puntuaciones de la calidad de las imágenes, descripción general del orto-mosaico y DSM, mediciones cuantitativas detalladas de la precisión de los puntos de control, entre otros.

2.6.3. Iber

Iber es un modelo matemático bidimensional que permite la simulación del flujo de agua en lámina libre y en ríos o esteros, desarrollado por la administración pública de España en colaboración del Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente GEAMA (*Universidade da Coruña*), del Grupo de Ingeniería Matemática (*Universidade de Santiago de Compostela*),

del Instituto Flumen (*Universitat Politècnica de Catalunya y Centre Internacional de Mètodes Numèrics en Enginyeria*), algunas de sus aplicaciones son para la evaluación de zonas inundables, el cálculo de transporte de sedimentos, para procesos medioambientales en hidrodinámica fluvial (Bladé et al., 2014).

2.6.3.1. Esquema numérico

El módulo hidrodinámico de Iber se resuelve utilizando las ecuaciones de aguas someras, conocidas también como ecuaciones de Saint Venant en dos dimensiones, de forma integral por medio del método de volúmenes finitos, dividiendo el dominio en estudio en celdas (malla de cálculo) (Ochoa et al., 2016).

Cabe agregar que dichas ecuaciones son válidas al obedecer las hipótesis de la distribución de presión hidrostática y la distribución uniforme de velocidad en profundidad, ambas se cumplen de manera adecuada y frecuentemente en flujos de río, no obstante, la segunda hipótesis está condicionada a la existencia de procesos importantes de estratificación por diferencias de salinidad, temperatura o viento (Guzmán Arias et al., 2017).

2.6.3.2. Condiciones de contorno

En Iber existen contornos cerrados como tipo pared y contornos abiertos en donde se da la entrada y salida del agua del dominio de cálculo, respecto a las condición de entrada se establece el caudal del flujo de agua, mientras que la condición de salida depende del régimen, en el caso de ser subcrítico se debe determinar la lámina de agua (Bladé et al., 2014).

2.6.3.3. Procesos de la simulación

La simulación se estructura en tres procesos, primeramente el preproceso, en donde se introduce la geometría y los datos necesarios para los cálculos como son las condiciones iniciales y de contorno, así como la aplicación de la rugosidad y la generación del mallado, luego el proceso, en el cual se desarrollan los cálculos de la simulación y finalmente el postproceso, en el cual se obtienen los resultados de la simulación como gráficas, perfiles

longitudinales y transversales, hidrogramas, mapas de velocidades y calados (Martos Pardillo, 2018).

2.6.3.4. Malla de cálculo

En Iber existen dos tipos de mallados: la estructurada, utilizada en canales o cauces relativamente rectilíneos, y la no estructurada, que se utiliza en geometrías más irregulares (Martos Pardillo, 2018). En el caso de la simulación de un río se recomienda una malla del tipo no estructurada debido a la irregularidad del cauce, ya que está permite el mallado de geometrías complejas de manera eficiente (Ochoa et al., 2016).

Además, a la malla de cálculo es posible incorporar un modelo digital de terreno para modificar la cota de los nodos, dándole una altura automáticamente a la malla (Bladé et al., 2014).

2.6.3.5 Rugosidad

Como parte del desarrollo del preproceso está la asignación de la rugosidad, la cual se introduce en el modelo de Iber mediante el coeficiente de Manning, el cual está asociada al uso del suelo del área de estudio, y su asignación en el modelo se puede realizar de forma automática a los elementos de la malla (Bladé et al., 2014).

3. METODOLOGÍA

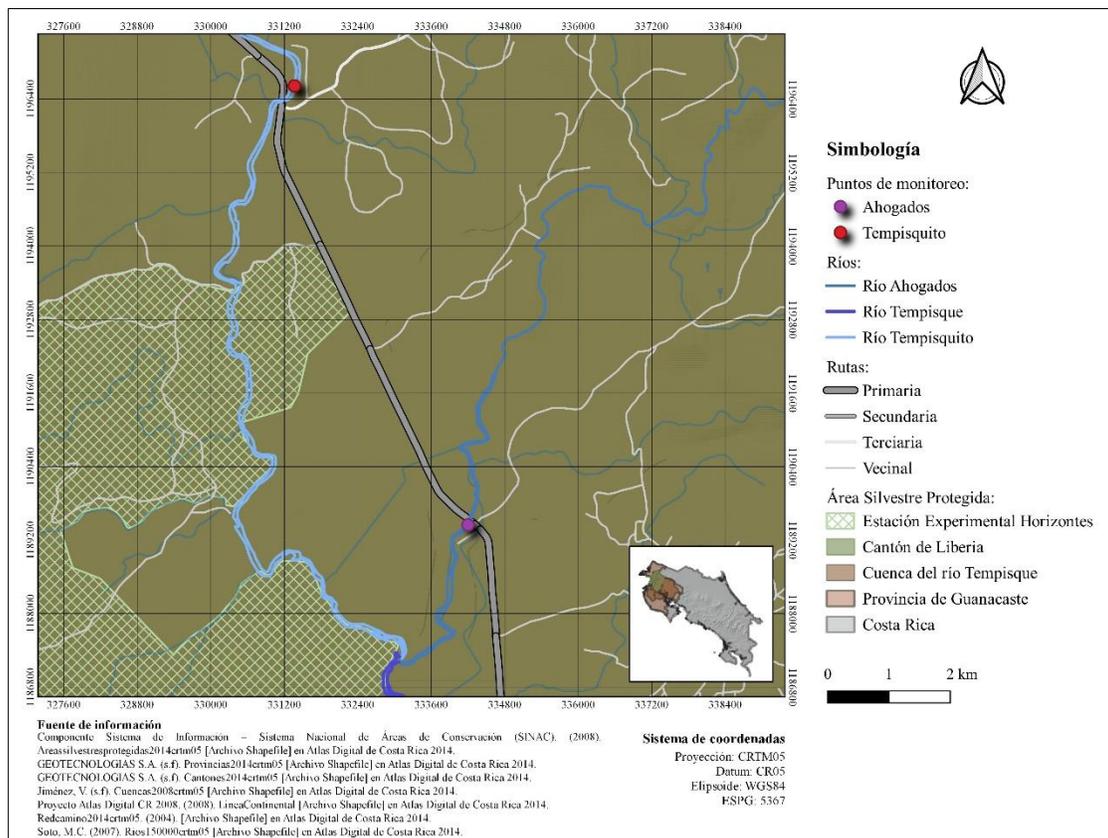
3.1. Visitas de campo

3.1.1. Levantamiento topográfico y fotogramétrico

Se realizó un levantamiento topográfico de los trayectos de control del cauce del río Ahogados y el río Tempisquito (ver Figura 9), utilizando una estación total (GeoMax Zipp10 Pro), tomando puntos de interés con coordenadas x, y, z de secciones transversales del cauce separadas aproximadamente cada 5 m. Asimismo, se llevó a cabo un levantamiento topográfico con un vehículo aéreo no tripulado (VANT) (DJI Phantom 3 Professional), capturando fotografías de los trayectos de los cauces, para lo cual también se tomaron puntos de control con coordenadas x, y, z con la estación total que serán utilizadas posteriormente en el tratamiento de la fotografías, en el caso del cauce del río Ahogados se hizo la toma de dos puntos de control y para el río Tempisquito se tomaron tres puntos de control.

Figura 9

Ubicación de los trayectos de control dentro del río Ahogados y el río Tempisquito



3.1.2. Muestreo granulométrico

Se llevó a cabo un muestreo de la granulometría en los lechos del trayecto del río Ahogados y el río Tempisquito por medio del método de toma de muestras superficiales empleando la técnica cuenta – cantos, en donde se midió el diámetro del eje medio de partículas de forma al azar, y en otros puntos de muestreo se aplicó la técnica de cuenta – grilla por medio de fotografías, utilizando un objeto de dimensiones conocidas como grilla, donde dichas fotografías fueron tratadas en trabajo de laboratorio descrito posteriormente.

Este muestreo se realizó mediante el método de los transectos siguiendo intervalos predefinidos, que en primera instancia se plantearon de 10 metros de largo y 10 metros de ancho; no obstante, debido a las condiciones climáticas y al comportamiento de los ríos durante la visita de campo, la cantidad de puntos disminuyó durante su ejecución.

Cabe agregar que los puntos de muestreo fueron georreferenciados dentro de cada trayecto de control mediante la utilización de GPS (Garmin Montana 680).

3.2. Procesamiento y análisis de datos de campo

3.2.1. Elaboración del Modelo Digital de Elevación (MDE)

Las fotografías digitales tomadas por el VANT fueron tratadas utilizando el software de fotogrametría Pix4Dmapper, mediante la licencia de prueba por 15 días, primeramente se ejecutó una prueba sin la utilización de puntos de control, esto con el fin de observar la desviación entre los puntos de control tomados con la estación total y el orto-mosaico generado.

La información obtenida en el levantamiento topográfico fue tratada en el software QGIS versiones 2.18.3. y 3.10.1, donde se cargaron los puntos de las secciones transversales, los cuales al ser tomados con una estación total sin coordenadas geográficas conocidas, fueron trasladados hacia el cauce en estudio, tomando como referencia uno de los puntos de control que se observaba en el orto-mosaico, y de esta manera georreferenciar los puntos tomados con la estación total.

Posteriormente, se realizó una segunda prueba en Pix4Dmapper para ajustar el ortomosaico así como los modelos digitales, introduciendo las coordenadas rectangulares (x, y) de los puntos de control, después de haber realizado el proceso inicial y antes de generar la nube de puntos y la malla.

Los productos fueron llevados nuevamente a QGIS, para realizar un ajuste altimétrico de los cauces, trasladando las elevaciones del Modelo Digital de Terreno (MDT) obtenido en el Pix4Dmapper, a las elevaciones de tomadas con la estación total, tomando siempre como referencia uno de los puntos de control, para lo cual se utilizó el “*Raster Calculator*” del programa.

Con el MDT corregido, se creó una nube de puntos utilizando puntos aleatorios con elevaciones provenientes del MDT (para esto se utilizó el *plugin “Point Sampling Tool”*) y los puntos de la estación total georreferenciados, y se llevó a cabo una interpolación de los mismos utilizando el algoritmo de SAGA “*Multilevel B-Spline Interpolation*” para la generación del Modelo Digital de Elevación (MDE) y el algoritmo “*Contour*” para la construcción de las curvas de nivel cada 0,1 m; no obstante, dichas curvas fueron modificadas manualmente para poder construir la batimetría del fondo del cauce.

Finalmente, las curvas de nivel corregidas fueron transformadas al MDE final de cada trayecto empleando el método de interpolación “*Inverse Distance Weighting (IDW)*”.

3.2.2. Análisis granulométrico

A partir del muestreo del lecho de los ríos, las muestras a las cuales se empleó el método de cuenta – grilla mediante fotografías, fueron trasladadas al software Civil 3D, donde se realizó un escalamiento de la imagen sobre la base de objeto de dimensiones conocidas, posteriormente se realizó de forma aleatoria la medición del diámetro del eje medio de las partículas que se observaban en las imágenes.

La información de las partículas contabilizadas en cada punto de muestreo fue ordenada y tratada mediante R y Rstudio, en donde se llevó a cabo la prueba de Tukey y se generaron las curvas de granulometría, respectivamente.

Seguidamente, se estimaron los principales percentiles para los cuales es posible estimar la rugosidad de partícula. De acuerdo con Crozzoli y Batalla (2003) estos son los percentiles medios y superiores de la distribución granulométrica, como el percentil 50, 84 y 90.

En este trabajo se determinaron los valores del tamaño de partícula correspondiente al percentil 50 y 90, proveniente de las curvas de granulometría de cada punto de muestreo, los cuales se usaron posteriormente para la definición de la rugosidades dentro del cauce.

En función de los diámetros correspondientes al percentil 50 y 90 de cada punto de muestreo, se llevó a cabo la interpolación en QGIS con base en los puntos ubicados en los trayectos de control, dicha interpolación se realizó mediante el método de “*Inverse Distance Weighting (IDW)*”, y de esta manera se obtuvo el valor por interpolación en áreas dentro del trayecto en donde no se pudieron realizar muestreos durante la visita de campo, en un archivo ráster para ambos trayectos de control.

3.3. Modelación hidráulica bidimensional

Para la modelación hidráulica de los trayectos de control se utilizó el software Iber 2.6.

3.3.1. Preproceso

Primeramente, se determinaron los parámetros requeridos en el preproceso.

3.3.1.1. Modelo geométrico

La construcción de la geometría del área de modelación se realizó en el software QGIS, utilizando los puntos del levantamiento topográfico que correspondían únicamente al cauce de los trayectos de control, asimismo se utilizó de apoyo los orto-mosaicos generados en el procesamiento de fotogrametría para afinar las delimitaciones del polígono del cauce, posteriormente la geometría fue importada a Iber.

Una vez definidos los cauces de los trayectos de control se llevó a cabo la medición y cálculo de dimensiones tales como longitudes y anchos (utilizando la herramienta “*Measure Line*”), pendientes (sobre la base del MDE y utilizando el *plugin* “*Profile Tool*”) y áreas (utilizando la herramienta “*Field Calculator*”).

3.3.1.2. Datos del problema

Estos corresponden al instante inicial, el cual se indicó un valor igual a cero, y el número de procesadores, para lo cual se utilizó un solo procesador.

Para definir los parámetros de entrada como el tiempo máximo de simulación y el intervalo de resultados, así como del tamaño del mallado, se realizaron simulaciones de pruebas, para permitirle al modelo que el caudal de entrada y el caudal de salida se nivelaran, y que esto se realizará en un tiempo asequible para la ejecución de las posteriores simulaciones.

3.3.1.3. Condiciones de contorno

Respecto a las condiciones de entrada del flujo en los trayectos de control, primeramente se definió el régimen de acuerdo a lo observado en campo, seguidamente se especificó el caudal, la información de los caudales fue brindada por parte de la Dirección de Agua, que llevaron a cabo los aforos mediante el método de correntómetro, para el río Tempisquito el valor de caudal proporcionado fue de 2,4847 m³/s, mientras que para el río Ahogados la información entregada fueron los datos en bruto del aforo, por lo que se calculó el caudal para este trayecto utilizando las ecuaciones dadas por el fabricante del molinete utilizado en el aforo (ver Anexo 1).

Por otro lado, las condiciones de salida del flujo se definieron de acuerdo con el tipo de flujo (régimen) observado en la visita de campo para cada trayecto.

3.3.1.4. Malla de cálculo

En ambos trayectos de control se generó una malla del tipo no estructurada debido a las irregularidades del cauce, ya que esta permite el mallado de geometrías complejas de forma eficiente (Ochoa et al., 2016).

El tamaño de la malla está en función del nivel de detalle de los datos que se quieren obtener de la simulación, y del tiempo disponible para poder realizar las simulaciones y calibrar el modelo hidráulico de los dos trayectos.

Adicionalmente, a la malla de cálculo se incorporó el MDE depurado, para modificar la cota de los nodos, dándole una altura automáticamente a la malla.

3.3.1.5. Rugosidad

Para la delimitación de las áreas y sus valores de rugosidad teóricos se utilizaron cuatro ecuaciones empíricas conocidas como “*Strickler-type*” (ver Tabla 2), mediante las cuales es posible calcular el valor del coeficiente de rugosidad de Manning en función del diámetro del grano. Para cada una de las ecuaciones de los investigadores se llevó a cabo un modelo hidráulico bidimensional.

Por lo que a partir de los archivos ráster de interpolación de los diámetros correspondientes al percentil 50 y 90 generados en la sección 3.2.2.; se obtuvo el ráster de rugosidades para cada ecuación para ambos trayectos, calculando estos valores de forma automática utilizando la herramienta “*Raster Calculator*”.

Teniendo en cuenta que en Iber para poder realizar una asignación automática de la rugosidad en los elementos de la malla se requiere un archivo georreferenciado con la rugosidad de Manning asociada al uso del suelo, el cual en el caso de este proyecto equivale a las áreas asociadas a un valor del coeficiente calculado por las ecuaciones, la variedad de valores del coeficiente de rugosidad en cada ráster debió adaptarse para obtener una cantidad de áreas y valores del uso del suelo (rugosidad) que sea práctica y factible, es por ello que para lograr esto los valores fueron acortados a una cantidad límite de tres decimales, de esta manera varios valores que compartían los mismos primeros tres decimales fueron agrupados en el mismo uso de suelo (en una misma área y valor de rugosidad).

Tabla 2*Fórmulas empíricas: "Strickler-type"*

Investigador	Abreviatura a utilizar	Fórmula
Strickler (1923)	Strickler	$n = 0,047d_{50}^{1/6}$... Ecuación 6
Meyer-Peter and Muller (1948)	MPM	$n = 0,038d_{90}^{1/6}$... Ecuación 7
Bray (1979)	Bray d_{50}	$n = 0,0593d_{50}^{0,179}$... Ecuación 8
Bray (1979)	Bray d_{90}	$n = 0,0495d_{90}^{0,16}$... Ecuación 9

Nota. Las fórmulas anteriores fueron organizadas por Yen (1992) de acuerdo con sus antecedentes históricos y teóricos, condiciones de campo y su aplicación práctica; donde, n es el coeficiente de rugosidad de Manning; d_{50} es el diámetro correspondiente al percentil 50 en metros; y d_{90} es el diámetro correspondiente al percentil 90 en metros. Adaptado de "Roughness coefficient and its uncertainty in gravel-bed river" por J.S. Kim, C.J. Lee, W. Kim y Y.J. Kim., 2010, *Water Science and Engineering*, 3(2), p.225 (<https://doi.org/10.3882/j.issn.1674-2370.2010.02.010>). Derechos reservados.

3.3.2. Postproceso

En el postproceso del programa se obtuvieron los resultados de los cálculos de las simulación, en este caso, el resultado de mayor interés era el área formada por la lámina de agua, la cual fue exportada de Iber como un archivo ráster y analizada en QGIS, para el proceso de calibración de los modelos que se describe posteriormente.

Otros resultados obtenidos de la simulación fueron parámetros hidráulicos, tales como profundidad de la lámina de agua y la velocidad del flujo.

3.3.3. Proceso de calibración

Se llevó a cabo la calibración de los ocho modelos hidráulicos bidimensionales (cuatro para el trayecto de control del río Ahogados y cuatro para el trayecto de control del río Tempisquito), mediante el proceso de "prueba y error", partiendo de los resultados obtenidos en la simulación con las rugosidades teóricas (las obtenidas por fórmula).

Se comparó el área del patrón del agua formado por el cauce del trayecto de control (dato observado) y el área de la mancha de agua simulada por el programa (dato simulado) de manera cuantitativa y espacialmente. De forma manual, los valores de rugosidad teóricos fueron multiplicados por distintos factores, obteniendo nuevos valores de rugosidad calculados, los cuales fueron ingresados en el preproceso (las áreas de rugosidad permanecen constantes), realizándose reiteradamente el proceso de simulación, exportación de resultados del postproceso, comparación de áreas y variación del factor, hasta que las áreas se asemejaran.

La calibración de los ocho modelos se realizó hasta que el “error”, esto es, el porcentaje de diferencia entre el dato observado y el dato simulado fuera menor a un 10%, esto a criterio del autor.

3.4. Modificación de las ecuaciones empíricas

Una vez identificado el valor del factor para cada modelo que permitió el mejor ajuste entre los datos, se realizó la modificación de las fórmulas empíricas utilizadas, ajustándolas a los nuevos valores de rugosidad pertenecientes a cada modelo. Para ello se partió del valor real de un diámetro (del percentil 50, para Strickler y Bray d_{50} ; y del percentil 90, para MPM y Bray d_{90}) ubicado en cada una de las áreas de rugosidad formadas por cada ecuación.

Teniendo para cada área el valor de la rugosidad y el diámetro real, se determinó el diámetro calculado de la ecuación sin corregir. La fórmula aplicada de la Tabla 2 depende de donde se derivan los datos anteriores, que sigue una estructura como la que se observa en la Ecuación 10.

$$n = C_t d_x^{e_t} \dots \text{Ecuación 10}$$

Donde,

n = Coeficiente de rugosidad de Manning

C_t = Constante teórica que varía según la fórmula de cada investigador

d_x = Diámetro de la partícula para un percentil x , el percentil a utilizar varía según la fórmula de cada investigador

e_t = Exponente teórico que varía según la fórmula de cada investigador

Seguidamente se calculó la relación (R) entre el diámetro calculado y el diámetro real en cada área de rugosidad, como se muestra en la Ecuación 11 y se determinó el valor promedio de las relaciones.

$$R = \frac{d_{x_{calculado}}}{d_{x_{real}}} \dots \text{Ecuación 11}$$

Finalmente, se estimó la nueva constante (C_N) que reemplazó el valor de la constante teórica de las fórmulas de los investigadores, siguiendo la Ecuación 12.

$$C_N = C_t \cdot R_{prom}^{e_t} \dots \text{Ecuación 12}$$

Lo descrito anteriormente se realizó para cada uno de los ocho modelos.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. Procesamiento y análisis de datos de campo

En la Figura 10 se muestra la ubicación de los trayectos de control del cauce del río Ahogados y el río Tempisquito, así como los orto-mosaicos generados a partir del análisis fotogramétrico de dichos cauces en estudio, en la cual se puede observar el patrón del río por medio de una vista en planta.

El cuanto al patrón del trayecto del cauce del río Ahogados, el cual corresponde al área formada por el espejo de agua, este posee un área de 0,18499 hectáreas (1849,90 m²), este trayecto posee longitudes entre los 88,32 m y los 89,98 m, y anchos entre los 17,64 m y los 26,44 m (ver Anexo 2).

Por otra parte, a lo largo del patrón del trayecto del cauce del río Tempisquito se presentan longitudes que van de 100,63 m hasta 54,33 m y los anchos entre los 24,22 m hasta los 9,56 m (ver Anexo 3), el área de la mancha de agua de este cauce es de 0,17983 hectáreas (1798,30 m²),

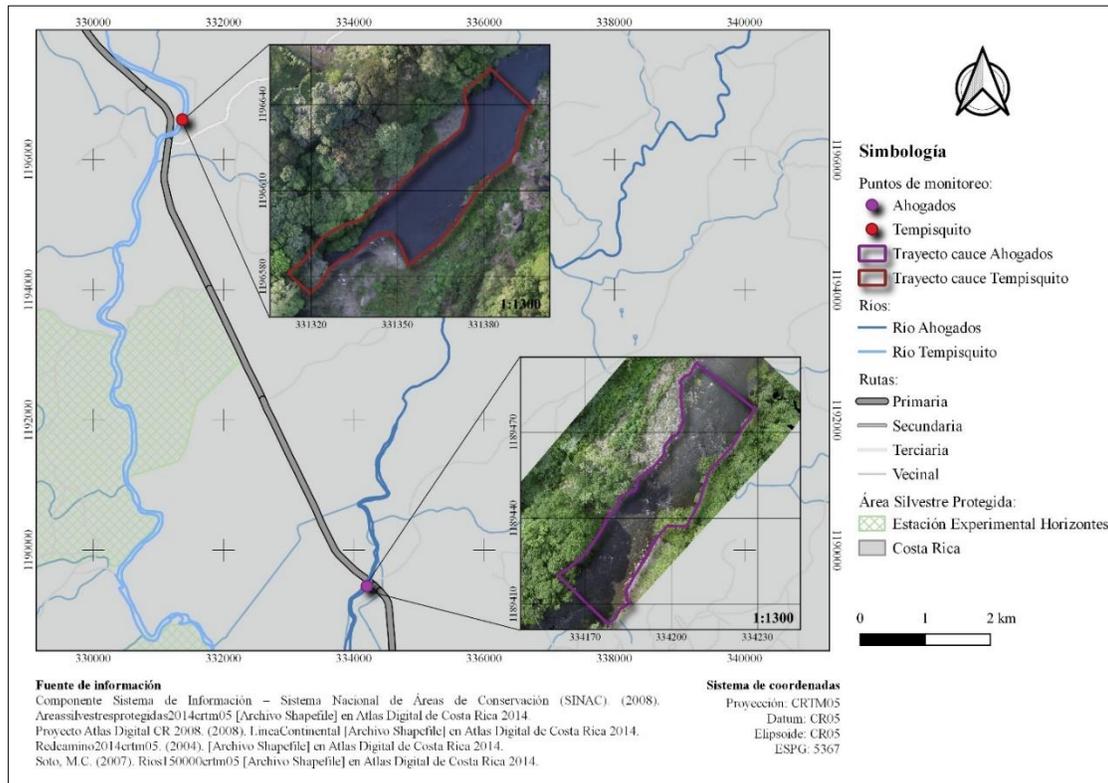
Se puede identificar que el trayecto del río Ahogados es más uniforme, la diferencia entre las distintas longitudes y anchos dentro del cauce es de aproximadamente 1,66 m y 8,80 m respectivamente, comparándolas con una diferencia en el trayecto del río Tempisquito de 46,30 m y 14,67 m, respectivamente. Adicionalmente, se identificaron anchos similares en el trayecto del río Ahogados por lo que podría determinarse como un cauce recto (Ochoa Rubio, 2011), aunque estos son muy raros en la naturaleza.

Al ser ambos trayectos de distancias relativamente cortas, no es posible observar sinuosidades o barras de punta que los identificara como cauces meándricos. Por otro lado, en los orto-mosaicos se pueden observar en los bancos de ambos cauces la presencia de barras laterales de grava y cantos; la visibilidad de barras caracteriza a los cauces trenzados (Mangelsdorf et al., 1990), aunque específicamente este tipo de barras también caracteriza a los canales rectos (Garde, 2000), Por lo que se requeriría tener un patrón de los trayectos de mayor longitud para observar las irregularidades que distinguen un tipo de patrón de otro.

Cabe agregar que los orto-mosaicos generados así como la delimitación del cauce se realizaron durante la época de transición de seco a lluviosa de la cuenca, por lo que en época seca podrían manifestarse otro tipo de barras o inclusive islotes, o por el contrario, observar un patrón más grande en época lluviosa que oculte este tipo de formaciones en el terreno.

Figura 10

Trajectos de control del cauce del río Ahogados y el río Tempisquito



4.1.1. Elaboración del Modelo Digital de Elevación (MDE)

En la Figura 11 se observa el MDE de los trayectos de control del cauce del río Ahogados y el río Tempisquito, donde para el primero de estos trayectos (ver Figura 11a) la elevación máxima es de 1000,698 m y la mínima es de 997,900 m, y para el segundo trayecto (ver Figura 11b) la mayor elevación es de 1001,999 m y la menor es de 997,403 m.

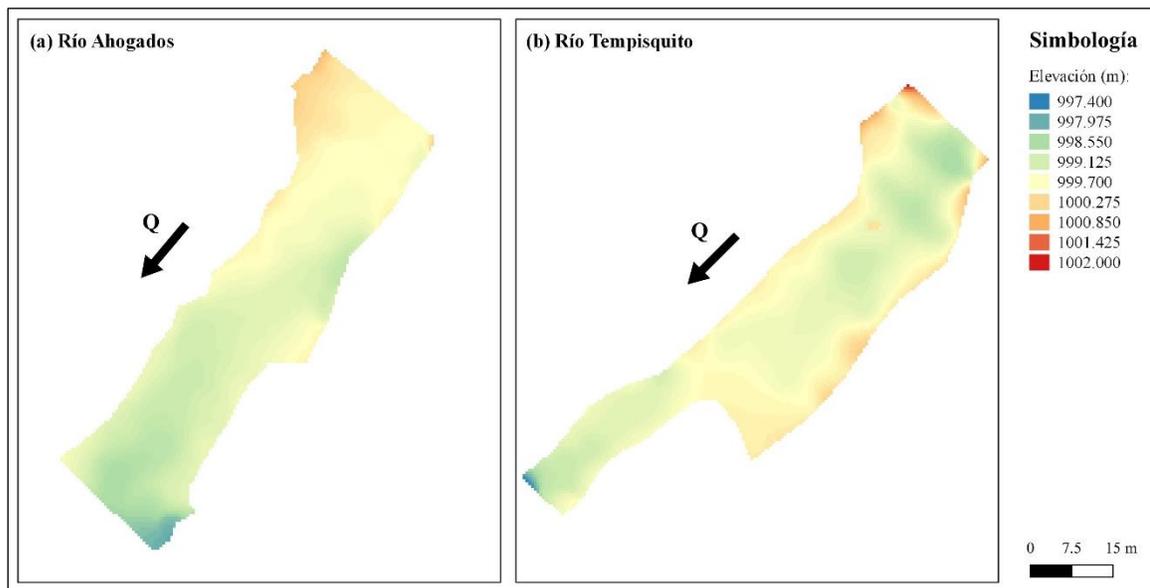
Respecto a la pendiente longitudinal promedio dentro del cauce esta es de aproximadamente 1,42% en el trayecto del río Ahogados (ver Anexo 4 y 6) y de 0,74% en el

del río Tempisquito (ver Anexo 5 y 7), por lo que ambos trayectos se clasifican como ríos de montaña, ya que posee pendientes superiores a 0,5% (0,005) (Elliot Munro, 2010).

Así pues es el trayecto del cauce del río Tempisquito el que posee tanto la mayor como la menor elevación, pero menor pendiente, esto debido a que la diferencia de altura a pesar de ser mayor que el trayecto de control del río Ahogados, esta se presenta en una longitud del cauce mayor.

Figura 11

Modelo Digital de Elevación (MDE) de los trayectos de control del cauce del río Ahogados y el río Tempisquito



4.1.2. Análisis granulométrico

En el Anexo 8 se muestran los datos en bruto de las partículas contabilizadas en el trayecto de control del río Ahogados, el valor promedio de las partículas es de 190,74 mm, con un valor máximo de 1000 mm y mínimo de 10 mm (sin considerar arenas); donde la desviación estándar de los datos es de 182,23 mm.

Debido al comportamiento y a las condiciones del entorno del río Ahogados durante la visita de campo, el cual presentaba bastante turbidez (coloración oscura) y un aumento del nivel

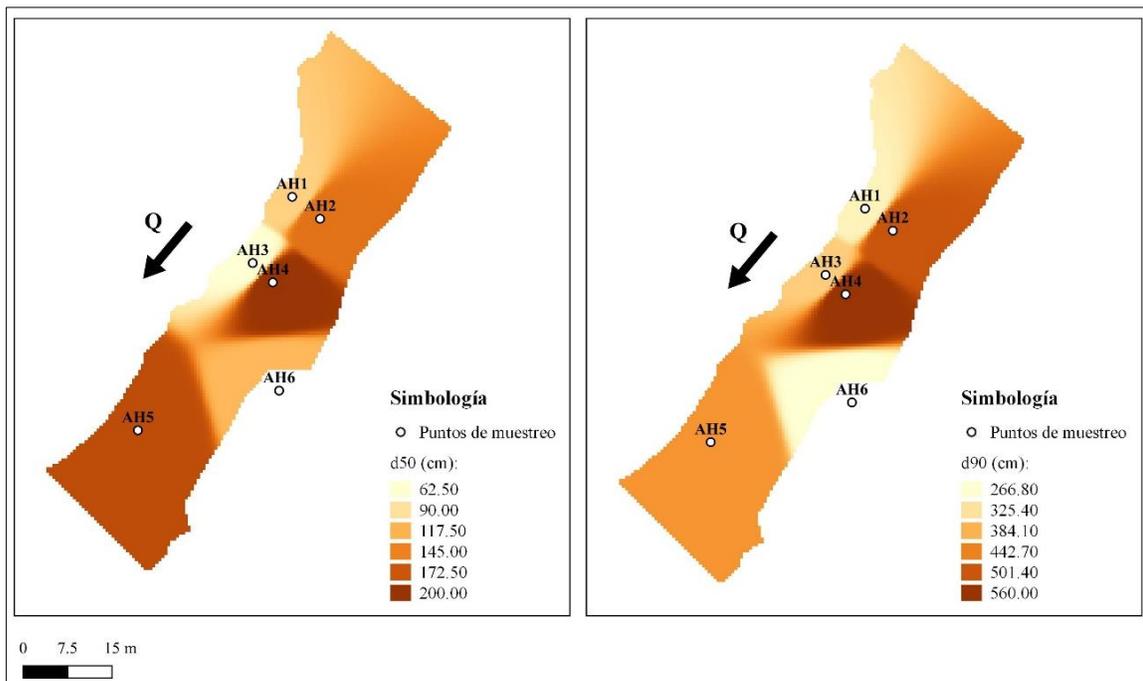
de agua, así como fuertes corrientes, se dificultó la medición de las partículas en el lecho y por ende una disminución tanto de la cantidad de puntos de muestreo como del número de partículas medidas, en total seis puntos de muestreo fueron tomados en el trayecto del río Ahogados (ver Figura 12), en donde se midieron 50 partículas en cada punto, cuando lo recomendable es mínimo 75 (Ochoa Rubio, 2011).

En la Tabla 3 se muestra para cada punto de muestreo el valor del diámetro medio (d_{50}) el cual equivale al tamaño de la partícula correspondiente al percentil 50, así como el valor del diámetro para el percentil 90 (d_{90}), provenientes de las curvas de granulometría que se observan en la Figura 13.

A partir del rango del d_{50} el material particulado dentro del lecho se clasifica como canto rodado según la escala de Gallegos (1996), mientras que en la escala de Wentworth (1922) la mayoría del lecho es canto rodado, a excepción de las áreas adyacentes al punto de muestreo AH3 (ver Figura 12) que se clasifica como gravilla (ver Tabla 1).

Figura 12

Rangos de los valores granulométricos d_{50} y d_{90} en el trayecto de control del río Ahogados



En cuanto a los resultados de la prueba de Tukey en la Tabla 3 se observa que solo dos de los seis puntos de muestreo coinciden en su totalidad con el mismo grafema, que son el punto AH3 con el punto AH6, lo que quiere decir que las medias son iguales o casi iguales, en este caso 143,20 mm y 142,54 mm, respectivamente, o sea, que el conjunto de los diámetros muestreados en AH3 son muy similares a los muestreados en el punto AH6. Adicionalmente, cabe agregar que al visualizar la ubicación de estos puntos en la Figura 12 estos están posicionados en zonas opuestas, similares a barras laterales en los bancos del cauce, estos se originan porque la tensión del corte se reduce (menor velocidad del flujo), provocando que la carga de sedimentos transportados se deposite en las orillas del cauce (Garde, 2000).

Tabla 3

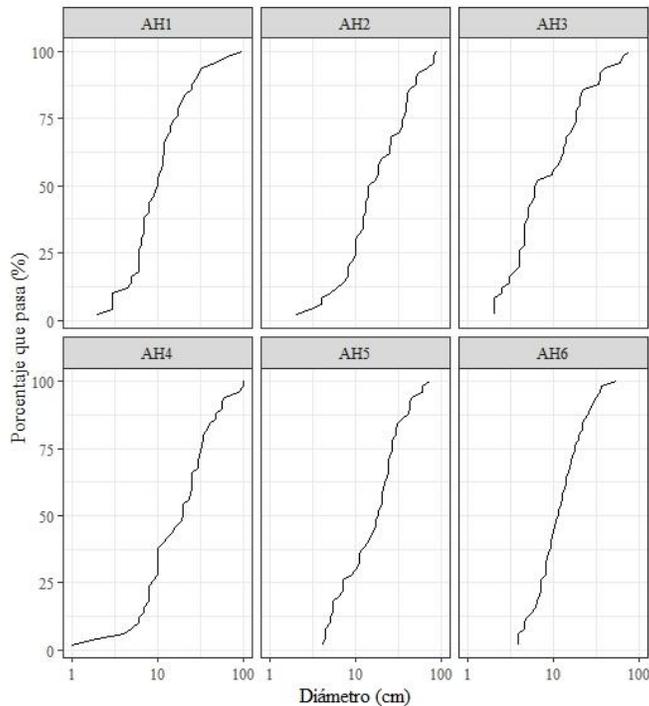
Principales resultados del análisis granulométrico de los puntos de muestreo en el trayecto de control del río Ahogados

Punto de muestreo	N° total de partículas	d₅₀ (mm)	d₉₀ (mm)	Prueba de Tukey
AH1	50	100,00	292,00	ab
AH2	50	155,00	504,00	bc
AH3	50	62,50	350,00	a
AH4	50	200,00	560,00	c
AH5	50	180,00	421,00	ac
AH6	50	114,00	266,80	a
Promedio	-	135,25	398,97	-

En las curvas granulométricas de la Figura 13, se puede observar que en los seis puntos de muestreo se presentan diámetros mayores a 256 mm (25,6 cm), que se ve reflejado en los valores del d₉₀, lo que evidencia la presencia de bloques a lo largo del lecho. Por otro lado, a pesar de que el valor del menor diámetro contabilizado en el muestreo es de 10 mm (1,0 cm), tanto el lecho del cauce, como sus paredes y bancos se observaron arenas, que no fueron contabilizadas, las causas de esto se explican más adelante.

Figura 13

Curvas de granulometría de los puntos de muestreo en el trayecto de control del río Ahogados



En cuanto al trayecto control del río Tempisque, en el Anexo 9 se presenta los datos en bruto de las partículas muestreadas, obteniendo un valor promedio del tamaño de las partículas de 58,37 mm, con una máxima y una mínima de 500 mm y 5 mm (sin considerar arenas) respectivamente, y cuya desviación estándar es de 46,44 mm.

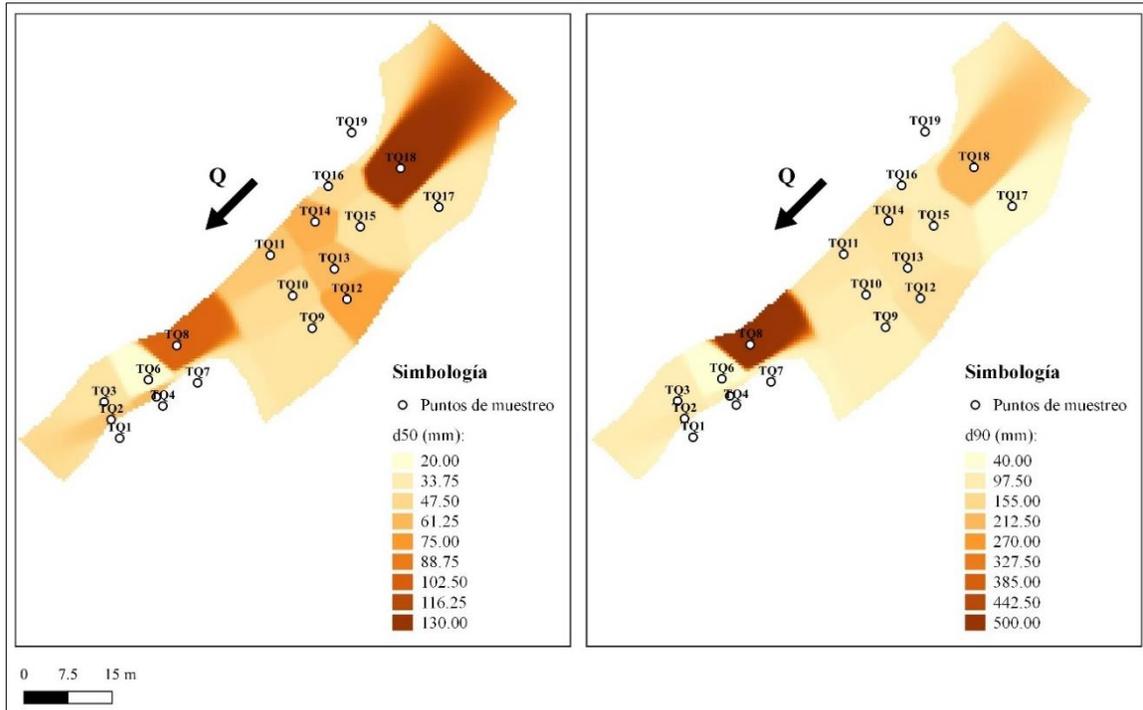
Durante la visita de campo el flujo del río tenía un comportamiento laminar en la mayoría de su área (tranquilo y lento) y supercrítico al final del trayecto, lo cual permitió una mayor cantidad de puntos de muestreo y de diámetros medidos, en comparación con el trayecto del río Ahogados, en total se tomaron 19 puntos de muestreo (ver Figura 14). La Tabla 4 muestra los valores del d_{50} y d_{90} para cada punto de muestreo.

De forma general el material particulado del lecho del trayecto se clasifica a partir del d_{50} como gravilla en las áreas cercanas de los puntos TQ1 a TQ7, TQ9 a TQ11, TQ13, TQ15 a TQ17, y TQ19 y como canto rodado las áreas alrededor de los puntos TQ8, TQ12, TQ14 y

TQ18 según la escala de Wentworth (1922), mientras que según la escala de Gallegos (1997) todo el lecho del cauce se clasifica como cantos rodados.

Figura 14

Rangos de los valores granulométricos d_{50} y d_{90} en el trayecto de control del río Tempisque



Al analizar la prueba de Tukey se tiene que el punto de muestreo TQ1, TQ9 y TQ19, presentan los mismos grafemas, dando a entender que sus promedios son muy similares entre sí, los cuales son de 46,68, 47,03 y 45,68 mm respectivamente, estos tres puntos se ubican en las zonas laterales del cauce (ver Figura 14) como una barra, también los puntos TQ10 y TQ16 comparten una media similar, de 52,37 y 52,64 mm respectivamente, en este caso el punto TQ10 se ubica en el centro del cauce, mientras que el TQ16 en un borde.

Tabla 4

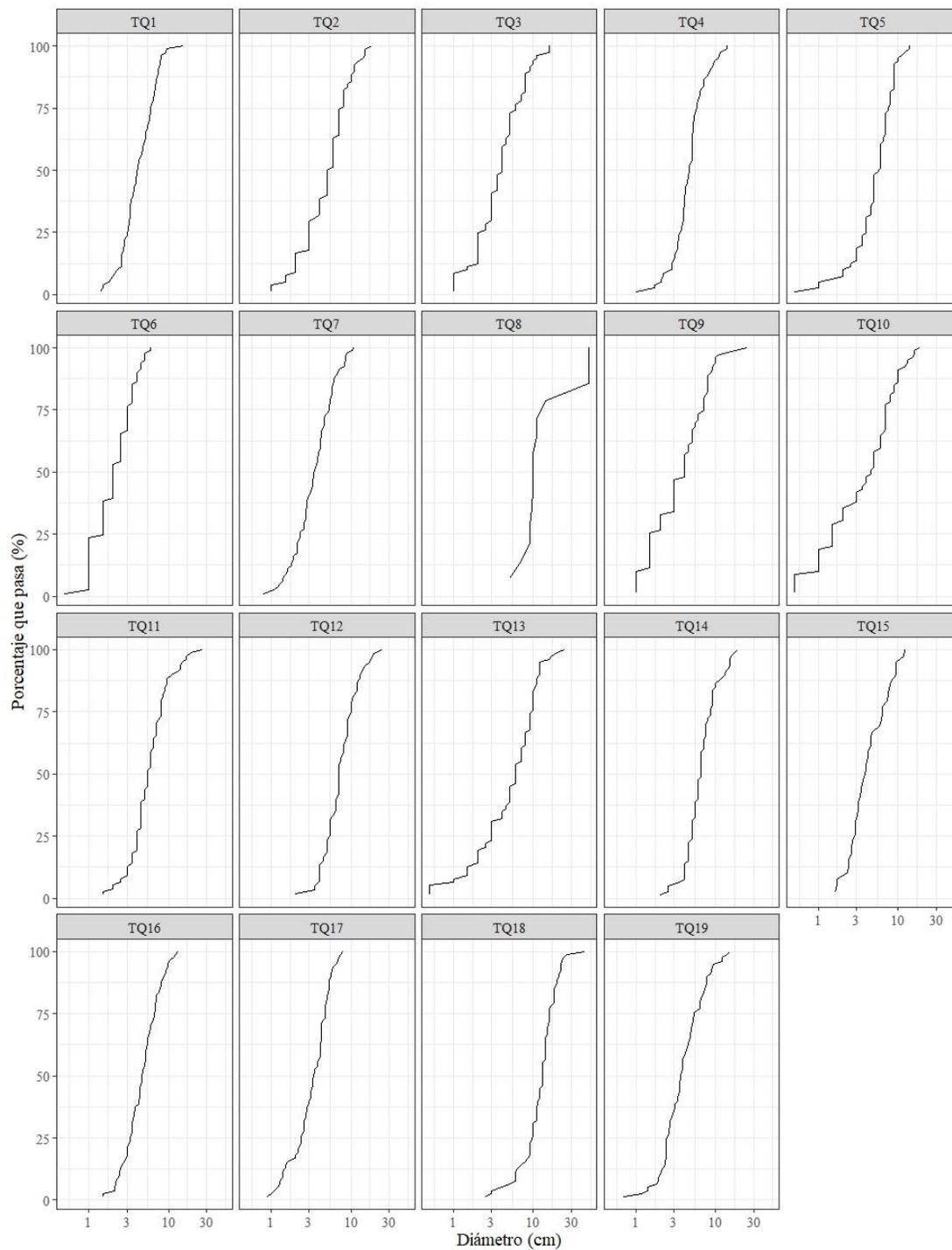
Principales resultados del análisis granulométrico de los puntos de muestreo en el trayecto de control del río Tempisquito

Punto de muestreo	N° total de partículas	d₅₀ (mm)	d₉₀ (mm)	Prueba de Tukey
TQ1	81	41,00	75,00	bcd
TQ2	78	55,00	110,00	dg
TQ3	81	40,00	90,00	bcde
TQ4	81	47,00	83,00	bcd
TQ5	81	60,00	90,00	cdg
TQ6	81	20,00	40,00	a
TQ7	81	35,00	69,00	ac
TQ8	14	100,00	500,00	-
TQ9	79	40,00	86,00	bcd
TQ10	79	45,00	100,00	bcdg
TQ11	78	55,00	116,00	fg
TQ12	60	70,00	131,00	-
TQ13	78	60,00	120,00	efg
TQ14	80	65,00	130,50	g
TQ15	39	40,00	93,00	-
TQ16	80	46,50	89,40	bcdg
TQ17	78	34,50	56,30	ab
TQ18	78	130,00	210,00	h
TQ19	78	36,50	80,00	bcd
Promedio	-	53,71	119,43	-

En las curvas de granulometría de la Figura 15 se puede observar que únicamente los puntos de muestreo TQ8, TQ11 y TQ18 presentan diámetros mayores a los 256 mm (26,5 cm), es decir, solo en estos puntos se contabilizaron materiales de tipo bloque, cabe resaltar la existencia de un bloque de un diámetro mayor a un metro que inclusive se puede observar en el MDE que sobresale en el centro del cauce (ver Figura 11b). Por otro lado, aun cuando en ninguno de los puntos de muestreo se contabilizaron diámetros menores a 2 mm relativos a arenas, siendo la mínima de 5 mm (0,5 cm), en la visita de campo sí se observaron arenas en el cauce y fuera de este.

Figura 15

Curvas de granulometría de los puntos de muestreo en el trayecto de control del río Tempisquito



Al comparar los resultados del análisis granulométrico en ambos trayectos, se puede determinar que de forma general ambos cauces son ríos con lechos conformados superficialmente por grava y cantos rodados; de acuerdo con Church y Ferguson (2015) la mayoría de los ríos en tierras altas o de montaña poseen este tipo de lechos, con d_{50} en un rango de 10 a 100 mm aproximadamente.

En el trayecto de control del río Ahogados se identificaron diámetros mayores a los 256 mm, que evidenció la presencia de bloques en el cauce, mientras que el trayecto del río Tempisquito, este tipo de diámetros fue escaso o inclusive nulo en muchos de los puntos de muestreo. En lo que concierne a la identificación de arenas, en ninguno de los puntos de muestreo de ambos trayectos se midieron diámetros de esta clase de material, esto debido a que en primer lugar las técnicas de muestreo utilizadas (cuenta – cantos y cuenta – grilla) no son las adecuadas para contabilizar este tipo de granos (Bunte y Abt, 2001), y en segundo lugar porque la toma de la muestra es superficial, si bien, en ríos de este tipo (con lechos de grava y cantos, e inclusive bloques) las partículas más pequeñas son ocultadas por las partículas más grandes, las cuales forman un “acorazamiento” en la superficie (Garde, 2000; Elliot Munro, 2010) lo pertinente es realizar un muestreo de los materiales superficiales ya que estos son los que aportan la rugosidad (Ochoa Rubio, 2011; Kim et al., 2010).

Según Garde (2000), los ríos con lechos de grava por lo general presentan una falta de partículas en el rango de 1 – 8 mm, lo cual puede ser causado también por la geología de la cuenca, la mezcla de sedimentos transportados de distintas formas y la limitación en los tamaños de los sedimentos proporcionados por la zona de origen.

4.2. Modelación hidráulica bidimensional

4.2.1. Preproceso

En la Tabla 5 se muestran los datos establecidos en el preproceso para los cálculos de las simulaciones en Iber después de realizadas las simulaciones de prueba, que fueron los datos del problema y el tamaño del mallado.

Lo que corresponde a las condiciones de contorno de los trayectos de control, de acuerdo con lo observado en la visita de campo, el régimen del flujo en la entrada de ambos trayectos es subcrítico, y a partir de la información suministrada por la Dirección de Aguas, se determinó que el caudal para el trayecto de control del río Ahogados es de 3,2626 m³/s (ver Anexo 10). El régimen del flujo de salida en los trayectos se especificó como supercrítico.

Respecto a los resultados de la rugosidad teórica y calibración de los modelos estos se exponen la sección **4.2.2.**

Tabla 5

Datos para el preproceso de las modelaciones en Iber

		Río Ahogados	Río Tempisquito
Datos del problema	Instante inicial	0	0
	Tiempo máximo de simulación	7500 s	7500 s
	Intervalo de resultados	10 s	10 s
	Número de procesadores	1	1
Condiciones de contorno	Régimen de entrada	Subcrítico	Subcrítico
	Caudal de entrada	3,2626 m ³ /s	2,4847 m ³ /s
	Régimen de salida	Supercrítico	Supercrítico
Malla de cálculo	Tamaño	0,5	0,5

4.2.2. Proceso de calibración

En la Figura 16 y 17 se muestran las área y los distintos valores de rugosidad generadas por las ecuaciones empíricas, en los trayectos de control del río Ahogados y del río Tempisquito. Los valores de rugosidad con factor 1,0 son los teóricos, es decir, los obtenidos aplicando las fórmulas de la Tabla 2. Los valores de los factores y rugosidades que están dentro del recuadro rojo fueron aquellos donde se obtuvo una diferencia entre las áreas (observada y simulada) menor a un 10% y que se seleccionaron para realizar la modificación posterior de las ecuaciones.

Los factores que dieron una diferencia de área menor a un 10% en el trayecto del río Ahogados son 2,5 (9,26 %), 2,7 (9,04%), 2,1 (9,09%) y 2,0 (9,35%); y en el trayecto del río Tempisquito son 1,1 (3,98%), 1,2 (3,89%), 1,0 (3,78%) y 1,0 (3,66%), para la ecuación de Strickler, MPM, Bray d₅₀ y Bray d₉₀, respectivamente.

En lo que respecta propiamente a los valores de las rugosidades obtenidos para los factores mencionados anteriormente en el trayecto del río Ahogados estos rangos son de 0,075 – 0,090, 0,081 – 0,092, 0,076 – 0,092 y 0,080 – 0,090; y en el trayecto del río Tempisquito estos rangos son de 0,026 – 0,036, 0,026 – 0,041, 0,029 – 0,041 y 0,030 – 0,044, para la ecuación de Strickler, MPM, Bray d_{50} y Bray d_{90} , respectivamente. De acuerdo con Jarrett (1984), los valores del coeficiente de rugosidad de Manning suelen ser mucho más grandes en los ríos de mayor gradiente, y con lecho de cantos rodados y bloques, en virtud de esto, tiene sentido que sea el trayecto de control del río Ahogados el que presenta coeficientes de rugosidad mayores (conociendo su topografía y granulometría, ver sección 4.1.) que el trayecto del río Tempisquito.

El modelo del trayecto de control del río Ahogados utilizando la ecuación de Strickler fue la primera modelación a ser calibrada, por esta razón cuenta con la mayor cantidad de simulaciones (número de factores probados), en comparación con los modelos de las otras tres ecuaciones. A partir de esta primera simulación se pudo observar que después del factor 2,5, al aumentar este valor a pesar de darse un aumento en la magnitud del área simulada, desde el punto de vista espacial, el cambio no se percibía (ver Anexo 11). De forma similar sucedió, en las simulaciones del trayecto de control del río Tempisquito, donde el factor límite en la simulación de Strickler fue de 1,1 (ver Anexo 15).

Se ha demostrado en varias investigaciones que la ecuación de Strickler subestima el coeficiente de rugosidad, la causa de esto es que la relación de Strickler se ajustó a flujos relativamente profundos sobre lechos casi uniformes, con una baja pendiente y con una menor resistencia de forma que muchos ríos en la naturaleza (Ferguson, 2010), por lo que cuando se presentan condiciones con flujos bajos y alta resistencia es necesario incorporar una relación entre el tirante y el tamaño de grano para poder estimar la rugosidad (Powell, 2014; Cheng, 2017) (estas son las fórmulas “*power-based*” y “*semi-logarithmic-based*”). Otros parámetros que también influyen en el coeficiente de rugosidad de Manning a parte del tamaño del grano, es la pendiente y el radio hidráulico (Azamathulla y Jarrett, 2013).

Al observar los resultados obtenidos en este trabajo con la ecuación de Strickler, se comprueba lo expuesto en la investigación realizada por Ferguson (2010), que indica que la

subestimación que procede de la ecuación de Strickler, es por un factor de 2 (en promedio, entre la mitad y el doble), siendo en este caso, para el trayecto del río Ahogados el factor de calibración de 2,5 y en el río Tempisquito de 1,1.

Aunque los autores de la ecuación de MPM incluyeron una corrección a su fórmula (Wong y Parker, 2006), los valores obtenidos en el trabajo de igual manera se vieron subestimados, y tuvieron que ser multiplicados por un factor para poder calibrar el modelo.

Al examinar el estudio realizado por Kim et al. (2010), quienes utilizaron las tres clases de ecuaciones empíricas para estimar el coeficiente de rugosidad para un río de lecho de grava, obtuvieron con la ecuación de Limerinos (fórmula “*semi-logarithmic-based*”) el valor más cercano a su coeficiente de rugosidad basado en la medición de campo, comparando dicho valor únicamente con las ecuaciones empíricas “*Strickler-type*”, fueron las ecuaciones de Bray (d_{50} y d_{90}), las que se aproximaron más, mientras que las ecuaciones de Strickler y de MPM lo subestimaron. En este caso, en el trayecto del río Ahogados son las ecuaciones de Bray (d_{50} y d_{90}) las que requirieron de un factor menor para poder obtener un error menor al 10%; y en el trayecto del río Tempisquito no fue necesario aplicar ningún factor para obtener un error inclusive más pequeño que el obtenido con los aplicados en el trayecto del río Ahogados.

A todo esto, se llega al porcentaje de error, esto es, la diferencia entre las áreas, siendo los modelos del trayecto del río Tempisquito aquellos con los que se obtuvo el menor porcentaje en las cuatro ecuaciones empíricas, en contraste con los modelos del trayecto del río Ahogados. Este comportamiento en la calibración de ambos trayectos se deriva de la necesidad que se tiene de la disponibilidad de los datos de campo para poder alimentar y calibrar el modelo numérico (Sanz-Ramos et al., 2019). Según Horritt (2000), para calibrar un modelo numérico a partir de la llanura de inundación y la rugosidad se precisa de que los coeficientes de resistencia del flujo sean espacialmente variables (de forma heterogénea) esto con el fin de poder mejorar el rendimiento del modelo, asimismo, este mismo autor se refiere al que el éxito de la calibración siempre está en función de las incertidumbre de los datos observados.

Teniendo en cuenta lo anterior, es el trayecto del río Tempisquito el que alimenta más al modelo numérico, ya que de él se obtuvo la mayor cantidad de información durante las visita

de campo, específicamente en la información de granulometría, la cual es la base de los coeficientes de rugosidad en este estudio, y por ende, el trayecto del río Ahogados demandó de un proceso de calibración más extenso (en tiempo) y no necesariamente completo de la calibración del cauce, porque careció de datos de campo, que debieron ser supuestos durante el procesamiento (interpolación de datos granulométricos), por lo que de acuerdo con Pinos y Timbe (2019) la falta o la no existencia de información dificulta la calibración del modelo. De modo que esto se plasmó en los resultados del proceso de calibración, obteniendo para el río Tempisquito un error menor, que en el río Ahogados; así como una mayor variedad de áreas y valores de rugosidad (heterogeneidad) en el trayecto del río Tempisquito que en el río Ahogados.

Otro factor a considerar, y que se explicó al principio de esta sección, es que el trayecto del río Ahogados al tener una granulometría en el lecho del río de mayores diámetros, así como considerando su topografía (pendiente), esta requiere de valores de mayor magnitud a los obtenidos con las ecuaciones, las cuales se generaron en condiciones completamente diferentes a las del entorno del río Ahogados, para poder acercarse a su realidad durante la calibración.

En los Anexos 11 al 18 se observan las áreas de la mancha de agua simuladas por los ocho modelos hidráulicos.

Figura 16

Áreas y valores de rugosidad del proceso de calibración en el trayecto de control del río Ahogados

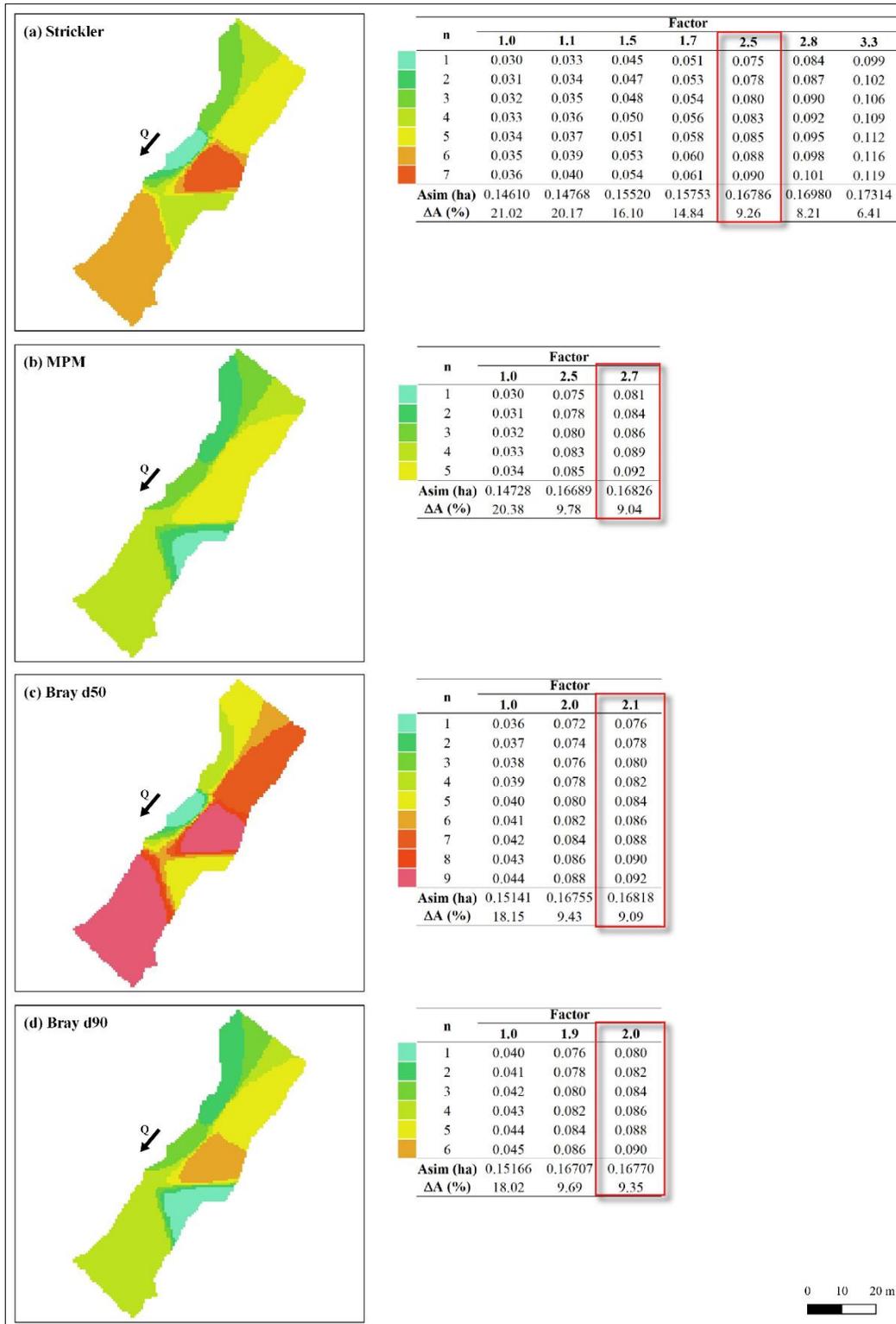
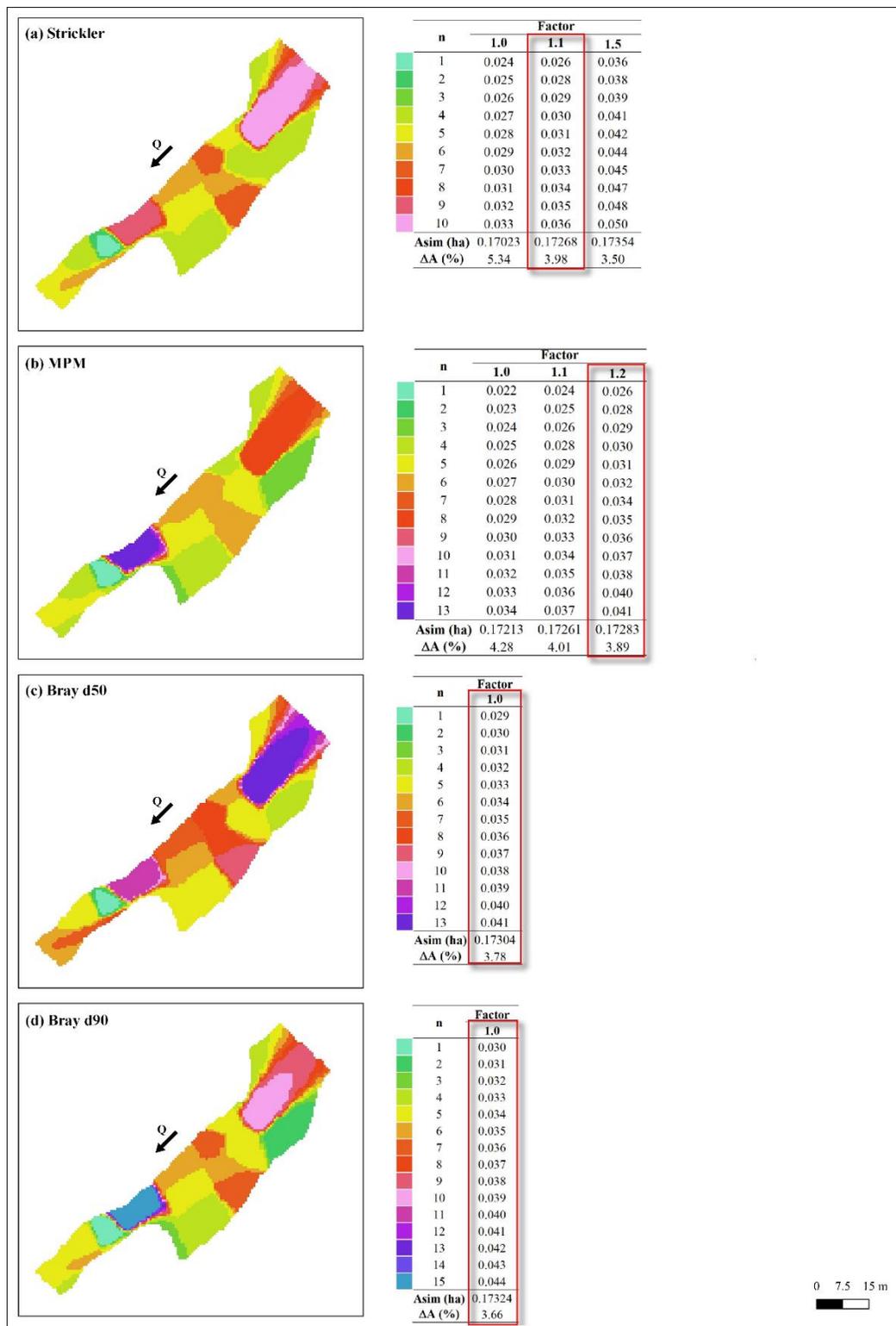


Figura 17

Áreas y valores de rugosidad del proceso de calibración en el trayecto de control del río Tempisque



4.2.3. Postproceso

En los Anexos 19 y 20 se muestran los valores de parámetros hidráulicos para el trayecto de control del río Ahogados y el río Tempisquito respectivamente, obtenidos después de la calibración de los modelos.

En términos generales, para el trayecto del río Ahogados, sus tirantes en el cauce van en un rango de 0,01 – 0,94 m, y de velocidades entre los 0,00 – 1,40 m/s, los mayores tirantes se presentan en las zonas del cauce que presentan menores elevaciones, y las velocidades más altas se presentan en la salida del cauce.

Mientras que en el trayecto del río Tempisquito, los tirantes están en un rango de 0,01 a 1,50 m y sus velocidades de 0,00 – 4,60 m/s, dichas velocidades se presentan a la salida y cercanas a esta, ya que en esta zona el cauce reduce su área hidráulica (casi la mitad con respecto a la entrada del flujo), y se generan rápidas, en esta zona el número de Froude es mayor 1.

4.4. Modificación de las ecuaciones empíricas

Los valores del diámetro real y del diámetro calculado a partir de las rugosidades simuladas, así como de la relación entre dichos diámetros, se encuentran en los Anexos del 21 al 26.

Por lo que en la Tabla 6 se muestran el valor de la nueva constante para las distintas fórmulas de los investigadores, en una nueva ecuación. Se evidencia que para el trayecto de control del río Ahogados se requiere de una constante de mayor magnitud para obtener coeficientes de rugosidad similares a los calibrados en comparación con las constantes obtenidas para el trayecto del río Tempisquito.

Por tanto, para obtener valores de rugosidades altos a partir del diámetro del material del lecho, se demandó de una constante proporcional, es por ello que la relación calculada con la Ecuación 11, el valor del diámetro calculado se encuentra en el numerador y el real en el denominador.

Tabla 6*Ecuaciones empíricas modificadas para cada trayecto de control*

Trayecto de control	Investigador	Ecuación empírica modificada
Río Ahogados	Strickler (1923)	$n = 0,1175d_{50}^{1/6}$
	Meyer-Peter and Muller (1948)	$n = 0,1025d_{90}^{1/6}$
	Bray (1979)	$n = 0,1246d_{50}^{0,179}$
	Bray (1979)	$n = 0,0989d_{90}^{0,16}$
	Strickler (1923)	$n = 0,0515d_{50}^{1/6}$
Río Tempisquito	Meyer-Peter and Muller (1948)	$n = 0,0456d_{90}^{1/6}$
	Bray (1979)	No se ocupó
	Bray (1979)	No se ocupó

De acuerdo Yen (1992) con el análisis estadístico de distintas pruebas de investigadores se ha demostrado que al variar el exponente teórico de la Ecuación 10 se influye muy poco en los resultados de la ecuación, no obstante, Ferguson (2010) indica que no siempre se debe de suponer que este valor sea igual a 1/6 en todas las circunstancias, por otro lado, concluye que la selección del diámetro de un grano diferente no afecta drásticamente los resultados.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

A partir del análisis granulométrico de los cauces, tanto el trayecto de control del río Ahogados, como el trayecto de control del río Tempisquito son ríos de lecho de material grueso, compuestos mayoritariamente por cantos rodados y grava.

De forma general, el trayecto del río Ahogados cuenta con un diámetro promedio de sus partículas de 190,74 mm (máx: 1000 mm, mín: 10 mm y SD: 182,23 mm) y en el trayecto del río Tempisquito un valor promedio de 58,37 mm (máx: 500 mm, mín: 5 mm y SD: 46,44 mm).

La presencia de arenas en los cauces no se puede separar de la caracterización de su granulometría, la cual es ocultada por la presencia de granos de mayor tamaño, siendo entre ambos trayectos, el río Ahogados el que posee los mayores diámetros.

Teniendo en cuenta su granulometría como su topografía, ambos cauces se definen como ríos de montaña. Como parte de su geomorfología, se observó en ambos cauces la presencia de barras laterales de material gravoso, que es usual en este tipo de ríos.

Se generaron los modelos hidráulicos bidimensionales calibrados de los trayectos de control se obtuvo un porcentaje de error de 9,26 % (Factor = 2,5), 9,04% (Factor = 2,7), 9,09% (Factor = 2,1) y 9,35% (Factor = 2,0) en el trayecto del río Ahogados; y de 3,98% (Factor = 1,1), 3,89% (Factor = 1,2), 3,78% (Factor = 1,0) y 3,66% (Factor = 1,0) en el trayecto del río Tempisquito, para la ecuación de Strickler, MPM, Bray d_{50} y Bray d_{90} , respectivamente. Cuyos rangos de rugosidad calibrados son en el trayecto del río Ahogados de 0,075 – 0,090, 0,081 – 0,092, 0,076 – 0,092 y 0,080 – 0,090; y en el trayecto del río Tempisquito estos rangos son de 0,026 – 0,036, 0,026 – 0,041, 0,029 – 0,041 y 0,030 – 0,044, para la ecuación de Strickler, MPM, Bray d_{50} y Bray d_{90} , respectivamente.

Se constató lo expresado por varios investigadores acerca de la subestimación del coeficiente de rugosidad generada por la ecuación de Strickler (1923) y que fue corregida mediante la calibración. Siendo las ecuaciones de Bray (1979) las que dieron los resultados más óptimos, al entregar errores de menor grado en un valor del factor más pequeño.

Se establecieron las razones por las cuales el trayecto del río Tempisquito presenta una menor porcentaje de error menor en los modelos, principalmente, por que en este trayecto se disponía de mayor cantidad de datos de campo (granulometría) que alimentaba el modelo numérico, que la obtenida para el trayecto del río Ahogados; y en segundo lugar, el trayecto del río Ahogados al tener una granulometría en el lecho del río de mayor tamaño precisa de valores de rugosidad más altos para definir la resistencia hidráulica real del flujo.

Finalmente, se determinaron las nuevas ecuaciones empíricas ajustadas para ambos trayectos de control, posibilitando el cálculo de la rugosidad ya calibrada para estos ríos, en función del tamaño del grano del lecho.

5.2. Recomendaciones

- En el caso de que se quiera realizar una análisis por debajo del sustrato superficial, si el lecho del río presenta material grueso junto con arenas, se sugiere realizar un análisis granulométrico compuesto, el cual consiste en la toma tanto volumétrica como superficial de los materiales.
- Se recomienda aumentar la cantidad de puntos de muestreo así como de partículas a muestrear (mínimo 75) en estudios de lechos de ríos, con el fin de obtener una mayor heterogeneidad del lecho que caracterice de forma más completa la morfología del sustrato, además de poder alimentar de mayor cantidad de datos de campo al modelo numérico.
- Con relación a la geomorfología del patrón de un río, se recomienda analizar trayectos de mayor longitud, así como examinar su variación temporal, de modo que se puedan observar las características que lo diferencien de un patrón de otro.
- Se recomienda considerar otros parámetros de los cuales depende la resistencia hidráulica al momento de estimar el coeficiente de rugosidad, principalmente utilizar fórmulas “*power-based*” y “*semi-logarithmic-based*”.

6. BIBLIOGRAFÍA

Referencias

- Alcántara García, D. (2014). *Topografía y sus aplicaciones*. Grupo Editorial Patria. eLibro.
- Aronica, G., Hankin, B., & Beven, K. (1998). Uncertainty and equifinality in calibrating distributed roughness coefficients in a flood propagation model with limited data. *Advances in Water Resources*, 22(4), 349–365. [https://doi.org/10.1016/S0309-1708\(98\)00017-7](https://doi.org/10.1016/S0309-1708(98)00017-7)
- Azamathulla, H. M., & Jarrett, R. D. (2013). Use of gene-expression programming to estimate Manning's roughness coefficient for high gradient streams. *Water Resources Management*, 27(3), 715–729. <https://doi.org/10.1007/s11269-012-0211-1>
- Barrantes Moreno, G. (2010). Evaluación del servicio ambiental hídrico en la cuenca del río Tempisque (Costa Rica) y su aplicación al ajuste de tarifas. *Revista Lebre*, 2, 131–160. <https://repository.usta.edu.co/handle/11634/8429>
- Bladé Castellet, E. (2005). *Modelación del flujo en lámina libre sobre cauces naturales. Análisis integrado con esquemas en volúmenes finitos en una y dos dimensiones* [Tesis de doctorado, Universitat Politècnica de Catalunya]. UPCommons <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/93706>
- Bladé, E., Cea, L., Corestein, G., Escolano, E., Puertas, J., Vázquez-Cendón, E., Dolz, J., y Coll, A. (2014). Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, 30(1), 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.rimni.2012.07.004>
- Bunte, K., & Abt, S. R. (2001). *Sampling surface and subsurface particle-size distributions in wadable gravel-and cobble-bed streams for analyses in sediment transport, hydraulics, and streambed monitoring*. United States Department of Agriculture. <https://doi.org/10.2737/RMRS-GTR-74>
- Cabrera, J. (2012). Calibración de modelos hidrológicos. *Instituto para la Mitigación de los*

Efectos del Fenómeno El Niño, Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Civil. http://www.imefen.uni.edu.pe/Temas_interes/modhidro_2.pdf

- Calvo Alvarado, J., Jiménez A, J. A., González, E., Pizarro, F., y Jiménez, A. (2008). Determinación preliminar del caudal ambiental en el río Tempisque, Costa Rica: el enfoque hidrológico con limitación de datos. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 5(13), 1–18. <https://revistas.tec.ac.cr/index.php/kuru/article/view/437>
- Carvajal Vanegas, D. (2017). *Dinámica hídrica bajo condiciones climáticas cambiantes en la subcuenca del río Tempisquito, cuenca del Tempisque, Guanacaste, Costa Rica* [Tesis de maestría, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE)]. Repositorio CATIE. <http://hdl.handle.net/11554/8705>
- Chavarría Pizarro, L., Guzmán Arias, I., Quesada Alvarado, F., y Watson Hernández, F. (2020). *Determinación del caudal ambiental requerido para río Pejibaye mediante la implementación de una metodología de cálculo hidrobiológica , considerando variables de cambio climático.* <https://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/11562>
- Chaves Quirós, A. (2020). El río Reventazón: Producción de energía y gestión ambiental. *Revista de Ciencias Ambientales*, 54(1), 200–214. <https://doi.org/10.15359/rca.54-1.12>
- Cheng, N. S. (2017). Simple modification of Manning-Strickler formula for large-scale roughness. *Journal of Hydraulic Engineering*, 143(9), 04017031. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)hy.1943-7900.0001345](https://doi.org/10.1061/(asce)hy.1943-7900.0001345)
- Church, M., & Ferguson, R. I. (2015). Morphodynamics: Rivers beyond steady state. *Water Resources Research*, 51(4), 1883–1897. <https://doi.org/10.1002/2014WR016862>
- Corredor Daza, J. G. (2015). *Implementación de modelos de elevación obtenidos mediante topografía convencional y topografía con drones para el diseño geométrico de una vía en rehabilitación sector Tuluá – Río Frío* [Tesis de grado, Universidad Militar Nueva Granada]. Repositorio Institucional UMNG. <https://repository.unimilitar.edu.co/handle/10654/7596>

- Crozzoli, L., y Batalla, R. J. (2003). Aplicación de la fotografía al análisis granulométrico de ríos con lecho de gravas. *Cuaternario y Geomorfología*, 17(3–4), 29–39. <https://repositori.udl.cat/handle/10459.1/59494>
- del Río Santana, O., Gómez Córdova, F. de J., López Carrillo, N. V., Saenz Esqueda, J. A., y Espinoza Fraire, A. T. (2020). Análisis comparativo de levantamiento topográfico tradicional y tecnología de drones. *Revista de Arquitectura e Ingeniería*, 14(2), 1–10. <https://www.redalyc.org/jatsRepo/1939/193963490001/193963490001.pdf>
- Dingman, S. L. (2009). *Fluvial hydraulics*. Oxford University Press USA - OSO. ProQuest Ebook Central.
- Elliot Munro, S. (2010). *El río y la forma: Introducción a la geomorfología fluvial*. RIL editores. eLibro.
- Ferguson, R. (2010). Time to abandon the Manning equation? *Earth Surface Processes and Landforms*, 35(15), 1873–1876. <https://doi.org/10.1002/esp.2091>
- Flores Saira, A. F. (2018). *Hidrometría* [Tesis de bachillerato, Universidad José Carlos Mariátegui]. Repositorio Institucional - UJCM. <http://repositorio.ujcm.edu.pe/handle/20.500.12819/407>
- Gallegos, J. A. (1996). Una clasificación revisada de los materiales sedimentarios. *Estudios Geológicos*, 52(3–4), 115–121. <https://doi.org/10.3989/egeol.96523-4259>
- García Martín, A. (2014). *Topografía*. Universidad Politécnica de Cartagena. eLibro.
- Garde, R. J. (2000). *River morphology*. New Age International Ltd. ProQuest Ebook Central.
- Graser, A. (2016). *Learning Qgis* (3a ed.). Packt Publishing. EBSCO.
- Guzmán Arias, I., Watson Hernández, F., y Villagra Mendoza, K. (2019). Determinación del caudal ambiental en el río Birrís, Costa Rica. *Revista Tecnología en Marcha*, 32(4), 18–27. <https://doi.org/10.18845/tm.v32i4.4786>

- Guzmán Arias, I., Watson Hernández, F., Villagra Mendoza, K., y Casasola Ramírez, R. (2017). *Modelación Hidrodinámica y morfológica del Río La Estrella, Limón*. <https://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/9154>
- Horritt, S. M. (2000). Calibration of a two-dimensional finite element flood flow model using satellite radar imagery. *Water Resources Research*, 36(11), 3279–3291. <https://doi.org/10.1029/2000WR900206>
- Ibáñez Ramírez, I. V., Andrade Álvarez, A. X., Loaiza Jiménez, C. M., Barreto Reyes, R. N., Paternina Martínez, J. M., y Buitrago Barreto, H. (2019). *Generalidades, caracterización e implementación de aeronaves remotamente tripuladas para levantamiento topográfico*. Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA). <https://repositorio.sena.edu.co/handle/11404/5188>
- Jarrett, R. D. (1984). Hydraulics of high-gradient streams. *Journal of Hydraulic Engineering*, 110(11), 1519–1539. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1984\)110:11\(1519\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1984)110:11(1519))
- Jiménez, J., Calvo, J., Pizarro, F., y González, E. (2005). *Conceptualización de caudal ambiental en Costa Rica: Determinación inicial para el río Tempisque* (Vol. 53, Número 9). UICN-Unión Mundial para la Naturaleza, Oficina Regional para Mesoamérica (UICN/ORMA). <https://www.iucn.org/es/content/conceptualizacion-de-caudal-ambiental-en-costa-rica-determinacion-incial-para-el-rio-tempisque>
- Kharuf Gutierrez, S., Hernández Santana, L., Orozco Morales, R., de la C.Aday Díaz, O., y Delgado Mora, I. (2018). Análisis de imágenes multiespectrales adquiridas con vehículos aéreos no tripulados en agricultura de precisión. *Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones*, 39(2), 79–91. EBSCO.
- Kim, J. S., Lee, C. J., Kim, W., & Kim, Y. J. (2010). Roughness coefficient and its uncertainty in gravel-bed river. *Water Science and Engineering*, 3(2), 217–232. <https://doi.org/10.3882/j.issn.1674-2370.2010.02.010>
- Mangelsdorf, J., Scheurmann, K., Weiß, F.-H., & Weiß, F.-H. (1990). *River morphology: A*

guide for geoscientists and engineers. Springer Berlin / Heidelberg. ProQuest Ebook Central.

- Martos Pardillo, A. (2018). *Estudio hidrológico, hidráulico y morfodinámico usando herramientas numéricas (Iber) de la cuenca del Barranco del Llorón (Almería)* [Tesis de grado, Universidad de Sevilla]. e-REdING. <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/91689/>
- Mateo-Vega, J. (2001). Características generales de la cuenca del río Tempisque. En J. A. Jiménez R y E. González J (Eds.), *La cuenca del río Tempisque: Perspectivas para un manejo integrado* (pp. 32–72). Organización para Estudios Tropicales. <https://rsis Ramsar.org/RISapp/files/623/documents/CR540mgt.pdf#page=36>
- Maurad Villizhañay, D. E. (2020). *Análisis de sensibilidad de la calibración de un modelo hidráulico en régimen variado impermanente del río Yanuncay* [Tesis de bachillerato, Universidad del Azuay]. Repositorio Institucional de la Universidad del Azuay. <http://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/10334>
- Millanao Balboa, C. B. (2010). *Determinación de granulometría de lecho de cauce de montaña a través del uso de fotografías digitales* [Tesis de pregrado, Universidad Austral de Chile]. https://www.academia.edu/42799938/DETERMINACION_DE_GRANULOMETRIA_DE_LECHO_DE_CAUCE_DE_MONTANA_A_TRAVES_DEL_USO_DE_FOTOGRAFIAS_DIGITALES
- National Oceanic and Atmospheric Administration [NOAA]. (2021). *What is bathymetry?* National Ocean Service website. <https://oceanservice.noaa.gov/facts/bathymetry.html>
- Ochoa Rubio, T. (2011). *Hidráulica de ríos y procesos morfológicos*. ECOE Ediciones. eLibro.
- Ochoa, S., Reyna, T., Reyna, S., García, M., Labaque, M., y Díaz, J. M. (2016). Modelación hidrodinámica unidimensional y bidimensional del tramo medio del río Ctalamochita, provincia de Córdoba. *Revista Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 3(2), 95–101. <https://revistas.unc.edu.ar/index.php/FCEFYN/article/view/11847>

- Ortega Gaucin, D. (2012). *Hidrometría básica aplicada a la operación de distritos y unidades de riego*. Instituto del Agua del Estado de Nuevo León (IANL). <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4047.4963>
- Ortega Pérez, E., y Martín Ramos, B. (2016). *Sistemas de información geográfica: teoría y práctica*. Dextra Editorial. eLibro.
- Pedraza Santos, A. (2019). *Análisis comparativo del levantamiento topográfico tradicional y el levantamiento topográfico con RPAS en la Huaca Aznapuquio, Los Olivos - 2019* [Tesis de bachillerato, Universidad César Vallejo]. Repositorio de la Universidad César Vallejo. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/36819>
- Pinos, J., & Timbe, L. (2019). Performance assessment of two-dimensional hydraulic models for generation of flood inundation maps in mountain river basins. *Water Science and Engineering*, 12(1), 11–18. <https://doi.org/10.1016/j.wse.2019.03.001>
- Powell, D. M. (2014). Flow resistance in gravel-bed rivers: Progress in research. *Earth-Science Reviews*, 136, 301–338. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.06.001>
- Rios Varillas, D. I. (2014). *Investigación de la disipación de energía en el modelo hidráulico del Proyecto Alto Piura* [Tesis de bachillerato, Universidad de Piura]. Repositorio de la Universidad de Piura. <https://pirhua.udep.edu.pe/handle/11042/2191>
- Santos Clavero, D. (2014). *Fotogrametría usando plataforma aérea UAV (Unmanned Aerial Vehicle)* [Tesis de maestría, Universitat Politècnica de Catalunya]. UPCCommons. <https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/24892>
- Santos Preciados, J. M. (2004). *Sistemas de información geográfica*. UNED - Universidad Nacional de Educación a Distancia. eLibro.
- Sanz-Ramos, M., Bladé Castellet, E., Palau Ibars, A., Querol Vericat, D., y Ramos-Fuertes, A. (2019). IberHABITAT: Evaluación de la idoneidad del hábitat físico y del hábitat potencial útil para peces. Aplicación en el río Eume. *Ribagua*, 6(2), 158–167.

<https://doi.org/10.1080/23863781.2019.1664273>

Schwind, M. (2016). *Comparing and characterizing three-dimensional point clouds derived by structure from motion photogrammetry* (Vol. 147) [Texas A&M University]. <https://tamucc-ir.tdl.org/handle/1969.6/1137>

Suziedelyte Visockiene, J., Brucas, D., & Ragauskas, U. (2014). Comparison of UAV images processing softwares. *Journal of Measurements in Engineering*, 2(2), 111–121. <https://www.jvejournals.com/article/15152#references>

Timbe Castro, L., y Willems, P. (2011). Desempeño de modelos hidráulicos 1D y 2D para la simulación de inundaciones. *Maskana*, 2(1), 91–98. <https://doi.org/10.18537/mskn.02.01.06>

Villón Béjar, M. (2004). *Hidrología*. Editorial Tecnológica de Costa Rica.

Villón Béjar, M. (2008). *Hidráulica de canales* (2a ed.). Editorial Tecnológica de Costa Rica.

Wentworth, C. K. (1922). A scale of grade and class terms for clastic sediments. *The Journal of Geology*, 30(5), 377–392. JSTOR.

Wong, M., & Parker, G. (2006). Reanalysis and correction of bed-load relation of Meyer-Peter and Müller using their own database. *Journal of Hydraulic Engineering*, 132(11), 1159–1168. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2006\)132:11\(1159\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2006)132:11(1159))

Yen, B. C. (1992). *Channel flow resistance: Centennial of Manning's formula*. Water Resources Publications. <https://bit.ly/2YGik9z>

7. ANEXOS

Anexo 1

Manual técnico del molinete SEBA Universalfügel F1

SEBA Hydrometrie GmbH
Gewerbestr. 61 A
87600 Kaufbeuren
GERMANY



Standardgleichung

SEBA Universalfügel F1

zur Verwendung mit
Stange 20 mm

Schaufeldurchmesser 125 mm Steigung 300 mm

0,00	< n <	1,98	$V = 0,0193 + 0,3117 * n$
1,98	< n <	10,27	$V = 0,0019 + 0,3205 * n$
10,27	< n <	15	$V = -0,1409 + 0,3344 * n$

$n = [1 / \text{sec}]$ $V = [\text{m} / \text{sec}]$

Anexo 2

Medidas de longitudes y anchos en el trayecto del cauce del río Ahogados

	Longitud (m)	Ancho (m)
	88,32	26,44
	88,78	22,52
	89,21	23,65
	89,61	17,64
	89,98	18,38
	88,32	22,53
		18,35
		18,11
		18,60
Promedio	89,18	20,69

Anexo 3

Medidas de longitudes y anchos en el trayecto del cauce del río Tempisquito

	Longitud (m)	Ancho (m)
	100,60	20,11
	100,59	24,22
	69,48	19,44
	54,33	20,63
	100,63	22,53
		23,62
		9,68
		10,01
		9,56
Promedio	85,12	17,75

Anexo 4

Cálculo de pendientes en el trayecto del cauce del río Ahogados

Prueba	X1	X2	ΔX	Y1	Y2	ΔY	S
1	0	89,524	89,524	999,780	998,386	-1,394	-1,56
2	0	88,311	88,311	999,900	999,200	-0,700	-0,79
3	0	89,877	89,877	999,700	998,208	-1,492	-1,66
4	0	89,426	89,426	999,780	998,400	-1,380	-1,54
5	0	89,638	89,638	999,799	998,396	-1,403	-1,57
						Promedio	-1,42

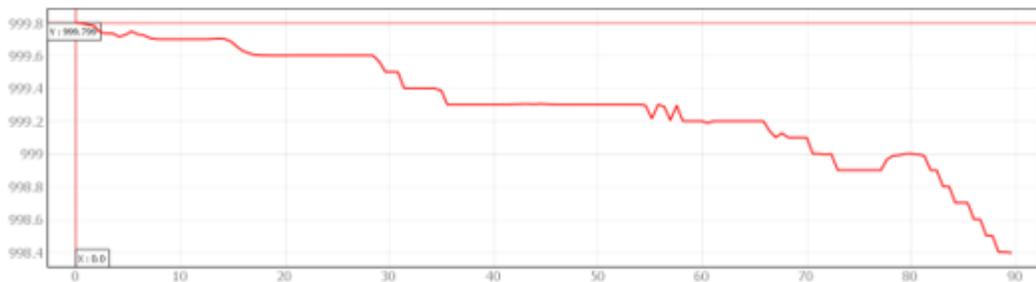
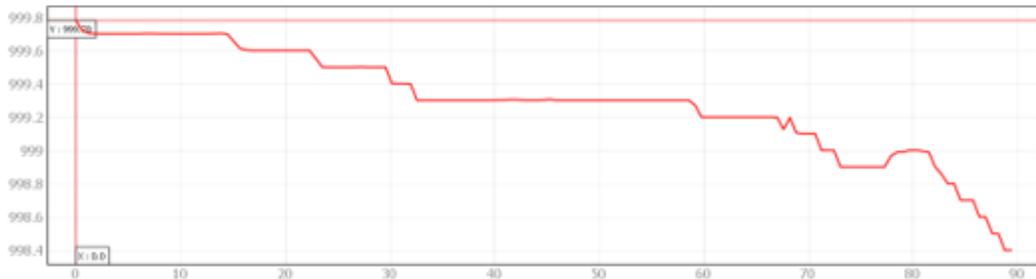
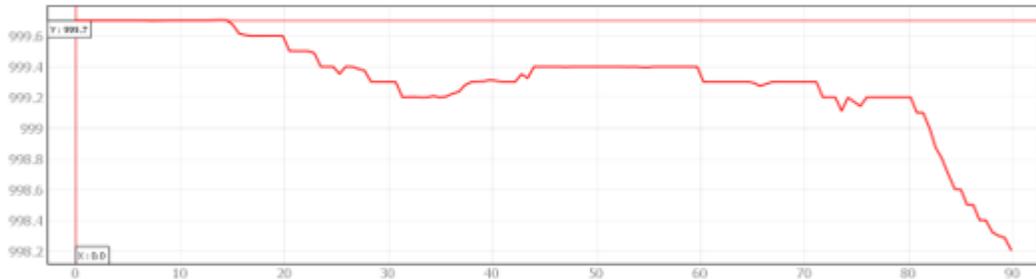
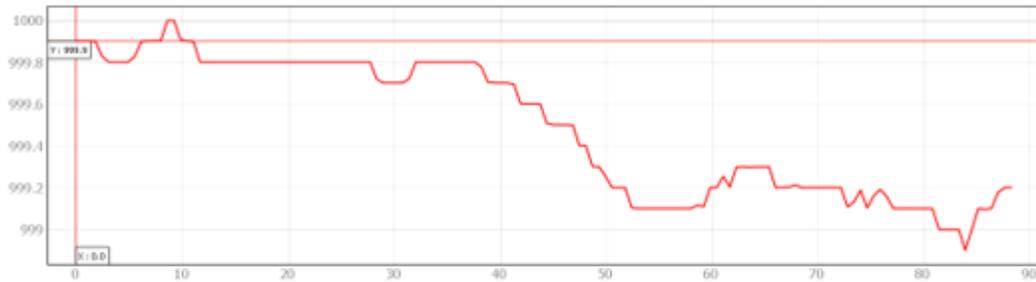
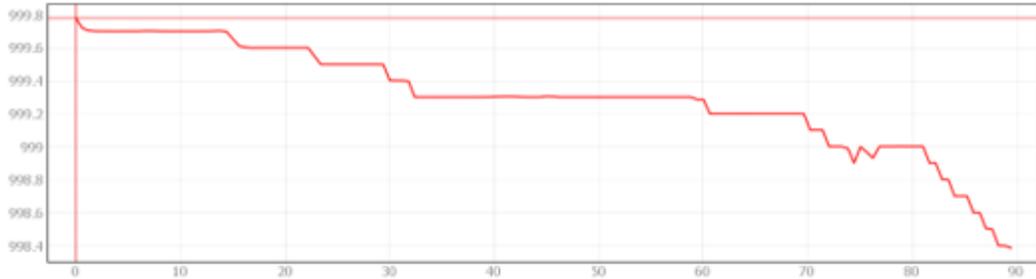
Anexo 5

Cálculo de pendientes en el trayecto del cauce del río Tempisquito

Prueba	X1	X2	ΔX	Y1	Y2	ΔY	S
1	0	100,256	100,256	999,993	998,900	-1,093	-1,09
2	0	100,024	100,024	999,543	998,900	-0,643	-0,64
3	0	100,102	100,102	999,796	998,966	-0,830	-0,83
4	0	100,071	100,071	999,543	999,198	-0,345	-0,34
5	0	99,903	99,903	999,800	999,001	-0,799	-0,80
						Promedio	-0,74

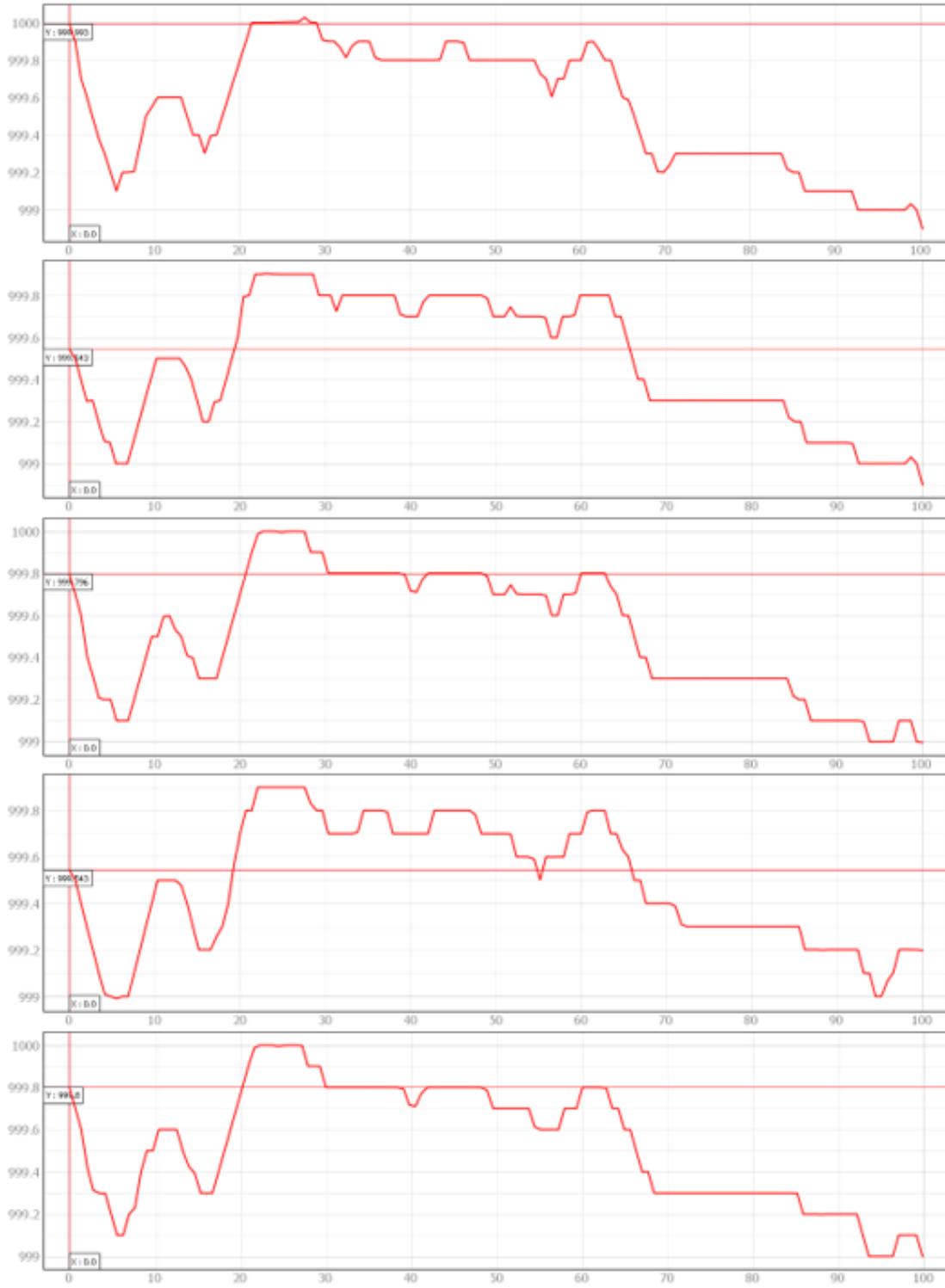
Anexo 6

Gráficos de las pendientes en el trayecto del cauce del río Ahogados



Anexo 7

Gráficos de las pendientes en el trayecto del cauce del río Tempisquito



Anexo 8

Datos en bruto del muestreo granulométrico del trayecto de control del río Ahogados

N	Pto. Muestreo	Diámetro (cm)
1	AH1	12
2	AH1	18
3	AH1	10.5
4	AH1	6
5	AH1	31
6	AH1	9
7	AH1	6
8	AH1	29
9	AH1	5
10	AH1	64
11	AH1	12
12	AH1	10
13	AH1	11.5
14	AH1	95
15	AH1	11.5
16	AH1	8
17	AH1	6.5
18	AH1	3
19	AH1	9.5
20	AH1	7
21	AH1	17
22	AH1	6
23	AH1	6
24	AH1	12
25	AH1	8
26	AH1	33
27	AH1	15
28	AH1	6.5
29	AH1	12.5
30	AH1	8
31	AH1	48
32	AH1	25
33	AH1	20
34	AH1	21
35	AH1	17
36	AH1	2
37	AH1	3
38	AH1	4.5
39	AH1	3
40	AH1	7
41	AH1	14
42	AH1	11
43	AH1	14
44	AH1	10
45	AH1	25
46	AH1	7
47	AH1	7
48	AH1	3
49	AH1	6
50	AH1	5
1	AH2	37
2	AH2	10
3	AH2	18
4	AH2	17
5	AH2	12
6	AH2	50
7	AH2	40

N	Pto. Muestreo	Diámetro (cm)
8	AH2	13
9	AH2	68
10	AH2	8
11	AH2	50
12	AH2	7
13	AH2	20
14	AH2	13
15	AH2	80
16	AH2	5
17	AH2	10
18	AH2	14
19	AH2	8
20	AH2	25
21	AH2	87
22	AH2	35
23	AH2	4
24	AH2	40
25	AH2	38
26	AH2	43
27	AH2	32
28	AH2	14
29	AH2	26
30	AH2	18
31	AH2	14
32	AH2	25
33	AH2	39
34	AH2	10
35	AH2	13
36	AH2	12
37	AH2	2
38	AH2	3
39	AH2	35
40	AH2	8
41	AH2	26
42	AH2	9
43	AH2	6
44	AH2	18
45	AH2	54
46	AH2	12
47	AH2	11
48	AH2	10
49	AH2	4
50	AH2	81
1	AH3	63
2	AH3	4.5
3	AH3	4
4	AH3	18
5	AH3	21
6	AH3	34
7	AH3	12
8	AH3	3.5
9	AH3	4
10	AH3	60
11	AH3	22
12	AH3	18
13	AH3	20
14	AH3	35

N	Pto. Muestreo	Diámetro (cm)
15	AH3	35
16	AH3	40
17	AH3	20
18	AH3	16
19	AH3	6
20	AH3	2.5
21	AH3	2
22	AH3	5
23	AH3	14
24	AH3	4.5
25	AH3	5.5
26	AH3	13
27	AH3	76
28	AH3	13
29	AH3	4
30	AH3	10
31	AH3	5
32	AH3	3
33	AH3	2
34	AH3	9.5
35	AH3	4.5
36	AH3	18
37	AH3	14
38	AH3	17
39	AH3	6
40	AH3	2
41	AH3	4.5
42	AH3	2
43	AH3	3
44	AH3	4.5
45	AH3	6.5
46	AH3	11.5
47	AH3	5
48	AH3	4
49	AH3	6
50	AH3	2.5
1	AH4	47
2	AH4	56
3	AH4	10
4	AH4	38
5	AH4	48
6	AH4	20
7	AH4	25
8	AH4	24
9	AH4	12
10	AH4	30
11	AH4	10
12	AH4	15
13	AH4	16
14	AH4	10
15	AH4	60
16	AH4	33
17	AH4	20
18	AH4	19
19	AH4	32
20	AH4	87
21	AH4	13

N	Pto. Muestreo	Diámetro (cm)
22	AH4	34
23	AH4	23
24	AH4	20
25	AH4	6
26	AH4	25
27	AH4	40
28	AH4	34
29	AH4	30
30	AH4	8
31	AH4	10
32	AH4	1
33	AH4	2
34	AH4	4
35	AH4	25
36	AH4	9
37	AH4	8
38	AH4	10
39	AH4	25
40	AH4	7
41	AH4	56
42	AH4	8
43	AH4	100
44	AH4	100
45	AH4	7
46	AH4	6
47	AH4	10
48	AH4	5
49	AH4	31
50	AH4	8
1	AH5	46
2	AH5	20
3	AH5	59
4	AH5	21
5	AH5	17
6	AH5	24
7	AH5	29
8	AH5	43
9	AH5	16
10	AH5	23
11	AH5	59
12	AH5	22
13	AH5	20
14	AH5	11

N	Pto. Muestreo	Diámetro (cm)
15	AH5	5
16	AH5	7
17	AH5	5
18	AH5	74
19	AH5	24
20	AH5	7
21	AH5	4.5
22	AH5	41
23	AH5	20
24	AH5	10
25	AH5	7
26	AH5	5.5
27	AH5	15
28	AH5	4.5
29	AH5	12
30	AH5	30
31	AH5	27
32	AH5	11
33	AH5	4
34	AH5	5.5
35	AH5	5.5
36	AH5	29
37	AH5	42
38	AH5	11
39	AH5	35
40	AH5	17
41	AH5	25
42	AH5	18
43	AH5	24
44	AH5	27
45	AH5	18
46	AH5	6.5
47	AH5	4.5
48	AH5	14
49	AH5	27
50	AH5	9
1	AH6	25.4
2	AH6	11.5
3	AH6	9.5
4	AH6	17.4
5	AH6	8.2
6	AH6	13.5
7	AH6	5.6

N	Pto. Muestreo	Diámetro (cm)
8	AH6	14.1
9	AH6	19.3
10	AH6	4.9
11	AH6	7.1
12	AH6	15.2
13	AH6	10.4
14	AH6	10.7
15	AH6	7.1
16	AH6	29.2
17	AH6	14.8
18	AH6	9.2
19	AH6	11.3
20	AH6	16.7
21	AH6	12.6
22	AH6	8.6
23	AH6	9.8
24	AH6	9.3
25	AH6	13.7
26	AH6	8.5
27	AH6	54.4
28	AH6	8.2
29	AH6	6.8
30	AH6	8.2
31	AH6	15.8
32	AH6	4.5
33	AH6	3.8
34	AH6	4.6
35	AH6	19.2
36	AH6	35.7
37	AH6	21.7
38	AH6	12.1
39	AH6	21.6
40	AH6	3.8
41	AH6	26.4
42	AH6	12.6
43	AH6	6.4
44	AH6	30.9
45	AH6	17.8
46	AH6	3.9
47	AH6	7.1
48	AH6	6.2
49	AH6	23
50	AH6	34.4

Anexo 9

Datos en bruto del muestreo granulométrico del trayecto de control del río Tempisque

N	Pto. Muestreo	Diámetro (cm)
1	TQ1	3.6
2	TQ1	3.9
3	TQ1	3.4
4	TQ1	9.5
5	TQ1	2.8
6	TQ1	3.2
7	TQ1	3.1
8	TQ1	2.3
9	TQ1	7.9
10	TQ1	4.2
11	TQ1	4.2
12	TQ1	5.1
13	TQ1	5.2
14	TQ1	5.4
15	TQ1	6.9
16	TQ1	3
17	TQ1	4
18	TQ1	7.1
19	TQ1	7.8
20	TQ1	3.1
21	TQ1	2.8
22	TQ1	3.7
23	TQ1	7.4
24	TQ1	5.9
25	TQ1	6
26	TQ1	3.9
27	TQ1	5.2
28	TQ1	1.8
29	TQ1	4
30	TQ1	5
31	TQ1	4.1
32	TQ1	1.5
33	TQ1	5.7
34	TQ1	1.9
35	TQ1	3.6
36	TQ1	3.3
37	TQ1	2
38	TQ1	4.9
39	TQ1	9.2
40	TQ1	7.1
41	TQ1	6.6
42	TQ1	15.5
43	TQ1	3.3
44	TQ1	2.6
45	TQ1	4.1
46	TQ1	2.6
47	TQ1	8.1
48	TQ1	5.9
49	TQ1	6.4
50	TQ1	2.6
51	TQ1	3.4
52	TQ1	7.5
53	TQ1	4.6
54	TQ1	2.6
55	TQ1	2.7
56	TQ1	7.2
57	TQ1	5.5

N	Pto. Muestreo	Diámetro (cm)
58	TQ1	3.3
59	TQ1	7.7
60	TQ1	1.4
61	TQ1	1.5
62	TQ1	3.7
63	TQ1	2.8
64	TQ1	4.5
65	TQ1	3
66	TQ1	2.1
67	TQ1	2.7
68	TQ1	4.8
69	TQ1	8.1
70	TQ1	6.4
71	TQ1	6.1
72	TQ1	6.7
73	TQ1	5.6
74	TQ1	2.6
75	TQ1	5.8
76	TQ1	6.9
77	TQ1	3.3
78	TQ1	3.3
79	TQ1	4.7
80	TQ1	3.9
81	TQ1	3.2
1	TQ2	8
2	TQ2	10
3	TQ2	11
4	TQ2	7
5	TQ2	6
6	TQ2	6
7	TQ2	12
8	TQ2	14
9	TQ2	18
10	TQ2	11
11	TQ2	15
12	TQ2	2
13	TQ2	4
14	TQ2	6
15	TQ2	6
16	TQ2	8
17	TQ2	7
18	TQ2	9
19	TQ2	11
20	TQ2	5
21	TQ2	7
22	TQ2	6
23	TQ2	15
24	TQ2	9
25	TQ2	8
26	TQ2	6
27	TQ2	5
28	TQ2	4
29	TQ2	5
30	TQ2	3
31	TQ2	5
32	TQ2	4
33	TQ2	10

N	Pto. Muestreo	Diámetro (cm)
34	TQ2	5
35	TQ2	3
36	TQ2	8
37	TQ2	3
38	TQ2	6
39	TQ2	7
40	TQ2	7
41	TQ2	10
42	TQ2	5
43	TQ2	4
44	TQ2	2
45	TQ2	1.5
46	TQ2	1
47	TQ2	1
48	TQ2	6
49	TQ2	3
50	TQ2	4
51	TQ2	5
52	TQ2	2
53	TQ2	3
54	TQ2	6
55	TQ2	5
56	TQ2	15
57	TQ2	8
58	TQ2	8
59	TQ2	3
60	TQ2	7
61	TQ2	7
62	TQ2	3.5
63	TQ2	3
64	TQ2	2
65	TQ2	2
66	TQ2	4
67	TQ2	3
68	TQ2	6
69	TQ2	2
70	TQ2	2
71	TQ2	1.5
72	TQ2	5
73	TQ2	7
74	TQ2	3
75	TQ2	3
76	TQ2	7
77	TQ2	1
78	TQ2	1.5
1	TQ3	8
2	TQ3	16
3	TQ3	7
4	TQ3	8
5	TQ3	6
6	TQ3	6
7	TQ3	10
8	TQ3	9
9	TQ3	5
10	TQ3	5
11	TQ3	2
12	TQ3	3.5

N	Pto. Muestreo	Diámetro (cm)
13	TQ3	3
14	TQ3	2
15	TQ3	16
16	TQ3	3.5
17	TQ3	4
18	TQ3	7
19	TQ3	11
20	TQ3	8
21	TQ3	11
22	TQ3	9
23	TQ3	5
24	TQ3	4
25	TQ3	4
26	TQ3	8
27	TQ3	5
28	TQ3	10
29	TQ3	4.5
30	TQ3	3
31	TQ3	2
32	TQ3	2.5
33	TQ3	4
34	TQ3	4
35	TQ3	1
36	TQ3	4
37	TQ3	3
38	TQ3	2
39	TQ3	2.5
40	TQ3	2
41	TQ3	2
42	TQ3	1
43	TQ3	4
44	TQ3	2
45	TQ3	8
46	TQ3	5
47	TQ3	2
48	TQ3	8
49	TQ3	1
50	TQ3	4
51	TQ3	3
52	TQ3	2.5
53	TQ3	2
54	TQ3	3
55	TQ3	3.5
56	TQ3	3
57	TQ3	1.5
58	TQ3	1
59	TQ3	5
60	TQ3	3.5
61	TQ3	3
62	TQ3	3
63	TQ3	3.5
64	TQ3	4
65	TQ3	1
66	TQ3	6
67	TQ3	3
68	TQ3	3
69	TQ3	1

N	Pto. Muestreo	Diámetro (cm)
70	TQ3	5
71	TQ3	5
72	TQ3	2
73	TQ3	3.5
74	TQ3	4.5
75	TQ3	4.5
76	TQ3	2
77	TQ3	1
78	TQ3	1.5
79	TQ3	8
80	TQ3	16
81	TQ3	7
1	TQ4	3.2
2	TQ4	3.5
3	TQ4	3.9
4	TQ4	4.2
5	TQ4	9.5
6	TQ4	11
7	TQ4	9.3
8	TQ4	11.4
9	TQ4	4.4
10	TQ4	2.8
11	TQ4	1.7
12	TQ4	5
13	TQ4	4.1
14	TQ4	2.1
15	TQ4	4.2
16	TQ4	5
17	TQ4	5
18	TQ4	3.8
19	TQ4	3.3
20	TQ4	3.3
21	TQ4	6.3
22	TQ4	5.5
23	TQ4	3.9
24	TQ4	4.1
25	TQ4	3.1
26	TQ4	4.2
27	TQ4	5
28	TQ4	7.1
29	TQ4	5.1
30	TQ4	3.9
31	TQ4	4
32	TQ4	8.3
33	TQ4	5.6
34	TQ4	5.3
35	TQ4	5
36	TQ4	7.1
37	TQ4	5.2
38	TQ4	3.7
39	TQ4	2.2
40	TQ4	1.7
41	TQ4	2.8
42	TQ4	1
43	TQ4	2.8
44	TQ4	3.1
45	TQ4	6

N	Pto. Muestreo	Diámetro (cm)
46	TQ4	3.7
47	TQ4	14
48	TQ4	7.8
49	TQ4	5.2
50	TQ4	5.9
51	TQ4	3.4
52	TQ4	4.7
53	TQ4	4.1
54	TQ4	9
55	TQ4	6.3
56	TQ4	5.8
57	TQ4	2.2
58	TQ4	6.6
59	TQ4	5
60	TQ4	7
61	TQ4	3.3
62	TQ4	4.5
63	TQ4	5.1
64	TQ4	5.2
65	TQ4	13.8
66	TQ4	3.4
67	TQ4	4.7
68	TQ4	3.9
69	TQ4	4.7
70	TQ4	2.1
71	TQ4	6.2
72	TQ4	2.9
73	TQ4	10.7
74	TQ4	4.5
75	TQ4	5.4
76	TQ4	4.4
77	TQ4	4.9
78	TQ4	5.1
79	TQ4	5.2
80	TQ4	8.2
81	TQ4	3.9
1	TQ5	11
2	TQ5	6
3	TQ5	8
4	TQ5	4
5	TQ5	3.5
6	TQ5	4
7	TQ5	3
8	TQ5	1
9	TQ5	1
10	TQ5	0.5
11	TQ5	1
12	TQ5	3.5
13	TQ5	4.5
14	TQ5	2
15	TQ5	1.5
16	TQ5	3.5
17	TQ5	4.5
18	TQ5	12
19	TQ5	5
20	TQ5	6
21	TQ5	7.5

N	Pto. Muestreo	Diámetro (cm)
22	TQ5	9
23	TQ5	10
24	TQ5	9
25	TQ5	9
26	TQ5	7
27	TQ5	8
28	TQ5	3
29	TQ5	5
30	TQ5	6
31	TQ5	2.5
32	TQ5	6.5
33	TQ5	5
34	TQ5	4
35	TQ5	6
36	TQ5	6.5
37	TQ5	6
38	TQ5	9
39	TQ5	8
40	TQ5	7
41	TQ5	4.5
42	TQ5	4
43	TQ5	3
44	TQ5	2.5
45	TQ5	9
46	TQ5	7
47	TQ5	5
48	TQ5	4
49	TQ5	2
50	TQ5	3
51	TQ5	3.5
52	TQ5	7
53	TQ5	5
54	TQ5	2
55	TQ5	5
56	TQ5	10
57	TQ5	6
58	TQ5	8
59	TQ5	9
60	TQ5	7
61	TQ5	5
62	TQ5	5
63	TQ5	9
64	TQ5	7
65	TQ5	4
66	TQ5	5.5
67	TQ5	14
68	TQ5	9
69	TQ5	5
70	TQ5	4.5
71	TQ5	7
72	TQ5	5
73	TQ5	7
74	TQ5	7.5
75	TQ5	9
76	TQ5	14
77	TQ5	6
78	TQ5	6

N	Pto. Muestreo	Diámetro (cm)
79	TQ5	8
80	TQ5	3
81	TQ5	6
1	TQ6	3
2	TQ6	5
3	TQ6	2.5
4	TQ6	2
5	TQ6	1
6	TQ6	4
7	TQ6	2
8	TQ6	2.5
9	TQ6	3
10	TQ6	3.5
11	TQ6	3
12	TQ6	3.5
13	TQ6	3
14	TQ6	2.5
15	TQ6	2
16	TQ6	3
17	TQ6	2.5
18	TQ6	1.5
19	TQ6	1
20	TQ6	0.5
21	TQ6	4.5
22	TQ6	5
23	TQ6	6
24	TQ6	4
25	TQ6	3
26	TQ6	2
27	TQ6	3
28	TQ6	2
29	TQ6	2.5
30	TQ6	1
31	TQ6	4.5
32	TQ6	3.5
33	TQ6	1.5
34	TQ6	2
35	TQ6	1
36	TQ6	1.5
37	TQ6	2
38	TQ6	3.5
39	TQ6	5
40	TQ6	4
41	TQ6	6
42	TQ6	4
43	TQ6	3
44	TQ6	4.5
45	TQ6	1
46	TQ6	1
47	TQ6	1.5
48	TQ6	1
49	TQ6	1
50	TQ6	1
51	TQ6	1
52	TQ6	2.5
53	TQ6	1
54	TQ6	1

N	Pto. Muestreo	Diámetro (cm)
55	TQ6	1.5
56	TQ6	1
57	TQ6	1
58	TQ6	1.5
59	TQ6	1
60	TQ6	1.5
61	TQ6	1.5
62	TQ6	1.5
63	TQ6	1
64	TQ6	2.5
65	TQ6	2
66	TQ6	2.5
67	TQ6	3.5
68	TQ6	2.5
69	TQ6	1.5
70	TQ6	1
71	TQ6	1.5
72	TQ6	3.5
73	TQ6	2
74	TQ6	3
75	TQ6	2
76	TQ6	3.5
77	TQ6	1
78	TQ6	2.5
79	TQ6	2
80	TQ6	1.5
81	TQ6	2
1	TQ7	3.9
2	TQ7	2.3
3	TQ7	2.6
4	TQ7	8.5
5	TQ7	5.5
6	TQ7	1.8
7	TQ7	2.1
8	TQ7	3.9
9	TQ7	2.1
10	TQ7	2.8
11	TQ7	4.5
12	TQ7	6.1
13	TQ7	1.4
14	TQ7	6.1
15	TQ7	4.1
16	TQ7	10.6
17	TQ7	4.6
18	TQ7	3.7
19	TQ7	4.6
20	TQ7	2.6
21	TQ7	3
22	TQ7	8.6
23	TQ7	5.2
24	TQ7	3.3
25	TQ7	2.8
26	TQ7	3.1
27	TQ7	0.8
28	TQ7	5.8
29	TQ7	5.6
30	TQ7	8.7

N	Pto. Muestreo	Diámetro (cm)
31	TQ7	2.2
32	TQ7	3.6
33	TQ7	5.3
34	TQ7	2.1
35	TQ7	3.3
36	TQ7	2.7
37	TQ7	3.8
38	TQ7	2.6
39	TQ7	6.9
40	TQ7	4.3
41	TQ7	1.1
42	TQ7	3.4
43	TQ7	1.5
44	TQ7	1.9
45	TQ7	1.6
46	TQ7	4.3
47	TQ7	1.2
48	TQ7	4.8
49	TQ7	3.4
50	TQ7	3.2
51	TQ7	2.7
52	TQ7	4.6
53	TQ7	8.4
54	TQ7	3.3
55	TQ7	7.3
56	TQ7	3.5
57	TQ7	6.4
58	TQ7	5.5
59	TQ7	4.1
60	TQ7	5.9
61	TQ7	2.1
62	TQ7	2.3
63	TQ7	3.8
64	TQ7	4.3
65	TQ7	2.7
66	TQ7	4.1
67	TQ7	5.3
68	TQ7	1.4
69	TQ7	8.4
70	TQ7	10.3
71	TQ7	4.1
72	TQ7	5.8
73	TQ7	1.8
74	TQ7	2.3
75	TQ7	2.8
76	TQ7	2.9
77	TQ7	1.3
78	TQ7	1.9
79	TQ7	1.6
80	TQ7	2.7
81	TQ7	5.8
1	TQ8	5
2	TQ8	7
3	TQ8	50
4	TQ8	10
5	TQ8	11
6	TQ8	10

N	Pto. Muestreo	Diámetro (cm)
7	TQ8	14
8	TQ8	10
9	TQ8	11
10	TQ8	9
11	TQ8	9
12	TQ8	9.5
13	TQ8	50
14	TQ8	50
1	TQ9	8
2	TQ9	10
3	TQ9	1
4	TQ9	3
5	TQ9	5
6	TQ9	4
7	TQ9	1
8	TQ9	1
9	TQ9	1
10	TQ9	10
11	TQ9	5
12	TQ9	9
13	TQ9	11
14	TQ9	6
15	TQ9	4
16	TQ9	3
17	TQ9	10
18	TQ9	2
19	TQ9	4
20	TQ9	4
21	TQ9	3
22	TQ9	3
23	TQ9	3
24	TQ9	4
25	TQ9	3
26	TQ9	1.5
27	TQ9	4
28	TQ9	3
29	TQ9	4
30	TQ9	2
31	TQ9	2
32	TQ9	1.5
33	TQ9	1.5
34	TQ9	2
35	TQ9	1.5
36	TQ9	1.5
37	TQ9	6
38	TQ9	3
39	TQ9	9
40	TQ9	7
41	TQ9	8
42	TQ9	7
43	TQ9	1.5
44	TQ9	4.5
45	TQ9	5
46	TQ9	8
47	TQ9	3
48	TQ9	5
49	TQ9	8.5

N	Pto. Muestreo	Diámetro (cm)
50	TQ9	7
51	TQ9	18
52	TQ9	7
53	TQ9	1
54	TQ9	5
55	TQ9	4
56	TQ9	6
57	TQ9	4.5
58	TQ9	5.5
59	TQ9	8
60	TQ9	8
61	TQ9	7
62	TQ9	2
63	TQ9	1.5
64	TQ9	1
65	TQ9	4.5
66	TQ9	7.5
67	TQ9	8
68	TQ9	3
69	TQ9	1.5
70	TQ9	5.5
71	TQ9	1.5
72	TQ9	1.5
73	TQ9	25
74	TQ9	2
75	TQ9	3
76	TQ9	1.5
77	TQ9	1
78	TQ9	1
79	TQ9	1.5
1	TQ10	19
2	TQ10	9
3	TQ10	5
4	TQ10	8
5	TQ10	4
6	TQ10	2
7	TQ10	5
8	TQ10	4.5
9	TQ10	3.5
10	TQ10	5
11	TQ10	8
12	TQ10	7
13	TQ10	7
14	TQ10	16
15	TQ10	7
16	TQ10	4
17	TQ10	5
18	TQ10	7
19	TQ10	7
20	TQ10	6
21	TQ10	9
22	TQ10	10
23	TQ10	7
24	TQ10	10
25	TQ10	1
26	TQ10	1
27	TQ10	2

N	Pto. Muestreo	Diámetro (cm)
28	TQ10	2.5
29	TQ10	1.5
30	TQ10	0.5
31	TQ10	0.5
32	TQ10	0.5
33	TQ10	16
34	TQ10	10
35	TQ10	15
36	TQ10	12
37	TQ10	13
38	TQ10	13
39	TQ10	10
40	TQ10	6
41	TQ10	7
42	TQ10	6
43	TQ10	8
44	TQ10	1.5
45	TQ10	0.5
46	TQ10	5
47	TQ10	4
48	TQ10	2
49	TQ10	9
50	TQ10	3
51	TQ10	0.5
52	TQ10	0.5
53	TQ10	1
54	TQ10	7
55	TQ10	5
56	TQ10	4.5
57	TQ10	3.5
58	TQ10	2
59	TQ10	1.5
60	TQ10	1.5
61	TQ10	1
62	TQ10	1
63	TQ10	0.5
64	TQ10	6.5
65	TQ10	10
66	TQ10	7
67	TQ10	6
68	TQ10	1
69	TQ10	1
70	TQ10	2
71	TQ10	6
72	TQ10	1
73	TQ10	1.5
74	TQ10	1.5
75	TQ10	1.5
76	TQ10	1.5
77	TQ10	3
78	TQ10	3
79	TQ10	3
1	TQ11	7
2	TQ11	2
3	TQ11	4.5
4	TQ11	5.5
5	TQ11	4.5

N	Pto. Muestreo	Diámetro (cm)
6	TQ11	3
7	TQ11	2.5
8	TQ11	2
9	TQ11	1.5
10	TQ11	1.5
11	TQ11	6
12	TQ11	5.5
13	TQ11	4
14	TQ11	9
15	TQ11	4
16	TQ11	6
17	TQ11	13
18	TQ11	8.5
19	TQ11	8
20	TQ11	4.5
21	TQ11	5.5
22	TQ11	6.5
23	TQ11	7
24	TQ11	4
25	TQ11	4.5
26	TQ11	9
27	TQ11	3
28	TQ11	8
29	TQ11	4
30	TQ11	7
31	TQ11	14
32	TQ11	6.5
33	TQ11	8
34	TQ11	16.5
35	TQ11	7.5
36	TQ11	6
37	TQ11	15
38	TQ11	8
39	TQ11	4
40	TQ11	6
41	TQ11	5.5
42	TQ11	16.5
43	TQ11	9.5
44	TQ11	6
45	TQ11	3
46	TQ11	3
47	TQ11	3.5
48	TQ11	4
49	TQ11	4
50	TQ11	8
51	TQ11	7
52	TQ11	7
53	TQ11	4.5
54	TQ11	5.5
55	TQ11	9.5
56	TQ11	27
57	TQ11	19
58	TQ11	9.5
59	TQ11	5
60	TQ11	5
61	TQ11	4.5
62	TQ11	11

N	Pto. Muestreo	Diámetro (cm)
63	TQ11	5.5
64	TQ11	3.5
65	TQ11	8
66	TQ11	6
67	TQ11	6.5
68	TQ11	8.5
69	TQ11	5
70	TQ11	4.5
71	TQ11	4.5
72	TQ11	4.5
73	TQ11	3.5
74	TQ11	5
75	TQ11	3.5
76	TQ11	2.5
77	TQ11	14
78	TQ11	6.5
1	TQ12	18
2	TQ12	4
3	TQ12	3.5
4	TQ12	9
5	TQ12	15
6	TQ12	6.5
7	TQ12	10
8	TQ12	9.5
9	TQ12	10.5
10	TQ12	8
11	TQ12	8
12	TQ12	12
13	TQ12	6.5
14	TQ12	5
15	TQ12	12
16	TQ12	5.5
17	TQ12	17
18	TQ12	7.5
19	TQ12	5.5
20	TQ12	14
21	TQ12	8.5
22	TQ12	4
23	TQ12	4
24	TQ12	4.5
25	TQ12	5
26	TQ12	4
27	TQ12	4.5
28	TQ12	2
29	TQ12	5
30	TQ12	12
31	TQ12	7
32	TQ12	6.5
33	TQ12	7
34	TQ12	7
35	TQ12	8
36	TQ12	6
37	TQ12	10
38	TQ12	4
39	TQ12	9
40	TQ12	5.5
41	TQ12	10

N	Pto. Muestreo	Diámetro (cm)
42	TQ12	25
43	TQ12	7
44	TQ12	13
45	TQ12	19
46	TQ12	9
47	TQ12	5
48	TQ12	5.5
49	TQ12	7
50	TQ12	11
51	TQ12	9
52	TQ12	3.5
53	TQ12	7
54	TQ12	7.5
55	TQ12	9
56	TQ12	5.5
57	TQ12	7
58	TQ12	7
59	TQ12	6.5
60	TQ12	13
1	TQ13	12
2	TQ13	7
3	TQ13	7
4	TQ13	6
5	TQ13	5
6	TQ13	4
7	TQ13	5
8	TQ13	5
9	TQ13	1
10	TQ13	2
11	TQ13	1.5
12	TQ13	10
13	TQ13	6
14	TQ13	3
15	TQ13	4
16	TQ13	2
17	TQ13	5
18	TQ13	3
19	TQ13	7
20	TQ13	3
21	TQ13	9
22	TQ13	12
23	TQ13	8
24	TQ13	7
25	TQ13	6
26	TQ13	9
27	TQ13	11
28	TQ13	12
29	TQ13	10
30	TQ13	9
31	TQ13	11
32	TQ13	16
33	TQ13	8
34	TQ13	10
35	TQ13	10
36	TQ13	8
37	TQ13	5
38	TQ13	3

N	Pto. Muestreo	Diámetro (cm)
39	TQ13	1
40	TQ13	0.5
41	TQ13	0.5
42	TQ13	0.5
43	TQ13	0.5
44	TQ13	10.5
45	TQ13	3
46	TQ13	6
47	TQ13	3
48	TQ13	2
49	TQ13	1.5
50	TQ13	12
51	TQ13	9
52	TQ13	10
53	TQ13	4
54	TQ13	7
55	TQ13	6
56	TQ13	8
57	TQ13	6
58	TQ13	6
59	TQ13	4.5
60	TQ13	2
61	TQ13	1.5
62	TQ13	4.5
63	TQ13	2.5
64	TQ13	1.5
65	TQ13	3
66	TQ13	2.5
67	TQ13	2
68	TQ13	5
69	TQ13	9
70	TQ13	12
71	TQ13	9
72	TQ13	25
73	TQ13	20
74	TQ13	11
75	TQ13	10
76	TQ13	8
77	TQ13	17
78	TQ13	10
1	TQ14	13
2	TQ14	6
3	TQ14	7.5
4	TQ14	15
5	TQ14	6.5
6	TQ14	15
7	TQ14	5
8	TQ14	4
9	TQ14	6
10	TQ14	5
11	TQ14	7.5
12	TQ14	15
13	TQ14	7.5
14	TQ14	5
15	TQ14	7.5
16	TQ14	4
17	TQ14	7

N	Pto. Muestreo	Diámetro (cm)
18	TQ14	2
19	TQ14	6.5
20	TQ14	6.5
21	TQ14	9
22	TQ14	7
23	TQ14	4.5
24	TQ14	5
25	TQ14	6.5
26	TQ14	8.5
27	TQ14	8.5
28	TQ14	9
29	TQ14	9
30	TQ14	7.5
31	TQ14	6
32	TQ14	14.5
33	TQ14	6
34	TQ14	9
35	TQ14	12
36	TQ14	10
37	TQ14	13.5
38	TQ14	19
39	TQ14	9
40	TQ14	8
41	TQ14	8.5
42	TQ14	10
43	TQ14	4.5
44	TQ14	7
45	TQ14	17.5
46	TQ14	6.5
47	TQ14	6
48	TQ14	5.5
49	TQ14	11
50	TQ14	5.5
51	TQ14	2.5
52	TQ14	3.5
53	TQ14	4
54	TQ14	4.5
55	TQ14	9
56	TQ14	5
57	TQ14	4.5
58	TQ14	4
59	TQ14	6.5
60	TQ14	4.5
61	TQ14	2.5
62	TQ14	4
63	TQ14	2.5
64	TQ14	5
65	TQ14	16
66	TQ14	5.5
67	TQ14	6
68	TQ14	6.5
69	TQ14	8
70	TQ14	5
71	TQ14	6.5
72	TQ14	5.5
73	TQ14	6.5
74	TQ14	6

N	Pto. Muestreo	Diámetro (cm)
75	TQ14	7
76	TQ14	5.5
77	TQ14	4
78	TQ14	4.5
79	TQ14	4.5
80	TQ14	5.5
1	TQ15	9.3
2	TQ15	3.1
3	TQ15	2.6
4	TQ15	1.7
5	TQ15	3.3
6	TQ15	2.4
7	TQ15	2.9
8	TQ15	3.2
9	TQ15	4
10	TQ15	1.7
11	TQ15	4
12	TQ15	2.7
13	TQ15	4.7
14	TQ15	3.4
15	TQ15	2.3
16	TQ15	8.1
17	TQ15	4.2
18	TQ15	9.3
19	TQ15	3.7
20	TQ15	1.6
21	TQ15	7.7
22	TQ15	4.6
23	TQ15	5.9
24	TQ15	11.8
25	TQ15	3.5
26	TQ15	2.6
27	TQ15	2.9
28	TQ15	4.2
29	TQ15	2.4
30	TQ15	7.3
31	TQ15	6.3
32	TQ15	9.3
33	TQ15	7.6
34	TQ15	3.2
35	TQ15	6.1
36	TQ15	2.9
37	TQ15	12
38	TQ15	6.4
39	TQ15	4.5
1	TQ16	3.4
2	TQ16	4.6
3	TQ16	12.8
4	TQ16	10.3
5	TQ16	3.3
6	TQ16	8.1
7	TQ16	3
8	TQ16	3.8
9	TQ16	4.7
10	TQ16	5.6
11	TQ16	5.2
12	TQ16	9.9

N	Pto. Muestreo	Diámetro (cm)
13	TQ16	5.4
14	TQ16	6.7
15	TQ16	3.5
16	TQ16	7
17	TQ16	5.2
18	TQ16	2.2
19	TQ16	3.8
20	TQ16	3
21	TQ16	5.3
22	TQ16	5
23	TQ16	7.9
24	TQ16	4.5
25	TQ16	4.4
26	TQ16	2.1
27	TQ16	2.1
28	TQ16	4.6
29	TQ16	3.7
30	TQ16	3.5
31	TQ16	9.8
32	TQ16	4.6
33	TQ16	1.5
34	TQ16	3.3
35	TQ16	3.6
36	TQ16	6
37	TQ16	12.4
38	TQ16	3.2
39	TQ16	5.1
40	TQ16	6.9
41	TQ16	4.2
42	TQ16	9.3
43	TQ16	6.4
44	TQ16	3.5
45	TQ16	2.6
46	TQ16	3.5
47	TQ16	4.4
48	TQ16	2.5
49	TQ16	7.7
50	TQ16	8.2
51	TQ16	9.4
52	TQ16	2.9
53	TQ16	6.8
54	TQ16	11.6
55	TQ16	6.7
56	TQ16	7
57	TQ16	4.4
58	TQ16	2.4
59	TQ16	2.3
60	TQ16	4.2
61	TQ16	3.7
62	TQ16	3
63	TQ16	5.4
64	TQ16	5.2
65	TQ16	6.1
66	TQ16	4.7
67	TQ16	3
68	TQ16	5.8
69	TQ16	5.9

N	Pto. Muestreo	Diámetro (cm)
70	TQ16	5.4
71	TQ16	6.8
72	TQ16	8
73	TQ16	8.9
74	TQ16	4.4
75	TQ16	5
76	TQ16	2.2
77	TQ16	7.1
78	TQ16	1.5
79	TQ16	2.7
80	TQ16	2.4
1	TQ17	2.6
2	TQ17	4.8
3	TQ17	2.6
4	TQ17	3.3
5	TQ17	7.4
6	TQ17	4.3
7	TQ17	3.3
8	TQ17	7
9	TQ17	5.3
10	TQ17	3
11	TQ17	4.7
12	TQ17	2.8
13	TQ17	4.9
14	TQ17	1.3
15	TQ17	5.7
16	TQ17	6
17	TQ17	4.3
18	TQ17	2.6
19	TQ17	3.8
20	TQ17	1
21	TQ17	3.4
22	TQ17	5.8
23	TQ17	3.2
24	TQ17	2.4
25	TQ17	4.3
26	TQ17	3.5
27	TQ17	5.1
28	TQ17	4.2
29	TQ17	2.2
30	TQ17	2
31	TQ17	4.3
32	TQ17	5.2
33	TQ17	3.1
34	TQ17	4.2
35	TQ17	3.3
36	TQ17	2.3
37	TQ17	4.3
38	TQ17	2.5
39	TQ17	4.7
40	TQ17	5.1
41	TQ17	3.5
42	TQ17	2.4
43	TQ17	0.9
44	TQ17	1.1
45	TQ17	2.7
46	TQ17	5.3

N	Pto. Muestreo	Diámetro (cm)
47	TQ17	4.8
48	TQ17	4.2
49	TQ17	5.3
50	TQ17	5.6
51	TQ17	4.1
52	TQ17	3.9
53	TQ17	2.2
54	TQ17	1.4
55	TQ17	2
56	TQ17	1.4
57	TQ17	1.4
58	TQ17	2.7
59	TQ17	1.5
60	TQ17	2.4
61	TQ17	2.8
62	TQ17	4.7
63	TQ17	4.4
64	TQ17	1.6
65	TQ17	3.1
66	TQ17	6.4
67	TQ17	3.8
68	TQ17	4.2
69	TQ17	5.3
70	TQ17	1.3
71	TQ17	6.9
72	TQ17	3.1
73	TQ17	4.3
74	TQ17	1.5
75	TQ17	3
76	TQ17	7.8
77	TQ17	1.2
78	TQ17	2.6
1	TQ18	12
2	TQ18	19
3	TQ18	7
4	TQ18	13
5	TQ18	13
6	TQ18	45
7	TQ18	16
8	TQ18	22
9	TQ18	15
10	TQ18	24
11	TQ18	9
12	TQ18	20
13	TQ18	26
14	TQ18	14
15	TQ18	11.5
16	TQ18	18
17	TQ18	18
18	TQ18	22
19	TQ18	11.5
20	TQ18	12
21	TQ18	16
22	TQ18	14
23	TQ18	16
24	TQ18	16
25	TQ18	14

N	Pto. Muestreo	Diámetro (cm)
26	TQ18	6
27	TQ18	13
28	TQ18	10
29	TQ18	14
30	TQ18	22
31	TQ18	11
32	TQ18	12
33	TQ18	15
34	TQ18	18
35	TQ18	10
36	TQ18	9
37	TQ18	23
38	TQ18	9.5
39	TQ18	21
40	TQ18	15
41	TQ18	9
42	TQ18	21
43	TQ18	10
44	TQ18	20
45	TQ18	14
46	TQ18	18
47	TQ18	11
48	TQ18	8.5
49	TQ18	8
50	TQ18	13
51	TQ18	15.5
52	TQ18	18
53	TQ18	17
54	TQ18	6
55	TQ18	3
56	TQ18	9
57	TQ18	16
58	TQ18	10
59	TQ18	11
60	TQ18	14
61	TQ18	13
62	TQ18	10
63	TQ18	14
64	TQ18	6.5
65	TQ18	13
66	TQ18	11
67	TQ18	5
68	TQ18	14
69	TQ18	6
70	TQ18	13
71	TQ18	12
72	TQ18	3
73	TQ18	6
74	TQ18	11
75	TQ18	13
76	TQ18	4
77	TQ18	9
78	TQ18	2.5
1	TQ19	1.4
2	TQ19	2.4
3	TQ19	2.8
4	TQ19	4.5

N	Pto. Muestreo	Diámetro (cm)
5	TQ19	11.9
6	TQ19	9.3
7	TQ19	6.7
8	TQ19	2.7
9	TQ19	8.7
10	TQ19	1.4
11	TQ19	6.3
12	TQ19	3.5
13	TQ19	4.8
14	TQ19	3.6
15	TQ19	6.6
16	TQ19	5.4
17	TQ19	2.7
18	TQ19	2.4
19	TQ19	1.9
20	TQ19	4.2
21	TQ19	4.3
22	TQ19	4.6
23	TQ19	4.9
24	TQ19	2.4
25	TQ19	3.3
26	TQ19	7.5
27	TQ19	2.9
28	TQ19	4.8
29	TQ19	2.3
30	TQ19	3.6
31	TQ19	12.2
32	TQ19	2.3
33	TQ19	1.2
34	TQ19	0.7
35	TQ19	2.4
36	TQ19	1.8
37	TQ19	2.5
38	TQ19	3.5
39	TQ19	3.3
40	TQ19	2.4
41	TQ19	3.4
42	TQ19	9.2
43	TQ19	6.3
44	TQ19	5.2
45	TQ19	7.1
46	TQ19	3.5
47	TQ19	2.2
48	TQ19	1.9
49	TQ19	2.4
50	TQ19	2
51	TQ19	3.8
52	TQ19	2.4
53	TQ19	2.1
54	TQ19	3.9
55	TQ19	5.2
56	TQ19	6.3
57	TQ19	3.5
58	TQ19	3.8
59	TQ19	13.7
60	TQ19	2.6
61	TQ19	2.7

N	Pto. Muestreo	Diámetro (cm)
62	TQ19	3
63	TQ19	7.6
64	TQ19	7.6
65	TQ19	3.7
66	TQ19	3.1
67	TQ19	3.8

N	Pto. Muestreo	Diámetro (cm)
68	TQ19	4.9
69	TQ19	15.1
70	TQ19	5.4
71	TQ19	5.1
72	TQ19	4.4
73	TQ19	7.7

N	Pto. Muestreo	Diámetro (cm)
74	TQ19	3.8
75	TQ19	8.9
76	TQ19	3.1
77	TQ19	7.2
78	TQ19	2.6

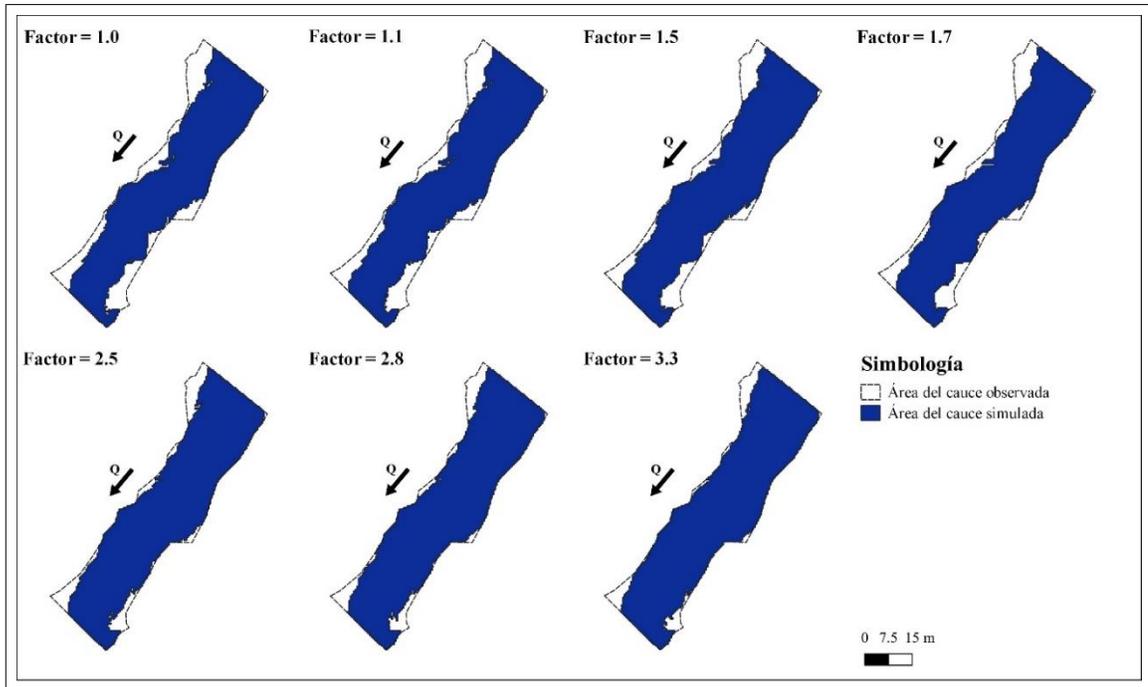
Anexo 10

Aforo del trayecto de control del río Ahogados

Tramo	Distancia	Y (m)	T (s)	Rev	n	v (m/s)	V _{media} (m/s)	A (m ²)	Q (m ³ /s)
-	-	0,35	30,00	0,00	0,00	0,019	-	-	-
1-2	1,00	0,87	30,00	25,00	0,83	0,279	0,149	0,610	0,091
2-3	1,00	0,71	30,00	25,00	0,83	0,279	0,279	0,790	0,220
3-4	1,00	0,66	30,00	24,00	0,80	0,269	0,274	0,685	0,188
4-5	1,00	0,70	30,00	22,00	0,73	0,248	0,258	0,680	0,176
5-6	1,00	0,69	30,00	25,00	0,83	0,279	0,263	0,695	0,183
6-7	1,00	0,70	30,00	22,00	0,73	0,248	0,263	0,695	0,183
7-8	1,00	0,63	30,00	29,00	0,97	0,321	0,284	0,665	0,189
8-9	1,00	0,49	30,00	25,00	0,83	0,279	0,300	0,560	0,168
9-10	1,00	0,55	30,00	29,00	0,97	0,321	0,300	0,520	0,156
10-11	1,00	0,60	30,00	33,00	1,10	0,362	0,341	0,575	0,196
11-12	1,00	0,42	30,00	36,00	1,20	0,393	0,378	0,510	0,193
12-13	1,00	0,53	30,00	18,00	0,60	0,206	0,300	0,475	0,142
13-14	1,00	0,44	30,00	22,00	0,73	0,248	0,227	0,485	0,110
14-15	1,00	0,36	30,00	29,00	0,97	0,321	0,284	0,400	0,114
15-16	1,00	0,38	30,00	18,00	0,60	0,206	0,263	0,370	0,097
16-17	1,00	0,44	30,00	22,00	0,73	0,248	0,227	0,410	0,093
17-18	1,00	0,40	30,00	18,00	0,60	0,206	0,227	0,420	0,095
18-19	1,00	0,53	30,00	22,00	0,73	0,248	0,227	0,465	0,106
19-20	1,00	0,51	30,00	15,00	0,50	0,175	0,212	0,520	0,110
20-21	1,00	0,52	30,00	18,00	0,60	0,206	0,191	0,515	0,098
21-22	1,00	0,56	30,00	11,00	0,37	0,134	0,170	0,540	0,092
22-23	1,00	0,60	30,00	15,00	0,50	0,175	0,154	0,580	0,090
23-24	1,00	0,40	30,00	10,00	0,33	0,123	0,149	0,500	0,075
24-25	1,00	0,24	30,00	11,00	0,37	0,134	0,128	0,320	0,041
25-26	1,00	0,26	30,00	10,00	0,33	0,123	0,128	0,250	0,032
26-27	1,00	0,30	30,00	0,00	0,00	0,019	0,071	0,280	0,020
27-28	1,00	0,20	30,00	0,00	0,00	0,019	0,019	0,250	0,005
								Total	3,2626

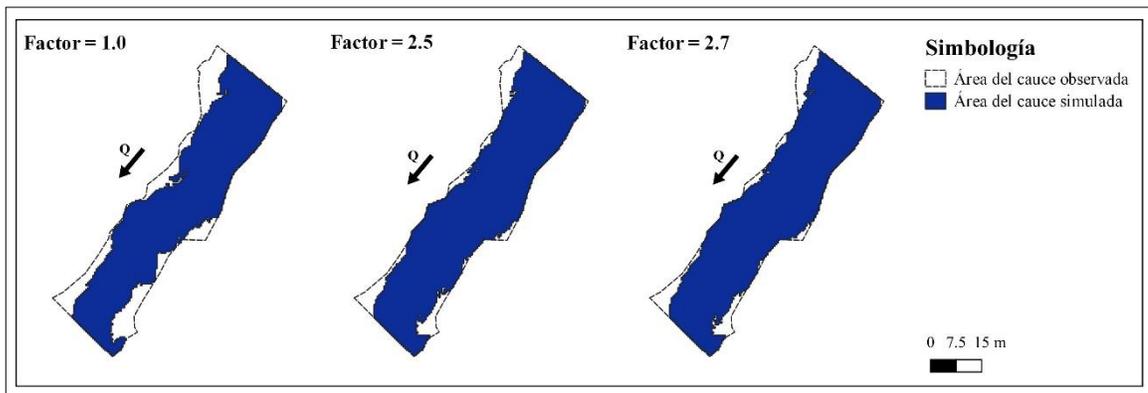
Anexo 11

Áreas simuladas para el modelo de la ecuación de Strickler en el trayecto de control del río Ahogados



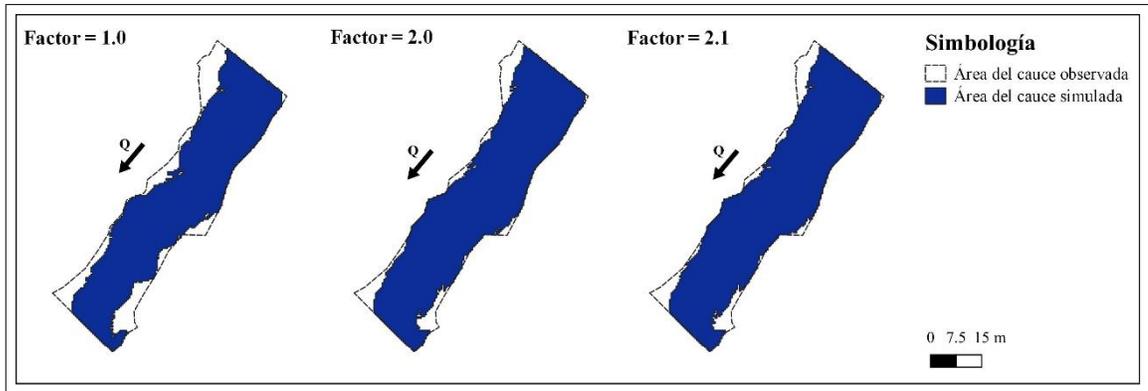
Anexo 12

Áreas simuladas para el modelo de la ecuación de MPM en el trayecto de control del río Ahogados



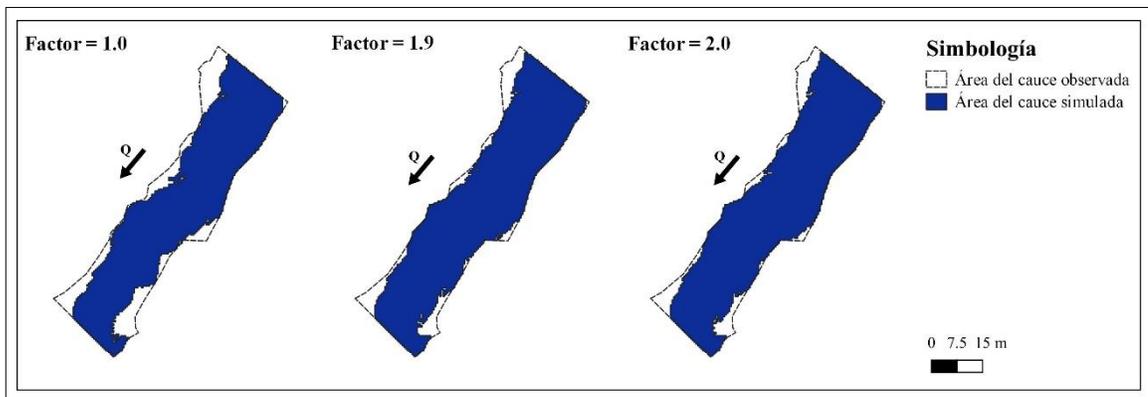
Anexo 13

Áreas simuladas para el modelo de la ecuación de Bray d_{50} en el trayecto de control del río Ahogados



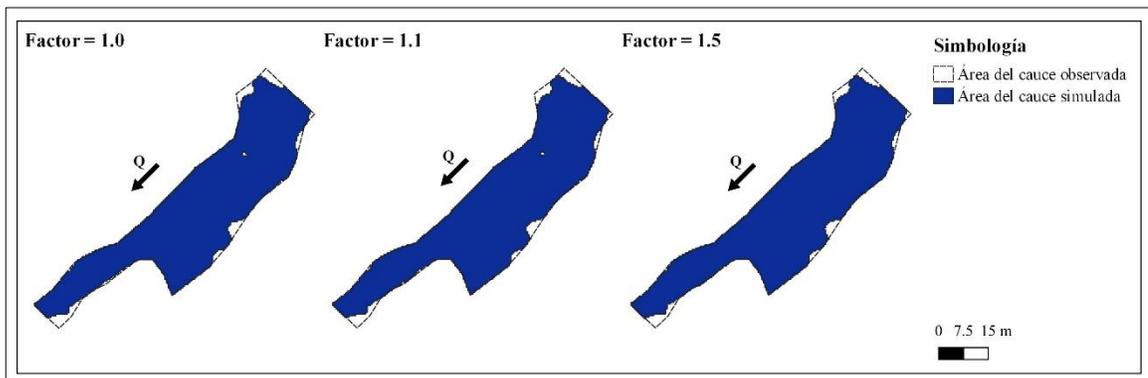
Anexo 14

Áreas simuladas para el modelo de la ecuación de Bray d_{90} en el trayecto de control del río Ahogados



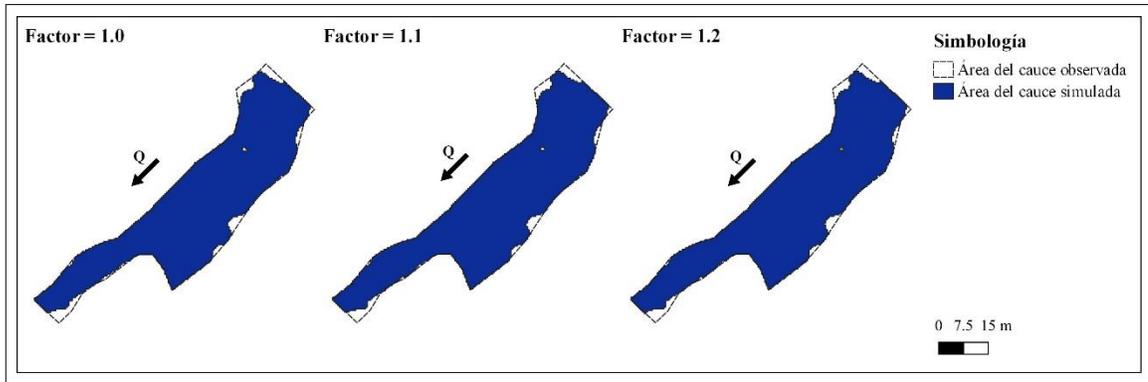
Anexo 15

Áreas simuladas para el modelo de la ecuación de Strickler en el trayecto de control del río Tempisquito



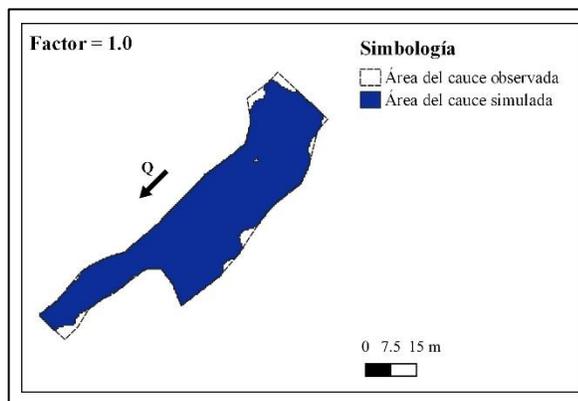
Anexo 16

Áreas simuladas para el modelo de la ecuación de MPM en el trayecto de control del río Tempisquito



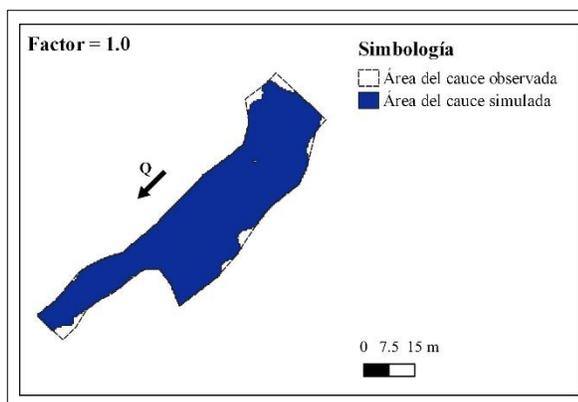
Anexo 17

Áreas simuladas para el modelo de la ecuación de Bray d_{50} en el trayecto de control del río Tempisquito



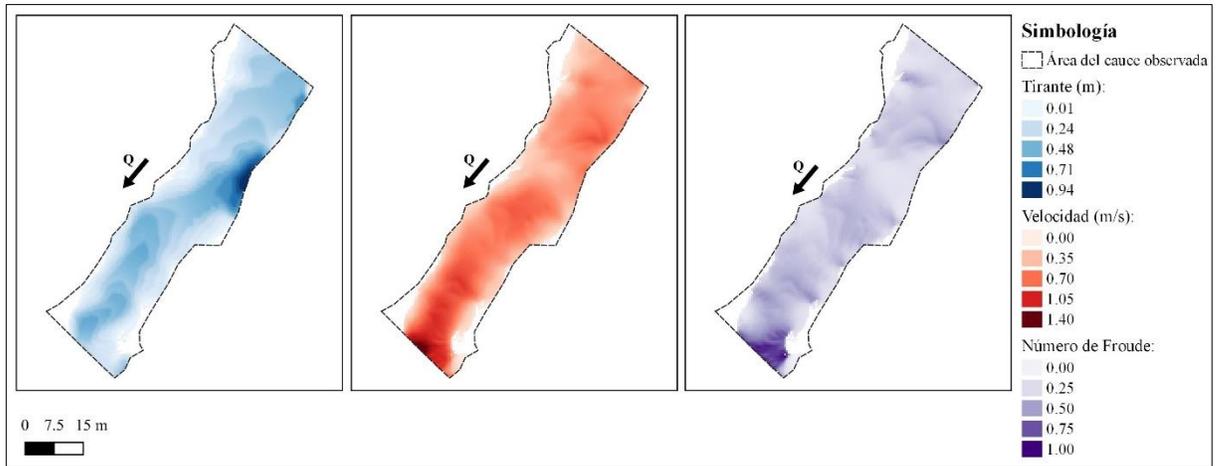
Anexo 18

Áreas simuladas para el modelo de la ecuación de Bray d_{90} en el trayecto de control del río Tempisquito



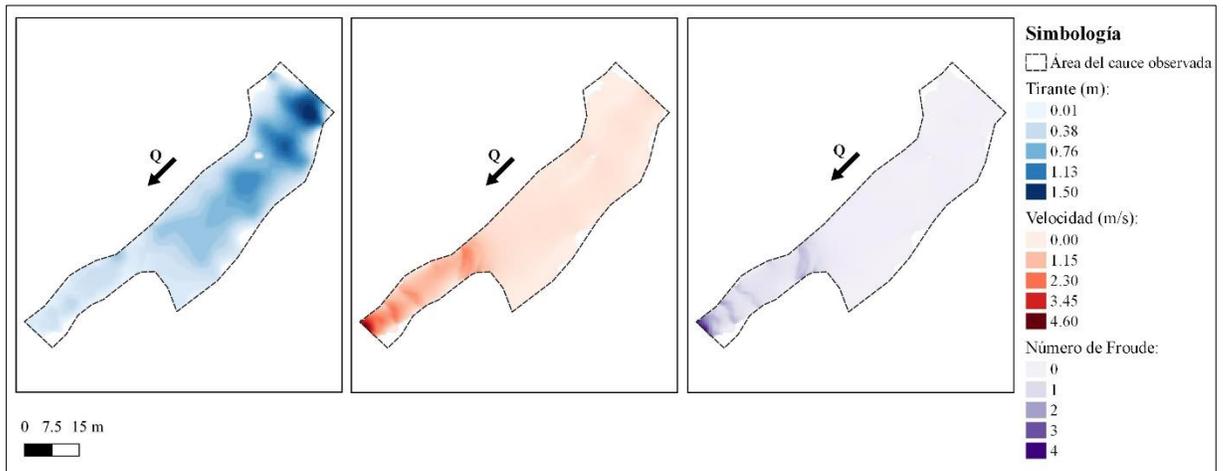
Anexo 19

Valores de parámetros hidráulicos en los modelos del trayecto de control del río Ahogados



Anexo 20

Valores de parámetros hidráulicos en los modelos del trayecto de control del río Tempisquito



Anexo 21

Cálculos para la modificación de la ecuación de Strickler en el trayecto de control del río Ahogados

d₅₀ real (m)	Nº Área	n simulado	d₅₀ calculado (m)	R
0,06250	1	0,075	16,511	264,180
0,08352	2	0,078	20,101	240,676
0,10121	3	0,080	24,319	240,286
0,11408	4	0,083	29,251	256,405
0,15384	5	0,085	34,989	227,435
0,18000	6	0,088	41,635	231,307
0,20000	7	0,090	49,302	246,512
Promedio				243,829

Anexo 22

Cálculos para la modificación de la ecuación de MPM en el trayecto de control del río Ahogados

D₉₀ real (m)	Nº Área	n simulado	d₉₀ calculado (m)	R
0,26680	1	0,081	93,801	351,578
0,29200	2	0,084	114,196	391,082
0,35001	3	0,086	138,160	394,733
0,42090	4	0,089	166,175	394,805
0,50400	5	0,092	198,772	394,388
Promedio				385,317

Anexo 23

Cálculos para la modificación de la ecuación de Bray d₅₀ en el trayecto de control del río Ahogados

d₅₀ real (m)	Nº Área	n simulado	d₅₀ calculado (m)	R
0,06252	1	0,076	3,883	62,117
0,06741	2	0,078	4,526	67,131
0,08252	3	0,080	5,253	63,656
0,10001	4	0,082	6,073	60,721
0,10803	5	0,084	6,996	64,756
0,12640	6	0,086	8,030	63,530
0,14430	7	0,088	9,188	63,672
0,16117	8	0,090	10,478	65,017
0,19999	9	0,092	11,914	59,575
Promedio				63,353

Anexo 24

Cálculos para la modificación de la ecuación de Bray d_{90} en el trayecto de control del río Ahogados

D₉₀ real (m)	N° Área	n simulado	d₉₀ calculado (m)	R
0,26683	1	0,080	20,092	75,299
0,30055	2	0,082	23,445	78,007
0,35000	3	0,084	27,256	77,874
0,42065	4	0,086	31,574	75,060
0,49335	5	0,088	36,453	73,889
0,56000	6	0,090	41,950	74,911
			Promedio	75,840

Anexo 25

Cálculos para la modificación de la ecuación de Strickler en el trayecto de control del río Tempisquito

d₅₀ real (m)	N° Área	n simulado	d₅₀ calculado (m)	R
0,02000	1	0,026	0,031	1,570
0,02059	2	0,028	0,040	1,948
0,02832	3	0,029	0,050	1,793
0,04000	4	0,030	0,063	1,592
0,04650	5	0,031	0,079	1,703
0,06000	6	0,032	0,097	1,629
0,06500	7	0,033	0,120	1,843
0,08156	8	0,034	0,146	1,788
0,10000	9	0,035	0,176	1,765
0,13000	10	0,036	0,212	1,633
			Promedio	1,726

Anexo 26

Cálculos para la modificación de la ecuación de MPM en el trayecto de control del río Tempisquito

D₉₀ real (m)	N° Área	n simulado	d₉₀ calculado (m)	R
0,04000	1	0,026	0,112	2,811
0,04429	2	0,028	0,147	3,315
0,05630	3	0,029	0,190	3,366
0,09000	4	0,030	0,242	2,690
0,09300	5	0,031	0,306	3,294
0,12000	6	0,032	0,384	3,202
0,16123	7	0,034	0,478	2,964
0,21000	8	0,035	0,590	2,809
0,26732	9	0,036	0,723	2,704
0,28953	10	0,037	0,880	3,040
0,34901	11	0,038	1,065	3,051
0,46705	12	0,040	1,281	2,742
0,50000	13	0,041	1,532	3,064
			Promedio	3,004