



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil

**CURVAS DE CALIBRACIÓN DE CAUDALES DE LAS ESTACIONES HIDROLÓGICAS
DE LA CUENCA COATÁN A LA CUENCA MADRE VIEJA, CORRESPONDIENTE
A LA VERTIENTE DEL PACÍFICO PARA EL PERIODO 2010-2013**

Walfred Colindres Estrada

Asesorado por la Inga. Karla Giovanna Judith Pérez Loarca

Guatemala, mayo de 2016

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**CURVAS DE CALIBRACIÓN DE CAUDALES DE LAS ESTACIONES HIDROLÓGICAS
DE LA CUENCA COATÁN A LA CUENCA MADRE VIEJA, CORRESPONDIENTE
A LA VERTIENTE DEL PACÍFICO PARA EL PERIODO 2010-2013**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

WALFRED COLINDRES ESTRADA

ASESORADO POR LA INGA. KARLA GIOVANNA JUDITH PÉREZ LOARCA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

GUATEMALA, MAYO DE 2016

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Raúl Eduardo Ticún Córdova
VOCAL V	Br. Henry Fernando Duarte García
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Angel Roberto Sic García (a.i.)
EXAMINADOR	Ing. Francisco Javier Quiñónez de la Cruz
EXAMINADOR	Ing. Carlos Salvador Gordillo García
EXAMINADOR	Ing. Marco Antonio García Díaz
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**CURVAS DE CALIBRACIÓN DE CAUDALES DE LAS ESTACIONES HIDROLÓGICAS
DE LA CUENCA COATÁN A LA CUENCA MADRE VIEJA, CORRESPONDIENTE
A LA VERTIENTE DEL PACÍFICO PARA EL PERIODO 2010-2013**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, con fecha 10 de noviembre de 2014.


Walfred Colindres Estrada



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

<http://civil.ingenieria.usac.edu.gt>

Universidad de San Carlos de Guatemala
FACULTAD DE INGENIERÍA
Escuela de Ingeniería Civil



Guatemala,
28 de abril de 2016

Ingeniero
Hugo Leonel Montenegro Franco
Director Escuela Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos

Estimado Ingeniero Montenegro.

Le informo que he revisado el trabajo de graduación CURVAS DE CALIBRACIÓN DE CAUDALES DE LAS ESTACIONES HIDROLÓGICAS DE LA CUENCA COATÁN A LA CUENCA MADRE VIEJA, CORRESPONDIENTE A LA VERTIENTE DEL PACÍFICO PARA EL PERIODO 2010-2013, desarrollado por el estudiante de Ingeniería Civil Walfred Colindres Estrada, quien contó con la asesoría de la Inga. Karla Giovanna Pérez Loarca.

Considero que este trabajo está bien desarrollado y representa un aporte para el departamento y habiendo cumplido con los objetivos del referido trabajo doy mi aprobación al mismo solicitando darle el trámite respectivo.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS

Ing. Claudio César Castañón Contreras
Jefe del Departamento de Hidráulica



FACULTAD DE INGENIERIA
DEPARTAMENTO
DE
HIDRAULICA
USAC

Mas de 134 años de Trabajo Académico y Mejora Continua
/bbdeb.





USAC
TRICENTENARIA
 Universidad de San Carlos de Guatemala


<http://civil.ingenieria.usac.edu.gt>

Universidad de San Carlos de Guatemala
 FACULTAD DE INGENIERÍA
 Escuela de Ingeniería Civil



El director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen de la Asesora Inga. Karla Giovanna Pérez Loarca y del Coordinador del Departamento de Hidráulica Ing. Claudio César Castañón Contreras, al trabajo de graduación del estudiante Walfred Colindres Estrada , titulado **CURVAS DE CALIBRACIÓN DE CAUDALES DE LAS ESTACIONES HIDROLÓGICAS DE LA CUENCA COATÁN A LA CUENCA MADRE VIEJA, CORRESPONDIENTE A LA VERTIENTE DEL PACÍFICO PARA EL PERIODO 2010-2013**, da por este medio su aprobación a dicho trabajo.

[Handwritten signature]
 Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco



Guatemala, mayo 2016
 /mrrm.

Mas de 134 años de Trabajo Académico y Mejora Continua





El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Civil, al trabajo de graduación titulado: **CURVAS DE CALIBRACIÓN DE CAUDALES DE LAS ESTACIONES HIDROLÓGICAS DE LA CUENCA COATÁN A LA CUENCA MADRE VIEJA, CORRESPONDIENTE A LA VERTIENTE DEL PACÍFICO PARA EL PERÍODO 2010-2013**, presentado por el estudiante universitario: **Walfred Colindres Estrada**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano



Guatemala, mayo de 2016

/cc

ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por su amor, la razón de mi existencia y por ser mi guía en el camino del bien.
- Mis padres** Rosa María de Colindres (q. e. p. d.) y Walfred Orlando Colindres Bathen, por su amor y apoyo constante, que serán siempre la inspiración de mi vida.
- Mis hermanas** Michelle y Rosemarie Colindres Estrada, por su amor y apoyo importante en mi vida.
- Mis abuelos** Ana María de Colindres, Manuel Colindres Aguilar (q. e. p. d.), Sara Morales (q. e. p. d.) y Pedro Estrada, por su amor y buenos consejos para mi vida.
- Mis tíos y primos** Por el aprecio demostrado hacia mí.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser el alma máter que me abrió las puertas para fortalecer mis conocimientos de interés.
Facultad de Ingeniería	Por ser la facultad donde aprendí y adquirí los conocimientos de ingeniería civil.
Asesora	Inga. Karla Giovanna Judith Pérez Loarca, por su apoyo para realizar el presente trabajo de graduación.
Catedráticos de la Facultad de Ingeniería	Por ser las personas que compartieron sus valiosos conocimientos durante mi carrera.
Mis amigos de la Facultad	Por su apoyo y aprecio durante la carrera.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS.....	IX
GLOSARIO.....	XI
RESUMEN.....	XVII
OBJETIVOS.....	XIX
INTRODUCCIÓN.....	XXI
1. VERTIENTE DEL OCÉANO PACÍFICO.....	1
1.1. Descripción y características del lugar.....	1
1.2. Cuencas que conforman la vertiente del Pacífico de Guatemala.....	2
1.3. Características de las cuencas hidrológicas.....	2
1.3.1. Río Suchiate.....	2
1.3.2. Río Naranjo.....	3
1.3.3. Río Ocosito.....	3
1.3.4. Río Samalá.....	4
1.3.5. Río Nahualate.....	5
1.3.6. Río Madre Vieja.....	5
1.3.7. Río Coatán.....	5
1.3.8. Río Sis-Icán.....	6
1.4. Estación hidrológica.....	6
1.4.1. Generalidades.....	6
1.4.2. Clasificación de las estaciones hidrológicas.....	7
1.4.2.1. Estación hidrométrica.....	8

	1.4.2.1.1.	Función de una estación hidrométrica.....	8
	1.4.2.1.2.	Estación limnimétrica.....	8
1.4.3.		Instrumentos que miden el nivel de agua	9
	1.4.3.1.	Limnómetro.....	9
	1.4.3.2.	Limnógrafo.....	10
	1.4.3.2.1.	Limnigrama.....	13
2.		REALIZACIÓN DE AFOROS	15
2.1.		Generalidades.....	15
2.2.		Tipos de aforo	16
2.2.1.		Aforos directos	17
	2.2.1.1.	Estimación aproximada con flotadores.....	17
	2.2.1.2.	Molinete.....	18
	2.2.1.3.	Aforos químicos.....	21
	2.2.1.3.1.	Aforos de vertido constante.....	22
	2.2.1.3.2.	Aforos de vertido único o de integración...	22
2.2.2.		Aforos indirectos.....	23
	2.2.2.1.	Escalas limnimétricas	23
	2.2.2.2.	Aforadores de vertedero	24
3.		MÉTODO PARA LA ELABORACIÓN DE CURVAS DE CALIBRACIÓN DE CAUDALES	27
3.1.		Generalidades.....	27
3.2.		Funcionamiento del método	29

3.2.1.	Factores que pueden inducir errores en la curva de calibración.....	31
3.2.1.1.	Curva de remanso.....	31
3.2.1.2.	Flujo no permanente	33
3.3.	Métodos para determinar curvas de calibración.....	35
3.3.1.	Método gráfico	35
3.3.2.	Método por ecuaciones hidráulicas	36
3.3.3.	Métodos matemáticos	37
3.3.4.	Curva potencial	38
3.4.	Extrapolación de la curva de calibración	40
3.4.1.	Método gráfico	42
3.4.2.	Método área-velocidad media	43
3.4.3.	Método de Stevens	44
3.4.4.	Método de Manning	45
3.4.5.	Método de área-pendiente	46
3.5.	Aplicación del método.....	48
4.	SIMULACIONES HIDRÁULICAS HEC-RAS.....	51
4.1.	Generalidades	51
4.2.	Información de diseño	51
4.3.	Aplicación del método.....	53
4.4.	Procedimiento de una simulación para flujo no permanente	53
5.	INFORMACIÓN OBTENIDA EN CAMPO DE LAS ESTACIONES HIDROMÉTRICAS	67
6.	RESULTADOS Y DESARROLLO DE LAS CURVAS DE CALIBRACIÓN.....	79
6.1.	Procedimiento para determinar H_o	80

6.2.	Procedimiento para determinar la ecuación de cada curva de calibración por regresión potencial	81
CONCLUSIONES		111
RECOMENDACIONES		113
BIBLIOGRAFÍA		115
ANEXOS		117

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Estación hidrológica	7
2.	Limnímetro	10
3.	Partes de un limnígrafo	11
4.	Limnigrama de la cuenca Suchiate, estación Malacatán	14
5.	Sección de agua	18
6.	Molinete	19
7.	Sección de cauce	20
8.	Perfiles de velocidad	21
9.	Vertido constante	22
10.	Vertido único	23
11.	Escala limnimétrica escalonada	24
12.	Vertedero	25
13.	Ejemplo curva de calibración cuenca Coatán	30
14.	Hidrograma	31
15.	Curva de remanso.....	32
16.	Curva de calibración para flujo no permanente	34
17.	Determinación de h_0 (diferencia nivel de agua y cero de la escala)	39
18.	Diagrama método de área–pendiente	47
19.	Datos geométricos	54
20.	Sección transversal.....	55
21.	Datos para flujo no permanente	56
22.	Datos de hidrograma.....	57
23.	Datos de pendiente	58

24.	Condiciones iniciales	59
25.	Simulación para flujo no permanente.....	60
26.	Sección transversal, cuenca Coatán.....	61
27.	Perfil, cuenca Coatán	62
28.	Curvas de calibración, cuenca Coatán.....	63
29.	Tramo de secciones en 3D, cuenca Coatán	64
30.	Tabla de resumen, cuenca Coatán	65
31.	Gráfica Log(Q) contra Log(H-Ho).....	81
32.	Curva de calibración, cuenca Coatán	84
33.	Sección de control, río Coatán.....	85
34.	Perfil de estaciones, río Coatán	85
35.	Perspectiva en 3D estaciones, río Coatán	86
36.	Curva de calibración, cuenca Suchiate	87
37.	Sección de control, río Suchiate	87
38.	Perfil de estaciones, río Suchiate.....	88
39.	Perspectiva en 3D estaciones, río Suchiate.....	88
40.	Curva de calibración, cuenca Naranjo	89
41.	Sección de control, río Naranjo.....	90
42.	Perfil de estaciones, río Naranjo	90
43.	Perspectiva en 3D estaciones, río Naranjo	91
44.	Curva de calibración, cuenca Ocosito.....	92
45.	Sección de control, río Ocosito	93
46.	Perfil de estaciones, río Ocosito	93
47.	Perspectiva en 3D estaciones, río Ocosito	94
48.	Curva de calibración, cuenca Samalá.....	95
49.	Sección de control, río Samalá	96
50.	Perfil de estaciones, río Samalá	96
51.	Perspectiva en 3D estaciones, río Samalá	97
52.	Curva de calibración, cuenca Sis.....	98

53.	Sección de control, río Sis.....	99
54.	Perfil de estaciones, río Sis.....	99
55.	Perspectiva en 3D estaciones río Sis	100
56.	Curva de calibración, cuenca Icán	101
57.	Sección de control, río Icán	102
58.	Perfil de estaciones, río Icán	102
59.	Perspectiva en 3D estaciones, río Icán	103
60.	Curva de calibración, cuenca Nahualate	104
61.	Sección de control, río Nahualate	105
62.	Perfil de estaciones, río Nahualate.....	105
63.	Perspectiva en 3D estaciones, río Nahualate	106
64.	Curva de calibración, cuenca Madre Vieja	107
65.	Sección de control, río Madre Vieja.....	108
66.	Perfil de estaciones, río Madre Vieja	108
67.	Perspectiva en 3D estaciones, río Madre Vieja	109

TABLAS

I.	Identificación de cuencas	67
II.	Dimensionales de las mediciones	68
III.	Información, cuenca Coatán.....	68
IV.	Información, cuenca Suchiate	69
V.	Información, cuenca Naranjo.....	71
VI.	Información, cuenca Ocosito	73
VII.	Información, cuenca Samalá	74
VIII.	Información, cuenca Sis	75
IX.	Información, cuenca Icán	76
X.	Información, cuenca Nahualate	77
XI.	Información, cuenca Madre Vieja	78

XII.	Datos de Ho, cuenca Coatán	80
XIII.	Datos logarítmicos, cuenca Coatán	82

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
H	Altura de nivel de agua
A	Área
Q	Caudal
cm	Centímetro
n	Coefficiente de rugosidad de Manning
km	Kilómetro
km ²	Kilómetro cuadrado
m	Metro
m ² /s	Metro cuadrado sobre segundo
m ³	Metro cúbico
m ³ /s	Metro cúbico sobre segundo
m/s	Metro sobre segundo
Mm	Milímetro
Ho	Nivel cuando el caudal es cero
So	Pendiente del canal
Hf	Pérdida de energía
P	Perímetro mojado
Y	Profundidad del flujo
Rh	Radio hidráulico
S	Segundos
dh/dt	Tasa de cambio del nivel de agua con el tiempo
V	Velocidad
Vm	Velocidad media

GLOSARIO

Afluente	En hidrología, corresponde a un curso de agua, también llamado tributario, que no desemboca en el mar, sino en otro río más importante con el cual se une en un lugar llamado confluencia.
Aforo	Proceso y arte de medir las alturas, áreas, velocidades y caudales en los ríos.
Agua superficial	Agua sobre la superficie del suelo.
Aguas abajo	Dirección en el sentido de la corriente.
Aguas arriba	Dirección en el sentido contrario de la corriente.
Cauce	Conducto abierto, creado natural o artificialmente, el cual contiene agua en movimiento periódico o continuamente.
Caudal	Magnitud del flujo de una corriente en un lugar determinado de su curso, o del flujo que mana de una fuente.

Caudal medio	Media aritmética de los caudales de todos los años hidrológicos completos registrados, sean o no consecutivos. Generalmente solo se publican los caudales medios cuando el número de años es igual o mayor de cinco.
Ciclo hidrológico	Circulación del agua desde el mar a la tierra y desde la tierra de nuevo al mar. Esta circulación es muy compleja estando constituida por un circuito principal y muchos circuitos secundarios.
Corriente	Término general para designar la masa de agua que fluye en un cauce natural o artificial.
Crecida	Flujo relativamente alto de una corriente.
Estación de aforos	Estación para la medida regular del caudal de una corriente. De acuerdo con las instalaciones y métodos empleados para medir el caudal.
Estación hidrológica	Esta denominación incluye tanto a las estaciones fluviométricas como a las estaciones limnimétricas, no obstante, generalmente la denominación hidrológica es sinónima de fluviométrica.
Estación limnimétrica	La que efectúa medidas regulares del nivel del lago y temperatura del agua.

GS	<i>Geological Survey.</i>
HEC-RAS	<i>Hydrologic Engineering Center's and River Analysis System.</i>
Hidrología	Ciencia que trata de las características y propiedades del agua sobre el suelo y su interior, principalmente de la distribución del agua procedente de lluvias recientes o de la fusión de las nieves.
Infiltración	Movimiento del agua desde la superficie hacia el interior del suelo. La infiltración es igual a la precipitación total menos las pérdidas debidas a la interceptación por la vegetación, a la retención en depresiones, a la evaporación y a la escorrentía superficial.
Insivumeh	Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología.
Inundación	Invasión de las tierras situadas junto a un cauce por el desbordamiento de sus aguas, debido a crecidas del caudal causadas por lluvias abundantes en la cuenca correspondiente.

Limnógrafo	Instrumento que mide y registra de forma automática y continua, la altura de la superficie de un lago.
Limnómetro	Es un instrumento que permite registrar y transmitir la medida de la altura de agua (en un punto determinado) de un río.
Lisímetro	Aparato para medir la cantidad de agua procedente de la precipitación que penetra en el suelo.
Molinete	Instrumento para medir la velocidad del flujo.
OMM	Organización Meteorológica Mundial
Precipitación	Hidrometeoro constituido por una agregación de partículas acuosas, líquidas o sólidas, que cae de una nube o grupo de nubes y que llega a alcanzar la superficie de la tierra.
Red hidrológica de estaciones	Conjunto de estaciones meteorológicas e hidrológicas en una cuenca, situadas de forma que sus observaciones puedan facilitar los datos básicos necesarios para el conocimiento del régimen de la cuenca en el espacio y en el tiempo.

Río	Corriente de agua superficial que va a desembocar a otra o al mar.
Sección de aforos	Sección transversal de una corriente donde se mide el caudal.
Sedimentos	Materiales fragmentarios originados por la acción de los elementos atmosféricos en las rocas y que es transportado, en estado de suspensión, por el agua o el viento.
Volumen de escorrentía	Volumen de agua que afluye a lo largo de la superficie del suelo, durante y después de la precipitación.
Zona de inundación	Tierras que bordean un río y que están sujetas a inundaciones con una frecuencia parecida.

RESUMEN

El presente trabajo de graduación tiene como objetivo la elaboración de las curvas de calibración de caudales de las cuencas hidrológicas: Coatán, Suchiate, Naranjo, Ocosito, Samalá, Sis-Icán, Nahualate y Madre Vieja, pertenecientes a la vertiente del Pacífico.

Las curvas de calibración se construyeron a partir de los registros e información obtenidos de las estaciones hidrométricas pertenecientes a la red hidrológica del Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (Insivumeh), ubicadas en las cuencas hidrológicas antes mencionadas. Estas curvas relacionan los caudales con los niveles de agua, teniendo como aplicación conocer la fluctuación de caudales en función de la altura de agua, registrados en un periodo, en este caso de 2010 a 2013.

Asimismo, sirven para conocer el comportamiento del río en crecidas (máximas alturas de agua) relacionadas con la topografía del cauce de las cuencas hidrológicas y de referencia, indispensable para cualquier tipo de estudio que se desee realizar. Estos estudios pueden estar relacionados con la dinámica fluvial (estudios de crecientes, regionalización de caudales, estudios de navegabilidad, entre otros), para el diseño de estructuras hidráulicas (bocatomas, presas, diques, obras de protección, entre otros), estudios de calidad del agua y, en general, para cualquier estudio que se requiera con propósitos de planeación, manejo y aprovechamiento del recurso hídrico.

OBJETIVOS

General

Determinar las curvas de calibración de caudales de las estaciones hidrométricas pertenecientes a la red hidrológica del Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (Insivumeh), que se encuentran ubicadas en las cuencas Coatán, Suchiate, Naranjo, Ocosito, Samalá, Sis-Icán, Nahualate y Madre Vieja, de la vertiente del Pacífico, para el periodo 2010-2013.

Específicos

1. Determinar caudales con mayor facilidad, con relación a sus niveles de agua, por medio de las ecuaciones que representan las curvas de calibración de caudales.
2. Construir curvas de calibración por medio de una regresión potencial y extrapolar estas curvas con simulaciones hidráulicas creadas por el programa HEC-RAS, determinando una ecuación de cada curva que estime caudales en función de un nivel de agua. Además que estas curvas sirvan de referencia para obtener caudales que puedan ser utilizados en estudios hidrológicos.
3. Obtener la mayor información posible para próximos estudios hidrológicos y que la misma sea útil para contribuir con el desarrollo del país.

INTRODUCCIÓN

En ocasiones, dependiendo de la ubicación, topografía del terreno y magnitud del flujo de agua en una sección de control o estación hidrométrica, los aforos o medición directa de caudales continuos en el tiempo son muy costosos, por lo que se hace una relación de caudales con niveles de agua. Esta información se registra en cada estación hidrométrica para un periodo determinado, y sirve de referencia para trazar las curvas de calibración.

Existen diferentes procedimientos y metodologías para determinar las curvas de calibración nivel-caudal. En Latinoamérica, en general, se ha popularizado el uso del método gráfico para su determinación. Sin embargo, gracias al desarrollo de los computadores, de la tecnología informática asociada y su gran facilidad de uso, las curvas de calibración pueden ser generadas utilizando técnicas de cálculo que minimizan los errores inherentes a los procedimientos gráficos y manuales. Es necesario resaltar que la experiencia del analista y su conocimiento de la dinámica del río y los controles hidráulicos son muy importantes para la correcta elaboración de las curvas de calibración. Para el presente trabajo se aplicó un método matemático, haciendo una regresión potencial con el uso del programa de cómputo Excel.

Las curvas de calibración se determinarán con objeto de encontrar caudales para cualquier nivel de altura de agua, relacionado estos niveles con la topografía del cauce de cada cuenca de estudio.

Estas curvas se construirán con base en los registros e información obtenida de las estaciones hidrométricas, ubicadas en las cuencas de estudio y pertenecientes a la red hidrológica nacional del Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (Insivumeh), para el periodo de 2010 a 2013.

Para estudios hidrológicos donde se predicen crecidas, se diseñan obras hidráulicas o se ubican zonas con riesgo de inundación, es necesario conocer los caudales máximos extremos. La medición directa de estos caudales máximos extremos rara vez se puede realizar ya que están en condiciones críticas, por lo que se hace una extrapolación de la curva de calibración por medio de un método de cálculo para hallar los caudales que correspondan a estos niveles. Para determinar el método de extrapolación más adecuado, se debe tener en cuenta la información disponible en cada estación de control. Para el presente trabajo, se utilizó el programa HEC-RAS, donde se realizaron simulaciones hidráulicas para cada una de las cuencas de estudio. Con HEC-RAS se simuló caudales para diferentes alturas de nivel, hasta llegar al desborde del cauce, conociendo así los caudales máximos extremos.

La determinación de los caudales en un río representa una tarea de suma importancia, porque se constituyen en datos básicos e indispensables para cualquier tipo de estudio que se desee adelantar relacionado con la dinámica fluvial (estudios de crecientes, regionalización de caudales, estudios de navegabilidad, entre otros), para el diseño de estructuras hidráulicas (bocatomas, presas, diques, obras de protección, entre otros), estudios de calidad del agua y, en general, para cualquier estudio que se requiera con propósitos de planeación, manejo y aprovechamiento del recurso hídrico.

1. VERTIENTE DEL OCÉANO PACÍFICO

1.1. Descripción y características del lugar

Los ríos que corresponden a la vertiente del Pacífico tienen longitudes cortas (110 km promedio) y se originan a una altura media de 3 000 MSNM. Las pendientes son fuertes en las partes altas de las cuencas, entre el 10 y el 20%, cambiando bruscamente a pendientes mínimas en la planicie costera, creando grandes zonas susceptibles a inundación en esta área. Estas condiciones fisiográficas producen crecidas instantáneas de gran magnitud y corta duración, así como tiempos de propagación muy cortos.

Por otro lado, todos los ríos de la Vertiente del Pacífico acarrear grandes volúmenes de material, especialmente escorias y cenizas volcánicas, debido a que la cadena volcánica se encuentra entre los límites de la vertiente. Debido a este arrastre de material, los ríos tienen cursos inestables que causan daños e inundaciones en la planicie costera. La precipitación en la vertiente del Pacífico tiene períodos de gran intensidad, típica de las zonas costeras, con una precipitación media anual de 2 200 mm. La vertiente del Pacífico en Guatemala ocupa el 25 por ciento del país.

El rango de las precipitaciones se encuentra entre los 1 500 a 4 500 mm anuales, en el sector oeste-este de la vertiente, siendo inferiores en el sector este y mayores hacia el oeste. Mientras que el rango para el sector norte-sur de la vertiente se encuentra entre 700 a 1 500 mm anuales, siendo inferiores los valores en la parte costera y aumentando conforme las elevaciones.

A partir de estas informaciones se estima un volumen de escorrentía de 25 500 millones de metros cúbicos por año.

1.2. Cuencas que conforman la vertiente del Pacífico de Guatemala

Las cuencas que conforman la vertiente del Pacífico son: Coatán (nace en Guatemala y entra en México), Suchiate (sirve de frontera con México), Naranjo, Ocosito, Samalá, Sis-Icán, Nahualate, Atitlán, Madre Vieja, Coyolate, Acome, Achiguate, María Linda, Paso Hondo, De los Esclavos, Paz y Ostua-Guija (nacen en Guatemala y entran a El Salvador) y Olopa, que sirve de frontera con El Salvador.

1.3. Características de las cuencas hidrológicas

A continuación se encontrará una breve descripción de las características de las cuencas de estudio.

1.3.1. Río Suchiate

Marca la frontera occidental entre México y Guatemala. Nace en una altitud de 3 000 msnm en las faldas surorientales del volcán Tacaná en el departamento de San Marcos y discurre en dirección sur-suroeste hasta desembocar en el océano Pacífico. Los últimos 75 km del río forman la frontera entre México y Guatemala.

La cuenca del río Suchiate tiene una superficie de 1 064 km² en territorio guatemalteco y 336 km² en territorio mexicano. El nombre Suchiate es derivado de las palabras náhuatl *Xochi atl*, que quiere decir agua de flores.

1.3.2. Río Naranjo

Es un corto río costero del suroccidente de Guatemala con una longitud de 105 km. Nace en la sierra Madre en el departamento de San Marcos y descorre en dirección del sur, pasa por la ciudad de Coatepeque, en Quetzaltenango, atraviesa la planicie costera en el departamento de Retalhuleu, para desembocar en el océano Pacífico. La cuenca del río Naranjo tiene una superficie de 1 273 km², con una población aproximada de 272 611 habitantes.

1.3.3. Río Ocosito

Es un corto río costero del suroccidente de Guatemala con una longitud de 107 km. Nace en la sierra Madre en el departamento de Quetzaltenango. Discurre en dirección del sur, atraviesa el departamento de Retalhuleu y torna hacia el oeste para desembocar en el océano Pacífico. La cuenca del Ocosito tiene una superficie de 2 035 km².

1.3.4. Río Samalá

Es un río costero del suroccidente de Guatemala. Sus fuentes nacen en los cerros de la sierra Madre en los departamentos de Totonicapán (Momostenango, San Vicente Buenabaj, San Francisco el Alto) y Quetzaltenango (San Carlos Sija). Corre por las ciudades de San Cristóbal Totonicapán y Quetzaltenango, y baja en una zona quebrada en el Palmar y Zunil, donde se forman cascadas, hacia la planicie de la costa en Retalhuleu para desembocar en el océano Pacífico. Su principales afluentes son los rios Xequijel o Siguilá, El Tambor, Nima I y Oc.

El río Samalá tiene una longitud de 145 km. Su cuenca tiene una superficie de 1 510 km² en la que vive una población de aproximadamente 400 000 habitantes. Su proximidad al complejo volcánico Santa María-Santiaguito, con sus flujos de lava y lahar, resulta en un elevado riesgo de serias inundaciones.

La corriente del río es explotado para mover molinos de trigo en Totonicapán y San Cristóbal, y la fábrica de hilados y tejidos en Cantel. En Zunil es aprovechado para generar energía hidroeléctrica en la planta hidroeléctrica Santa María, que entró en operación en 1927.

1.3.5. Río Nahualate

Es un corto río costero del suroccidente de Guatemala con una longitud de 130 km. Nace en la Sierra Madre, cerca de Santa Catarina Ixtahuacán y Nahualá (Sololá) y discurre en dirección del sur, atraviesa los departamentos de Sololá, Suchitepéquez y Escuintla para desembocar en el océano Pacífico. La cuenca del Nahualate tiene una superficie de 1 941 km².

1.3.6. Río Madre Vieja

Es un corto río costero del suroeste de Guatemala con una longitud de 126 km, nace en la Sierra Madre, en el área limítrofe de los departamentos de Quiché, Sololá, y Chimaltenango y discurre en dirección del sur, atravesando la planicie costera de Suchitepéquez y Escuintla para desembocar en el océano Pacífico. La cuenca del Madre Vieja tiene una superficie de 1 007 km².

1.3.7. Río Coatán

La cuenca del río Coatán es compartida entre México y Guatemala en la vertiente del océano Pacífico y su río tributario principal es el río Coatán. La cuenca en su totalidad posee una extensión de 270 km² de las cuales 37 por ciento se ubica en territorio guatemalteco y el restante 63 por ciento en México. Las coordenadas geográficas extremas son 14° 45' y 15° 17' de latitud norte y 91° 56' y 92° 31' SW longitud oeste, con altitudes que van desde los 0 msnm hasta los 2 700 msnm.

1.3.8. Río Sis-Icán

El río Sis sirve de línea divisoria entre Retalhuleu y Suchitepéquez, se une al río Icán, el cual atraviesa los municipios de San Francisco Zapotitlán, Cuyotenango, San Lorenzo y Mazatenango.

El río Icán es un río costero del suroccidente de Guatemala con una longitud de 53 km. Nace en la sierra Madre, en las laderas del volcán de Santo Tomás, en el departamento de Suchitepéquez y discurre en dirección del sur, atravesando la planicie costera de Suchitepéquez para desembocar en el océano Pacífico. El río corre paralelo a su principal afluente, el río Sis. La cuenca Sis-Icán tiene una superficie de 919 km².

1.4. Estación hidrológica

A continuación se describen las generalidades, así como la clasificación de una estación hidrológica.

1.4.1. Generalidades

Una estación hidrológica es el lugar donde se efectúan observaciones hidrológicas o climatológicas para fines hidrológicos.

1.4.2. Clasificación de las estaciones hidrológicas

El Reglamento número 49 de la Organización Meteorológica Mundial (OMM) clasifica a las estaciones en:

- Estaciones hidrométricas
- Estaciones climatológicas para fines hidrológicos
- Estaciones de agua subterránea
- Estaciones hidrológicas para propósitos específicos

Figura 1. Estación hidrológica



Fuente: *Estaciones hidrológicas*.

http://datateca.unad.edu.co/contenidos/358002/Abastecimiento_Contenido_en_linea/leccin_22_estaciones_hidrolgicas.html. Consulta: 25 de octubre de 2014.

1.4.2.1. Estación hidrométrica

Se define como el lugar de observación en el cual se obtienen datos sobre el agua de ríos, lagos o embalses. En una estación hidrométrica se deberá observar uno o más de los elementos que se citan a continuación:

- Nivel de agua de los ríos, lagos y embalses.
- Caudal o flujo de las corrientes.
- Transporte o depósito de sedimentos o ambos.
- Temperatura y otras propiedades físicas del agua de un río, lago y embalses.
- Propiedades químicas del agua de los ríos, lagos y embalses.

1.4.2.1.1. Función de una estación hidrométrica

Las mediciones de los niveles de agua de los ríos, lagos o algún cuerpo de agua se usan directamente para predecir crecidas (máximas alturas de agua), definir o delinear zonas con riesgo de inundación y proyectar estructuras (puentes u otras obras hidráulicas).

1.4.2.1.2. Estación limnimétrica

Es el lugar donde se obtienen datos del nivel de agua durante un programa observacional sistemático. El instrumento de medición directa es el limnómetro, su instalación representa un bajo costo, sin embargo los datos no son continuos y precisos. Los datos de nivel se utilizan como base para computar registros de caudal o cambios en el almacenamiento de agua.

Los limnímetros, en el caso de ríos muy caudalosos, son importantes para fines de navegación, pesca, alerta a inundaciones. En los lugares donde se han instalados los limnímetros es indispensable que se realicen campañas de aforos para el cálculo de caudales o disponibilidad de agua.

1.4.3. Instrumentos que miden el nivel de agua

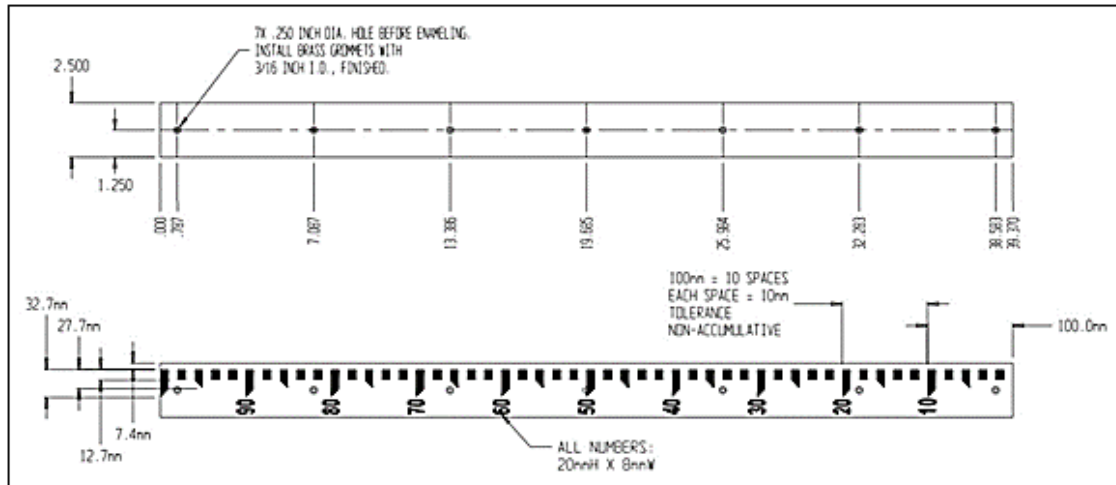
En las estaciones hidrométricas del Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (Insivumeh) se cuenta con el limnímetro y limnígrafo.

1.4.3.1. Limnímetro

Es una regla graduada que permite medir las fluctuaciones del nivel del agua. El Reglamento Técnico OMM número 49 indica las características funcionales que deben reunir los limnímetros y tipos de limnímetros.

- Deben ser precisos y estar claramente graduados.
- Deben ser resistentes a la corrosión y de fácil mantenimiento.
- Deben ser fáciles de instalar y utilizar.
- Las graduaciones deberán ser claras y permanentes. Los números deberán ser claramente legibles y estar situados de tal manera que no haya ninguna posibilidad de ambigüedad.
- Para dar conformidad a su construcción, se deberá constatar que las marcaciones de las subdivisiones tendrá una precisión de $\pm 0,5$ mm y el error acumulado de longitud no será superior al mayor de dos valores siguientes: 0,1 por ciento o 0,5 milímetros.

Figura 2. Limnómetro



Fuente: *Guía de hidrometría de aguas superficiales.*

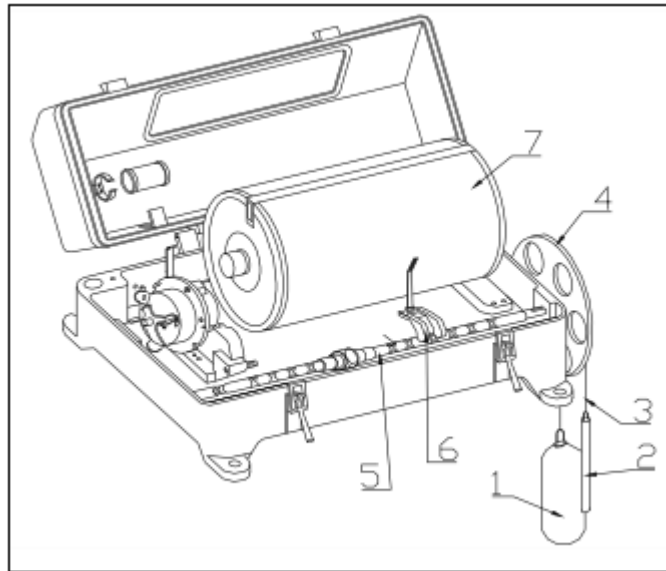
www.senamhi.gob.pe/pdf/aprendiendo_hidrometria.pdf. Consulta: 25 de octubre de 2014.

1.4.3.2. Limnógrafo

Es un aparato inscriptor provisto de un mecanismo de relojería y de dispositivos que permiten registrar las alturas de agua de forma continua. A continuación se describe en forma sencilla al limnógrafo:

Está conformado por: un flotador (1) y contrapeso (2), los cuales con un cable (3) son conectados al dispositivo de reducción (4), el que acciona el husillo con ranuras helicoidales (5), sobre el cual juega el dispositivo portaplumilla con plumilla (6) y un tambor (7), que está colocado ya sea horizontal o verticalmente, ver figura 3.

Figura 3. Partes de un limnógrafo



Fuente: *Guía de hidrometría de aguas superficiales.*

www.senamhi.gob.pe/pdf/aprendiendo_hidrometria.pdf. Consulta: 25 de octubre de 2014.

Con el fin de que la banda registradora, o limnograma, no resulte demasiado ancha, se ha instalado un mecanismo de retroceso de la plumilla. Un husillo sin fin que conduce la portaplumilla, está provisto de dos ranuras helicoidales en sentido opuesto que se enlazan sin interrupción en los extremos, de manera que en ellos cambia el sentido de la palanca portaplumilla. De esta forma, los registros de niveles de agua extraordinariamente altos o bajos que hubiesen salido de los límites de la escala de nivel de la banda, aparecen rebatidos hacia dentro, quedando, por lo tanto, descartada la pérdida de los niveles máximos de las crecidas. Según la reducción de alturas usadas, cada rayita en la banda corresponde sea a 1 (1:10 o 1:20) o 2 cm, respectivamente, dependiendo del diámetro de la polea.

El tambor, dependiendo del sistema de relojería, puede completar una revolución en 32 días, en 1 semana o 1 día y según esta disposición deberá efectuarse el cambio de la banda.

El volumen número 49 de la OMM indica que los limnógrafos mecánicos deben reunir las siguientes características funcionales:

- Deberá funcionar satisfactoriamente en las condiciones ambientales predominantes de temperatura y humedad relativa correspondiente a las condiciones locales.
- Todas las partes del limnógrafo estarán fabricadas en material resistente a la corrosión en condiciones de utilización a la intemperie.
- El limnógrafo estará colocado dentro de una caseta resistente a la humedad, al polvo y a la intemperie.
- La tapa tendrá una ventana que permita el control visual del limnógrafo sin necesidad de abrirla.
- El error límite de las mediciones del tiempo no debe pasar de 30 segundos por día (s/d) en promedio, durante un periodo de 30 días por lo menos.
- Habrá un sistema de ajuste del movimiento para permitir la regulación con las condiciones de precisión.
- El papel utilizado deberá mantenerse estable dentro de unos límites relativamente estrechos, en toda la gama de condiciones previstas de temperatura y humedad.
- Si se utiliza una pluma con tinta, esta deberá producir un trazo fácilmente legible sin corrimiento. Si se utiliza un lápiz, tendrá la dureza adecuada para producir un trazo legible.
- El reloj del limnógrafo debe ser intercambiable, con un sistema fácil para ser desmontado y transportado.

- Errores de funcionamiento: generalmente, son causados por una variación de la profundidad de flotación del flotador cuando el nivel cambia con rapidez y con él cambia el peso del cable del flotador. También, la falla puede darse por expansión y contracción del papel y cuando se utiliza cable de flotador que no reúne las características de diseño.

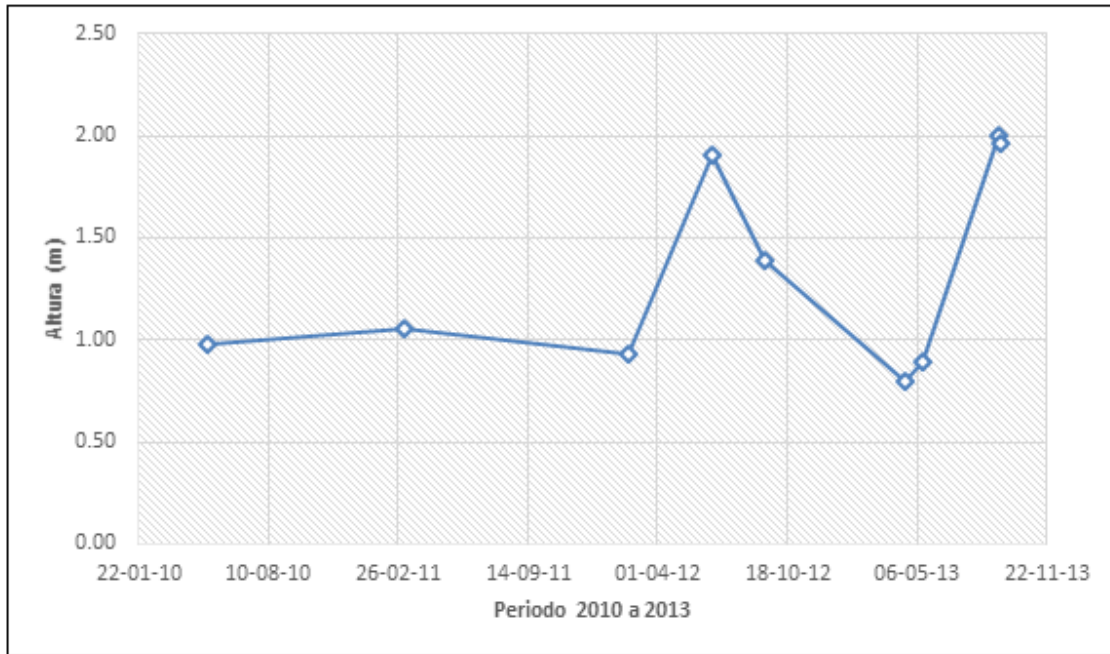
1.4.3.2.1. Limnigrama

El *Glosario hidrológico internacional* de la OMM/Unesco, define al limnigrama como:

- Registro continuo del nivel de agua por medio de un limnígrafo.
- Representación gráfica o no, de la variación del agua en función del tiempo.

Este gráfico se da en coordenadas cartesianas siendo normalmente las abscisas (eje horizontal), los tiempos (en horas y días) y las ordenadas (eje vertical), las alturas leídas o legibles (normalmente, la mínima división apreciable en un centímetro). Hay limnigramas para una semana o treinta días, todos esos periodos han de reflejarse en la duración de la cuerda de los relojes. Al colocar el limnigrama, el observador escribirá la fecha de puesta y hora (06:00) también, al finalizar escribirá la fecha de retiro y hora (18:00), firma del observador hidrológico y ayudante.

Figura 4. **Limnograma de la cuenca Suchiate, estación Malacatán**



Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

2. REALIZACIÓN DE AFOROS

2.1. Generalidades

Un aforo es la determinación del caudal en un curso de agua. Una sección de aforo es un punto específico para hacer las mediciones de caudal, deben tenerse en cuenta algunos factores importantes, pero el más importante es tener la certeza de que la forma de la sección no cambie en el tiempo, es decir, que se trata de un tramo de río o arroyo que no sufre socavación y no está en proceso de sedimentación.

Cuando estas características no se encuentran en el tramo en el cual interesa instalar la sección de aforo, deberá implementarse una obra, como por ejemplo un vertedero. Esta obra, según la dimensión del río o arroyo, puede llegar a ser costosa y, en algunos casos, puede resultar más conveniente determinar el caudal por otros métodos.

Los vertederos utilizados en estos casos son también de varios tipos:

- Vertedero de Bazin
- Vertedero libre en pared delgada y vertical
- Rectangular
- Triangular
- Tipo Cipolletti
- Trapezoidal
- Circular
- Vertederos de paredes gruesas

Con frecuencia, una sección adecuada para implementar una sección de aforo es en correspondencia con un puente, puesto que esta sección ya ha sido estabilizada.

En ríos y arroyos de anchos, se hace difícil y costoso implementar vertederos con la sola finalidad de definir la sección de aforo, en estos casos la medición se hace con el uso del correntómetro. Con el auxilio de este instrumento se mide la velocidad del flujo en varias partes de la sección, de forma a establecer curvas de igual velocidad en toda la sección. Con base en el mapeo de las velocidades del flujo, se calcula el caudal líquido.

2.2. Tipos de aforo

Aforar es medir un caudal. En hidrología superficial puede ser necesario medir desde pequeños caudales (unos pocos litros por segundo) hasta grandes ríos con caudales de centenares o miles de metros cúbicos por segundo. Se distinguen dos tipos de aforo:

- Aforos directos: con algún aparato o procedimiento se miden directamente el caudal.
- Aforos indirectos o continuos: se mide el nivel del agua en el cauce y a partir del nivel se estima el caudal.

Para medir el caudal diariamente o de un modo continuo en diversos puntos de una cuenca se utilizan aforos indirectos, por eso también se les denomina continuos.

2.2.1. Aforos directos

A continuación se describen los procedimientos básicos que existen para realizar aforos directos.

2.2.1.1. Estimación aproximada con flotadores

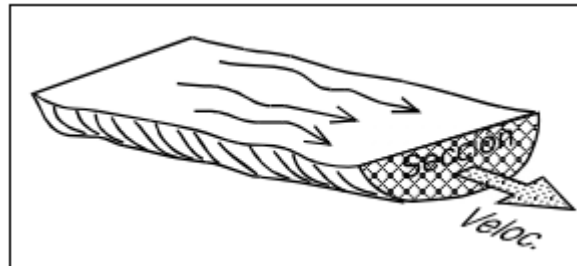
El procedimiento se basa en medir la velocidad del agua y aplicar la ecuación:

$$\text{Caudal} = \text{sección} \times \text{velocidad}$$

Para una estimación, la velocidad se calcula arrojando algún objeto que flote al agua, y la sección se estima muy aproximadamente (anchura media x profundidad media). Este procedimiento da grandes errores, pero proporciona un orden de magnitud.

A veces se aconseja multiplicar el valor obtenido con flotadores por un coeficiente del orden de 0,7 o 0,8, ya que con los flotadores suele medirse preferentemente la velocidad en la parte central del cauce, no teniendo en cuenta las partes próximas a las orillas, de velocidades más bajas, obteniéndose un error por exceso.

Figura 5. **Sección de agua**

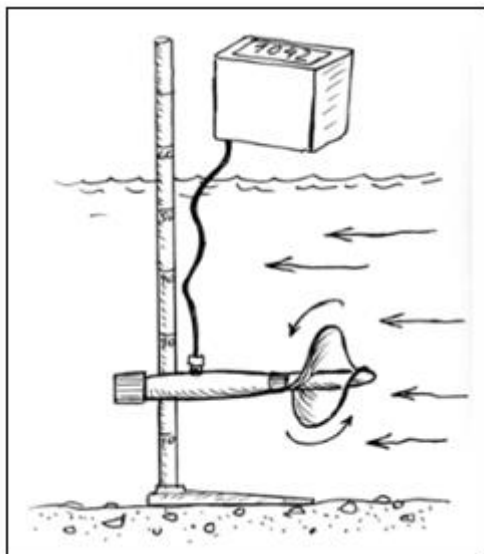


Fuente: *Medida de caudales*. <http://hidrologia.usal.es/temas/Aforos.pdf>. Consulta: 25 de octubre de 2014.

2.2.1.2. Molinete

La medida exacta de la velocidad se realiza con un molinete. Se mide la velocidad de la corriente en varios puntos de la misma vertical y en varias verticales de la sección del cauce. A la vez que se miden las velocidades, se mide la profundidad en cada vertical y la anchura exacta del cauce, lo que permite establecer la sección con bastante precisión.

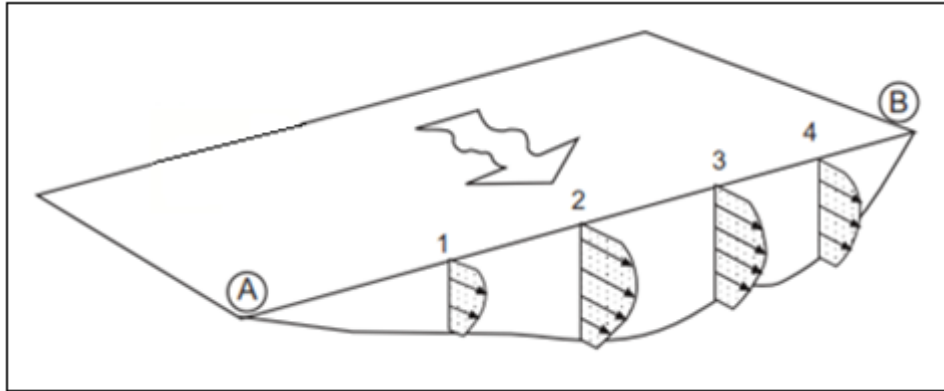
Figura 6. **Molinete**



Fuente: *Medida de caudales*. <http://hidrologia.usal.es/temas/Aforos.pdf>. Consulta: 25 de octubre de 2014.

En el ejemplo de la figura 7 se han realizado medidas en cuatro verticales: en cada vertical se mide la distancia desde la orilla (distancias A-1, A-2 y otras), la profundidad en ese punto y se realizan una o varias medidas de la velocidad a distintas profundidades. En el ejemplo del dibujo se han realizado: dos medidas en la vertical 1, cuatro medidas en las verticales 2 y 3 y tres medidas en la vertical 4.

Figura 7. **Sección de cauce**

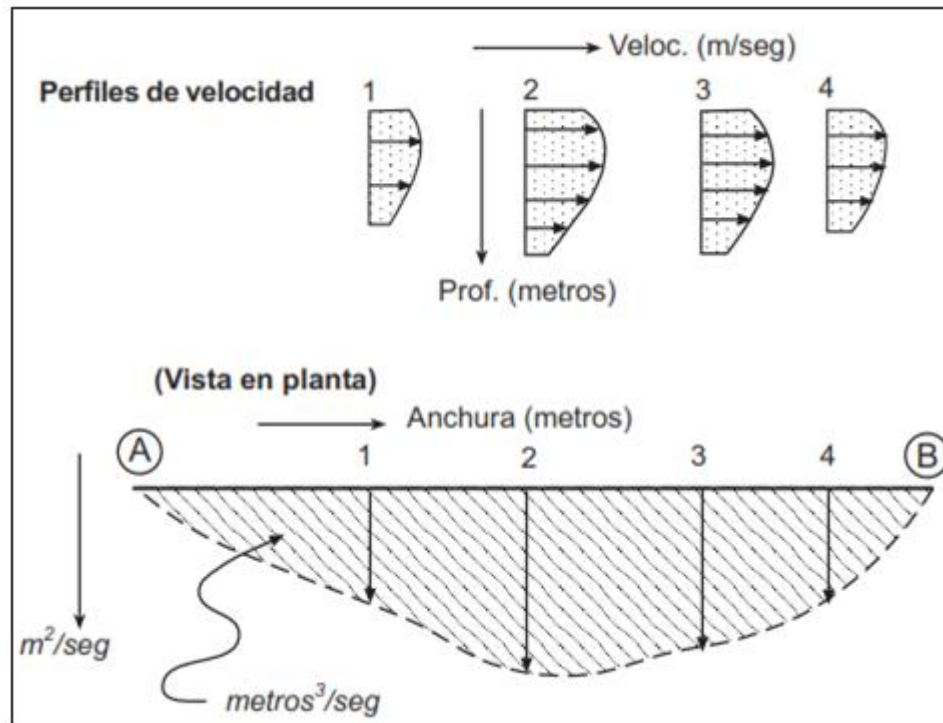


Fuente: *Medida de caudales*. <http://hidrologia.usal.es/temas/Aforos.pdf>. Consulta: 25 de octubre de 2014.

A partir de las velocidades, se obtiene el caudal por el siguiente procedimiento:

- Se dibujan a escala los perfiles de corriente correspondientes a cada vertical donde se midió con el molinete. Se planimetra cada uno de los perfiles. Como en horizontal están las velocidades en metros por segundo y en vertical la profundidad en metros, la superficie planimetrada en cada perfil estará en metros cuadrados por segundo.
- Se dibuja una vista en planta del cauce, en abscisas la anchura del mismo, señalando los puntos exactos donde se midió, y en ordenadas los vectores en metros cuadrados por segundo, cuyas longitudes corresponden a la planimetría del punto anterior. Se traza la envolvente de todos estos vectores, planimetrando de nuevo. Esta planimetría, convertida a la escala del gráfico, ya es el caudal (en horizontal la anchura en metros, en vertical metros cuadrados por segundo: el producto en metros cúbicos por segundo).

Figura 8. **Perfiles de velocidad**



Fuente: *Medida de caudales*. <http://hidrologia.usal.es/temas/Aforos.pdf>. Consulta: 25 de octubre de 2014.

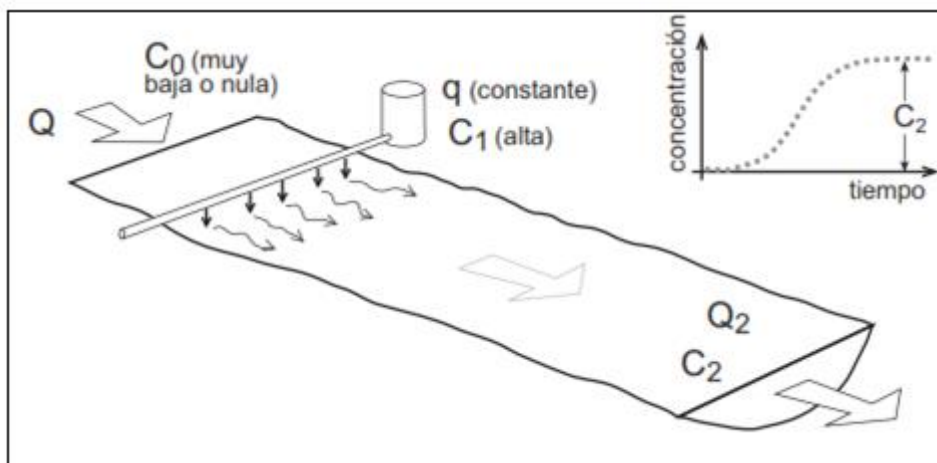
2.2.1.3. **Aforos químicos**

Su fundamento es el siguiente: se arroja una sustancia de concentración conocida a un cauce, se diluye en la corriente y aguas abajo se toman muestras y se analizan. Cuanto mayor sea el caudal, más diluidas estarán las muestras recogidas. La aplicación concreta de este principio se puede ejecutar con dos procedimientos distintos.

2.2.1.3.1. Aforos de vertido constante

A un cauce de caudal Q (que se quiere medir) se añade un pequeño caudal continuo q de una disolución de concentración conocida C_1 . Se supone que el río ya tenía una concentración C_0 de esa misma sustancia.

Figura 9. Vertido constante

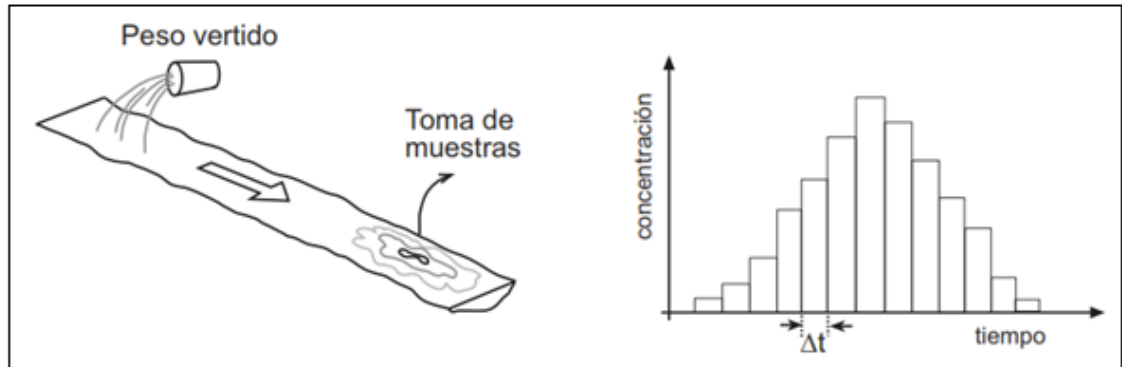


Fuente: *Medida de caudales*. <http://hidrologia.usal.es/temas/Aforos.pdf>. Consulta: 25 de octubre de 2014.

2.2.1.3.2. Aforos de vertido único o de integración

Si no se dispone del equipo necesario para el vertido continuo o no es posible por otras razones, el vertido único de una sustancia al cauce es otra alternativa, aunque requiere una corriente turbulenta que asegure la mezcla del vertido con todo el caudal circulante hasta el punto de toma de muestra.

Figura 10. **Vertido único**



Fuente: *Medida de caudales*. <http://hidrologia.usal.es/temas/Aforos.pdf>. Consulta: 25 de octubre de 2014.

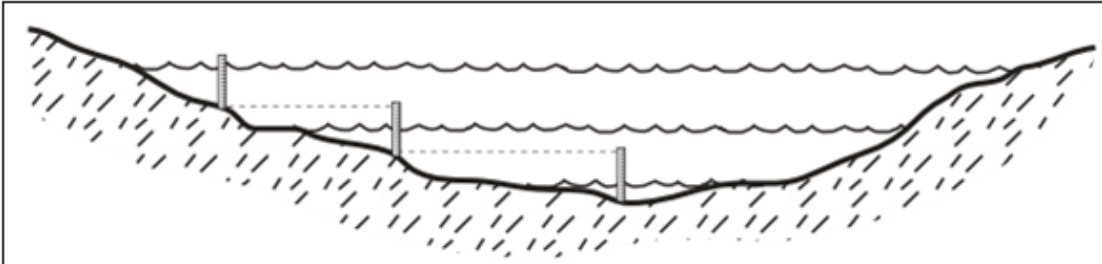
2.2.2. Aforos indirectos

A continuación se describen los procedimientos básicos que existen para realizar aforos indirectos.

2.2.2.1. Escalas limnimétricas

Se trata de escalas graduadas en centímetros y firmemente sujetas en el suelo, a veces adosadas al pilar de un puente. En cauces muy abiertos puede ser necesario instalar varias escalas de manera que el final de una corresponda al comienzo de la siguiente. Es necesario que un operario acuda cada día a tomar nota de la altura del agua.

Figura 11. **Escala limnimétrica escalonada**



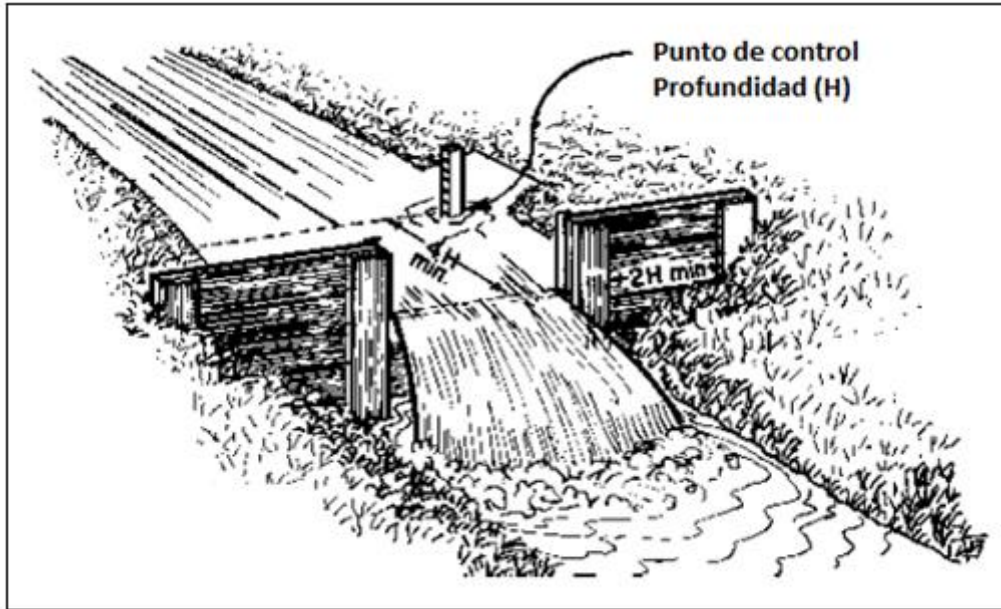
Fuente: *Medida de caudales*. <http://hidrologia.usal.es/temas/Aforos.pdf>. Consulta: 25 de octubre de 2014.

2.2.2.2. Aforadores de vertedero

Un vertedero es cualquier estructura transversal a la corriente que eleva el nivel aguas arriba y permite la circulación a través de una abertura de forma triangular, trapezoidal o rectangular. La forma triangular es más sensible a la medida de caudales pequeños que ocuparán solamente el vértice el triángulo invertido.

En cauces pequeños, a veces se realiza una instalación provisional con una placa de metal, plástico o madera, mientras que en otras ocasiones se trata de construcciones fijas y de mayores dimensiones.

Figura 12. **Vertedero**



Fuente: *Medida de caudales*. <http://hidrologia.usal.es/temas/Aforos.pdf>. Consulta: 25 de octubre de 2014.

3. MÉTODO PARA LA ELABORACIÓN DE CURVAS DE CALIBRACIÓN DE CAUDALES

3.1. Generalidades

La curva de gastos es un gráfico que muestra el caudal medio (Q) que corresponde a un nivel de profundidad (H) particular en un lugar específico de un curso fluvial.

El proceso de elaboración de la curva de calibración nivel-caudal en un cauce debe incluir el dibujo, la localización y la forma de la curva. Se pueden usar métodos de análisis hidráulicos y de ajustes matemáticos para ayudar en el proceso de elaboración de la curva; sin embargo, para el análisis final, la relación nivel-caudal debe ajustarse a los datos de los aforos directos. Por otra parte, el analista debe verificar que la curva de calibración obtenida sea hidráulicamente correcta y ser consciente que cada aforo no necesariamente debe ajustar en la misma curva de calibración, debido al cambio en las condiciones de control que algunas veces puede ocurrir. Es decir, el analista deberá definir, después de una evaluación rigurosa de las condiciones geométricas e hidráulicas de la sección y el tramo, si los datos de un aforo deben ser incluidos o no para determinar la relación nivel-caudal.

Los métodos utilizados para elaborar las curvas de calibración simples son los siguientes:

- Método gráfico
- Método de las ecuaciones hidráulicas (Manning y Chezy)
- Métodos analíticos (logarítmico, parabólico y las tres curvas)

La curva de calibración o relación nivel-caudal, en principio, debe aplicarse solamente dentro del rango de niveles aforados. Las mediciones normalmente se realizan para caudales mínimos y medios. Si se requiere estimar el caudal para niveles de agua superiores o inferiores a los aforados, será necesario efectuar una extrapolación de la curva de calibración. Para ello, es necesario conocer muy bien las características geométricas e hidráulicas de la sección transversal y tener un suficiente número de aforos, con el fin de ajustar dicha curva a una condición de extrapolación aceptable.

Como pueden existir curvas de gastos muy antiguas para determinadas estaciones, es muy importante asegurar el uso de la curva de gastos correcta. Si una crecida modifica el cauce del río, la curva de gastos puede cambiar. La erosión y deposición de sedimento altera y cambia la forma del área de la sección transversal del cauce fluvial. El uso de una curva de gastos desactualizada produce estimaciones de caudal incorrectas, además, al examinar los datos históricos, es importante que la curva de gastos elegida fuera válida cuando se produjo el suceso histórico. El uso de una curva de gastos inadecuada produce estimaciones de caudal incorrectas.

La relación nivel-caudal puede verse afectada debido a diferentes condiciones que suelen presentarse u ocurrir en los ríos. Un embalse existente aguas abajo de una estación hidrométrica puede originar remansos hacia aguas arriba, sumergiendo total o parcialmente el control de flujo de la estación y, por consiguiente, invalidando la relación nivel-caudal. Igualmente, un tributario descargando aguas abajo o dentro del tramo de control de flujo en la estación puede generar remansos variables en el cauce principal, los cuales pueden sumergir el control y afectar la relación nivel-caudal. También, la operación de una represa para fines de generación de energía impone en el río condiciones de régimen dinámico o no permanente, originando un efecto conocido como histéresis o curva en bucle. En estos casos, el caudal real para un determinado nivel de agua será mayor que el caudal normal tomado de la curva de calibración simple cuando el nivel de agua asciende y el caudal real será inferior al caudal normal cuando el nivel de agua desciende.

En todos estos casos, en los cuales la superficie libre del agua y su gradiente son variables y no existe, por lo tanto, una relación simple entre los niveles y los caudales, se deben elaborar curvas de calibración complejas.

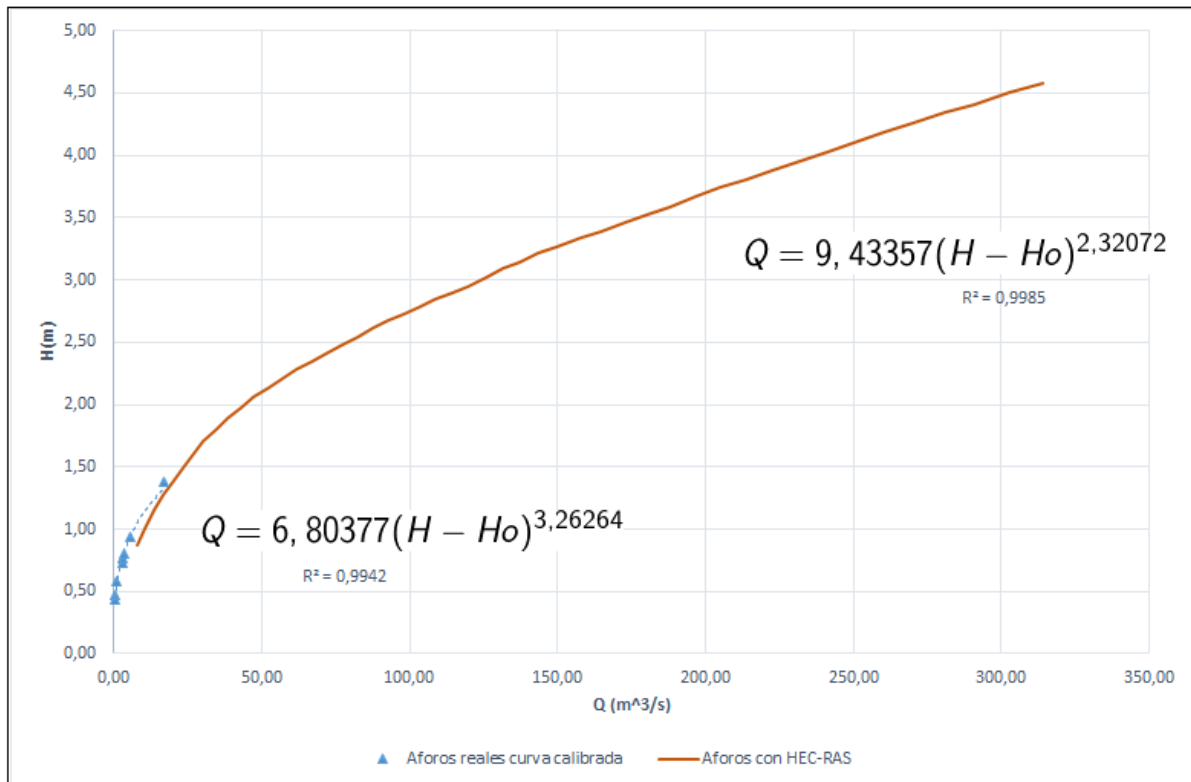
3.2. Funcionamiento del método

El objetivo de aforar una corriente durante varias épocas en el año en una sección determinada, es determinar lo que se conoce como curva de calibración de la sección de control. Esta permite transformar niveles de agua, leídos con una mira, en caudales. Las curvas se construyen a partir de los aforos hechos durante un período largo, de tal manera que se tengan niveles bajos y altos del río. La curva tiene la forma mostrada en la figura 13.

Por medio de esta curva se obtienen los hidrogramas o gráficas variaciones del caudal contra el tiempo en una sección determinada, que tienen la forma mostrada en la figura 14.

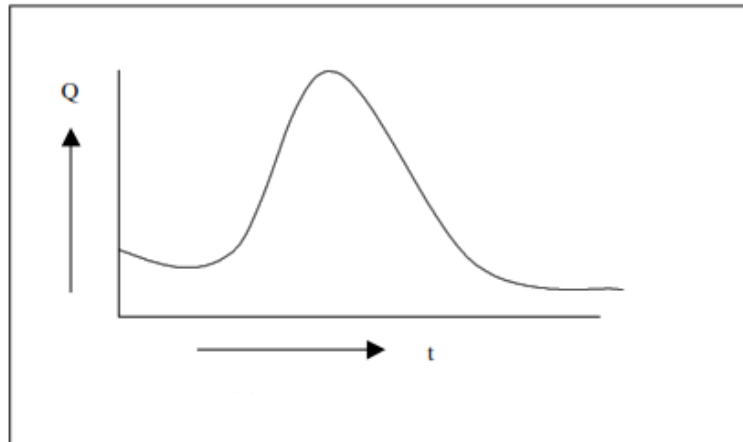
Las curvas de calibración pueden cambiar por efectos erosivos, agradación, efectos de curvas de remanso o debido a flujo no permanente. Por lo tanto, se deben calcular permanentemente estas curvas, para detectar posibles errores.

Figura 13. **Ejemplo curva de calibración cuenca Coatán**



Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

Figura 14. **Hidrograma**



Fuente: elaboración propia.

3.2.1. Factores que pueden inducir errores en la curva de calibración

Existen diversos factores que alteran las curvas de calibración, a continuación se describen; curva de remanso y flujo no permanente.

3.2.1.1. Curva de remanso

Se presentan debido a la existencia de una sección de control, por ejemplo una presa o un vertedero. Si hay curvas de remanso, la misma altura de mira (H) puede corresponder a dos caudales diferentes.

Hay estaciones con muchos años de registro, que son influidas por la cola de embalses, formando remansos que afectan los registros de la estación de aforo.

Para no perder la serie, este problema se puede resolver instalando otra estación auxiliar aguas abajo y se sigue el siguiente procedimiento. Se toman lecturas de los niveles en las dos miras y F es la diferencia entre niveles, ver figura 15.

Aplicando la fórmula de Bernoulli entre las dos miras se tiene:

$$\frac{V_1}{2g} + y_1 + z_1 = \frac{V_2}{2g} + y_2 + z_2 + h_f$$

Donde

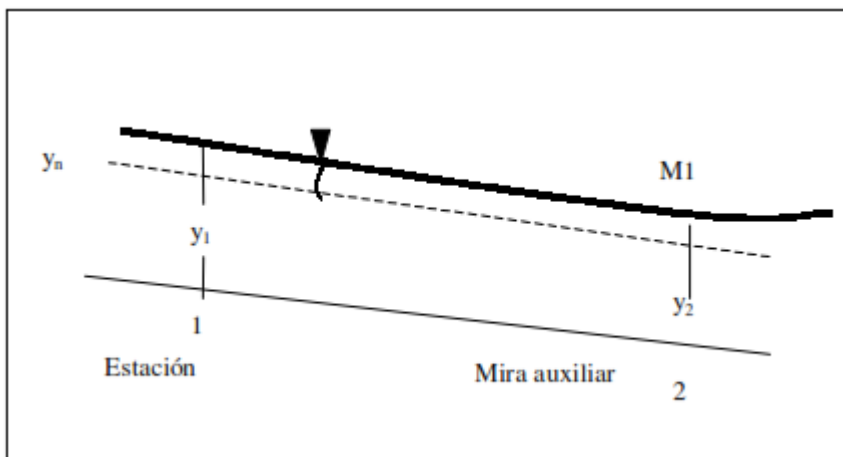
V: velocidad

y: profundidad del flujo

z: cabeza de posición

hf: pérdidas de energía

Figura 15. **Curva de remanso**



Fuente: elaboración propia

Si se tiene

$$Z = z + y$$

Despreciando cabezas de velocidad se obtiene:

$$Z_1 - Z_2 - h_f = F_n$$

El Geological Survey (USGS) propone la siguiente expresión para hallar el caudal corregido:

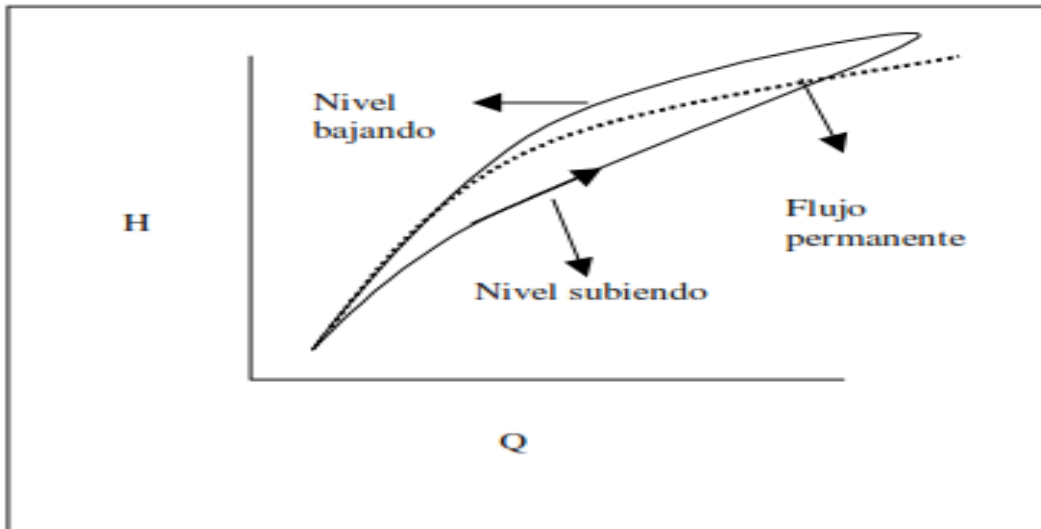
$$\frac{Q}{Q_n} = \left(\frac{F}{F_n}\right)^m$$

Donde Q_n es el caudal normal para una altura de la mira H dada y m es un exponente con un valor cercano a 0,5.

3.2.1.2. Flujo no permanente

Cuando el flujo es no permanente (cuando se produce una creciente), los niveles del agua son diferentes en la etapa de aumento del caudal y cuando este empieza a descender. Cuando empiezan a subir los niveles, el flujo está acelerado y las velocidades son mayores; al contrario, cuando los niveles del agua descienden, hay una desaceleración del flujo, reduciéndose por consiguiente la velocidad. Por lo tanto, la relación niveles caudales es una curva como la mostrada por la figura 16.

Figura 16. Curva de calibración para flujo no permanente



Fuente: elaboración propia.

Si Q_n es el caudal normal para un nivel dado con flujo permanente y Q_M es el caudal con flujo no permanente existe la siguiente relación entre ellos:

$$\frac{Q_M}{Q_n} = \sqrt{1 + \frac{1}{V_w S_o} \frac{dh}{dt}}$$

Donde

S_o : pendiente del canal

$\frac{dh}{dt}$: tasa de cambio del nivel del agua con el tiempo

V_w : velocidad de la onda de creciente, igual a $V_w = 1,4V$.

V : velocidad hallada con la ecuación de Manning

3.3. Métodos para determinar curvas de calibración

A continuación se describen los métodos más utilizados para determinar curvas de calibración, para el presente trabajo se aplicó el método matemático.

3.3.1. Método gráfico

El gráfico de la relación nivel-caudal o curva de calibración se puede realizar con la ayuda de instrumentos de dibujo como curvígrafos, papel milimetrado (aritmético) o logarítmico. El analista encargado de trazar la curva de calibración primero grafica los datos (H-Q) de los aforos y luego determina cuáles de estos deben incluirse en la curva de calibración, para finalmente ajustar, según su criterio, la relación (gráficamente), generando una curva suavizada que produzca la menor desviación posible de los datos de campo.

El analista debe siempre considerar toda la información disponible acerca del control y el nivel efectivo de caudal cero (H_0), con el fin de dar una consideración propia a las curvas de transición y otros cambios en la forma y pendiente de la curva calibrada.

El ajuste gráfico se facilita considerablemente si la gráfica se realiza en papel logarítmico y con la escogencia adecuada del nivel H_0 . Al hacerlo así, usualmente es posible definir segmentos de la curva de calibración por medio de líneas rectas, en lugar de líneas curvas.

3.3.2. Método por ecuaciones hidráulicas

Algunas veces puede definirse la forma de la relación nivel-caudal a través del uso de ecuaciones hidráulicas, como las de Manning y Chezy. En estas los coeficientes de rugosidad de Manning o de Chezy son estimados de los datos de campo, mientras que la pendiente de fricción se estima de los canales, mapas o medidas de calibración. Las ecuaciones de Manning o de Chezy pueden usarse con el fin de estimar el caudal a partir de unos pocos niveles, para definir la forma de la curva de calibración.

Este es un procedimiento simplificado que asume flujo uniforme y permanente, sin embargo, mediante diferentes técnicas de cálculo de curvas de remanso se pueden analizar situaciones más complejas, incluyendo flujo no uniforme. Para cualquiera de los casos (control de sección o control de canal), la curva calculada mediante las ecuaciones hidráulicas se usa solamente para definir la forma de la curva.

Los métodos de las ecuaciones hidráulicas son recomendados principalmente para extrapolar los extremos más altos de la curva de calibración cuando existe el control de canal y cuando la forma del lecho no cambia con el incremento del caudal. Se puede estimar la rugosidad del canal para el rango de extrapolación; mientras que la pendiente de fricción puede estimarse para los caudales más bajos y ser extrapolada al rango más alto.

En algunos casos, las marcas de niveles altos de caudal pueden ayudar en la estimación de la pendiente de fricción. La sección transversal del área (A) y el radio hidráulico (R) pueden ser calculados de la sección transversal mediante el estudio de una sección típica en el tramo de control. Debe tenerse cuidado si la forma de la sección transversal cambia apreciablemente, debido a que la pendiente de fricción también puede cambiar significativamente. Cuando ocurre desbordamiento, la pendiente de fricción para el flujo por encima del nivel de banca llena puede diferir significativamente de la pendiente para el flujo dentro del cauce principal.

La posición correcta de la curva es definida por los datos de aforo. Este procedimiento también puede utilizarse para ayudar a determinar cuándo las mediciones definen una nueva posición de la curva, tal como cuando ocurre un cambio de control.

3.3.3. Métodos matemáticos

Para las estaciones donde el control es estable (con pequeños cambios o sin ellos), la relación H-Q puede definirse por procedimientos matemáticos, como el análisis de regresión. Sin embargo, se debe tener cuidado si los datos de niveles y caudales usados para la regresión no corresponden a la misma curva, entonces los resultados de la regresión pueden definir una curva que no es hidráulicamente correcta. Dicha curva puede conducir a resultados erróneos cuando se aplica para propósitos de calcular los caudales diarios.

3.3.4. Curva potencial

El resultado de la investigación de muchas curvas de descarga ha llegado a la conclusión que estas pueden quedar representadas por la ecuación de una parábola de orden superior, tangente al eje de las ordenadas. En este caso, el caudal queda dado por la ecuación:

$$Q = K (h-h_0)^n$$

Donde

Q: caudal en metros cúbicos por segundo

h: nivel de agua leído en la escala

h₀: Diferencia de nivel entre el punto de mayor profundidad del cauce y el cero de la escala en metros

K, n: constantes a determinar

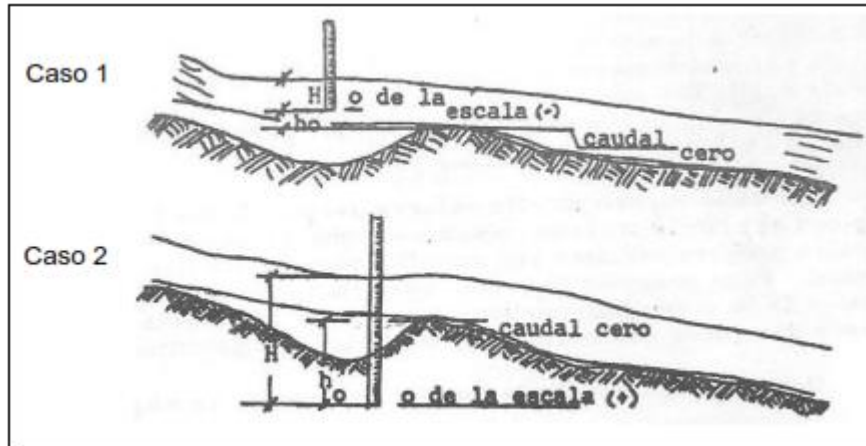
Aplicando logaritmos a la ecuación anterior:

$$\text{Log } Q = \text{Log } K + n \text{ Log } (h-h_0)$$

Esta segunda ecuación se asemeja a una ecuación de tipo lineal con pendiente n e intercepto log K en un sistema de coordenadas, donde los ejes de coordenadas son Log (h-h₀) y Log Q.

Como ya se ha mencionado, el valor de h₀ es la diferencia de nivel entre el punto de mayor profundidad del cauce y el cero de la escala, pudiendo ser positivo o negativo según sea el caso (ver figura 17). Cuando el lecho del río está por debajo del cero de la escala, será negativo y cuando lecho del río está por encima del cero será positivo.

Figura 17. **Determinación de h_0 (diferencia nivel de agua y cero de la escala)**



Fuente: elaboración propia.

La determinación de h_0 se puede efectuar en campo cuando se miden los caudales bajos.

De lo anteriormente expresado se deduce la importancia de que aguas abajo de la sección exista un buen control estabilizado para que no cambie h_0 , y así permanezca inalterable la expresión analítica de la curva de descarga. Sin embargo, no en todas las corrientes es posible.

El nivel de agua efectivo de caudal cero (h_0) debe ser determinado para cada segmento de la curva de calibración. Para controles de forma regular, este valor es casi igual al nivel real para caudal cero. Para la mayoría de controles, sin embargo, se puede hacer una determinación más exacta mediante el método gráfico de prueba y error. Se asume un valor de h_0 y se grafican los datos basados en este valor asumido; el valor final de h_0 es aquel que al graficar los datos de $\text{Log}(Q)$ contra $\text{Log}(H-H_0)$, permite obtener el mejor ajuste a una línea recta.

Generalmente, solo se necesitan unos pocos valores para hallar un valor que determine una línea recta para el segmento de la curva de calibración.

El método matemático consiste en la regresión lineal o no lineal. Por medio de una regresión lineal, de las variables transformadas mediante logaritmos y, aplicando mínimos cuadrados, se determinan las constantes k y n de la ecuación. Mientras que en la regresión no lineal se usan los datos sin transformación.

Mediante la regresión no lineal (método matemático) y utilizando programas de cálculo como Excel, Statistic, entre otros, se pueden determinar directamente las constantes k y n de la curva de descarga.

3.4. Extrapolación de la curva de calibración

En estudios hidrológicos se necesita información de caudales máximos extremos. Por razones en las que las condiciones son críticas, la medición directa de estos niveles y caudales extremos rara vez se puede realizar, por lo que se hace necesario extrapolar la curva de calibración para hallar una estimación de los caudales que correspondan a estos niveles.

Una relación nivel - caudal no debe ser aplicada por fuera del rango de los caudales medidos en los que está basada. Si se desean estimar caudales por fuera de este rango medido, será necesario hacer una extrapolación de la curva de calibración para caudales menores o mayores. Esto se debe hacer cuidadosamente a través del uso de métodos que ayuden a definir la forma y la posición de la parte extrapolada de la curva. Antes de hacer cualquier extrapolación de la curva, debe examinarse el canal y el control en una determinada distancia aguas abajo y aguas arriba de la estación.

Las obstrucciones en el flujo, las restricciones, las expansiones, las contracciones, los cambios en la forma del canal y otras condiciones se deben tener en cuenta. Si existen condiciones anormales del canal que no puedan ser consideradas en el análisis de la curva, entonces no se debe hacer la extrapolación.

Se recomienda, siempre y cuando sea posible, hacer extrapolaciones usando dos o más de los métodos aquí descritos. Así, los resultados pueden compararse y se puede definir con más confianza la curva extrapolada.

El procedimiento tradicional para la estimación de los caudales asociados a los niveles máximos no aforados consiste en extrapolar la relación nivel-caudal obtenida a partir de aforos realizados con niveles bajos y medios, lo cual puede generar grandes errores en la estimación. Dichos errores pueden deberse a la inestabilidad de la sección de control, así como a la relación no unívoca que puede presentarse entre los niveles y los caudales en un río cuando se tiene régimen no permanente. Los caudales máximos pueden estimarse algunas veces con la ayuda de los caudales más altos de la relación nivel-caudal.

Un método hidráulico para la extrapolación de la curva nivel-caudal sugiere tener conocimiento completo de la configuración de la sección de aforo en el rango no aforado. En una sección uniforme con forma de V, la geometría de la misma está bien representada por una parábola; pero si es irregular en una o ambas márgenes, la condición es diferente y se hace difícil la extrapolación, debiéndose tener en cuenta estas limitaciones para hacer una mejor estimación de los caudales máximos.

Los métodos recomendados para la extrapolación de las curvas de calibración nivel-caudal son los siguientes:

- Simulaciones con HEC-RAS (descrito en el capítulo 4)
- Método gráfico
- Método de área-velocidad
- Método de las ecuaciones hidráulicas (Stevens y Manning)
- Método de área-pendiente

3.4.1. Método gráfico

El método más simple para extrapolar la curva de calibración nivel-caudal es el método gráfico en papel logarítmico. Para usar este método correctamente, el analista debe tener un conocimiento adecuado de las condiciones de control y de los métodos logarítmicos, de otra forma el método podrá conducir a grandes errores.

La parte de la curva que requiere extrapolación debe ser graficada con una escala efectiva, escogida de tal forma que la curva graficada asemeje una recta. Adicionalmente, el analista debe tener conocimiento del tipo de control (sección o canal) y la forma del control a través del rango de extrapolación; si la forma del control no cambia significativamente y la rugosidad del canal permanece casi constante, entonces es razonable hacer una línea recta de extrapolación sobre el papel logarítmico. Una extrapolación logarítmica de este tipo es particularmente conveniente para condiciones de control de canales para caudales medios y altos, pero no debe ser usada para extrapolar más de 1,5 veces el mayor caudal medido. Es muy importante tener en cuenta que se requiere especial cuidado cuando se extrapolan los caudales más bajos.

Cuando existe control de sección, es muy importante conocer la forma del control y el nivel efectivo de caudal cero (h_0). Algunas veces es mejor graficar la curva de calibración en papel logarítmico de tal forma que pueda localizarse el nivel efectivo (H_0), especialmente si la curva es extrapolada para $Q = 0$.

3.4.2. Método área-velocidad media

El caudal queda en general por lo expresión:

$$Q = A * V_m$$

Donde A es la superficie encerrada por el perfil de la sección limnimétrica para una altura de agua determinada y V_m la velocidad media correspondiente a esa misma altura.

Con el perfil de la sección limnimétrica es fácil determinar una curva de variación del área con respecto a la altura de agua, obteniendo una curva cóncava. Al mismo tiempo, de todos los aforos de la sección puede determinarse la velocidad media (V_m) del agua.

La velocidad media queda en general por la expresión:

$$V_m = Q/A \text{ (metros sobre segundo)}$$

Luego se construye una curva entre altura de agua y velocidad media (V_m), obteniéndose en general una curva que tiende a un valor asintótico para velocidades altas. Luego, en este método el problema se reduce a extrapolar la curva de velocidad media.

3.4.3. Método de Stevens

Este método se utiliza para ríos relativamente anchos y poco profundos. Es una modificación de la fórmula de Chezy para canales abiertos en que el caudal queda dado por la expresión:

$$Q = A \cdot C \sqrt{SR} \text{ (Chezy).}$$

Donde

A: área en metros cuadrados

S: pendiente del eje hidráulico

R: radio hidráulico, que para cauces anchos y poco profundos se reemplaza por

la profundidad media $D = \frac{A}{a}$ en metros

a: ancho del río en la superficie del agua, en metros

C: constante adimensional

Luego, queda:

$$Q = C\sqrt{S} A\sqrt{D}$$

Al igual que en la fórmula de Manning, el factor hidráulico $C\sqrt{S}$ para valores altos del limnómetro tiende a hacerse constante y por consiguiente si se hace un gráfico los valores de Q contra los valores de $A\sqrt{D}$ se obtendrá una línea recta.

3.4.4. Método de Manning

Aunque la fórmula de Manning está deducida para canales y en condiciones de flujo uniforme, la experiencia de los últimos años indica que es un valioso instrumento para analizar las características hidráulicas y geométricas de los aforos realizados.

Además, cuando se tiene una crecida, la pendiente del eje hidráulico toma un valor promedio pasando por alto las pequeñas variaciones en la pendiente del lecho. Es por esto que las fórmulas para canales abiertos pueden aplicarse a caudales naturales con mayor seguridad a los estados altos que a los bajos, pues estos últimos quedan notoriamente influenciados por las condiciones del lecho.

El caudal Q queda dado por la expresión:

$$Q = AR^{\frac{2}{3}} \frac{\sqrt{S}}{n}$$

Donde

A: área en metros cuadrados

R: radio hidráulico en metros

P: perímetro mojado en metros

S: pendiente del eje hidráulico, se determina con las mediciones en terreno inmediatamente después de una crecida.

El término $AR^{2/3}$ depende solo de las características geométricas de la sección y mediante el correspondiente perfil de la sección puede conocerse para cualquier nivel del agua.

Este término se llamará, de aquí en adelante, factor geométrico, y se puede calcular para cada aforo con las medidas directas que se han tomado.

A continuación, se construye una curva $h = f(AR^{2/3})$ y se puede realizar la extrapolación con la fórmula de Manning.

Al término $\frac{\sqrt{S}}{n}$ se le puede denominar factor hidráulico, pues considera la rugosidad del lecho y la pendiente del eje hidráulico. Este término, algunas veces, tiende a un valor asintótico para niveles altos del río.

La curva $h = f\left(\frac{\sqrt{S}}{n}\right)$, en la que las alturas de agua están en ordenadas y $\frac{\sqrt{S}}{n}$ en abscisas, es por lo tanto de extrapolación relativamente sencilla.

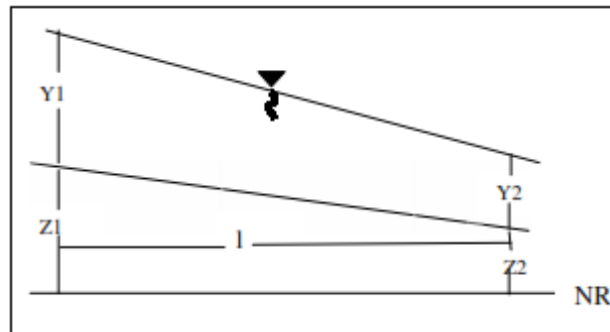
Con la extrapolación de estas curvas se pueden determinar también los caudales para aquellas alturas de agua en que no se han obtenido aforos. Al haber un cambio, ya sea en el factor geométrico o hidráulico, este queda claramente reflejado en las gráficas antes mencionadas mediante un desfase de las curvas respectivas.

3.4.5. Método de área–pendiente

A veces se presentan crecientes en sitios donde no existe ningún tipo de instrumentación y cuya estimación se requiere para el diseño de estructuras hidráulicas como puentes o canales. Las crecientes dejan huellas que permiten hacer una estimación aproximada del caudal, determinando las propiedades geométricas de 2 secciones diferentes, separadas una distancia L y el coeficiente de rugosidad en el tramo.

Si se supone que se tiene un tramo de río con profundidades Y1 y Y2 en las secciones 1 y 2 respectivamente, con NR el nivel de referencia, se tendría el diagrama que se presenta en la figura 18.

Figura 18. **Diagrama método de área-pendiente**



Fuente: Elaboración propia.

Aplicando la ecuación de Bernoulli se tiene:

$$h_1 + \frac{V_1^2}{2g} = h_2 + \frac{V_2^2}{2g} + h_f$$

Donde $h = Y + Z$ y h_f son las pérdidas de energía que se pueden hallar usando la fórmula de Manning:

$$VA = Q = \frac{1}{n} R_H^{2/3} S_f^{1/2}$$

Donde

V: velocidad en metros por segundos

RH: radio hidráulico en metros

Sf: pendiente de la línea de energía

A: área de la sección transversal en metros cuadrados

n: coeficiente de rugosidad de Manning

3.5. Aplicación del método

Para el presente trabajo se construyeron las curvas de calibración con sus respectivas ecuaciones por medio del método matemático, haciendo una regresión potencial y extrapolando las curvas por medio de simulaciones hidráulicas con HEC-RAS, en las cuencas hidrológicas: Coatán, Suchiate, Naranjo, Ocosito, Samalá, Sis-Icán, Nahualate y Madre Vieja, pertenecientes a la vertiente del Pacífico, para el periodo de 2010 a 2013.

Con las curvas de calibración se pueden determinar caudales para cualquier nivel de altura de agua, ya obtenidos, los caudales constituyen datos básicos e indispensables para cualquier tipo de estudio relacionado con la dinámica fluvial (estudios de crecientes, regionalización de caudales, estudios de navegabilidad, entre otros), para el diseño de estructuras hidráulicas (bocatomas, presas, diques, obras de protección, entre otros). También para estudios de calidad del agua y, en general, para cualquier estudio que se requiera adelantar con propósitos de planeación, manejo y aprovechamiento del recurso hídrico.

En estudios hidrológicos donde se requiere conocer las tendencias de crecidas (máximas alturas de agua), para diseños de obras hidráulicas, entre otros, es necesario conocer los caudales máximos extremos. La medición directa de estos caudales máximos extremos rara vez se puede realizar por ser en condiciones críticas, por lo que se hace una extrapolación de las curvas de calibración para hallar los caudales que correspondan a estos niveles. Finalmente se obtienen las curvas de calibración con una ecuación donde se determina el caudal en función de una altura determinada.

4. SIMULACIONES HIDRÁULICAS HEC-RAS

4.1. Generalidades

HEC-RAS es un programa de cómputo que modela los flujos hidráulicos de agua a través de ríos naturales y otros canales. El programa es unidimensional, lo que significa que no hay modelado directo del efecto hidráulico de los cambios de sección transversal, curvas, y otros aspectos bidimensionales y tridimensionales de flujo. El programa fue desarrollado por el Departamento de Defensa del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos con el fin de gestionar los ríos, puertos y otras obras públicas bajo su jurisdicción, encontrando una amplia aceptación desde su lanzamiento público en 1995.

El Centro de Ingeniería Hidrológica (HEC) en Davis, California desarrolló el sistema de análisis de río (RAS) para ayudar a los ingenieros hidráulicos en el análisis de flujo de canales y la determinación de planicie de inundación. Incluye numerosas capacidades de datos de entrada, componentes hidráulicos, análisis de las capacidades de almacenamiento y gestión de datos, de gráficos y generación de informes.

4.2. Información de diseño

HEC-RAS es un programa informático para el modelado de agua que fluye a través de sistemas de canales abiertos y el cálculo de los perfiles de la superficie del agua.

HEC-RAS encuentra particular aplicación comercial en el manejo de llanuras de inundación y estudios de inundaciones para evaluar usurpaciones de cauce. Desde su aparición, el modelo HEC-RAS ha evolucionado y ha aumentado sus capacidades. El resultado es que en la actualidad se dispone de un modelo matemático que permite hacer el estudio del funcionamiento hidráulico de canales, con cambios de régimen, secciones compuestas irregulares, puentes, alcantarillas, uniones y bifurcaciones, lagunas, entre otros. A su vez, posee cómodas interfaces gráficas para representar la geometría y ver los resultados, lo que permite comparar distintos escenarios de funcionamiento.

El modelo HEC-RAS incluye un módulo que permite hacer el análisis del flujo unidimensional en régimen no permanente, que aunque representa una simplificación importante del fenómeno de propagación de una avenida, en muchos casos es una aproximación suficientemente adecuada para predecir niveles de agua. Además, permite incluir almacenamientos que forman parte de un sistema hidráulico, con ello se puede calcular la variación del nivel de la superficie libre en un almacenamiento.

Algunos de los usos adicionales son: diseño y análisis de puentes y alcantarillas, estudios de diques y estudios para modificación de canales. Se puede utilizar también para el análisis de uso de presa, aunque otros métodos de modelado son actualmente más ampliamente aceptados para este propósito.

4.3. Aplicación del método

Las simulaciones hidráulicas presentan una manera de análisis de la interrelación entre la topografía del cauce de un río, los volúmenes de agua y sedimentos transportados, así como la manera en que influyen en el nivel de agua las obstrucciones u obras hidráulicas que se presenten en su cauce.

En el presente trabajo de graduación se realizaron simulaciones hidráulicas para flujo no permanente, tomándose en cuenta únicamente la interrelación entre la topografía del cauce del río y los volúmenes de agua.

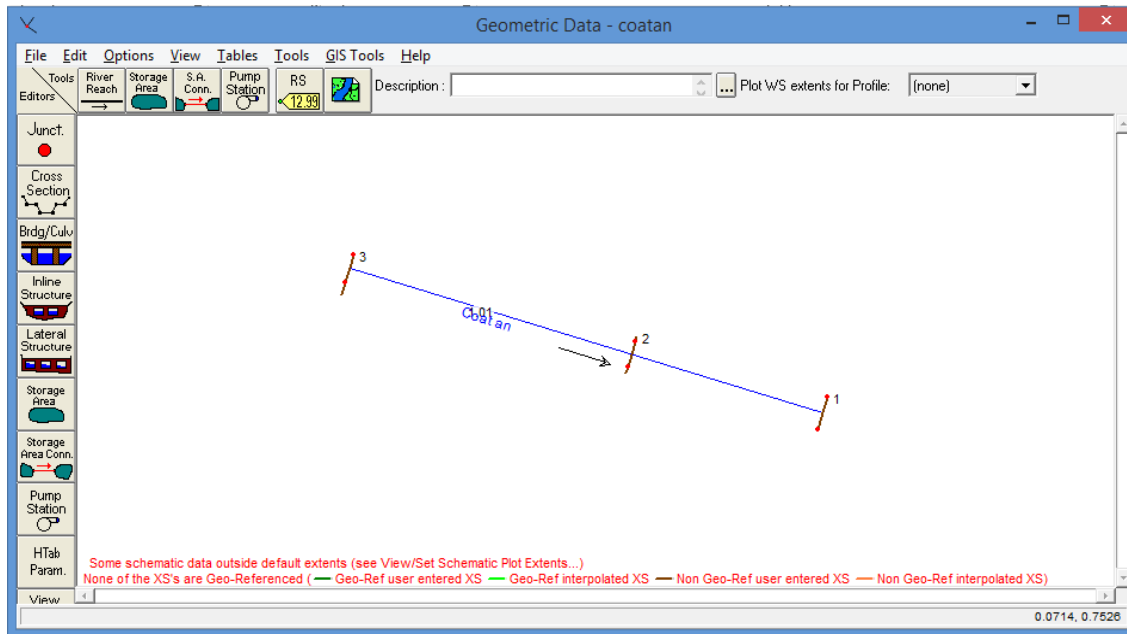
En las simulaciones hidráulicas se extrapolaron caudales para distintos niveles de agua hasta el borde del cauce. Con estos datos simulados se elaboraron las curvas de nivel para cada cuenca de estudio, definiendo una ecuación para determinar caudales (Q) en función de una altura (H), donde esta altura de agua debe estar limitada hasta el nivel de desborde del cauce.

4.4. Procedimiento de una simulación para flujo no permanente

Para demostrar el siguiente procedimiento, se tomó con base la información de la estación de control Cunlaj de la cuenca hidrológica Coatán.

Como primer paso, se deben introducir los datos geométricos de las secciones de control, en este caso se utiliza la opción *geometric data* o datos geométricos.

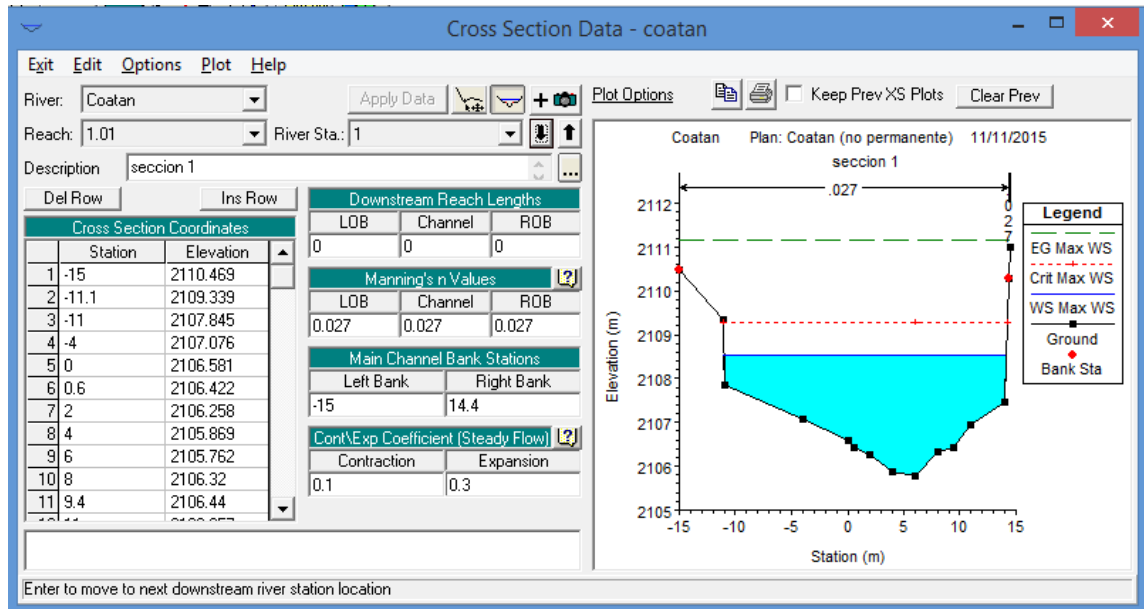
Figura 19. Datos geométricos



Fuente: elaboración propia, empleando HEC-RAS.

Luego, ir a la opción *cross section* (sección transversal) y se ingresan los datos topográficos de cada sección transversal, como distancia entre estaciones y valores de Manning.

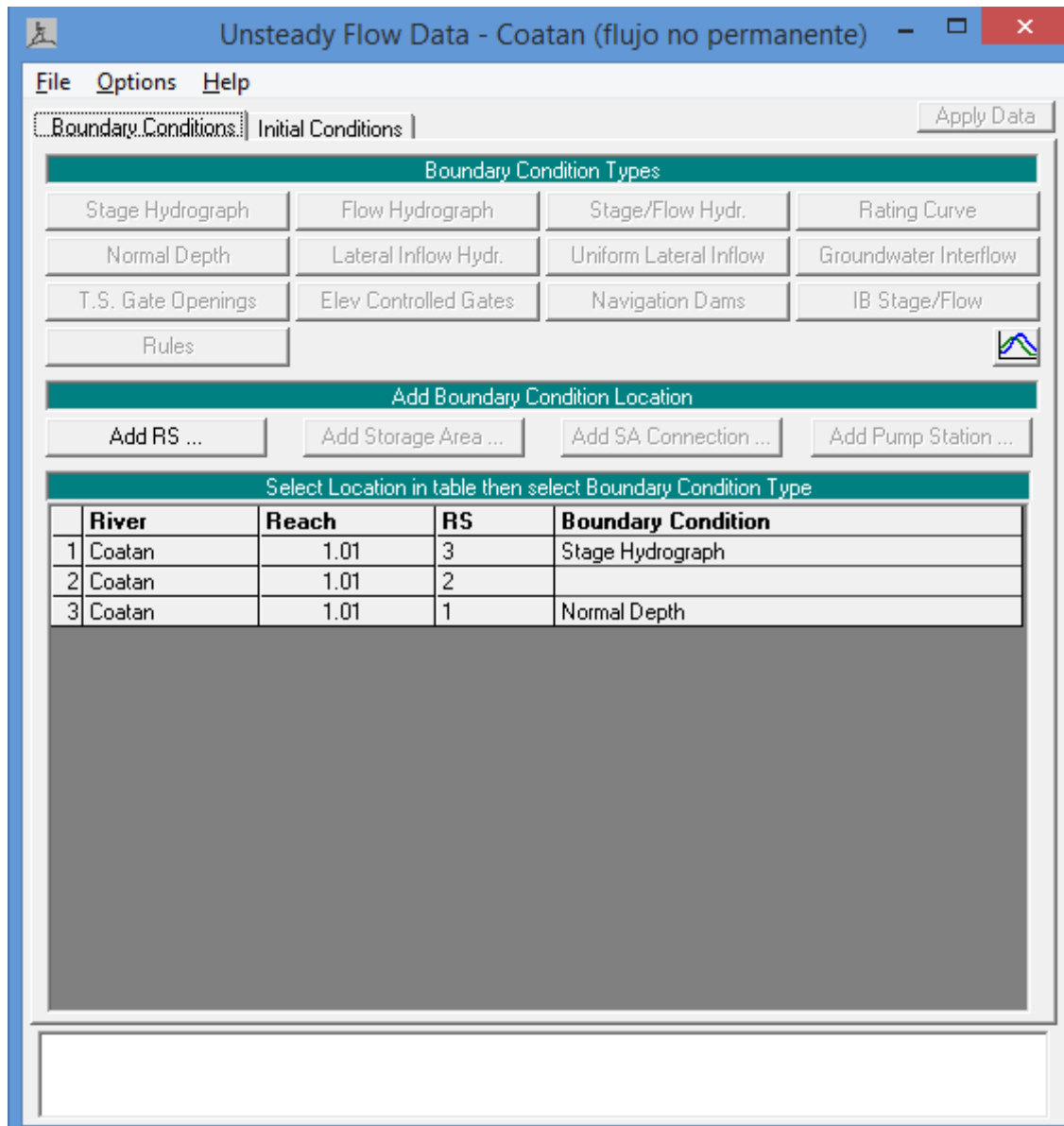
Figura 20. Sección transversal



Fuente: elaboración propia, empleando HEC-RAS.

Ya ingresados los datos geométricos, ir a la opción *enter unsteady flow data* (ingresar datos para flujo no permanente), ingresar los datos necesarios para flujo no permanente.

Figura 21. Datos para flujo no permanente



Fuente: elaboración propia, empleando HEC-RAS.

En este caso, se deben ingresar datos para *boundary conditions* (condiciones de frontera) para aguas arriba y aguas abajo. En aguas arriba se ingresaron datos para un hidrograma.

Figura 22. Datos de hidrograma

Stage Hydrograph
River: Coatan Reach: 1.01 RS: 3

Read from DSS before simulation Select DSS file and Path

File:
Path:

Enter Table Data time interval: 1 Hour

Select/Enter the Data's Starting Time Reference

Use Simulation Time: Date: 19SEP2008 Time: 2400

Fixed Start Time: Date: Time:

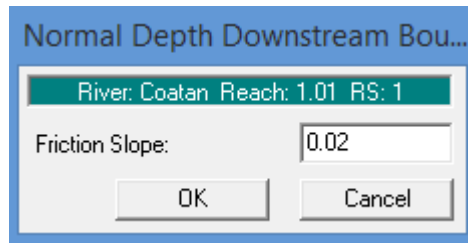
No. Ordinates Interpolate Missing Values Del Row Ins Row

Hydrograph Data			
	Date	Simulation Time (hours)	Stage (m)
1	19sep2008 2400	00:00	2109.25
2	20sep2008 0100	01:00	2109.33
3	20sep2008 0200	02:00	2109.42
4	20sep2008 0300	03:00	2109.5
5	20sep2008 0400	04:00	2109.59
6	20sep2008 0500	05:00	2109.67
7	20sep2008 0600	06:00	2109.76
8	20sep2008 0700	07:00	2109.84
9	20sep2008 0800	08:00	2109.92
10	20sep2008 0900	09:00	2110.01
11	20sep2008 1000	10:00	2110.09
12	20sep2008 1100	11:00	2110.18
13	20sep2008 1200	12:00	2110.26
14	20sep2008 1300	13:00	2110.35
15	20sep2008 1400	14:00	2110.42

Fuente: elaboración propia, empleando HEC-RAS.

Luego, en aguas abajo para condiciones de frontera, se ingresan datos de *normal depth* o pendiente.

Figura 23. **Datos de pendiente**



Fuente: elaboración propia, empleando HEC-RAS.

Después de ingresar los datos para condiciones de frontera, se ingresan datos para condiciones iniciales. En este caso, se ingresa el flujo inicial en aguas arriba.

Figura 24. Condiciones iniciales

Boundary Conditions | Initial Conditions | Apply Data

Initial Flow Distribution Method

Use a Restart File Filename:

Enter Initial flow distribution

Add RS...

Locations of Flow Data Changes

	River	Reach	RS	Initial Flow
1	Coatan	1.01	3	5

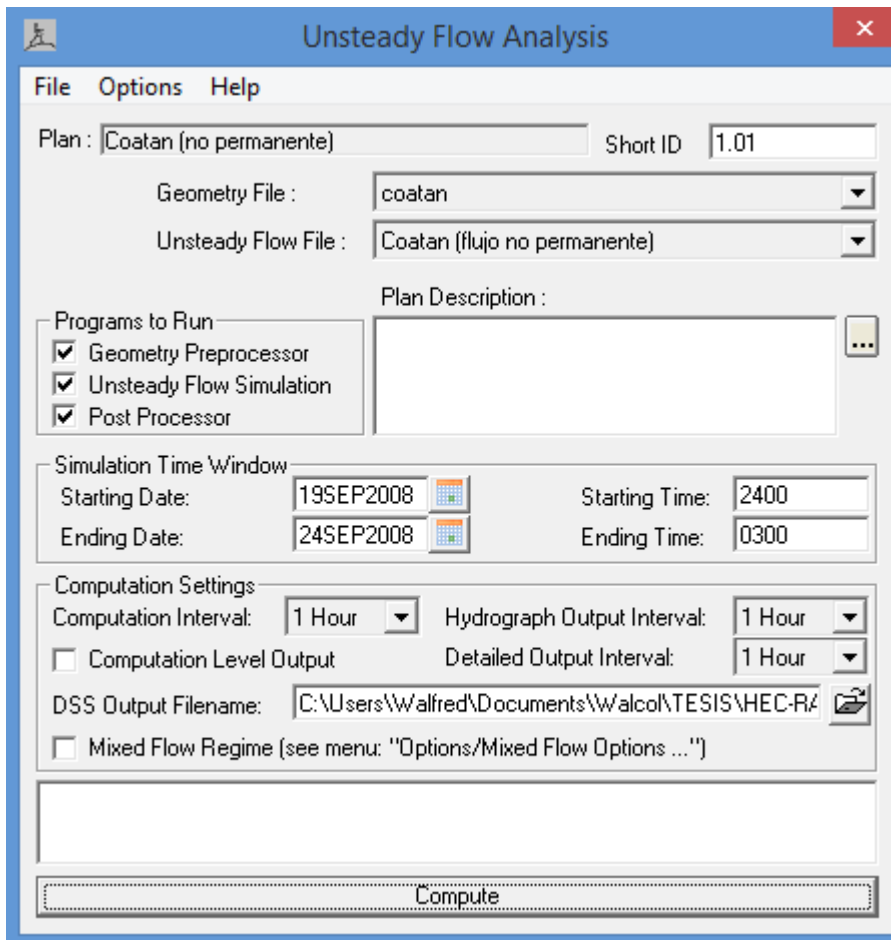
Initial Elevation of Storage Areas

	Storage Area	Initial Elevation
1		

Fuente: elaboración propia, empleando HEC-RAS.

Ya ingresados los datos de flujo no permanente, se procede a crear o correr una simulación para flujo no permanente (*perform an unsteady flow simulation*), donde se debe asegurar de procesar los datos que se ingresaron anteriormente, es decir, datos geométricos y datos para flujo no permanente.

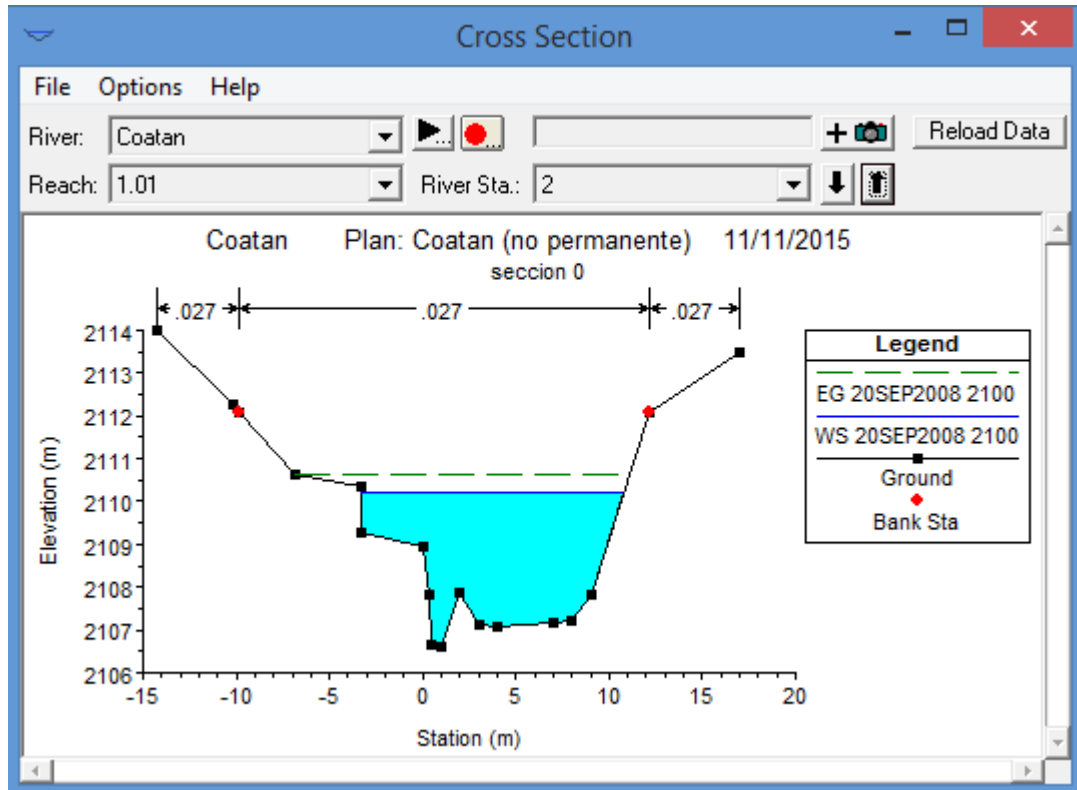
Figura 25. Simulación para flujo no permanente



Fuente: elaboración propia, empleando HEC-RAS.

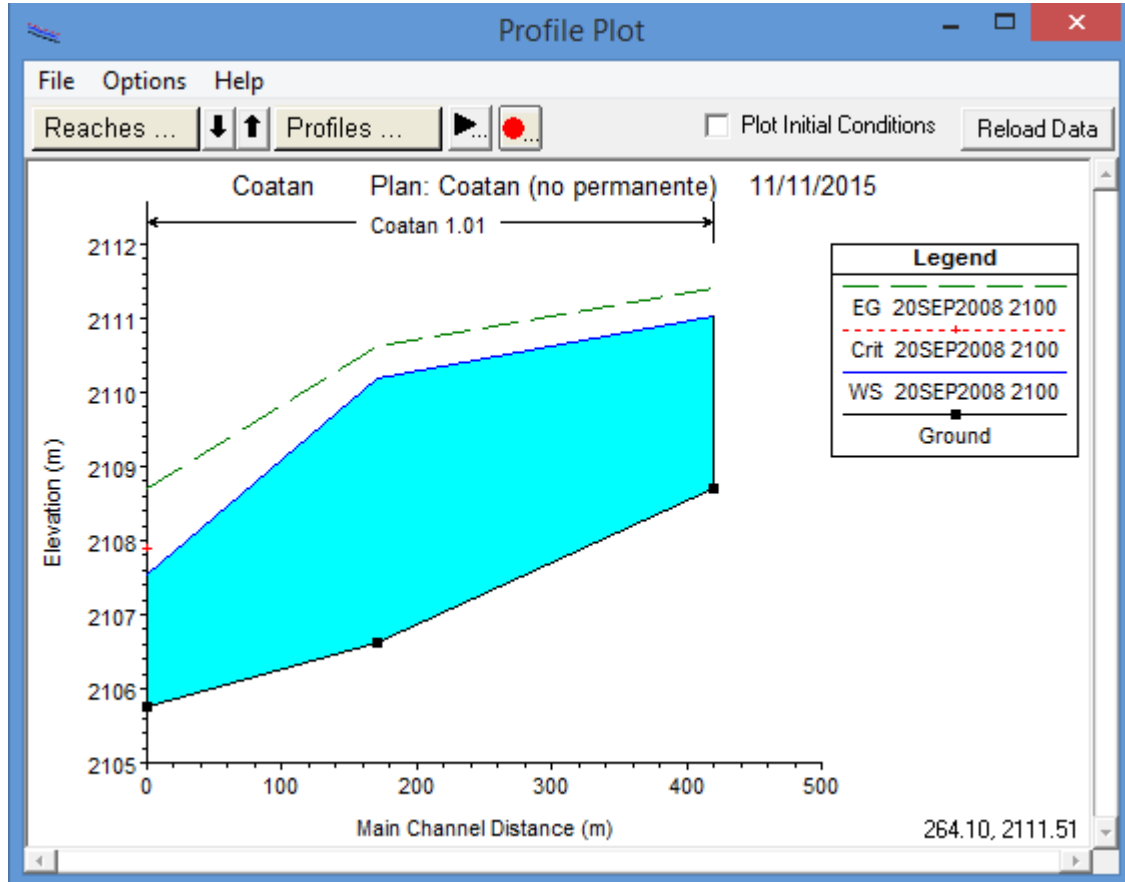
Ya hecha la simulación, se obtienen varios resultados como: secciones transversales, perfiles, curvas de calibración, vista del tramo de secciones en 3D, tablas de resumen, entre otros. A continuación se muestran algunos resultados de la sección de la cuenca Coatán.

Figura 26. Sección transversal, cuenca Coatán



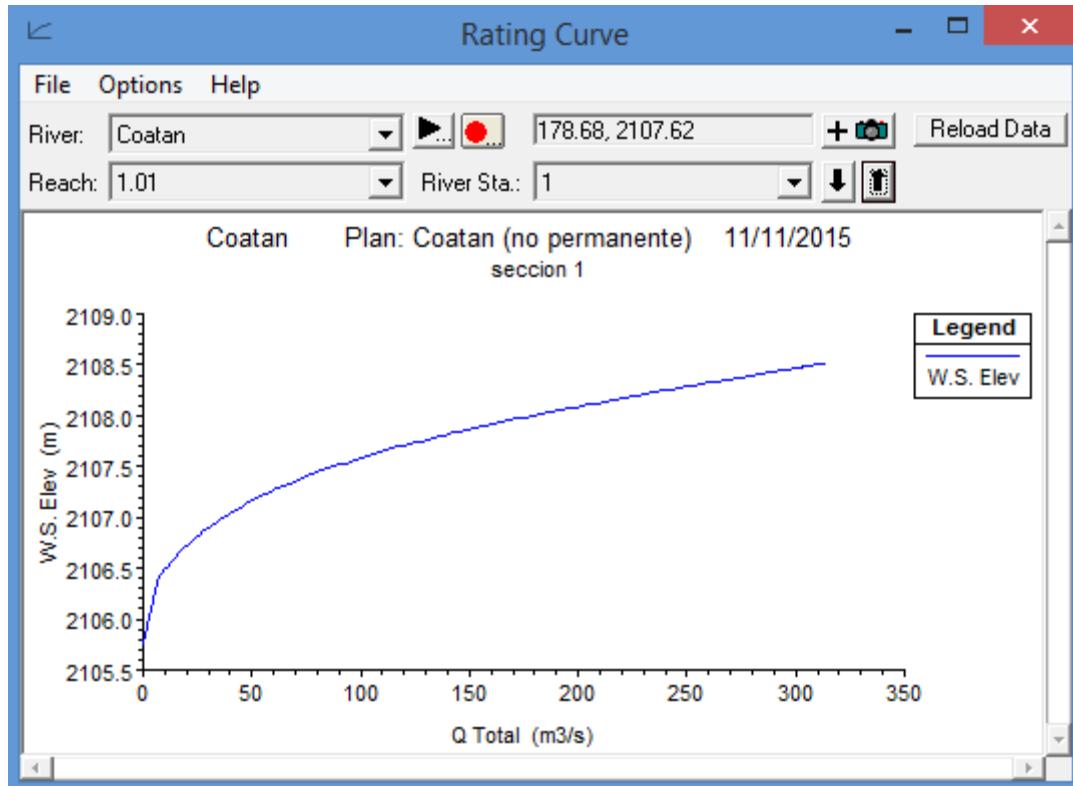
Fuente: elaboración propia, empleando HEC-RAS.

Figura 27. Perfil, cuenca Coatán



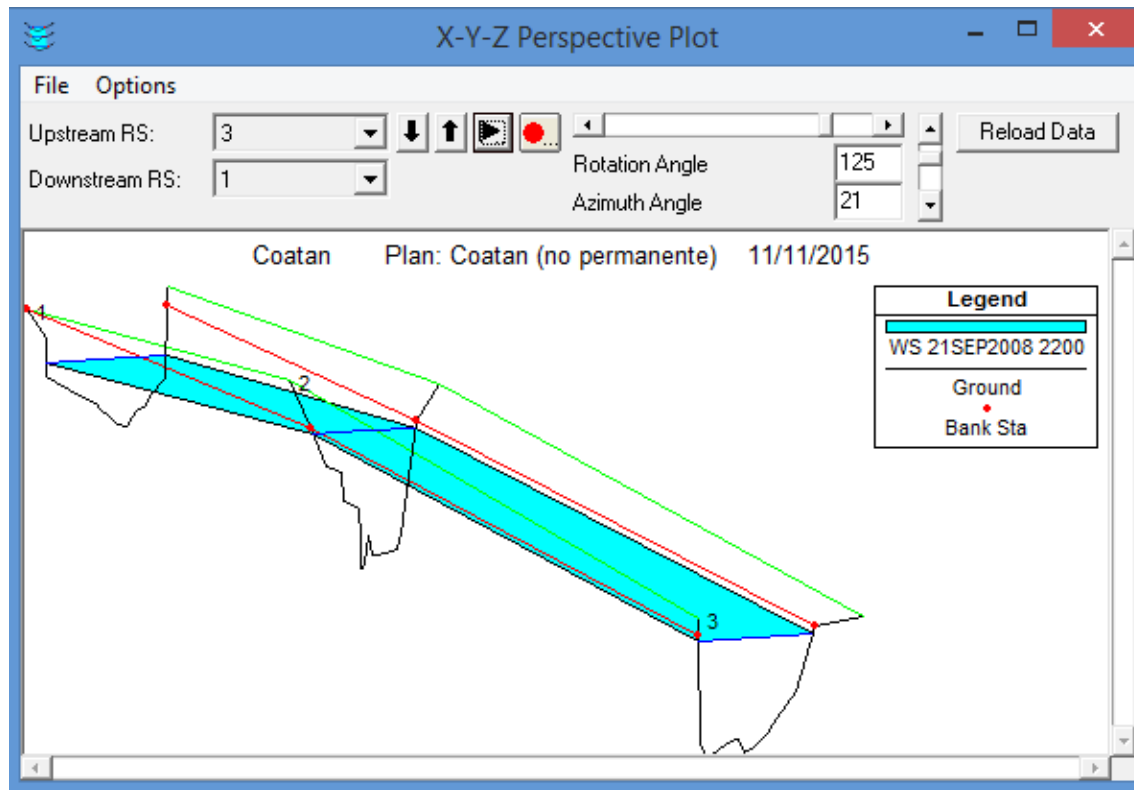
Fuente: elaboración propia, empleando HEC-RAS.

Figura 28. Curvas de calibración, cuenca Coatán



Fuente: elaboración propia, empleando HEC-RAS.

Figura 29. Tramo de secciones en 3D, cuenca Coatán



Fuente: elaboración propia, empleando HEC-RAS.

Figura 30. **Tabla de resumen, cuenca Coatán**

Plan: 1.01 Coatan 1.01 RS: 2 Profile: Max WS					
Element		Left OB	Channel	Right OB	
E.G. Elev (m)	2113.18				
Vel Head (m)	1.08				
W.S. Elev (m)	2112.10				
Crit W.S. (m)					
E.G. Slope (m/m)	0.004818				
Q Total (m3/s)	314.05				
Top Width (m)	22.06				
Vel Total (m/s)	4.60				
Max Chl Dpth (m)	5.48				
Conv. Total (m3/s)	4524.4				
Length Wtd. (m)	170.00				
Min Ch El (m)	2106.62				
Alpha	1.00				
Frctn Loss (m)	1.48				
C & E Loss (m)					
Wt. n-Val.			0.027		
Reach Len. (m)		170.00	170.00		170.00
Flow Area (m2)			68.24		
Area (m2)			68.24		
Flow (m3/s)			314.05		
Top Width (m)			22.06		
Avg. Vel. (m/s)			4.60		
Hydr. Depth (m)			3.09		
Conv. (m3/s)			4524.4		
Wetted Per. (m)			28.49		
Shear (N/m2)			113.17		
Stream Power (N/m s)		813.92	0.00		0.00
Cum Volume (1000 m3)			9.50		
Cum SA (1000 m2)			4.02		

Fuente: elaboración propia, empleando HEC-RAS.

5. INFORMACIÓN OBTENIDA EN CAMPO DE LAS ESTACIONES HIDROMÉTRICAS

A continuación se muestran tablas con resultados que se obtuvieron en campo del periodo de 2010 a 2013.

Tabla I. **Identificación de cuencas**

Nombre de Cuenca	Código de Cuenca
Coatán	1,01
Suchiate	1,02
Naranja	1,03
Ocosito	1,04
Samalá	1,05
Sis-Icán	1,06
Nahualate	1,07
Madre Vieja	1,09

Fuente: Insivumeh.

Tabla II. Dimensionales de las mediciones

Medición	Dimensional
Escala de inicio	Metros (m)
Escala final	Metros (m)
Escala promedio	Metros (m)
Área	Metros cuadrados (m^2)
Perímetro mojado	Metros (m)
Ancho	Metros (m)
Profundidad media	Metros (m)
Radio hidráulico	Metros (m)
Profundidad máxima	Metros (m)
Ho	Metros (m)
Velocidad media	Metros / segundos (m/s)
Caudal	Metros cúbicos / segundos (m^3/s)
Factor hidráulico	Adimensional

Fuente: elaboración propia.

Tabla III. Información, cuenca Coatán

Estación	Cuenca	Fecha	Escala	Escala	Escala	Área	Perim	Ancho	Prof
			Inicio	Final	Promedio		mojado		media
CUNLAJ	1,01	08/05/2010	-0,100	-0,100	-0,100	3,537	11,188	10,960	0,323
CUNLAJ	1,01	17/09/2010	0,250	0,250	0,250	8,535	13,797	13,500	0,632
CUNLAJ	1,01	18/02/2012	0,63	0,63	0,63	3,172	11,419	11,310	0,280
CUNLAJ	1,01	24/06/2012	1,02	1,02	1,02	4,060	14,447	14,380	0,282
CUNLAJ	1,01	14/09/2012	1,03	1,03	1,03	4,815	15,463	15,380	0,313
CUNLAJ	1,01	18/04/2013	0,79	0,79	0,79	4,007	9,398	9,100	0,440
CUNLAJ	1,01	18/08/2013	1,08	1,08	1,08	6,208	13,840	13,620	0,456
CUNLAJ	1,01	11/09/2013	1,40	1,40	1,40	11,298	10,872	9,600	1,177

Continuación de la tabla III.

Estación	Cuenca	Fecha	Radio	Prof.	Ho	Velocidad	Caudal	Factor
			Hidráulico	Máxima		Media		Hidráulico
CUNLAJ	1,01	08/05/2010	0,316	0,660	-0,150	0,175	0,619	0,377
CUNLAJ	1,01	17/09/2010	0,619	0,940	-0,300	0,664	5,667	0,915
CUNLAJ	1,01	18/02/2012	0,278	0,510	-0,300	0,318	1,008	0,747
CUNLAJ	1,01	24/06/2012	0,281	0,550	-0,450	0,682	2,770	1,590
CUNLAJ	1,01	14/09/2012	0,311	0,580	-0,450	0,593	2,855	1,291
CUNLAJ	1,01	18/04/2013	0,426	0,680	0,000	0,111	0,445	0,196
CUNLAJ	1,01	18/08/2013	0,449	0,700	-0,350	0,588	3,648	1,003
CUNLAJ	1,01	11/09/2013	1,039	1,600	-0,200	1,517	17,141	1,479

Fuente: Insivumeh.

Tabla IV. Información, cuenca Suchiate

Estación	Cuenca	Fecha	Escala	Escala	Escala	Área	Perim	Ancho	Prof
			Inicio	Final	Promedio		mojado		media
MALACATÁN	1,02	08/05/2010	0,450	0,450	0,450	20,211	27,406	27,250	0,742
MALACATÁN	1,02	06/03/2011	0,310	0,310	0,310	27,318	32,072	31,900	0,856
MALACATÁN	1,02	17/02/2012	0,40	0,40	0,40	15,140	22,217	22,000	0,688
MALACATÁN	1,02	24/06/2012	1,87	1,87	1,87	44,684	28,587	27,850	1,604
MALACATÁN	1,02	13/09/2012	1,42	1,42	1,42	29,656	27,683	27,200	1,090
MALACATÁN	1,02	17/04/2013	0,85	0,85	0,85	15,440	24,153	24,000	0,643
MALACATÁN	1,02	16/05/2013	1,02	1,02	1,02	17,404	23,683	23,400	0,744
MALACATÁN	1,02	10/09/2013	1,90	2,00	1,95	45,795	28,567	27,800	1,647
MALACATÁN	1,02	11/09/2013	2,00	1,90	1,95	51,875	28,863	27,800	1,866

Continuación de la tabla IV.

Estación	Cuenca	Fecha	Radio	Prof.	Ho	Velocidad	Caudal	Factor
			Hidráulico	Máxima		Media		Hidráulico
MALACATÁN	1,02	08/05/2010	0,737	1,130	-0,24	1,055	21,328	1,293
MALACATÁN	1,02	06/03/2011	0,852	1,300	-0,20	0,858	23,429	0,954
MALACATÁN	1,02	17/02/2012	0,681	1,150	-0,24	0,985	14,916	1,272
MALACATÁN	1,02	24/06/2012	1,563	2,600	-0,30	2,751	122,918	2,042
MALACATÁN	1,02	13/09/2012	1,071	1,550	-0,30	1,621	48,065	1,548
MALACATÁN	1,02	17/04/2013	0,639	0,980	-0,15	0,683	10,542	0,920
MALACATÁN	1,02	16/05/2013	0,735	1,100	-0,15	0,823	14,322	1,011
MALACATÁN	1,02	10/09/2013	1,603	2,900	-0,35	2,985	136,715	2,180
MALACATÁN	1,02	11/09/2013	1,797	2,900	-0,10	2,594	134,563	1,755

Fuente: Insivumeh.

Tabla V. Información, cuenca Naranja

Estación	Cuenca	Fecha	Escala	Escala	Escala	Área	Perim	Ancho	Prof
			Inicio	Final	Promedio		mojado		media
COATEPEQUE	1,03	07/05/2010	0,790	0,810	0,800	12,212	26,786	26,610	0,459
CORRAL GRANDE II	1,03	08/05/2010	0,300	0,300	0,300	2,804	7,000	6,630	0,423
CORRAL GRANDE II	1,03	16/09/2010	0,450	0,450	0,450	6,298	11,559	11,200	0,562
MELENDEZ II	1,03	08/05/2010	-0,220	-0,220	-0,220	5,381	15,987	15,920	0,338
PAJAPITA	1,03	07/05/2010	0,390	0,390	0,390	52,035	41,432	41,070	1,267
COATEPEQUE	1,03	06/03/2011	0,900	0,900	0,900	15,736	26,587	26,330	0,598
CORRAL GRANDE II	1,03	06/03/2011	0,340	0,340	0,340	4,840	12,094	11,880	0,407
MELENDEZ II	1,03	06/03/2011	0,740	0,740	0,740	3,555	11,666	11,590	0,307
PAJAPITA	1,03	06/03/2011	0,280	0,280	0,280	44,950	40,983	40,520	1,109
COATEPEQUE	1,03	04/01/2012	0,98	0,98	0,98	15,972	25,615	25,330	0,631
COATEPEQUE	1,03	16/02/2012	0,56	0,56	0,56	16,716	25,342	25,120	0,665
COATEPEQUE	1,03	23/06/2012	1,50	1,48	1,49	30,005	30,030	29,530	1,016
COATEPEQUE	1,03	13/09/2012	1,21	1,21	1,21	22,445	30,809	30,520	0,735
CORRAL GRANDE II	1,03	18/02/2012	0,36	0,36	0,36	4,604	10,090	9,650	0,477
CORRAL GRANDE II	1,03	24/06/2012	0,55	0,55	0,55	5,176	12,052	11,880	0,436
CORRAL GRANDE II	1,03	01/08/2012	0,41	0,41	0,41	4,607	9,942	9,450	0,487
CORRAL GRANDE II	1,03	14/09/2012	0,50	0,50	0,50	2,993	7,809	7,320	0,409
COATEPEQUE	1,03	15/05/2013	0,90	0,90	0,90	13,632	27,509	27,270	0,500
COATEPEQUE	1,03	10/09/2013	1,60	1,62	1,61	36,394	30,088	29,250	1,244
COATEPEQUE	1,03	11/09/2013	1,50	1,65	1,58	34,983	29,917	29,120	1,201
CORRAL GRANDE II	1,03	17/05/2013	0,49	0,49	0,49	2,571	9,631	9,530	0,270
CORRAL GRANDE II	1,03	10/09/2013	0,88	0,86	0,87	8,080	9,063	7,360	1,098
CORRAL GRANDE II	1,03	09/10/2013	0,76	0,72	0,74	5,331	7,687	7,360	0,724

Continuación tabla V.

Estación	Cuenca	Fecha	Radio	Prof.	Ho	Velocidad	Caudal	Factor
			Hidráulico	Máxima		Media		Hidráulico
COATEPEQUE	1,03	07/05/2010	0,456	0,820	-0,35	1,082	13,212	1,826
CORRAL GRANDE II	1,03	08/05/2010	0,401	0,680	0,00	0,434	1,218	0,800
CORRAL GRANDE II	1,03	16/09/2010	0,545	0,790	-0,10	1,093	6,884	1,639
MELENDEZ II	1,03	08/05/2010	0,337	0,500	-0,22	0,691	3,720	1,429
PAJAPITA	1,03	07/05/2010	1,256	1,890	-0,22	0,175	9,106	0,150
COATEPEQUE	1,03	06/03/2011	0,592	0,890	-0,17	0,722	11,363	1,024
CORRAL GRANDE II	1,03	06/03/2011	0,400	0,680	-0,07	0,429	2,075	0,789
MELENDEZ II	1,03	06/03/2011	0,305	0,470	-0,19	0,608	2,162	1,343
PAJAPITA	1,03	06/03/2011	1,097	1,760	-0,19	0,111	4,973	0,104
COATEPEQUE	1,03	04/01/2012	0,624	1,040	-0,07	0,678	10,834	0,929
COATEPEQUE	1,03	16/02/2012	0,660	1,010	-0,07	0,568	9,503	0,750
COATEPEQUE	1,03	23/06/2012	0,999	1,370	-0,20	1,830	54,920	1,831
COATEPEQUE	1,03	13/09/2012	0,728	1,100	-0,24	1,162	26,079	1,435
CORRAL GRANDE II	1,03	18/02/2012	0,456	0,720	0,00	0,350	1,611	0,590
CORRAL GRANDE II	1,03	24/06/2012	0,429	0,650	-0,12	0,725	3,752	1,273
CORRAL GRANDE II	1,03	01/08/2012	0,463	0,630	0,00	0,497	2,287	0,829
CORRAL GRANDE II	1,03	14/09/2012	0,383	0,610	-0,10	0,868	2,597	1,644
COATEPEQUE	1,03	15/05/2013	0,496	0,680	-0,20	0,661	9,016	1,056
COATEPEQUE	1,03	10/09/2013	1,210	1,600	-0,10	1,962	71,394	1,728
COATEPEQUE	1,03	11/09/2013	1,169	1,420	-0,10	1,768	61,854	1,593
CORRAL GRANDE II	1,03	17/05/2013	0,267	0,380	-0,15	0,496	1,274	1,195
CORRAL GRANDE II	1,03	10/09/2013	0,892	1,720	-0,15	1,584	12,799	1,710
CORRAL GRANDE II	1,03	09/10/2013	0,693	0,900	-0,15	0,805	4,289	1,027

Fuente: Insivumeh.

Tabla VI. Información, cuenca Ocosito

Estación	Cuenca	Fecha	Escala	Escala	Escala	Área	Perim	Ancho	Prof
			Inicio	Final	Promedio		mojado		media
CABALLO BLANCO	1,04	07/05/2010	0,320	0,320	0,320	49,995	48,459	48,270	1,036
CABALLO BLANCO	1,04	07/03/2011	0,230	0,230	0,230	48,510	46,235	46,000	1,055
EL ASINTAL	1,04	05/03/2011	0,380	0,380	0,380	4,372	10,904	10,770	0,406
CABALLO BLANCO	1,04	16/02/2012	0,22	0,22	0,22	51,348	45,004	44,700	1,149
CABALLO BLANCO	1,04	22/06/2012	0,66	0,66	0,66	71,707	56,458	56,210	1,276
CABALLO BLANCO	1,04	12/09/2012	0,72	0,72	0,72	69,465	56,777	56,500	1,229
CABALLO BLANCO	1,04	15/05/2013	0,26	0,26	0,26	49,182	45,111	44,790	1,098
CABALLO BLANCO	1,04	15/08/2013	0,93	0,90	0,92	84,395	60,607	60,320	1,399
CABALLO BLANCO	1,04	12/09/2013	1,41	1,54	1,48	123,430	65,809	65,300	1,890
Estación	Cuenca	Fecha	Radio	Prof.	Ho	Velocidad	Caudal	Factor	
			Hidráulico	Máxima		Media		Hidráulico	
CABALLO BLANCO	1,04	07/05/2010	1,032	1,450	-0,15	0,193	9,656	0,189	
CABALLO BLANCO	1,04	07/03/2011	1,049	1,550	0,00	0,104	5,054	0,101	
EL ASINTAL	1,04	05/03/2011	0,401	0,630	-0,52	0,557	2,436	1,025	
CABALLO BLANCO	1,04	16/02/2012	1,141	1,600	0,00	0,114	5,841	0,104	
CABALLO BLANCO	1,04	22/06/2012	1,270	1,980	-0,20	0,408	29,292	0,348	
CABALLO BLANCO	1,04	12/09/2012	1,223	2,000	-0,30	0,528	36,662	0,461	
CABALLO BLANCO	1,04	15/05/2013	1,090	1,500	0,00	0,119	5,852	0,112	
CABALLO BLANCO	1,04	15/08/2013	1,392	2,150	-0,20	0,593	50,039	0,475	
CABALLO BLANCO	1,04	12/09/2013	1,876	2,850	-0,20	1,135	140,131	0,746	

Fuente: Insivumeh.

Tabla VII. Información, cuenca Samalá

Estación	Cuenca	Fecha	Escala	Escala	Escala	Área	Perim	Ancho	Prof
			Inicio	Final	Promedio		mojado		media
CANTEL	1,05	07/05/2010	0,340	0,340	0,340	6,954	17,860	17,710	0,393
CANDELARIA	1,05	06/05/2010	0,020	0,020	0,020	3,883	11,059	10,970	0,354
CANTEL II	1,05	03/06/2011	0,130	0,130	0,130	12,742	12,696	11,880	1,073
CANTEL II	1,05	16/02/2012	0,03	0,03	0,03	10,131	11,884	11,270	0,899
CANTEL II	1,05	22/06/2012	0,30	0,30	0,30	9,989	15,147	14,770	0,676
CANTEL II	1,05	12/09/2012	0,32	0,32	0,32	12,540	15,187	14,620	0,858
CANDELARIA	1,05	26/06/2013	-0,05	-0,05	-0,05	10,339	13,047	12,690	0,815
CANDELARIA	1,05	14/08/2013	0,01	0,01	0,01	9,466	13,162	12,900	0,734
CANDELARIA	1,05	12/09/2013	0,85	0,85	0,85	25,602	20,411	19,510	1,312
CANTEL II	1,05	14/05/2013	0,02	0,02	0,02	10,499	12,071	11,610	0,904
CANTEL II	1,05	14/08/2013	0,03	0,03	0,03	11,993	13,371	12,840	0,934
CANTEL II	1,05	12/09/2013	1,30	1,30	1,30	32,494	18,886	17,360	1,872
Estación	Cuenca	Fecha	Radio	Prof.	Ho	Velocidad	Caudal	Factor	
			Hidráulico	Máxima		Media		Hidráulico	
CANTEL	1,05	07/05/2010	0,389	0,610	-0,45	0,526	3,659	0,987	
CANDELARIA	1,05	06/05/2010	0,351	0,510	-0,15	0,164	0,637	0,330	
CANTEL II	1,05	03/06/2011	1,004	1,520	0,00	0,645	8,215	0,643	
CANTEL II	1,05	16/02/2012	0,853	1,430	0,00	0,470	4,766	0,523	
CANTEL II	1,05	22/06/2012	0,659	1,500	-0,37	0,763	7,623	1,007	
CANTEL II	1,05	12/09/2012	0,826	1,700	-0,27	0,796	9,978	0,904	
CANDELARIA	1,05	26/06/2013	0,792	1,350	-0,39	1,272	13,148	1,485	
CANDELARIA	1,05	14/08/2013	0,719	1,200	-0,40	1,073	10,160	1,337	
CANDELARIA	1,05	12/09/2013	1,254	2,410	-0,40	2,704	69,227	2,325	
CANTEL II	1,05	14/05/2013	0,870	1,340	0,00	0,380	3,987	0,417	
CANTEL II	1,05	14/08/2013	0,897	1,390	0,00	0,337	4,043	0,362	
CANTEL II	1,05	12/09/2013	1,721	2,850	0,00	1,548	50,303	1,078	

Fuente: Insivumeh.

Tabla VIII. Información, cuenca Sis

Estación	Cuenca	Fecha	Escala	Escala	Escala	Área	Perim	Ancho	Prof
			Inicio	Final	Promedio		mojado		media
LA MÁQUINA	1,06	06/05/2010	0,750	0,750	0,750	10,208	19,101	18,820	0,542
LA MÁQUINA	1,06	05/03/2011	0,490	0,490	0,490	14,059	19,723	19,250	0,730
LA MÁQUINA	1,06	15/02/2012	0,63	0,63	0,63	14,939	19,418	18,740	0,797
LA MÁQUINA	1,06	21/06/2012	0,78	0,78	0,78	15,591	19,117	18,350	0,850
LA MÁQUINA	1,06	12/09/2012	0,76	0,76	0,76	17,796	19,753	18,860	0,944
LA MÁQUINA	1,06	16/04/2013	0,61	0,61	0,61	12,337	18,389	17,930	0,688
LA MÁQUINA	1,06	14/05/2013	0,65	0,65	0,65	14,189	17,947	17,070	0,831
LA MÁQUINA	1,06	14/08/2013	0,73	0,73	0,73	15,123	19,029	18,500	0,817
LA MÁQUINA	1,06	13/09/2013	1,09	1,11	1,10	26,083	19,681	18,200	1,433
Estación	Cuenca	Fecha	Radio	Prof.	Ho	Velocidad	Caudal	Factor	
			Hidráulico	Máxima		Media		Hidráulico	
LA MÁQUINA	1,06	06/05/2010	0,534	0,860	0,02	0,262	2,671	0,397	
LA MÁQUINA	1,06	05/03/2011	0,713	0,930	0,25	0,153	2,150	0,192	
LA MÁQUINA	1,06	15/02/2012	0,769	1,010	0,37	0,108	1,618	0,129	
LA MÁQUINA	1,06	21/06/2012	0,816	1,120	0,10	0,412	6,423	0,472	
LA MÁQUINA	1,06	12/09/2012	0,901	1,260	0,17	0,365	6,502	0,392	
LA MÁQUINA	1,06	16/04/2013	0,671	0,850	0,32	0,086	1,064	0,113	
LA MÁQUINA	1,06	14/05/2013	0,791	1,100	0,37	0,144	2,037	0,168	
LA MÁQUINA	1,06	14/08/2013	0,795	1,100	0,12	0,350	5,293	0,408	
LA MÁQUINA	1,06	13/09/2013	1,325	1,740	0,30	0,665	17,342	0,551	

Fuente: Insivumeh.

Tabla IX. Información, cuenca Icán

Estación	Cuenca	Fecha	Escala	Escala	Escala	Área	Perim	Ancho	Prof
			Inicio	Final	Promedio		mojado		media
LA FRANJA	1,06	06/05/2010	0,210	0,210	0,210	27,933	21,616	19,620	1,424
LA FRANJA	1,06	05/03/2011	0,060	0,060	0,060	21,657	17,828	16,210	1,336
LA FRANJA	1,06	18/06/2013	0,35	0,35	0,35	33,559	22,705	20,450	1,641
LA FRANJA	1,06	14/08/2013	0,42	0,42	0,42	33,483	21,139	19,420	1,724
LA FRANJA	1,06	13/09/2013	0,70	0,70	0,70	40,683	24,659	22,450	1,812
Estación	Cuenca	Fecha	Radio	Prof.	Ho	Velocidad	Caudal	Factor	
			Hidráulico	Máxima		Media		Hidráulico	
LA FRANJA	1,06	06/05/2010	1,292	3,100	-1,11	0,151	4,227	0,128	
LA FRANJA	1,06	05/03/2011	1,215	2,650	-1,11	0,102	2,210	0,090	
LA FRANJA	1,06	18/06/2013	1,478	3,350	-1,05	0,270	9,059	0,208	
LA FRANJA	1,06	14/08/2013	1,584	3,500	-1,00	0,282	9,426	0,207	
LA FRANJA	1,06	13/09/2013	1,650	4,050	-1,11	0,681	27,707	0,488	

Fuente: Insivumeh.

Tabla X. Información, cuenca Nahualate

Estación	Cuenca	Fecha	Escala	Escala	Escala	Área	Perim	Ancho	Prof
			Inicio	Final	Promedio		mojado		media
MONTECRISTO	1,07	06/05/2010	1,090	1,090	1,090	20,805	22,021	21,130	0,985
SAN MIGUEL MOCA	1,07	05/05/2010	0,180	0,180	0,180	35,269	29,087	28,480	1,238
MONTECRISTO	1,07	04/03/2011	0,530	0,530	0,530	10,578	16,584	16,170	0,654
SAN MIGUEL MOCA	1,07	04/03/2011	0,120	0,120	0,120	17,584	22,170	21,850	0,805
SAN MIGUEL MOCÁ	1,07	15/02/2012	SIN ESCALA			17,912	18,867	18,290	0,979
SAN MIGUEL MOCÁ	1,07	20/06/2012	SIN ESCALA			39,046	52,293	51,600	0,757
SAN MIGUEL MOCÁ	1,07	12/09/2012	SIN ESCALA			40,300	52,857	52,390	0,769
SAN MIGUEL MOCA	1,07	14/05/2013	0,30	0,30	0,30	16,109	37,247	37,180	0,433
SAN MIGUEL MOCA	1,07	13/08/2013	0,63	0,63	0,63	31,465	47,228	47,000	0,669
SAN MIGUEL MOCA	1,07	13/09/2013	1,15	1,15	1,15	53,059	52,062	51,680	1,027
Estación	Cuenca	Fecha	Radio	Prof.	Ho	Velocidad	Caudal	Factor	
			Hidráulico	Máxima		Media		Hidráulico	
MONTECRISTO	1,07	06/05/2010	0,945	2,200	-0,030	0,396	8,246	0,412	
SAN MIGUEL MOCA	1,07	05/05/2010	1,213	2,000	-0,030	0,781	27,548	0,687	
MONTECRISTO	1,07	04/03/2011	0,638	1,120	-0,050	0,322	3,411	0,435	
SAN MIGUEL MOCA	1,07	04/03/2011	0,793	1,400	-0,050	0,818	14,383	0,955	
SAN MIGUEL MOCÁ	1,07	15/02/2012	0,949	2,000	-0,15	1,486	26,624	1,539	
SAN MIGUEL MOCÁ	1,07	20/06/2012	0,747	2,400	-0,15	2,041	79,699	2,480	
SAN MIGUEL MOCÁ	1,07	12/09/2012	0,762	1,720	-0,10	1,753	70,627	2,100	
SAN MIGUEL MOCA	1,07	14/05/2013	0,432	0,800	-0,10	0,802	12,920	1,402	
SAN MIGUEL MOCA	1,07	13/08/2013	0,666	1,350	-0,05	1,242	39,089	1,629	
SAN MIGUEL MOCA	1,07	13/09/2013	1,019	1,870	0,00	2,384	126,492	2,354	

Fuente: Insivumeh.

Tabla XI. Información, cuenca Madre Vieja

Estación	Cuenca	Fecha	Esca	Esca	Esca	Área	Perim	Ancho	Prof
			Inicio	Final	Promedio		mojado		media
PATULUL	1,09	05/05/2010	0,530	0,530	0,530	7,104	12,720	12,430	0,572
SAJBINÁ	1,09	04/03/2011	0,230	0,230	0,230	3,455	9,048	8,880	0,389
SAJBINÁ	1,09	03/06/2011	0,190	0,190	0,190	3,331	8,838	8,640	0,386
PATULUL	1,09	02/03/2011	SIN ESCALA			7,516	12,748	12,100	0,621
PATULUL	1,09	02/06/2011	SIN ESCALA			8,925	13,144	12,600	0,708
SAJBINÁ	1,09	15/02/2012	SIN ESCALA			3,563	8,958	8,790	0,405
SAJBINÁ	1,09	11/09/2012	SIN ESCALA			3,289	9,704	9,580	0,343
PATULUL	1,09	15/02/2012	SIN ESCALA			6,437	13,091	12,520	0,514
PATULUL	1,09	19/06/2012	SIN ESCALA			9,720	13,290	12,600	0,771
PATULUL	1,09	11/09/2012	SIN ESCALA			8,490	13,327	12,900	0,658
PATULUL	1,09	11/10/2012	SIN ESCALA			11,737	13,977	13,180	0,891
PATULUL	1,09	14/05/2013	0,330	0,330	0,330	10,854	13,006	11,530	0,941
PATULUL	1,09	10/07/2013	0,420	0,420	0,420	8,792	12,388	11,230	0,783
PATULUL	1,09	13/09/2013	0,570	0,570	0,570	13,850	13,880	13,000	1,065
Estación	Cuenca	Fecha	Radio	Prof.	Ho	Velocidad	Caudal	Factor	
			Hidráulico	Máxima		Media		Hidráulico	
PATULUL	1,09	05/05/2010	0,558	0,870	-0,07	1,120	7,960	1,652	
SAJBINÁ	1,09	04/03/2011	0,382	0,530	-0,10	1,002	3,4613	1,9035	
SAJBINÁ	1,09	03/06/2011	0,377	0,600	-0,07	0,839	2,794	1,607	
PATULUL	1,09	02/03/2011	0,590	1,130	-0,15	1,841	13,840	2,619	
PATULUL	1,09	02/06/2011	0,679	1,100	-0,16	2,246	20,048	2,908	
SAJBINÁ	1,09	15/02/2012	0,398	0,600	-0,10	1,024	3,6474	1,8926	
SAJBINÁ	1,09	11/09/2012	0,339	0,540	-0,25	1,944	6,394	3,999	
PATULUL	1,09	15/02/2012	0,492	0,700	-0,14	1,329	8,554	2,133	
PATULUL	1,09	19/06/2012	0,731	1,000	-0,15	2,374	23,077	2,925	
PATULUL	1,09	11/09/2012	0,637	0,800	-0,16	1,975	16,766	2,667	
PATULUL	1,09	11/10/2012	0,840	1,300	-0,14	2,627	30,832	2,951	
PATULUL	1,09	14/05/2013	0,835	1,600	-0,14	0,643	6,980	0,726	
PATULUL	1,09	10/07/2013	0,710	1,290	0,00	1,319	11,598	1,658	
PATULUL	1,09	13/09/2013	0,998	1,300	0,00	2,100	29,081	2,103	

Fuente: Insivumeh.

6. RESULTADOS Y DESARROLLO DE LAS CURVAS DE CALIBRACIÓN

A continuación se presentan las curvas de calibración, secciones transversales, perfiles y perspectivas en 3D de las estaciones de control de las cuencas hidrológicas: Coatán, Suchiate, Naranjo, Ocosito, Samalá, Sis-Icán, Nahualate y Madre Vieja, que se construyeron a partir de la información obtenida de las estaciones de control según fuente de información del Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (Insivumeh). Para elaborar las curvas se aplicó un método matemático, realizando una regresión potencial con el uso del programa de cálculo Excel, el cual fue el método que más se ajustó a la sucesión de datos, es decir, a los aforos reales. Luego, con el uso del programa HEC-RAS, se simularon caudales de las secciones de control para cada una de las cuencas de estudio, desde un caudal mínimo hasta un caudal máximo, cuando el nivel de agua se encuentra al desborde de cada sección.

El procedimiento aplicado con HEC-RAS se explicó anteriormente en el capítulo 4, subtítulo 4.4, del presente trabajo. Por último, con los datos simulados, se extrapólo cada una de las curvas de calibración determinando una ecuación para determinar caudales (Q), que estén en función de una altura de agua (H). Para demostrar cómo se determinó la ecuación de cada una de las curvas, se explica el procedimiento a continuación, tomando como base los datos de la cuenca Coatán.

6.1. Procedimiento para determinar Ho

Generalmente Ho no se conoce y puede encontrarse mediante prueba y error, asumiendo diferentes valores de Ho y graficando Log(Q) contra Log(H-Ho), el valor final de Ho es aquel que al graficar los datos de Log(Q) contra Log(H-Ho) permite obtener el mejor ajuste a una línea recta. Para elaborar las curvas de calibración, se determinó Ho por medio de prueba y error.

Como ejemplo del procedimiento se tomó como base los datos de la estación hidrológica que le pertenece a la cuenca Coatán.

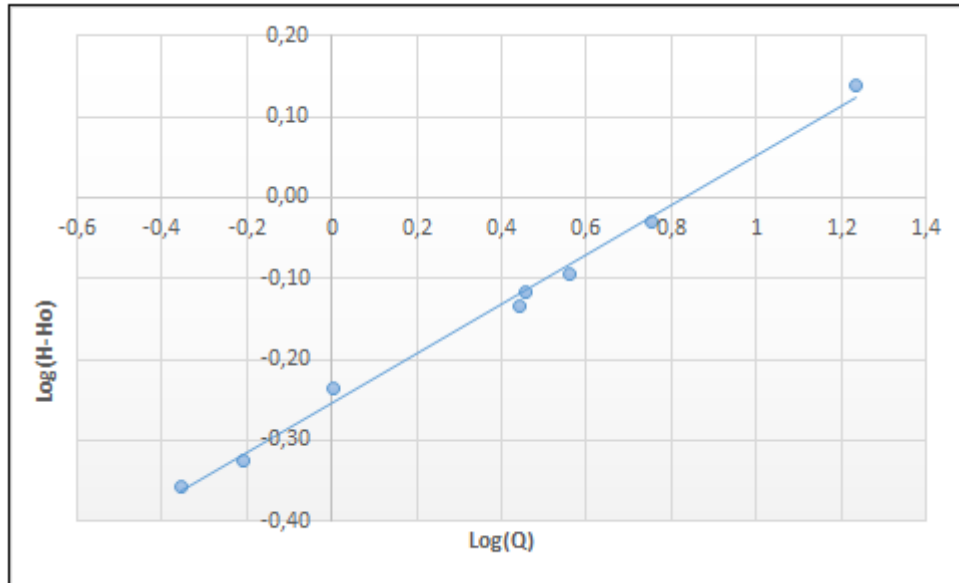
Tabla XII. Datos de Ho, cuenca Coatán

Fecha	Caudal (m^3/s)	Prof media (m)	Vel media	Ho(m)	H-Ho	Log(Q)	Log(H-Ho)
08/05/2010	0,62	0,32	0,17	-0,150	0,47	-0,20843625	-0,33
17/09/2010	5,67	0,63	0,66	-0,300	0,93	0,75335298	-0,03
18/02/2012	1,01	0,28	0,32	-0,300	0,58	0,00358945	-0,24
24/06/2012	2,77	0,28	0,68	-0,450	0,73	0,44251075	-0,14
14/09/2012	2,86	0,31	0,59	-0,450	0,76	0,45567429	-0,12
18/04/2013	0,44	0,44	0,11	0,000	0,44	-0,35204636	-0,36
18/08/2013	3,65	0,46	0,59	-0,350	0,81	0,56209621	-0,09
11/09/2013	17,14	1,18	1,52	-0,200	1,38	1,23404754	0,14

Fuente: Insivumeh.

Para determinar los Ho, se asumieron diferentes valores de Ho y se graficaron los valores resultantes de Log(Q) contra Log(H-Ho), hasta obtener el mejor ajuste a una línea recta, como se visualiza en la siguiente gráfica.

Figura 31. **Gráfica Log(Q) contra Log(H-Ho)**



Fuente: elaboración propia.

Así, sucesivamente se aplica el mismo procedimiento para determinar los demás valores de H_o de cada una de las curvas de calibración.

6.2. Procedimiento para determinar la ecuación de cada curva de calibración por regresión potencial

Como ejemplo del procedimiento, se toma como base los datos de la estación hidrológica que le pertenece a la cuenca Coatán.

Tabla XIII. Datos logarítmicos, cuenca Coatán

X(H)	Y(Q)	X'= log(X-X ₀)	Y'= logY	X' Y'	X' ²
0,47	0,62	-0,327902142	-0,208436245	0,068346691	0,107519815
0,93	5,67	-0,031517051	0,753352984	-0,023743465	0,000993325
0,58	1,01	-0,236572006	0,003589447	-0,000849163	0,055966314
0,73	2,77	-0,13667714	0,442510754	-0,060481104	0,018680641
0,76	2,86	-0,119186408	0,45567429	-0,054310182	0,0142054
0,44	0,44	-0,356547324	-0,352046364	0,125521189	0,127125994
0,81	3,65	-0,091514981	0,562096212	-0,051440224	0,008374992
1,38	17,14	0,139879086	1,234047536	0,172617442	0,019566159
Sumatorias		-1,160037966	2,890788614	0,175661184	0,352432638

Fuente: elaboración propia.

Forma de ecuación

$$Y = A(X - X_0)^B$$

Como primer paso se aplica logaritmos a ambos lados de la ecuación

$$\log Y = \log A(X - X_0)^B$$

Luego se aplican las leyes de logaritmos

$$\log Y = \log A + \log(X - X_0)^B$$

$$\log Y = \log A + B \log(X - X_0)$$

Se continúa simplificando la ecuación identificando cada logaritmo con una variable.

$$\begin{aligned} \log Y &= Y' \\ \log A &= A' \\ \log(X - X_0) &= X' \end{aligned}$$

Simplificando la ecuación queda de la siguiente manera:

$$Y' = A' + BX'$$

Luego se aplica el método de mínimos cuadrados:

$$B = \frac{n(\sum X'Y') - (\sum X')(\sum Y')}{n\sum X'^2 - (\sum X')^2} \quad n = \text{número de datos} = 8$$

$$A' = \bar{Y}' - B\bar{X}'$$

Para despejar cada variable, se determinó con el programa Excel obteniendo los siguientes resultados:

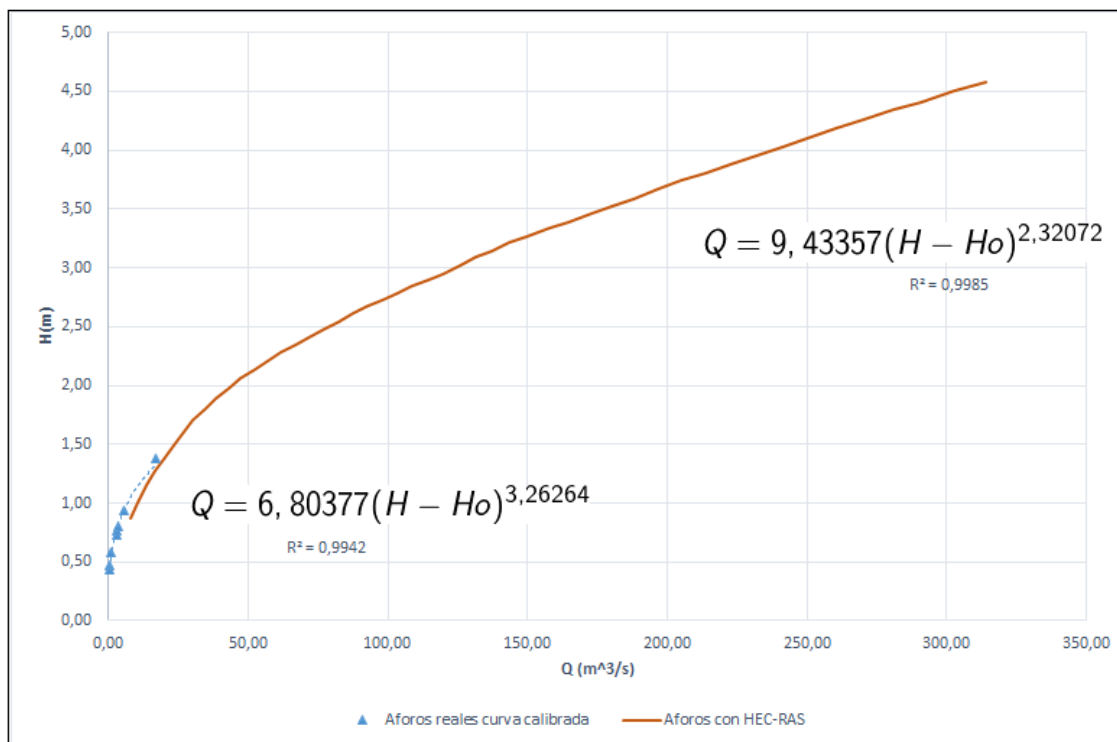
$$\begin{aligned} B &= 3,26264 \\ A' &= \log A = 0,83275 \\ A &= 10^{0,83275} = 6,80377 \end{aligned}$$

Obteniendo finalmente la ecuación de la curva de calibración

$$Q = 6,80377(H - H_0)^{3,26264}$$

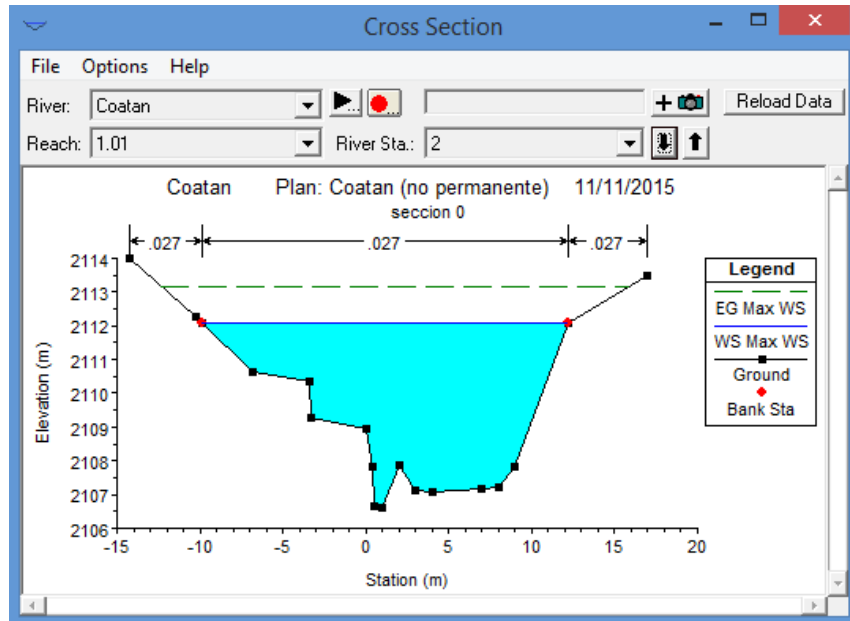
Así, sucesivamente se aplica el mismo procedimiento para determinar las demás ecuaciones que representan cada una de las curvas de calibración.

Figura 32. Curva de calibración, cuenca Coatán



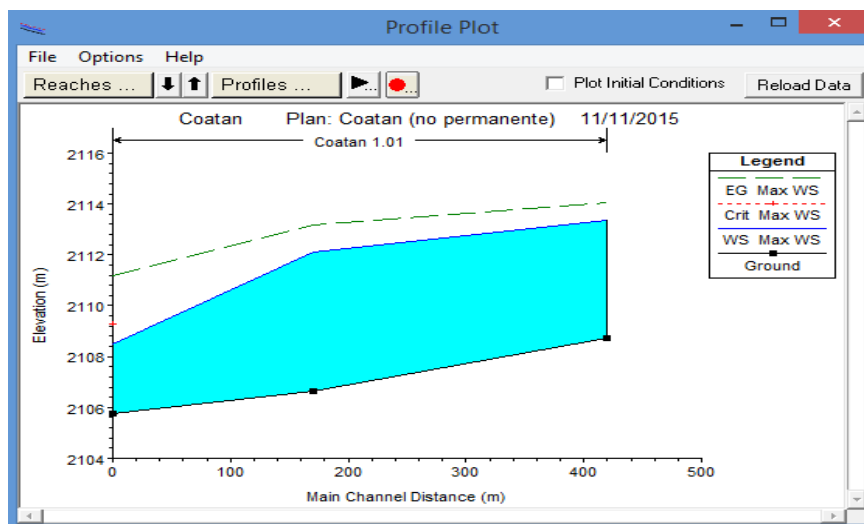
Fuente: elaboración propia.

Figura 33. Sección de control, río Coatán



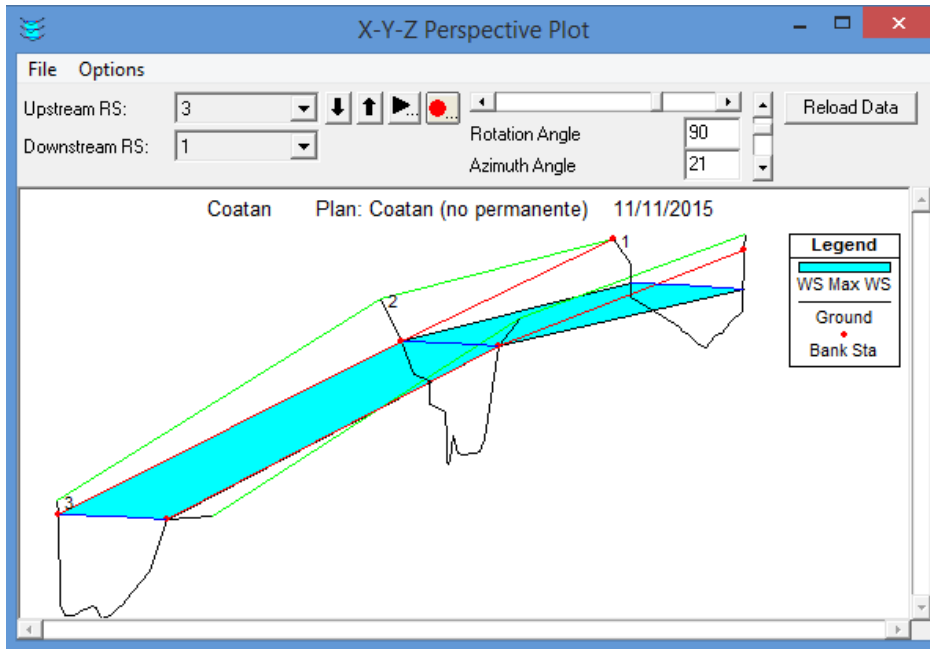
Fuente: elaboración propia, empleando HEC-RAS.

Figura 34. Perfil de estaciones, río Coatán



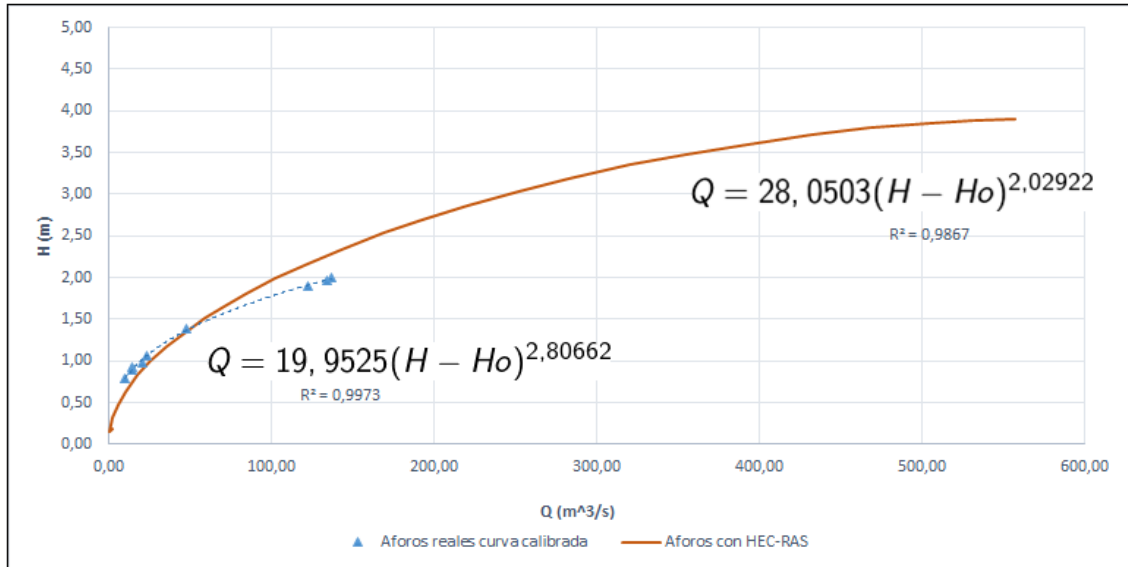
Fuente: elaboración propia, empleando HEC-RAS.

Figura 35. **Perspectiva en 3D estaciones, río Coatán**



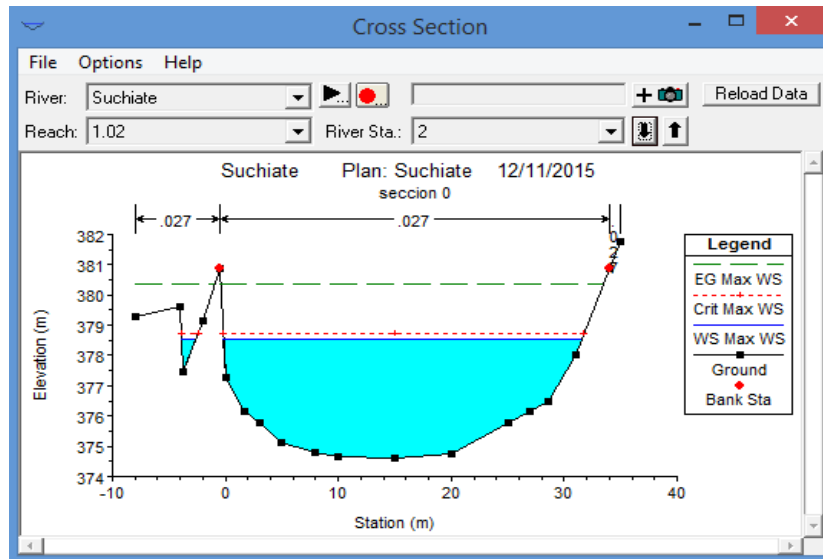
Fuente: elaboración propia, empleando HEC-RAS.

Figura 36. Curva de calibración, cuenca Suchiate



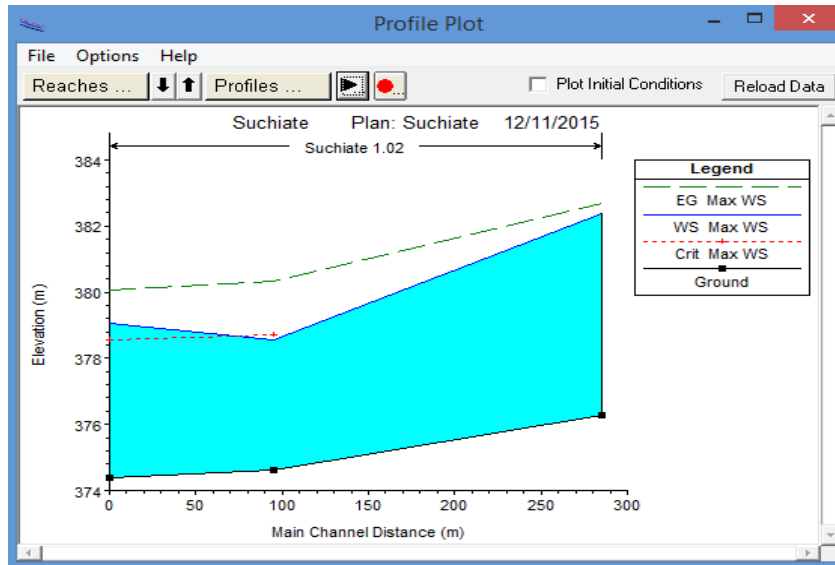
Fuente: elaboración propia.

Figura 37. Sección de control, río Suchiate



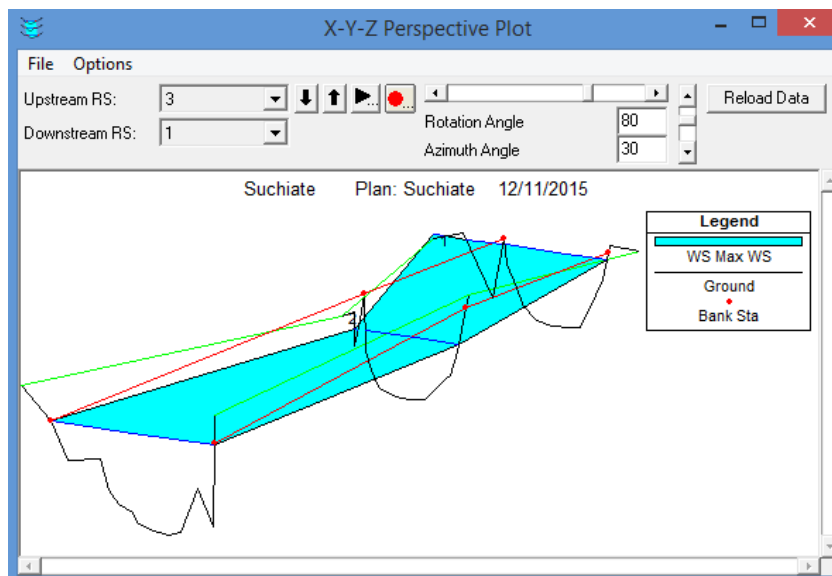
Fuente: elaboración propia, empleando HEC-RAS.

Figura 38. Perfil de estaciones, río Suchiate



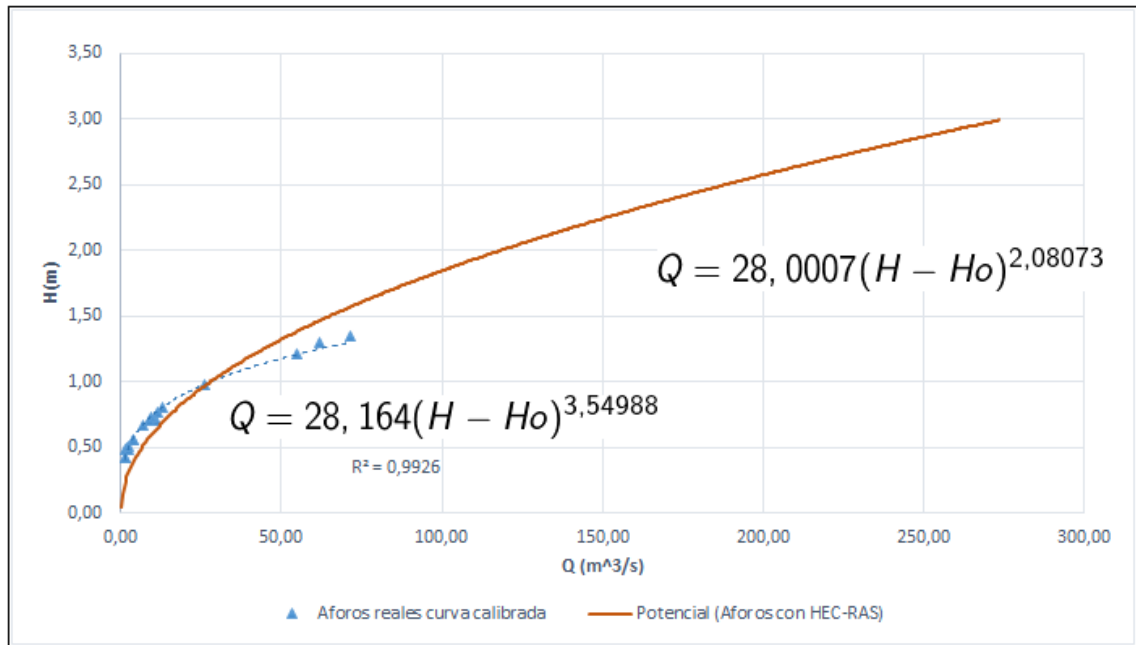
Fuente: elaboración propia, empleando HEC-RAS.

Figura 39. Perspectiva en 3D estaciones, río Suchiate



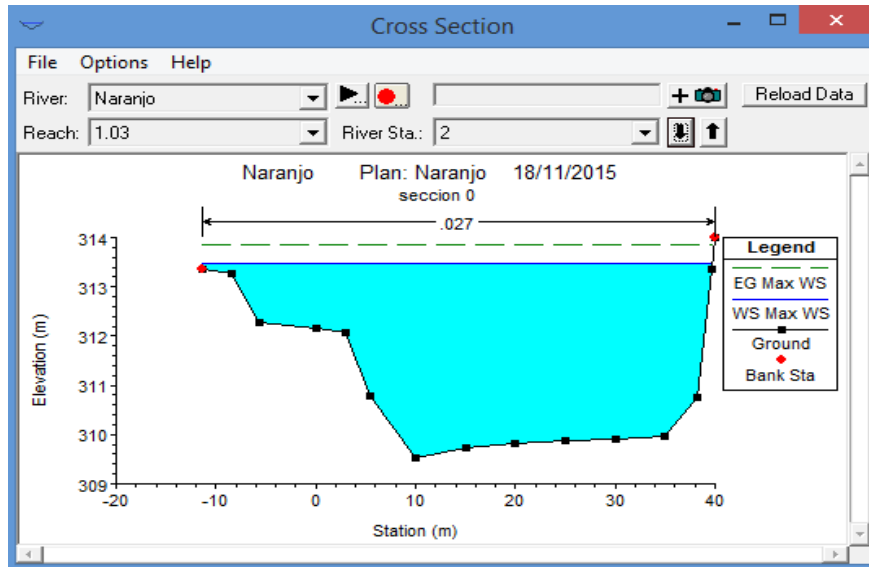
Fuente: elaboración propia, empleando HEC-RAS.

Figura 40. Curva de calibración, cuenca Naranjo



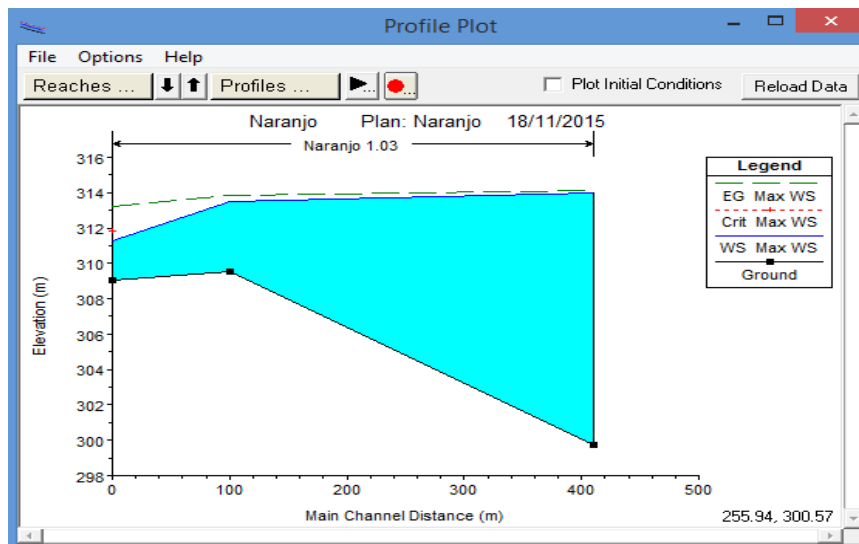
Fuente: elaboración propia.

Figura 41. Sección de control, río Naranjo



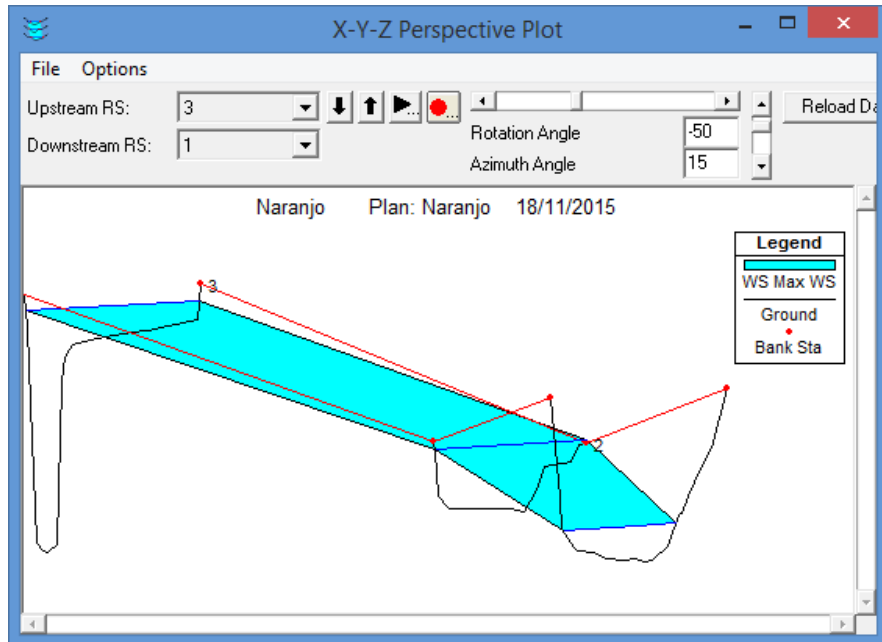
Fuente: elaboración propia, empleando HEC-RAS.

Figura 42. Perfil de estaciones, río Naranjo



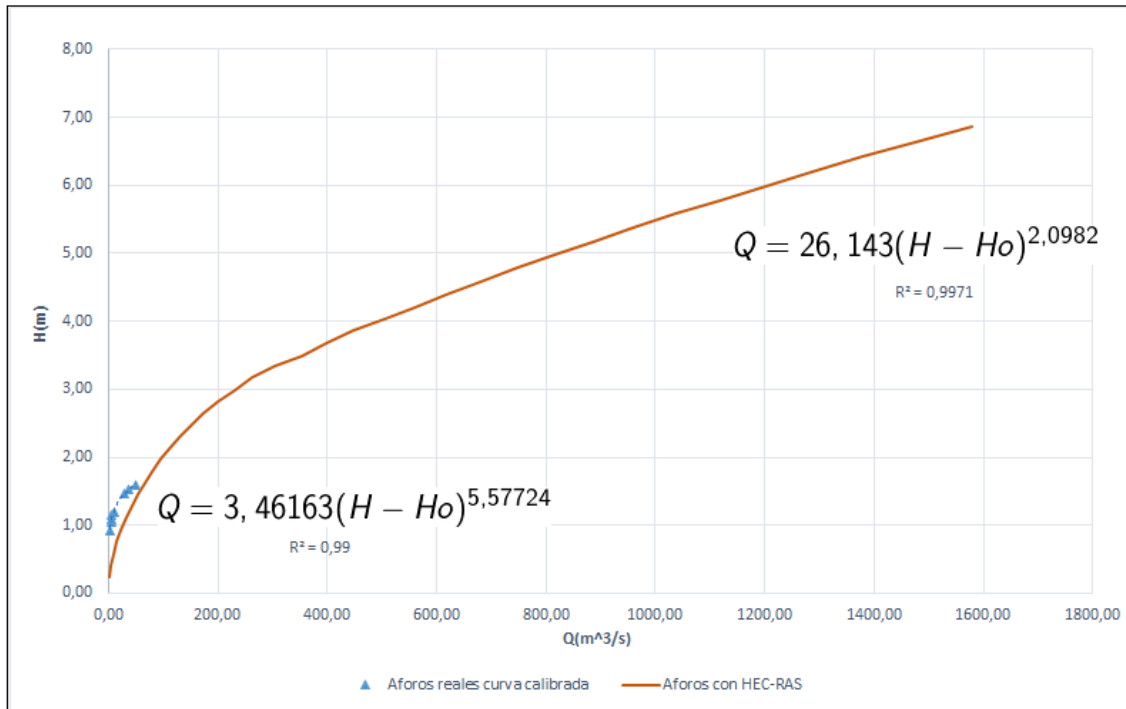
Fuente: elaboración propia, empleando HEC-RAS.

Figura 43. **Perspectiva en 3D estaciones, río Naranjo**



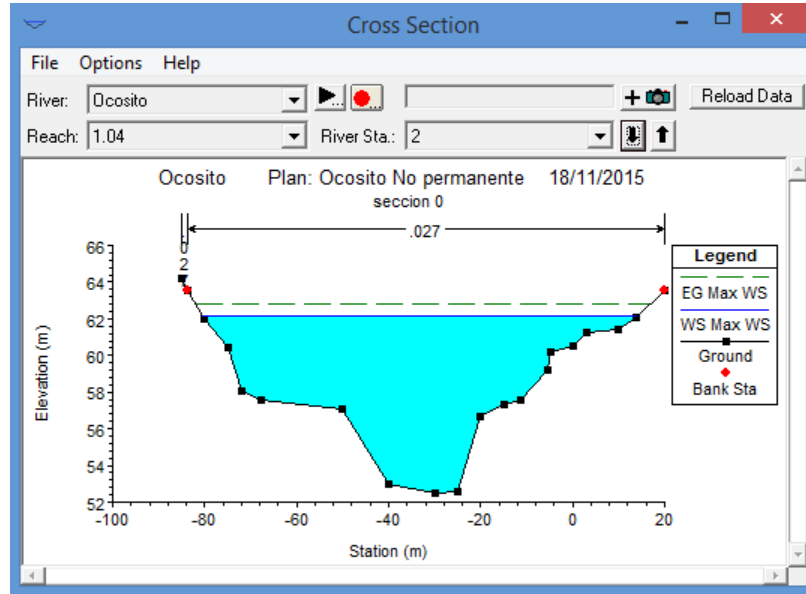
Fuente: elaboración propia, empleando HEC-RAS.

Figura 44. Curva de calibración, cuenca Ocosito



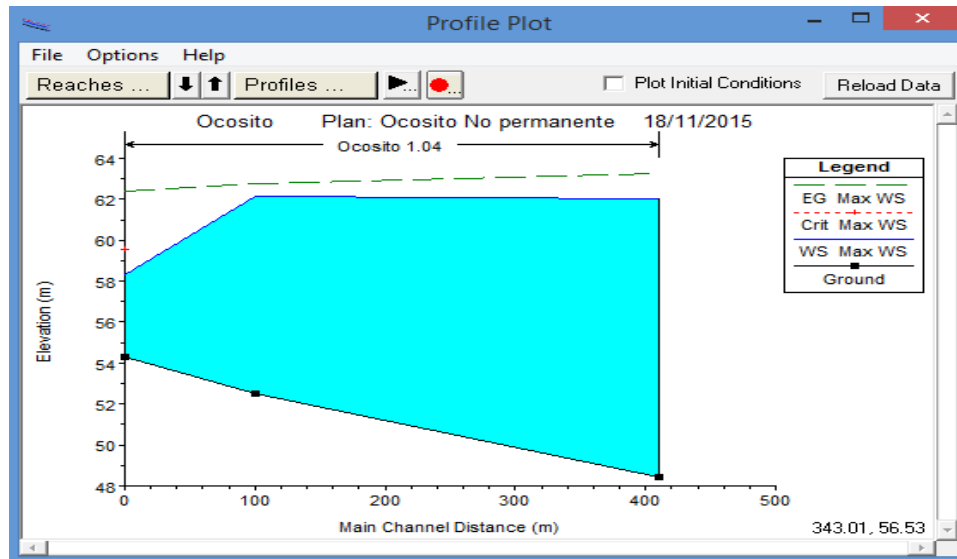
Fuente: elaboración propia.

Figura 45. Sección de control, río Ocosito



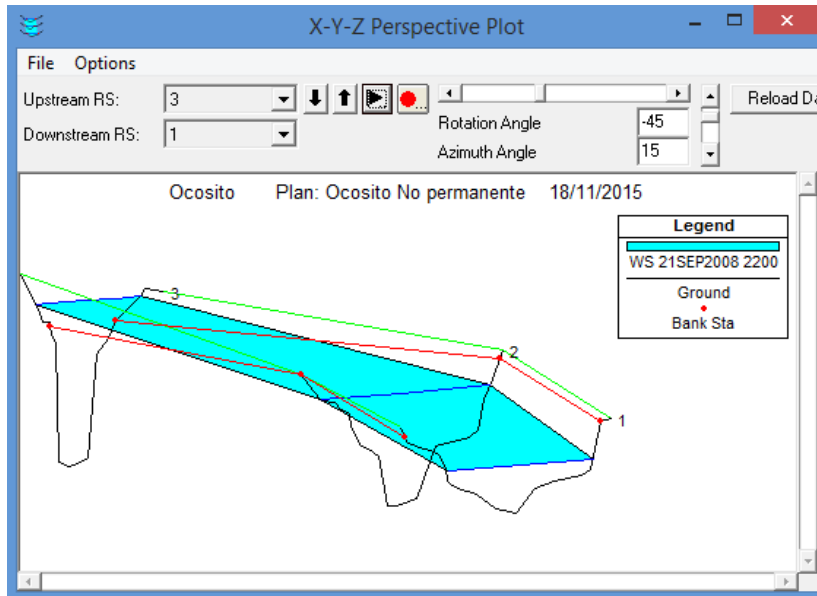
Fuente: elaboración propia, empleando HEC-RAS.

Figura 46. Perfil de estaciones, río Ocosito



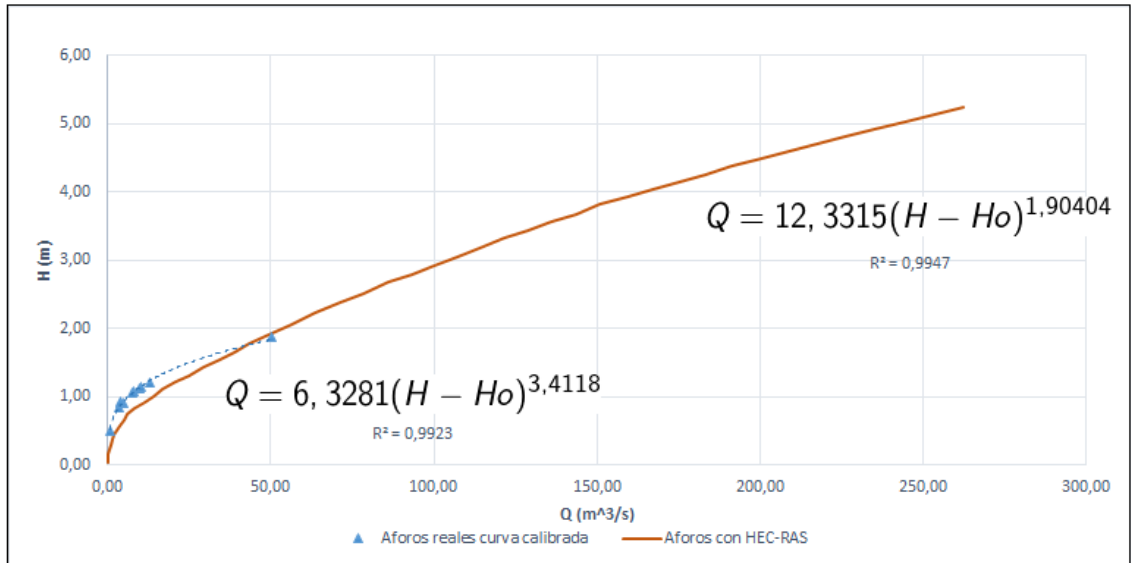
Fuente: elaboración propia, empleando HEC-RAS.

Figura 47. Perspectiva en 3D estaciones, río Ocosito



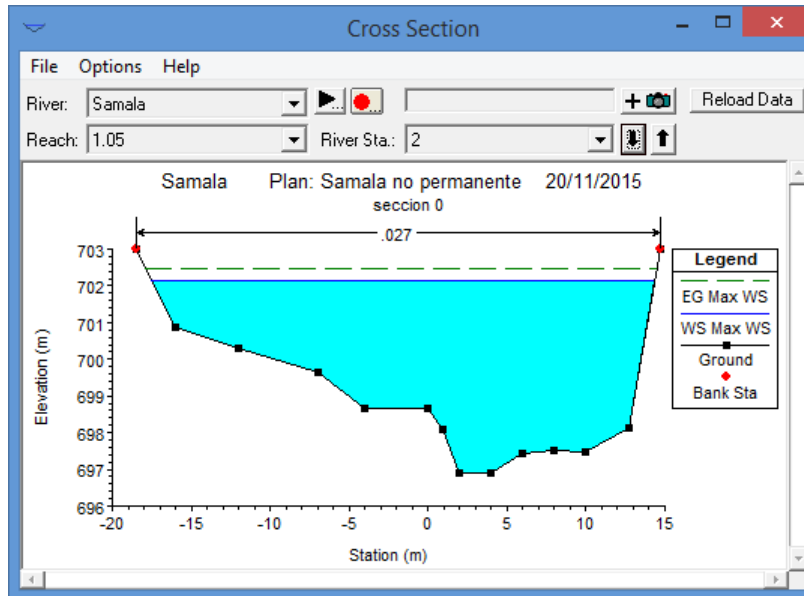
Fuente: elaboración propia, empleando HEC-RAS.

Figura 48. Curva de calibración, cuenca Samalá



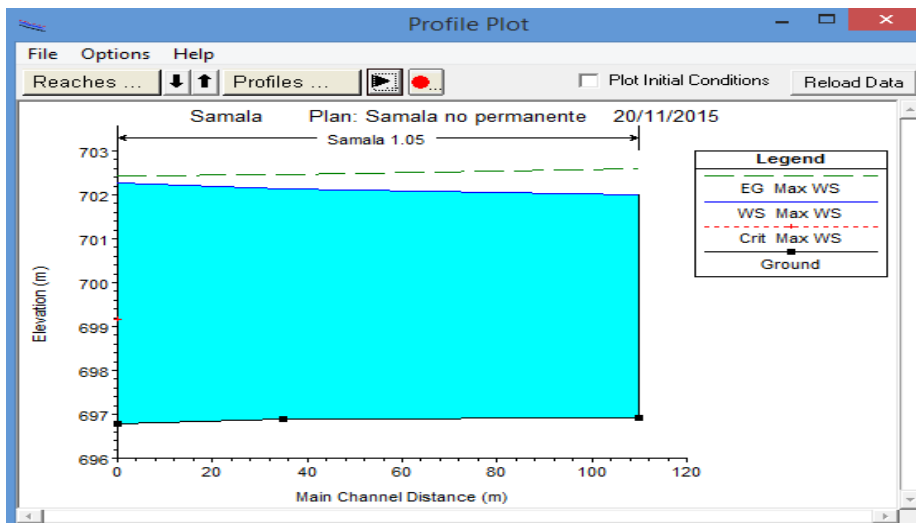
Fuente: elaboración propia.

Figura 49. Sección de control, río Samalá



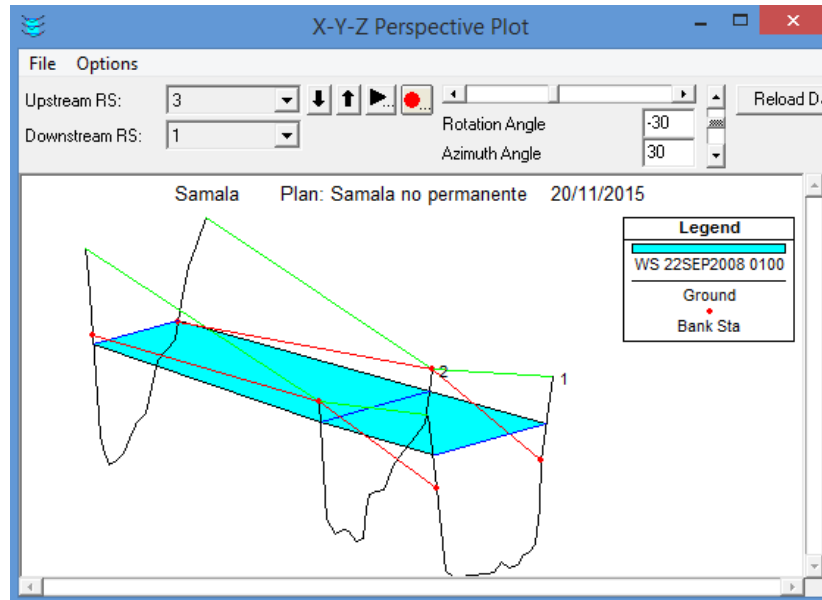
Fuente: elaboración propia, empleando HEC-RAS.

Figura 50. Perfil de estaciones, río Samalá



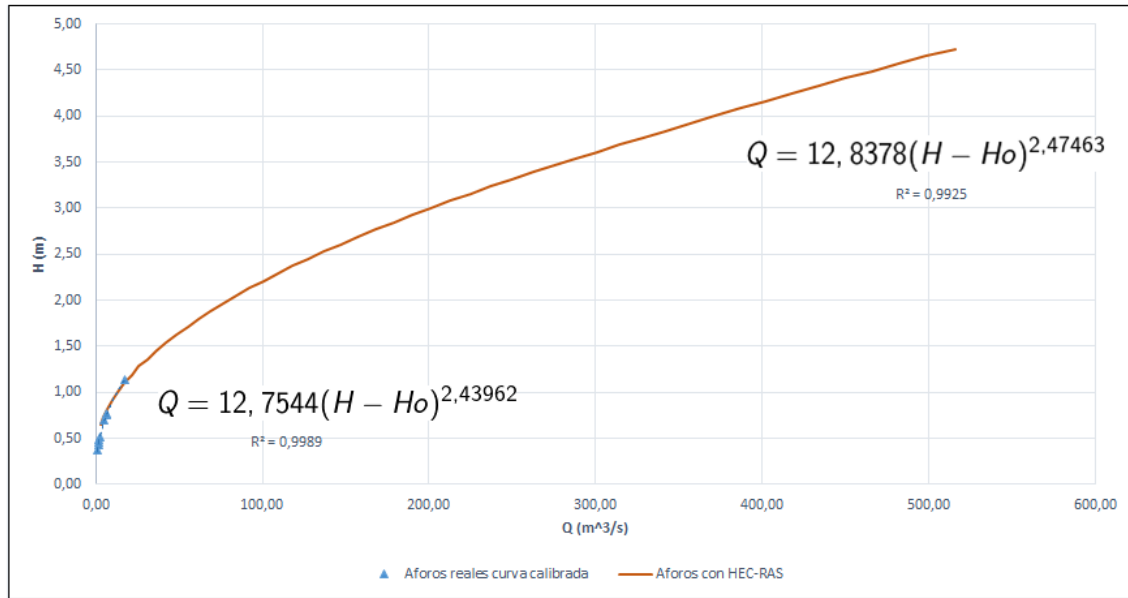
Fuente: elaboración propia, empleando HEC-RAS.

Figura 51. **Perspectiva en 3D estaciones, río Samalá**



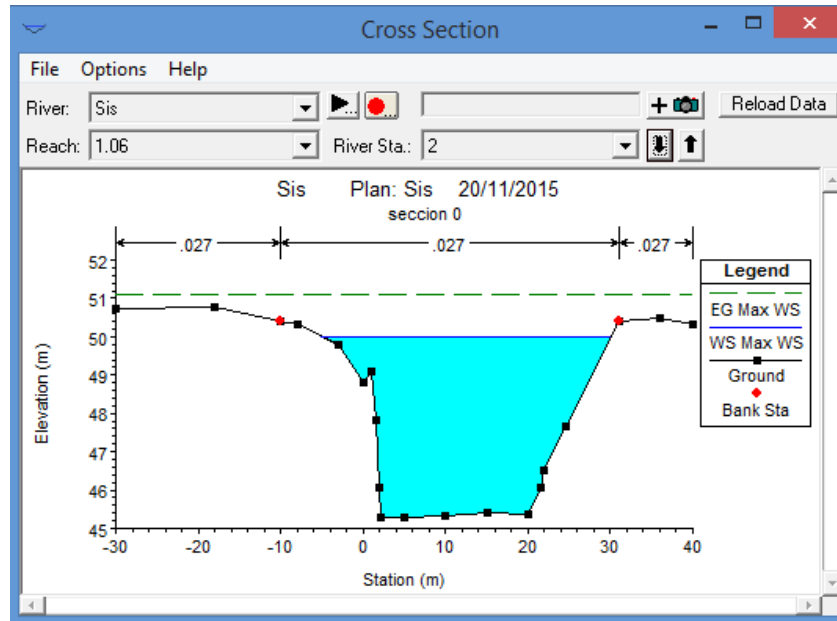
Fuente: elaboración propia, empleando HEC-RAS.

Figura 52. Curva de calibración, cuenca Sis



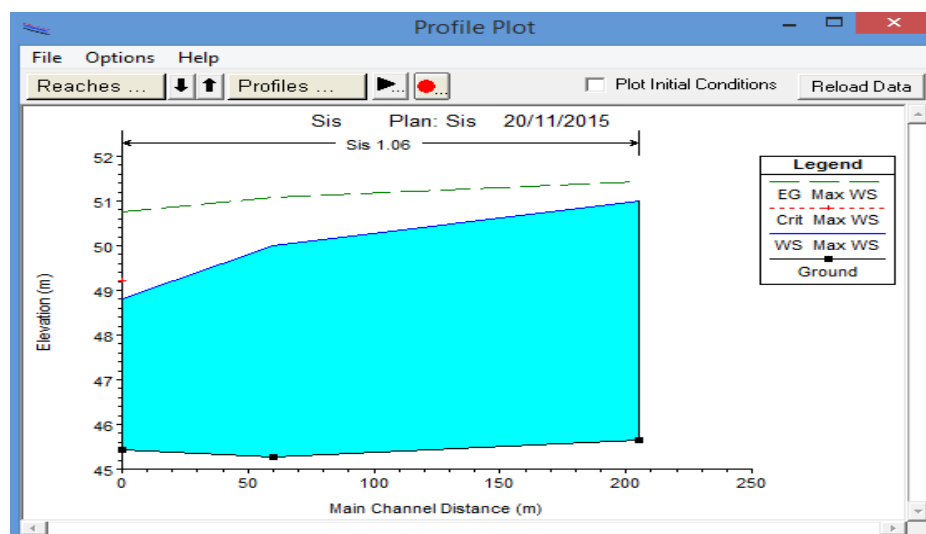
Fuente: elaboración propia.

Figura 53. Sección de control, río Sis



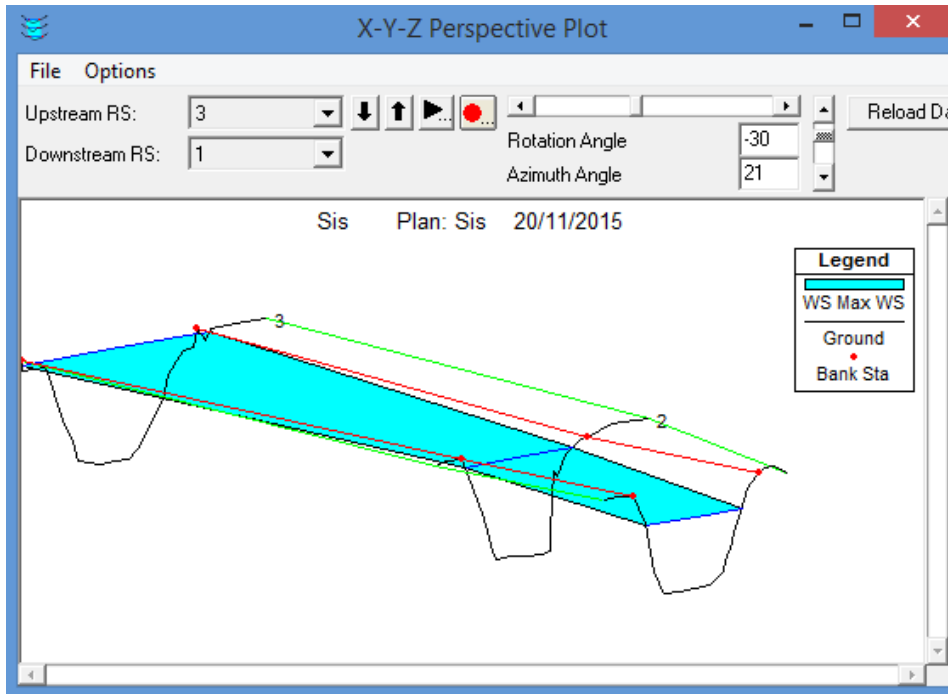
Fuente: elaboración propia, empleando HEC-RAS.

Figura 54. Perfil de estaciones, río Sis



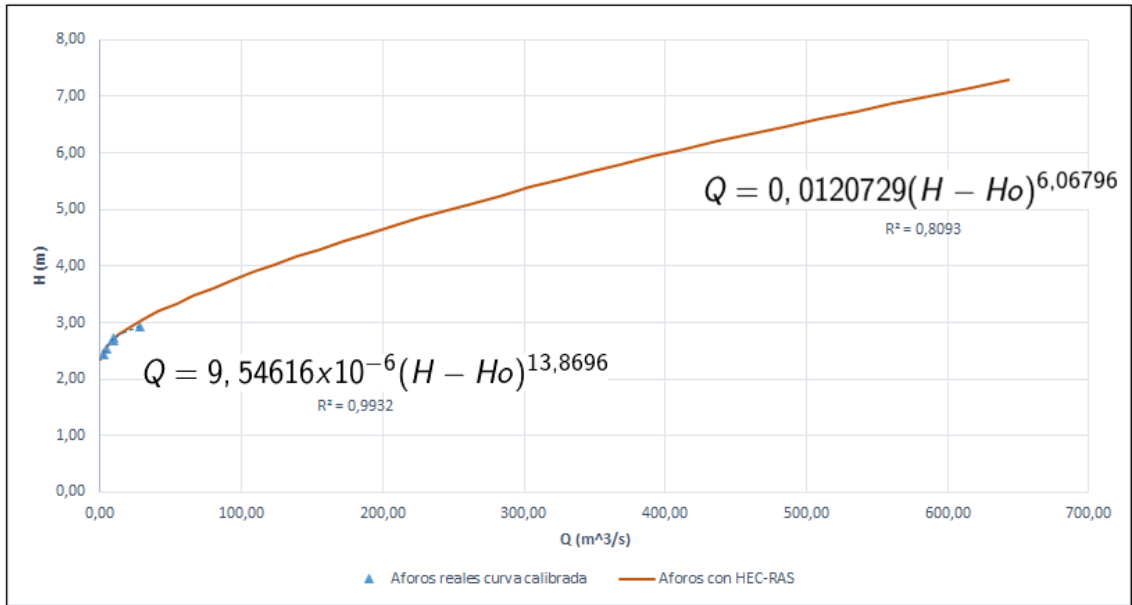
Fuente: elaboración propia, empleando HEC-RAS.

Figura 55. **Perspectiva en 3D estaciones rio Sis**



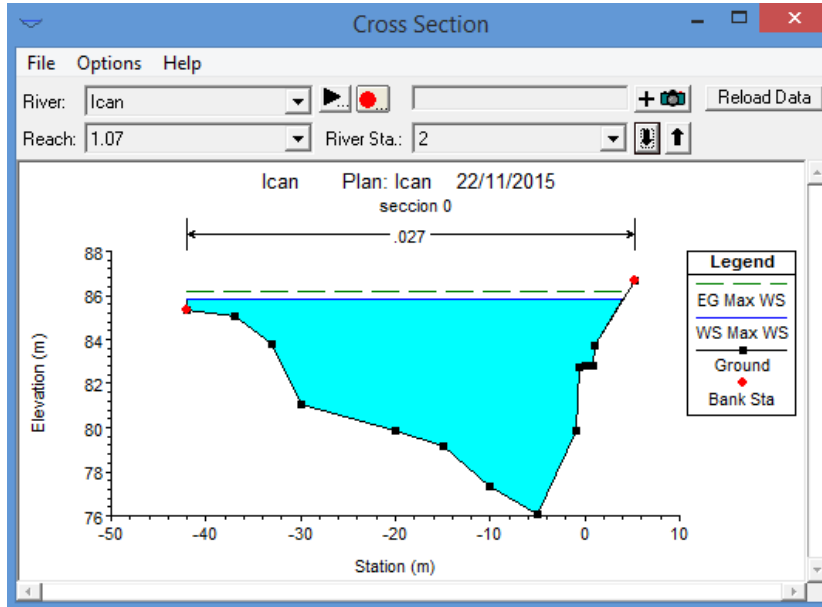
Fuente: elaboración propia, empleando HEC-RAS.

Figura 56. Curva de calibración, cuenca Icán



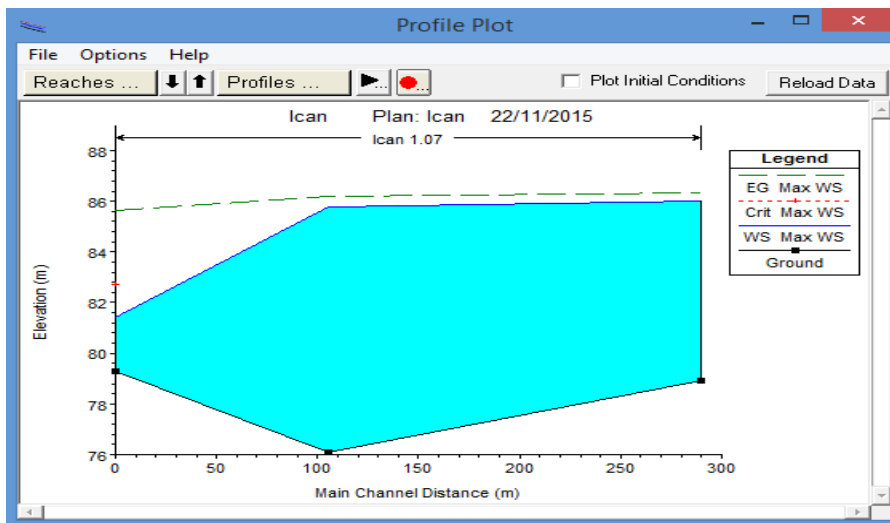
Fuente: elaboración propia.

Figura 57. Sección de control, río Icán



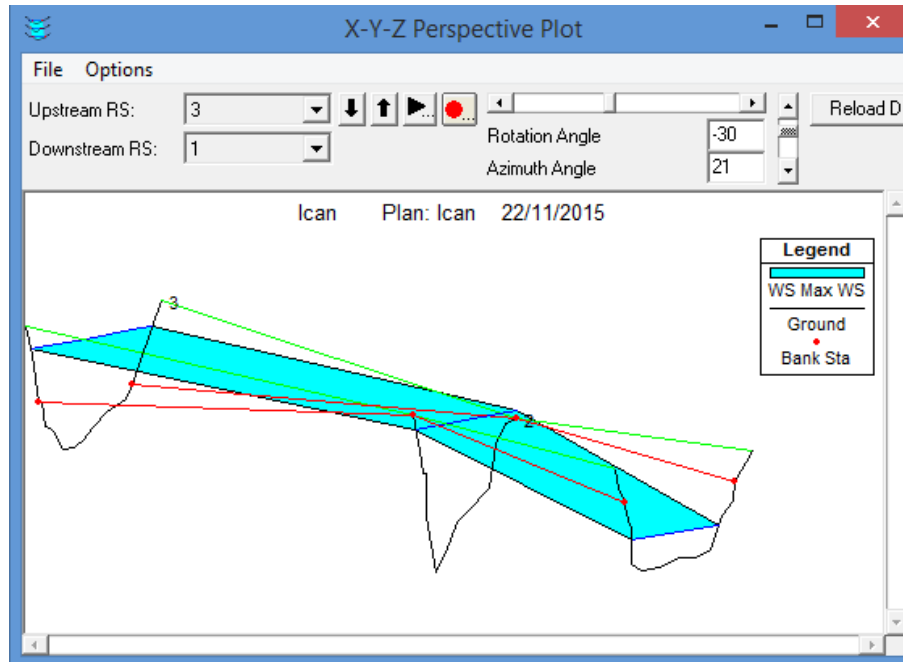
Fuente: elaboración propia, empleando HEC-RAS.

Figura 58. Perfil de estaciones, río Icán



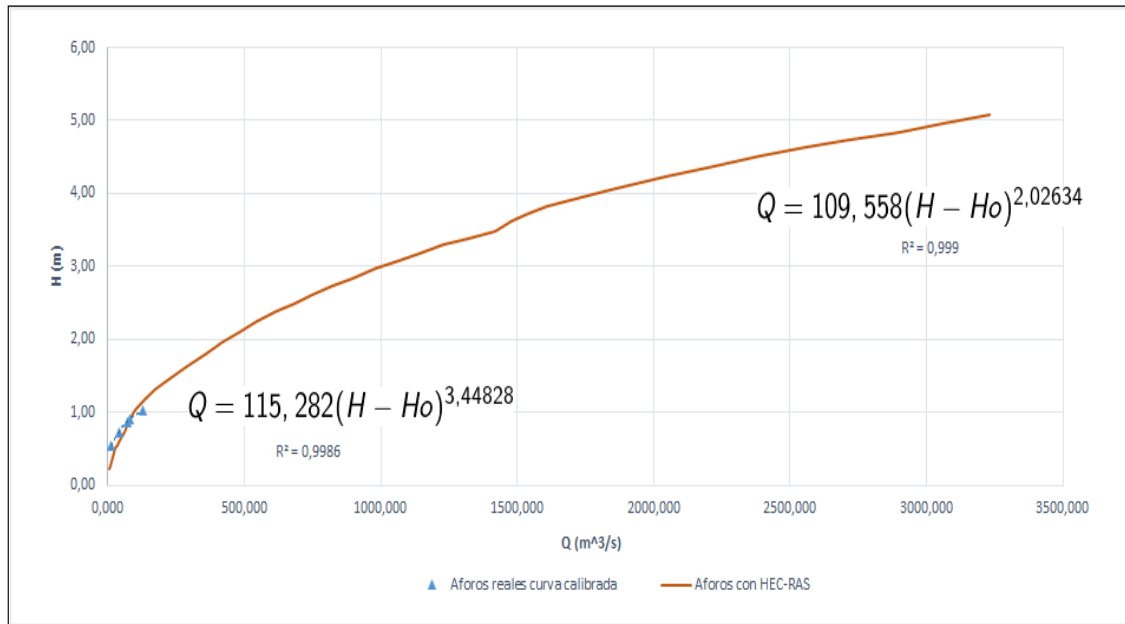
Fuente: elaboración propia, empleando HEC-RAS.

Figura 59. **Perspectiva en 3D estaciones, río Icán**



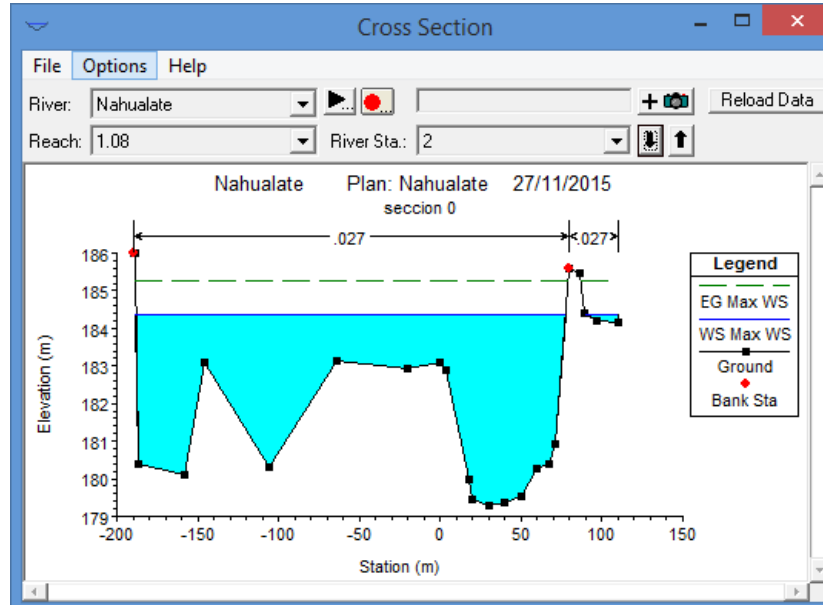
Fuente: elaboración propia, empleando HEC-RAS.

Figura 60. Curva de calibración, cuenca Nahualate



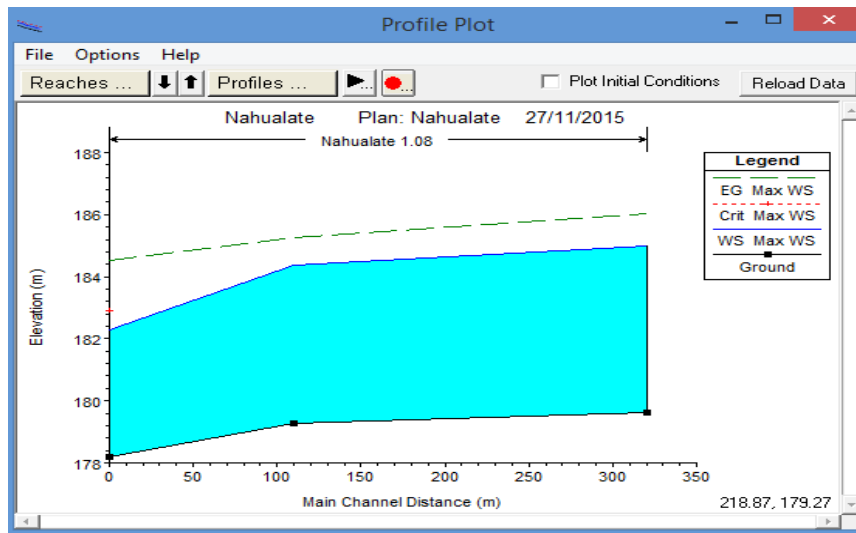
Fuente: elaboración propia.

Figura 61. Sección de control, río Nahualate



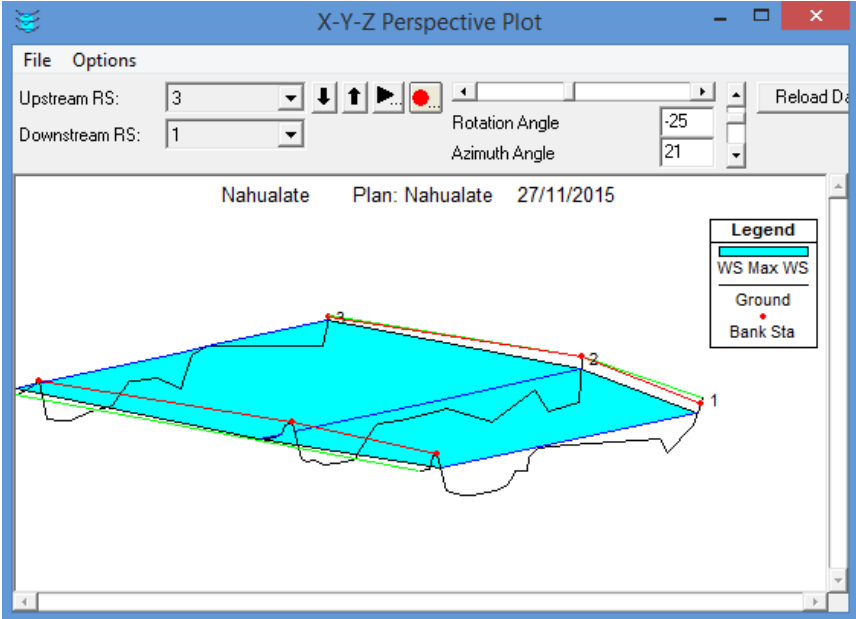
Fuente: elaboración propia, empleando HEC-RAS.

Figura 62. Perfil de estaciones, río Nahualate



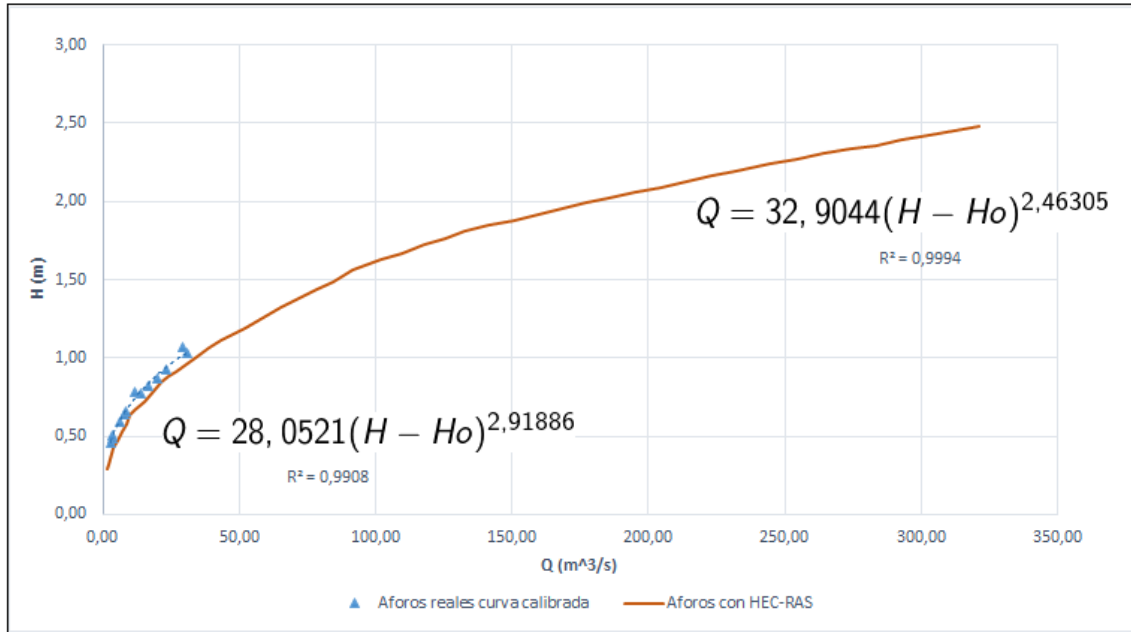
Fuente: elaboración propia, empleando HEC-RAS.

Figura 63. Perspectiva en 3D estaciones, río Nahualate



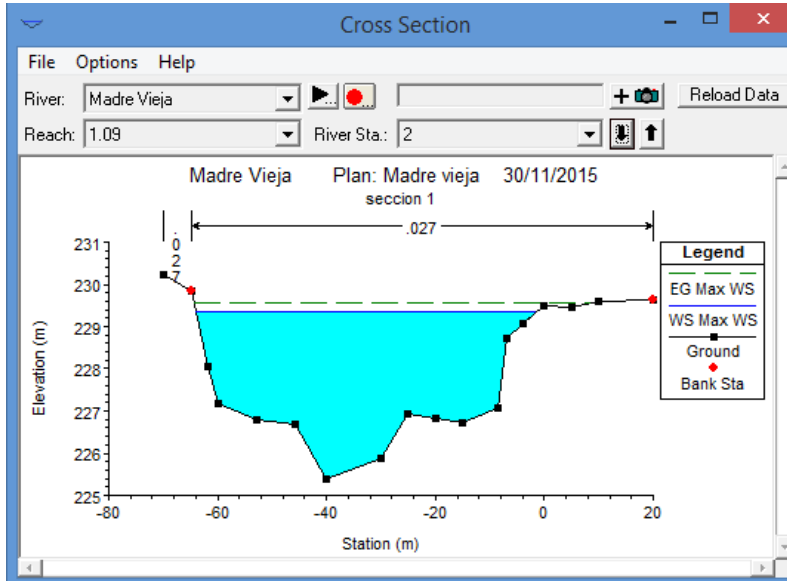
Fuente: elaboración propia, empleando HEC-RAS.

Figura 64. Curva de calibración, cuenca Madre Vieja



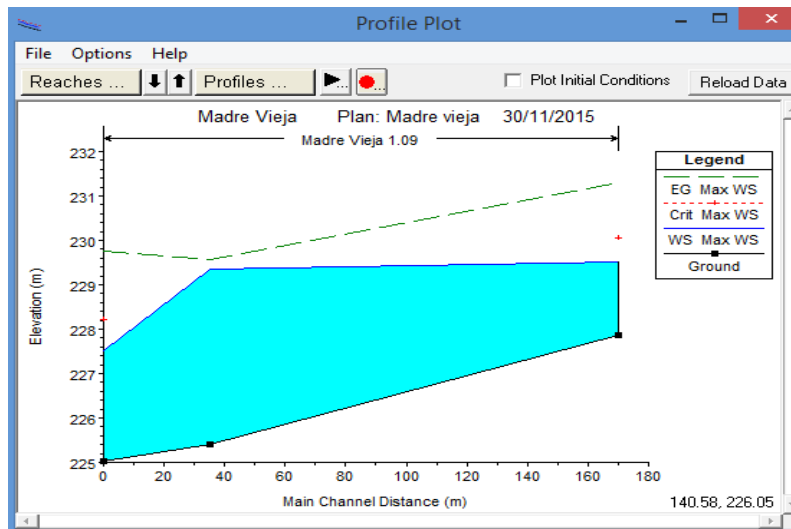
Fuente: elaboración propia.

Figura 65. Sección de control, río Madre Vieja



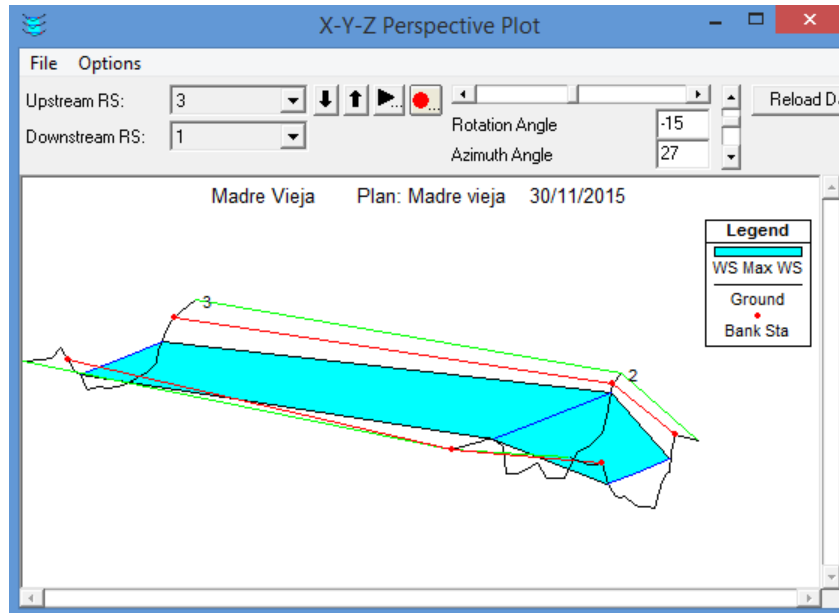
Fuente: elaboración propia, empleando HEC-RAS.

Figura 66. Perfil de estaciones, río Madre Vieja



Fuente: elaboración propia, empleando HEC-RAS.

Figura 67. **Perspectiva en 3D estaciones, río Madre Vieja**



Fuente: elaboración propia, empleando HEC-RAS.

CONCLUSIONES

1. Se determinaron las curvas de calibración de caudales y sus respectivas ecuaciones de las cuencas hidrológicas: Coatán, Suchiate, Naranjo, Ocosito, Samalá, Sis-Icán, Nahualate y Madre Vieja, pertenecientes a la vertiente del Pacífico, para el periodo 2010-2013.
2. Al elaborar las curvas de calibración se aplicó el método matemático de regresión potencial, el cual fue el que más se ajustó a la sucesión de datos, es decir, a los aforos reales en relación a los niveles de agua, por medio de las estaciones de control pertenecientes a la red hidrológica del Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (Insivumeh).
3. Se extrapoló cada curva de calibración por medio de las simulaciones hidráulicas en HEC-RAS para caudales extremos máximos. En HEC-RAS se simularon desde caudales mínimos hasta caudales máximos, cerca del desborde de cada sección de control. Ya determinados los caudales máximos para cada una de las estaciones hidrológicas, se procedió a extrapolar las curvas de calibración por medio del programa HEC-RAS, determinando así una ecuación para estimar caudales en relación a niveles de agua que se encuentran dentro de la topografía del cauce.

4. Las curvas de calibración obtenidas sirven de referencia para estudios relacionados con la dinámica fluvial (estudios de crecientes, regionalización de caudales, estudios de navegabilidad, entre otros), para el diseño de estructuras hidráulicas (bocatomas, presas, diques, obras de protección, entre otros), estudios de calidad del agua y, en general, para cualquier estudio que se requiera con propósitos de planeación, manejo y aprovechamiento del recurso hídrico.

RECOMENDACIONES

1. La implementación de las herramientas analíticas mediante el uso del computador en la aplicación de metodologías para la determinación de las curvas nivel - caudal debe incluir el criterio y la experiencia del ingeniero para el análisis de diferentes aspectos, como: la selección de los datos de aforo a incluir en el procedimiento, los cambios morfológicos que se producen en la sección transversal, la dinámica del río en respuesta a intervenciones y eventos de origen natural o antropogénico que alteran las condiciones naturales del cauce, y los tipos de controles existentes que determinan la relación nivel-caudal de la sección para los diferentes rangos de niveles.
2. Se deben estudiar los métodos que existen para elaborar y extrapolar curvas de calibración, y aplicar el método que más se ajuste a la información de una estación hidrométrica. También es necesario auxiliarse de la tecnología, es decir, programas de cálculo o programas de simulaciones hidráulicas, entre otros, para garantizar datos fiables y con un margen mínimo de error.

3. En las estaciones hidrométricas es necesario realizar aforos para un rango amplio de niveles y caudales en un periodo que garantice una buena calibración de la curva de caudales. El objetivo de un buen control de calidad es asegurar la mayor estandarización posible de los datos primarios, antes de que se encuentren disponibles para los usuarios. La calidad de la información debe garantizarse desde la toma del dato en campo, hasta la divulgación o publicación de la misma.

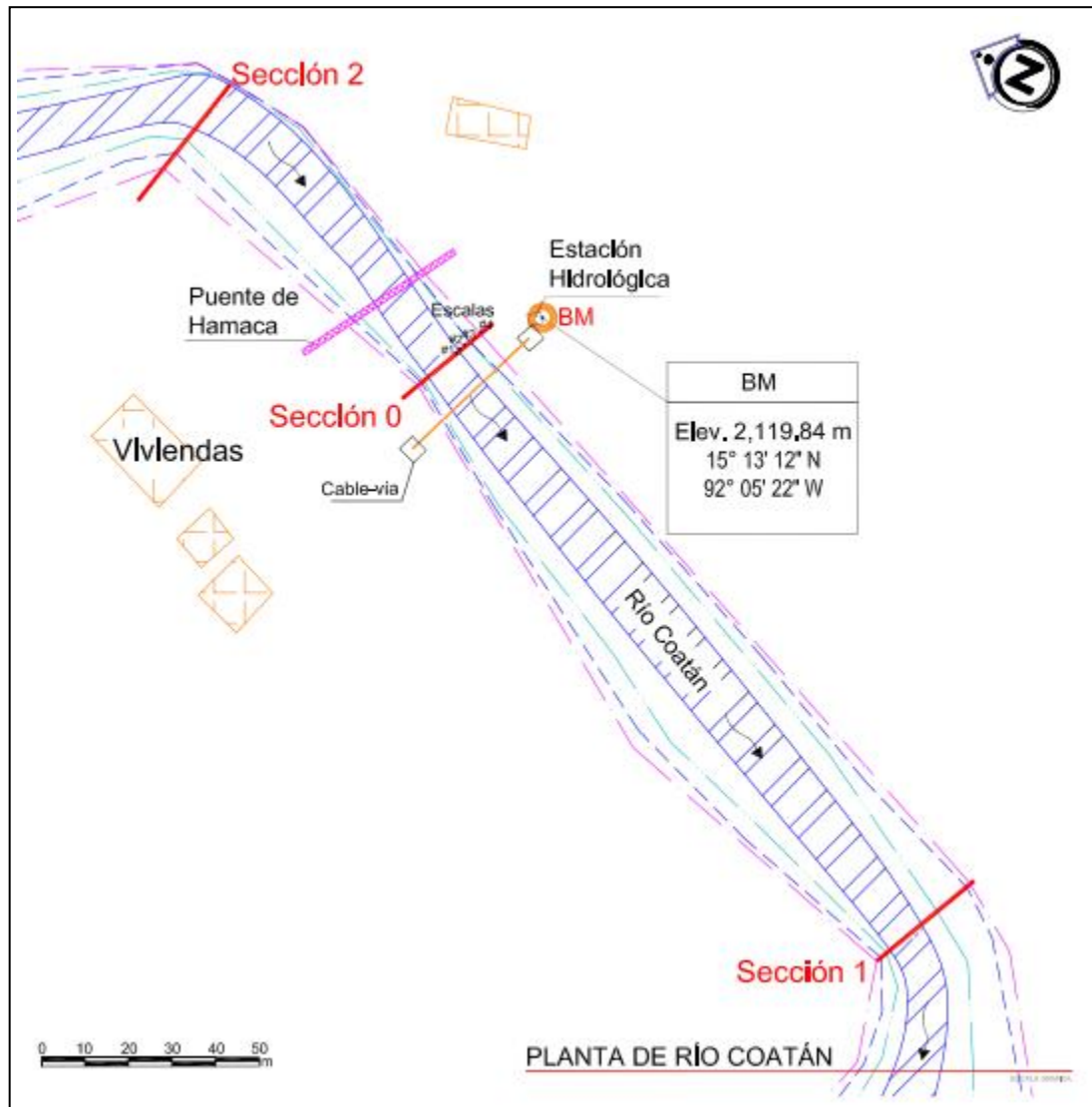
BIBLIOGRAFÍA

1. APARICIO M., Javier Francisco. *Fundamentos de hidrología de superficie*. México: Limusa, 1989. 303 p.
2. CHOW, Ven Te. *Hidráulica de los canales abiertos*. México: Diana, 1983. 337 p. ISBN 968-13-1327-5.
3. Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca; Universidad del Valle, Escuela de Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente. *Caracterización y modelación matemática del río Cauca – PMC fase II. Red geodésica de alta precisión tramo Salvajina – La Virginia*. Colombia: CVC, 2005. 268 p.
4. INSIVUMEH. *Ríos de Guatemala*. [en línea]
<<http://www.insivumeh.gob.gt/riosdeguatemala.html>> [Consulta: 18 de enero de 2015.]
5. MOTT, Robert. *Mecánica de fluidos aplicada*. 4a. ed. México: Pearson Educación, México, 1983. 515 p. ISBN 0-02-384231-8.
6. Organización Meteorológica Mundial. *Guías de las prácticas hidrológicas, adquisición y proceso de datos, análisis, predicción y otras aplicaciones*. 5a. ed. Suiza: OMM, 1994. 168 p.

7. US Army Corps of Engineers, Institute for Water Resources, Hydrologic Engineering Center. *HEC-RAS, River analysis system. Hydraulic Reference Manual*. USA: USACE, 2010. 960 p.

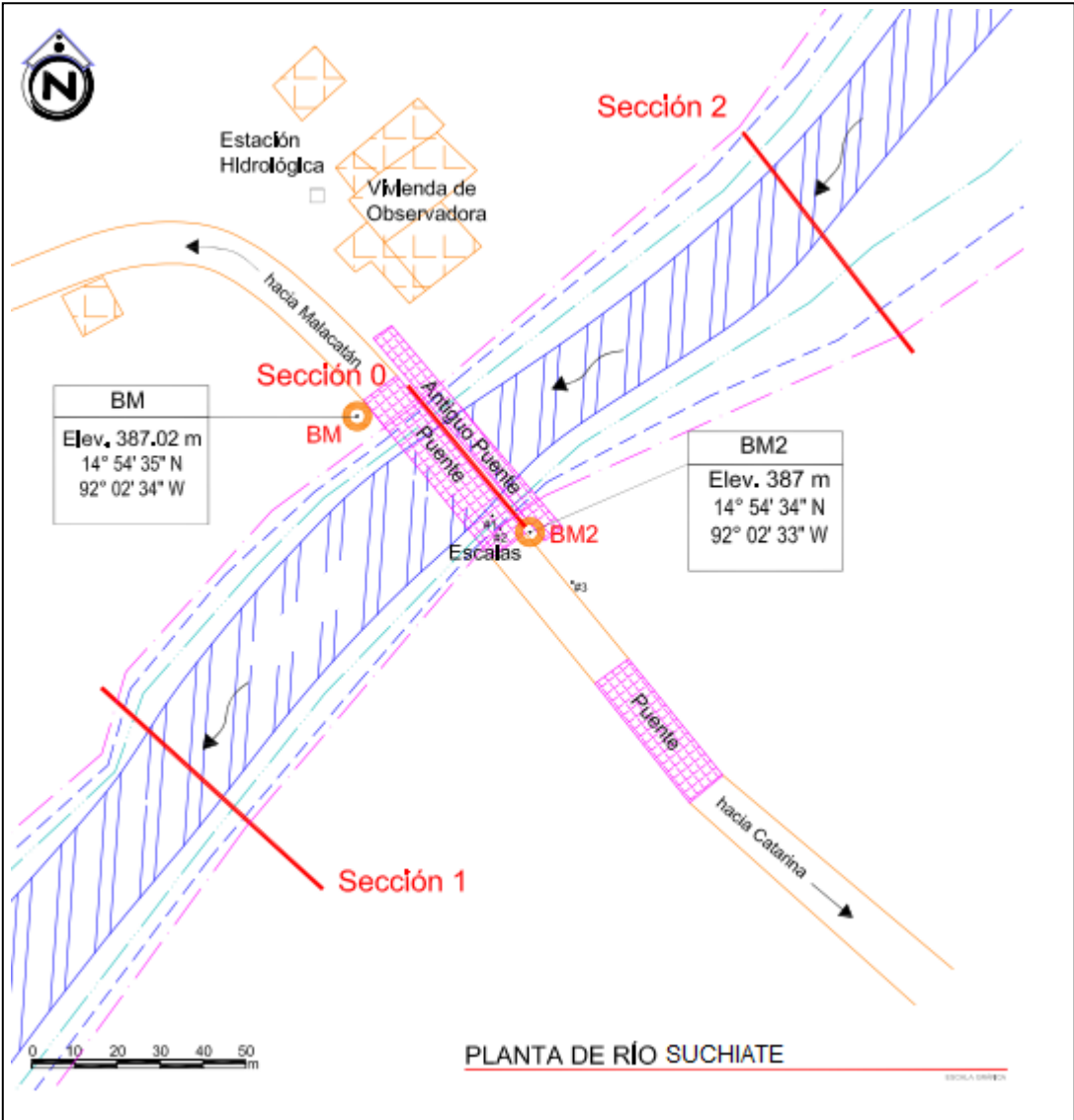
ANEXOS

1. Plano en planta del río Coatán



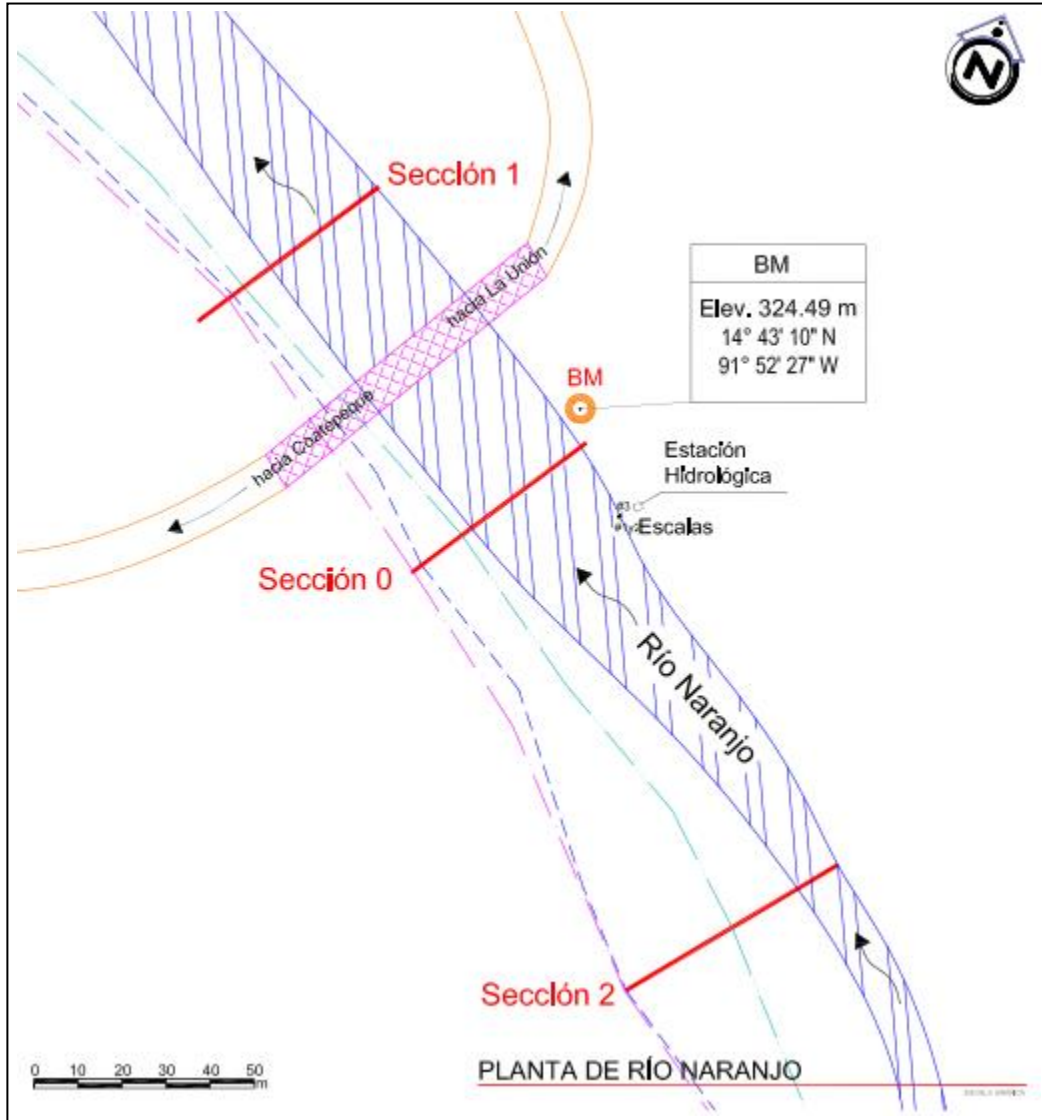
Fuente: Insivumeh.

2. Plano en planta del río Suchiate



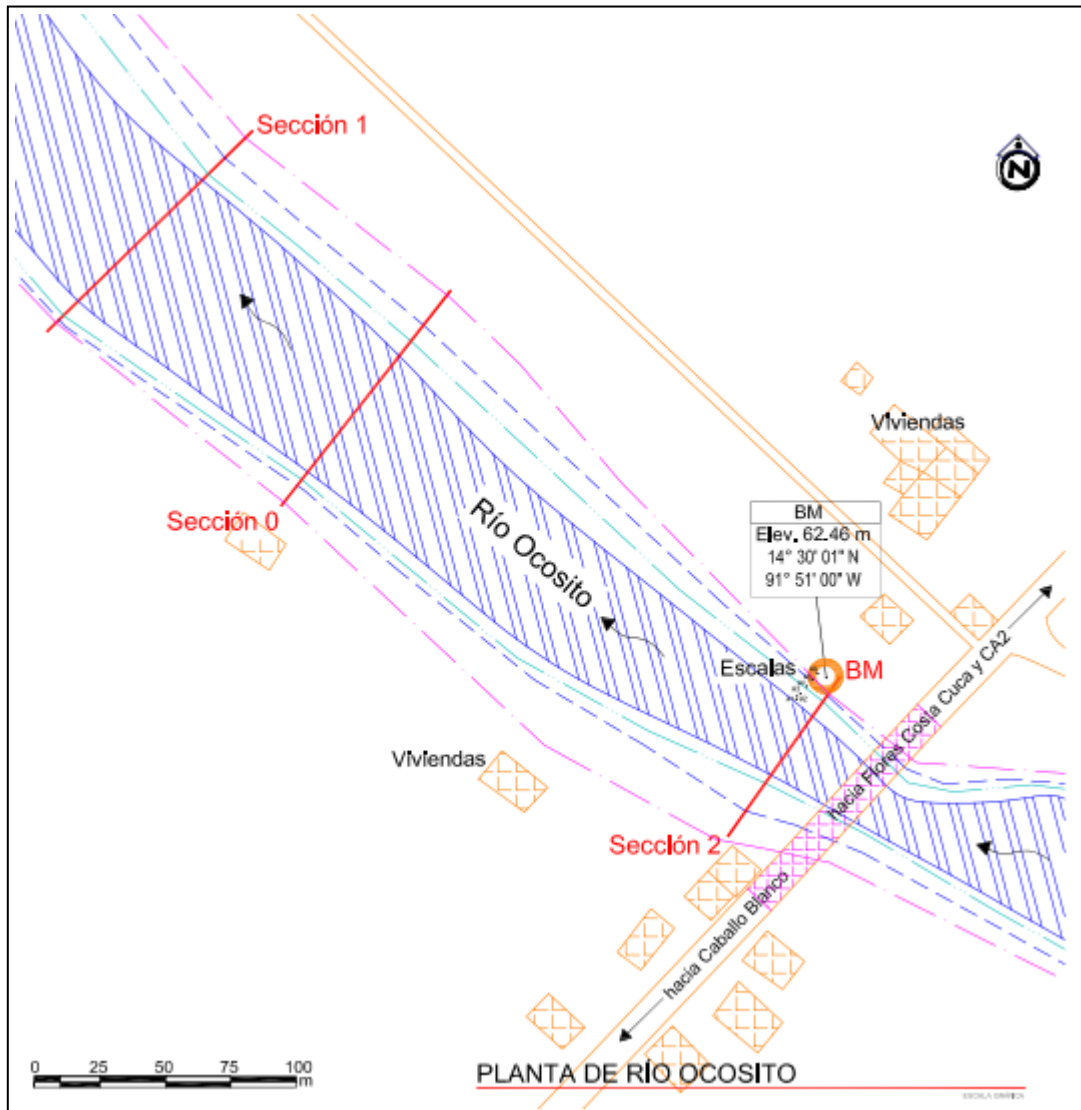
Fuente: Insivumeh.

3. Plano en planta del río Naranjo



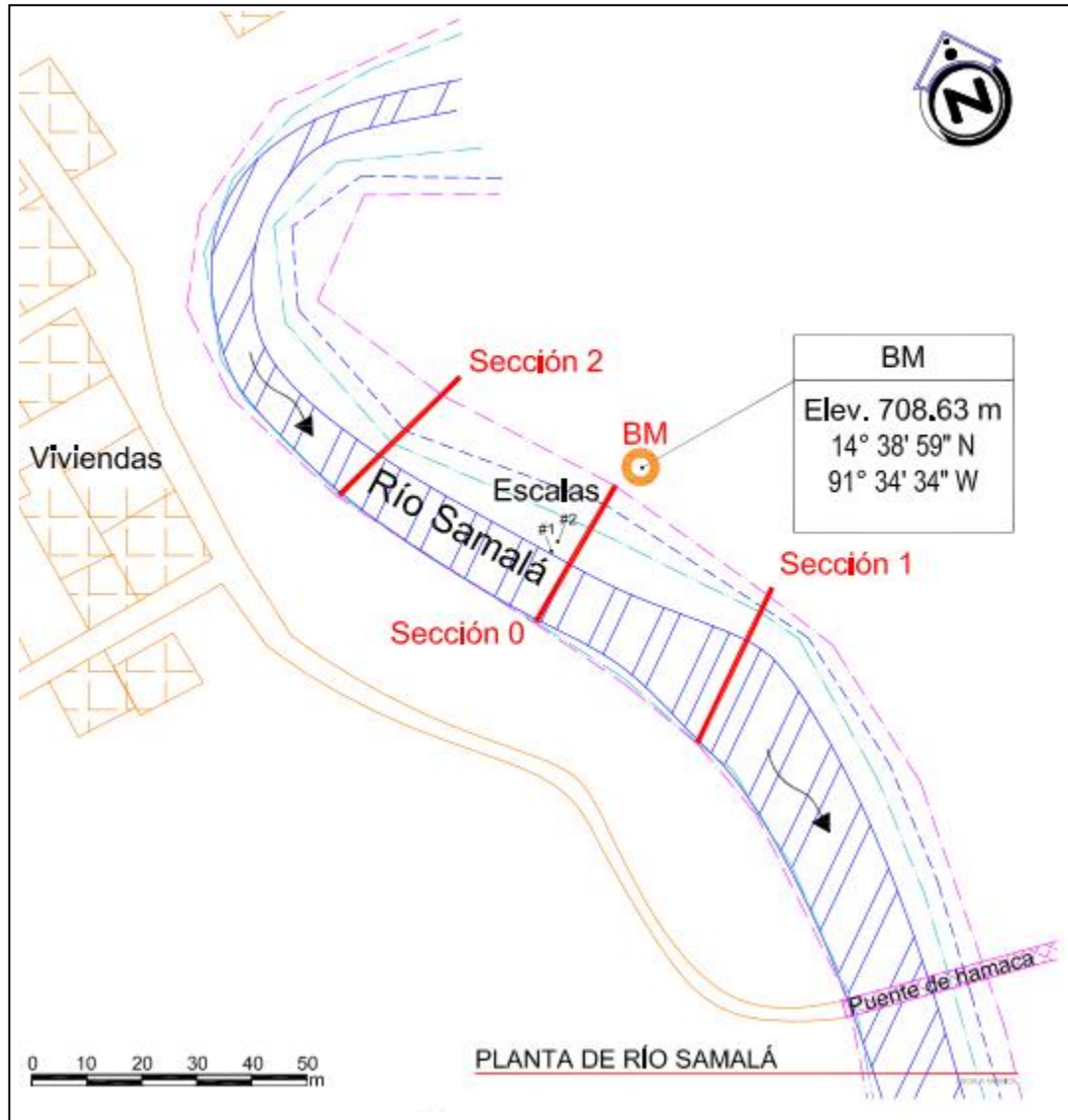
Fuente: Insivumeh.

4. Plano en planta del río Ocosito



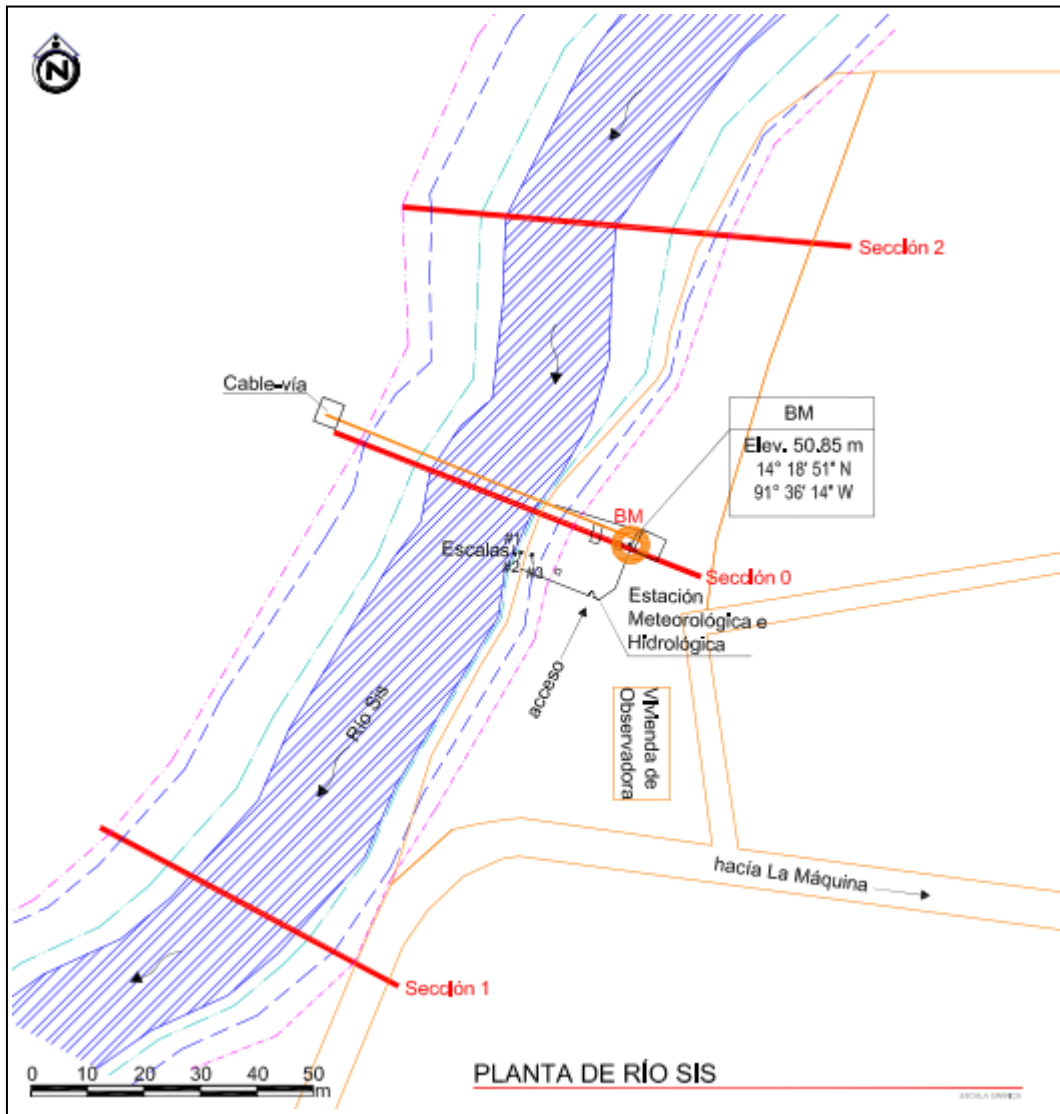
Fuente: Insivumeh.

5. Plano en planta del río Samalá



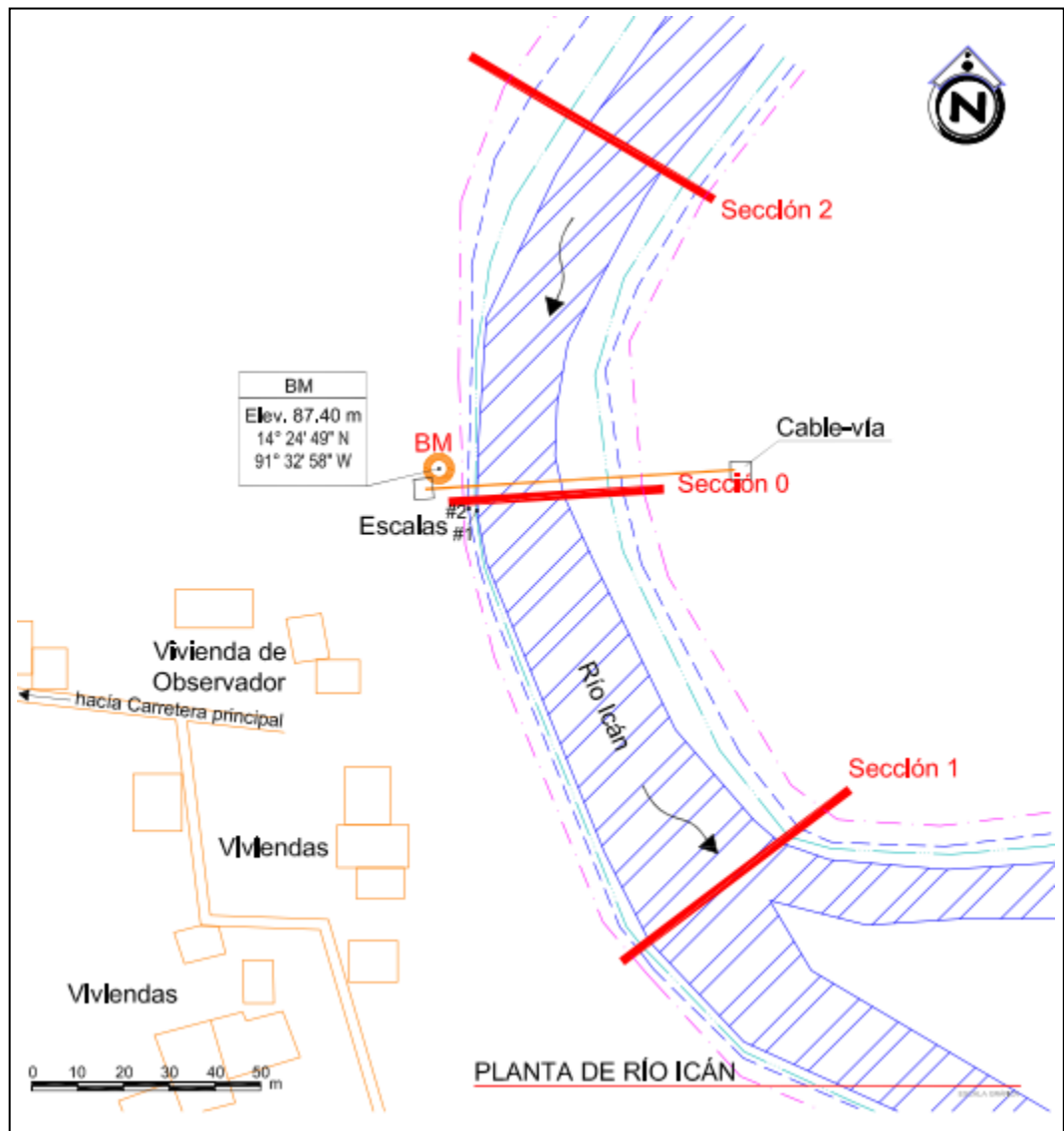
Fuente: Insivumeh.

6. Plano en planta del río Sis



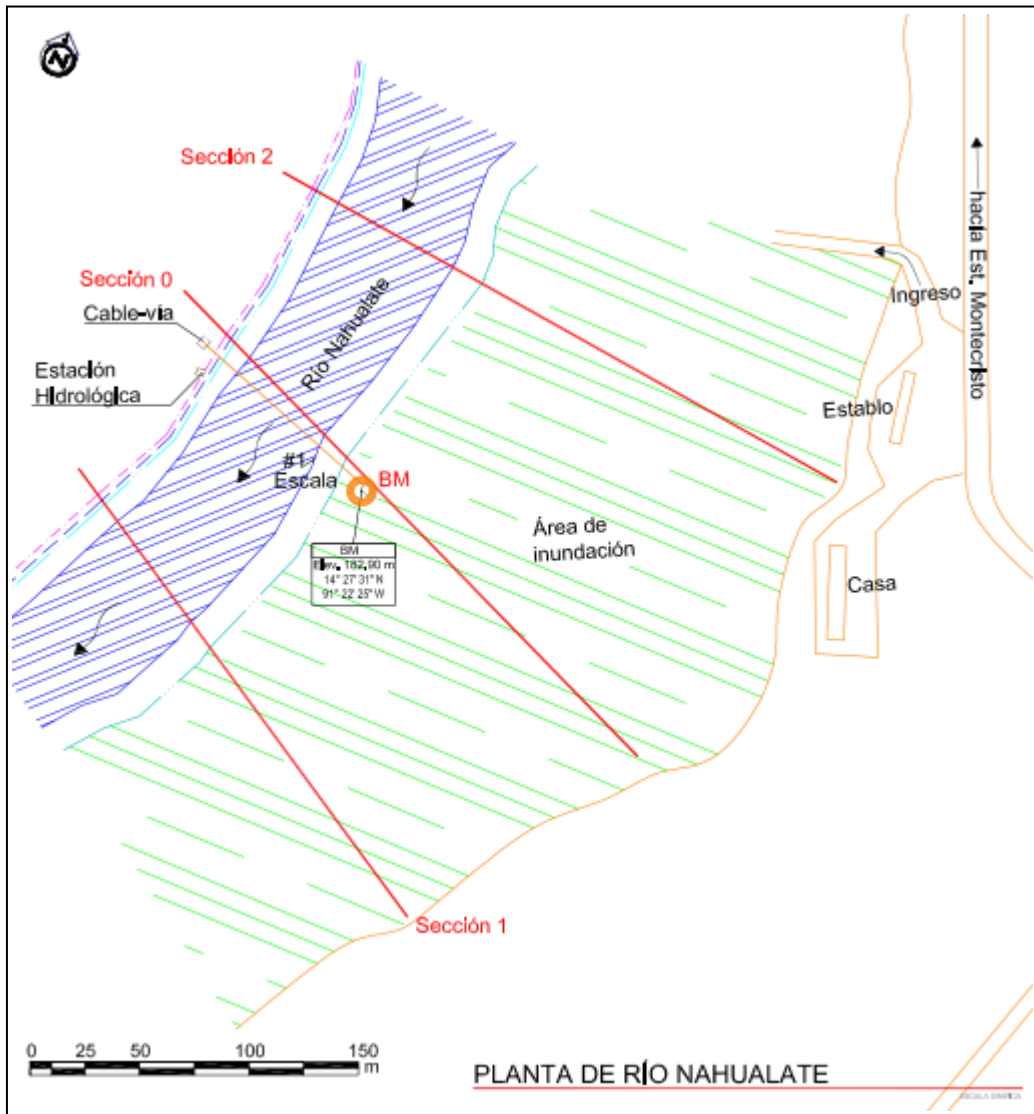
Fuente: Insivumeh.

7. Plano en planta del río Icán



Fuente: Insivumeh.

8. Plano en planta del río Nahualate



Fuente: Insivumeh.