

SALUD AL AMBIENTE
AGUA PARA LA GENTE



Con el apoyo de

RÍO ARRENTE
FUNDACIÓN



MONITOREO REMOTO-DIGITAL DE CAUDALES ECOLÓGICOS PARA LA GESTIÓN DEL AGUA

Análisis y modelación ecohidrológica

Sergio A. Salinas-Rodríguez, Alejandro H. Cueva-Rodríguez,
Ma. Mercedes Castillo Uzcanga, Aarón Jarquín Sánchez,
Roberto Rodríguez Bastarmérito y Rodimiro Ramos Reyes



Monitoreo remoto- digital de caudales ecológicos para la gestión del agua

Análisis y modelación ecohidrológica

Sergio A. Salinas-Rodríguez, Alejandro H. Cueva-
Rodríguez, Ma. Mercedes Castillo Uzcanga, Aarón
Jarquín Sánchez, Roberto Rodríguez Bastarmérito y
Rodimiro Ramos Reyes

Primera edición digital, diciembre de 2025. Diseño: Mario Alberto Gómez Barrera. Corrección de estilo: Julio Rubén Roldán Estrada. ISBN: 978-607-69265-1-2. La versión digital de este libro se encuentra disponible en: <https://ecosur.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1017/2845>. Hecho en México / *Made in Mexico*.

Se autoriza la reproducción de esta obra para propósitos de divulgación o didácticos, siempre y cuando no existan fines de lucro, se cite la fuente y no se altere el contenido.

El contenido de este libro es resultado del proyecto “Construyendo bases para el monitoreo remoto-digital de caudales ecológicos para la gestión del agua” (Acuerdo WWF No. MX18709, ECOSUR/CONTRATO/012/VIH/2024), financiado por la Alianza entre el Fondo Mundial para la Naturaleza (WWF, por sus siglas en inglés) y la Fundación Gonzalo Río Arronte I.A.P. (Alianza WWF-FGRA), y desarrollado con la participación y colaboración de la Dirección Local Tabasco de la Comisión Nacional del Agua. Esta publicación fue sometida a un estricto proceso de arbitraje por pares, con base en los lineamientos establecidos por el Comité Editorial de El Colegio de la Frontera Sur.

Fotografías portada exterior, interior, capítulos y contraportada: Sergio Salinas-Rodríguez. Diseño de contraportada interior: Rodolfo Pérez Orduña.

Forma de citar:

Salinas-Rodríguez, S. A., Cueva-Rodríguez, A. H., Castillo Uzcanga, M. M., Jarquín Sánchez, A., Rodríguez Bastarmérito, R., y Ramos Reyes, R. (2025). *Monitoreo remoto-digital de caudales ecológicos para la gestión del agua: Análisis y modelación ecohidrológica*. México: Fondo Mundial para la Naturaleza, Fundación Gonzalo Río Arronte I.A.P. (Alianza WWF-FGRA) y El Colegio de la Frontera Sur (ECOSUR).

 MANEJO SUSTENTABLE DE CUENCAS Y ZONAS COSTERAS ECOSUR	El Grupo Académico Manejo Sustentable de Cuencas y Zonas Costeras de ECOSUR está adscrito al Departamento de Ciencia de la Sustentabilidad y tiene por objetivo generar conocimiento de impacto local, nacional e internacional a través de publicaciones, proyectos científicos y formación de recursos humanos, que incida en el diseño de políticas públicas en el marco de la sustentabilidad para el aprovechamiento, conservación y restauración de las cuencas y zonas costeras. https://www.ecosur.mx/grupo/cuencas/
--	---

 ECOSUR	El Colegio de la Frontera Sur es un centro público de investigación científica, que busca contribuir al desarrollo sustentable de la frontera sur de México, Centroamérica y el Caribe a través de la generación de conocimientos, la formación de recursos humanos y la vinculación desde las ciencias sociales y naturales. https://www.ecosur.mx/
---	---

D.R. © El Colegio de la Frontera Sur, Carretera Panamericana y Periférico Sur s/n, Barrio María Auxiliadora, San Cristóbal de Las Casas, 29290 Chiapas, México.

 WWF	Por qué estamos aquí: Para detener la degradación del ambiente natural del planeta y construir un futuro en el cual los humanos convivan en armonía con la naturaleza. www.wwf.org.mx
--	--

© 1986 Logotipo del Panda de WWF.

® “WWF” es una Marca Registrada de WWF.

WWF México, Av. Insurgentes Sur 1216, Tlacoquemécatl del Valle, Benito Juárez, 03100 CDMX, México.

Contenido

Agradecimientos	i
Presentación	ii
1. Introducción.....	1
2. Propósito de la obra	3
3. Procedimientos preparatorios, equipo y abordaje metodológico	5
3.1. Arreglo, participación institucional, comunitaria y de especialistas	6
3.2. Recorridos prospectivos para seleccionar los sitios de estudio	7
3.3. Equipo de trabajo e instrumentos de campo	9
3.4. Ecohidrología y ecohidráulica aplicada: teoría y procedimientos	10
3.4.1. Hidrología	14
3.4.1.1. Condiciones ordinarias.....	14
3.4.1.2. Régimen de inundaciones: condiciones extraordinarias	22
3.4.1.3. Régimen de caudales ecológicos.....	31
3.4.2. Hidráulica.....	40
3.4.2.1. Muestreos en campo.....	42
3.4.2.2. Cálculo de parámetros hidráulicos	47
3.4.2.3. Validación del modelo hidráulico	56
3.4.3. Sensores remotos.....	57
3.4.3.1. Requerimientos de instalación y operación de sensores	59
3.4.3.2. Descarga y procesamiento de información	62
3.4.3.3. Modelación caudal-elevación a partir de los sensores.....	66
4. Evaluación de desempeño: validación entre sensores y caudal ecológico.....	69
4.1. Relación de sensores	70
4.2. Caudal ecológico	71
4.3. Utilidad del modelo en la gestión de riesgos y análisis de vulnerabilidad.....	74
5. Alcances y limitaciones	77
6. Recomendaciones finales	81
7. Referencias	83
APÉNDICES.....	87
A1. Análisis de alteración del régimen de caudales del río De la Sierra	87
A2. Rango natural de variabilidad de caudales del río Carrizal.....	91
A3. Parámetros para calcular caudales unitarios en la sección mojada	101

Agradecimientos

Al Ing. Luis Antonio Cabrera, titular en la Dirección Local Tabasco de la Comisión Nacional del Agua; al personal técnico y de apoyo y, en particular, a la gente en las comunidades que operan las estaciones hidrométricas que nos brindaron todas las facilidades para desarrollar las actividades del proyecto.

A las señoras Maricela y Gina Román Ramos y los señores José Antonio Jiménez Priego y Ramón Gerónimo González y familias por su apoyo durante el desarrollo de actividades en campo. Al Ing. Miguel Ángel Mena Torres, instructor del padrón de capacitadores del Instituto Nacional de Estadística y Geografía, por su apoyo en la asesoría para realizar el levantamiento topográfico en las secciones transversales.

A los estudiantes de doctorado Sofía Álvarez Castrejón y Erik Antonio Chacón Hartleven, Arturo Marcial Álvarez Merino, técnico de apoyo del Laboratorio de Biogeoquímica y Mario Alberto Gómez Barrera, responsable del área de Difusión y Promoción de Servicios y Recursos de Información de El Colegio de la Frontera Sur cuyo aporte en el levantamiento de información en campo, procesamiento, modelaje y maquetación de la obra fue de gran apoyo. A Elías Yoel Cruz Cruz, estudiante de la Universidad Politécnica Mesoamericana, por su servicio en el procesamiento y curación de las fotografías tomadas por las cámaras trampa y el almacenamiento de lecturas de nivel en bases de datos.

A la Alianza entre el Fondo Mundial para la Naturaleza (WWF, por sus siglas en inglés) y la Fundación Gonzalo Río Arronte I.A.P. (Alianza WWF-FGRA) por depositar su confianza en este grupo de trabajo para desarrollar un método estratégico e innovador de análisis ecohidrológicos y ecohidráulicos que contribuya a la conservación y gestión del agua y los ecosistemas que dependen del régimen de escurrimientos.



Presentación

La historia de los caudales ecológicos en México, si bien se remonta a unas primeras experiencias en la década de 1990, no es sino hasta 2012, con la publicación de la norma mexicana NMX-AA-159-SCFI-2012 que establece el procedimiento para la determinación de caudales ecológicos en cuencas hidrológicas, que el tema adquiere presencia en la gestión del agua en el país. Esta norma, que se sustenta en una serie de aplicaciones piloto de diferentes metodologías a las realidades de México —por lo que habría que enfatizar que es auténticamente mexicana—, continúa siendo una aportación importante al mundo de los caudales ecológicos por varios aspectos. Primero, por dejar de lado las interminables discusiones metodológicas para enfocarse en los principios científicos del entendimiento de los caudales ecológicos; segundo, por establecer un principio de equilibrio entre la conservación de la biodiversidad y el uso del agua, y finalmente, por establecer una jerarquía de análisis de lo sencillo a lo complejo orientada a la gestión, es decir, por avanzar en el proceso de gestión y no obstaculizarlo. En resumen, se trata de un instrumento para la gestión de los recursos hídricos con un sustento ecológico, bases científicas y aproximaciones prácticas.

Esta contribución no es poca cosa ya que da el soporte necesario para replantear la gestión de recursos hídricos bajo un verdadero paradigma de sustentabilidad: entender el agua como un elemento de los ecosistemas, sustento de la gestión. Esto implica valorar el agua que se extrae, pero sobre todo de aquella porción que permanece en el ambiente, un paradigma que fortalece las capacidades de resiliencia ante el cambio climático.

El establecimiento de reservas de agua se materializó masivamente en 2018 con la protección de caudales ecológicos en casi 300 cuencas del país, una política sin parangón a nivel internacional por su alcance y oportuna aplicación, y que en su momento convocó a distintas entidades académicas y actores de diversos sectores para aportar su conocimiento y experiencia y así determinar volúmenes sostenibles de extracción fundamentados en el entendimiento ecohidrológico del sistema, y de las realidades de usos del agua en cada cuenca.

Este libro forma parte de ese proceso y retoma de manera innovadora y práctica la responsabilidad e importancia de la academia en el desarrollo de soluciones a los problemas del país. En particular, propone soluciones innovadoras al reto de generar información confiable para tomar decisiones adecuadas, contribuye al entendimiento de una nueva gestión del agua, y demuestra que la ecología no está peleada con el desarrollo. Propone espacios para una participación informada de la sociedad y —quizá lo más relevante en estas épocas de confusión en que vivimos— tiende puentes de entendimiento entre los diferentes sectores de la sociedad para construir mejores soluciones para todos nosotros. Enhorabuena por esta publicación, y por las muchas más que resulten de esta fértil experiencia.

J. Eugenio Barrios Ordóñez

Director del Programa Agua

Fundación Gonzalo Río Arronte I.A.P.

1. INTRODUCCIÓN

*"Todo está relacionado
con el agua".*

Lao Tzu, Tao Te Ching (circa 500 A.C.)



La ecohidrología es una ciencia interdisciplinaria e integrativa de procesos ecológicos y servicios ecosistémicos vinculados a la circulación del agua en el ambiente. El monitoreo de los escurrimientos permite comprender el vínculo biósfera-hidrosfera, una relación clave para establecer soluciones en la gestión del agua basadas en la naturaleza.

Los caudales ecológicos se definen como la cantidad, calidad y régimen o niveles de agua dulce necesarios para sostener los ecosistemas acuáticos que, a cambio, dotan del soporte cultural, económico y los medios de vida sostenibles para el bienestar humano (Arthington *et al.*, 2018). Garantizan los servicios ecosistémicos de los cuales se beneficia la humanidad (p. ej., la provisión de agua y alimento): procesos biológicos, ecológicos y sociales que dependen de la conectividad del régimen de flujo, y la protección ante eventos extremos como las sequías e inundaciones.

En México, las evaluaciones de los caudales ecológicos están reguladas por las disposiciones de la NMX-AA-159-SCFI-2012 que establece el procedimiento para la determinación de caudales ecológicos en cuencas hidrológicas, instrumento normativo que se ratificó en 2017 y que desde 2023 se encuentra en proceso de actualización (PROY-NMX-AA-159-SCFI-2023). A la fecha, las evaluaciones se implementan a través de la figura de reserva de agua para uso ambiental conforme al artículo 41 de la Ley de Aguas Nacionales y existen reservas en cerca de 300 cuencas del país. Sin embargo, si bien se encuentran implementadas administrativamente, aún no existe un mecanismo de evaluación de desempeño. Ello implica diseñar un sistema de monitoreo en tiempo real o cercano, lo cual impone desafíos ya que la red de estaciones hidrométricas es insuficiente en cantidad, resolución espacial y, ante el desafío de un clima variable y cada vez más errático debido al cambio climático, también en resolución temporal.

Los registros de observaciones de los niveles de inundación a largo plazo son clave para la toma de decisión en torno al manejo del agua, y la gestión de riesgos ante eventos extremos y los ecosistemas dependientes del patrón de escurrimientos. Sin embargo, la ubicación de estaciones hidrométricas tiende a privilegiar el monitoreo de cuerpos de agua que son de gran interés para la evaluación de la disponibilidad, por lo que existe una subrepresentación en áreas remotas y despobladas. Asimismo, a nivel global los ríos de corrientes intermitente o efímera están subrepresentados (Krabbenhoft *et al.*, 2022). En tanto que los métodos tradicionales de monitoreo son costosos y requieren de capacidades altamente especializadas. Es con el propósito de mejorar y potenciar la diversidad espacial y temporal en la toma de muestras que han surgido alternativas de monitoreo para mejorar el análisis y precisión con base en tecnologías de percepción remota cercana a la superficie (p. ej., series de imágenes o fotografías) (Manfreda *et al.*, 2024).

2. PROPÓSITO DE LA OBRA

"Lo que está pasando con el agua está pasando con el mundo".

Isabel Allende, El cuaderno de Maya (2011)



En esta obra desarrollamos el marco conceptual y los procedimientos técnico-estratégicos para instrumentar e implementar un monitoreo remoto-digital de caudales y niveles de inundación. Asimismo, para el análisis y modelaciones ecohidrológica y ecohidráulica factibles de implementar para robustecer el sistema actual. Surge de la prueba de concepto de un método con técnicas fotogramétricas en sitio, validado por sensores automáticos, y del modelaje de parámetros hidráulicos como alternativa para la evaluación de desempeño de caudales ecológicos, y el análisis de su contribución en tanto solución basada en la naturaleza para la gestión del agua y la prevención de riesgos ante inundaciones, aparte de que tiene el potencial de desarrollarse para los eventos de sequías.

3. PROCEDIMIENTOS PREPARATORIOS, EQUIPO Y ABORDAJE METODOLÓGICO

"Los campos ríen cuando las riberas se inundan".

Rubén Darío, Cantos de vida y esperanza (1905).



El procedimiento técnico para instrumentar e implementar monitoreos remoto-digitales de caudales y niveles de inundación implica el análisis estratégico en el/los caso/s de estudio. Se requiere, al menos, de participación y coordinación interinstitucional, comunitaria y de diferentes especialistas para la selección de sitios de trabajo en campo, el equipo y el rol de cada participante. Implica también la construcción de relaciones de confianza entre las partes colaboradoras, y la generación y provisión de información para la toma de decisiones en torno al manejo del agua de forma robusta y transparente.

La presente sección se enfoca en la descripción del arreglo y participación institucional y comunitaria, la conformación del grupo de trabajo, el objeto del desarrollo de recorridos prospectivos y los detalles a observar para seleccionar los sitios de estudio en campo. Además, se abordan el material y equipo necesario, los procedimientos detallados para realizar los análisis ecohidrológicos, ecohidráulicos, instalar los sensores remotos, el procesamiento de la información, así como la evaluación de desempeño de los modelos.

3.1. Arreglo, participación institucional, comunitaria y de especialistas

La Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), en línea con sus atribuciones y obligaciones, ha diseñado y operado un sistema de monitoreo de caudales y niveles de agua en los ríos del país, esta información se encuentra a disposición pública en el Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS, desde el explorador de windows <ftp://ftp.conagua.gob.mx/Bandas/>). Se trata de un acervo de 2,281 estaciones hidrométricas como sitios de monitoreo de niveles de agua en ríos, velocidades y caudales, con criterios técnicos sólidos que han probado ser de utilidad para la toma de decisiones y perdurar en el tiempo. La información pública varía desde estaciones que ofrecen unos pocos meses o años a sitios que lo hacen por setenta años o más. Sin embargo, en las últimas décadas la inversión para mantener o cubrir más sitios de monitoreo ha sido insuficiente, mientras que los desafíos técnicos, operativos y logísticos se incrementan. La experiencia de la CONAGUA es fundamental, no solo por el sistema actual, esencial para evaluaciones de disponibilidad y caudal ecológico para la gestión del agua, sino porque en el ámbito de sus responsabilidades y obligaciones, representa, a nivel institucional, el actor principal para su robustecimiento.

Otro actor relevante para el desarrollo del sistema son las comunidades rurales donde se pretende instalar el equipo. Idealmente, la comunidad debe estar informada sobre el proceso de monitoreo y, además, que participe. Lo mínimo indispensable para arrancar el trabajo es lograr el acuerdo con algún actor local o núcleo familiar de la comunidad. Empoderarse en la gestión de los recursos hídricos de los que dependen.

Por lo que respecta a la academia, se requieren conocimientos de ecología, hidrología, hidráulica, topografía, batimetría, sistemas de información geográfica y teledetección cercana a la superficie, así como sobre la generación, tratamiento y procesamiento de la información. Sería igualmente deseable contar con especialistas entrenados en

La forma de participación puede ir desde otorgar el permiso de ingreso a sus predios y compartir su conocimiento a fin de diseñar la mejor estrategia para la instalación del equipo y la frecuencia de toma de datos, hasta contribuir en la vigilancia del equipo, la toma de datos, eventualmente conocer los resultados y retroalimentarlos con el propósito de realizar gestión adaptativa y, finalmente, apropiarse de estos y el ámbito de las ciencias sociales, en especial, en el de la gobernanza de recursos naturales. El papel de la academia consiste en servir de interlocutor entre autoridades y comunidades, e integrar el conocimiento de ambas esferas para el diseño de la estrategia más eficiente y su implementación en campo, además de recoger, organizar y procesar la información con robustez técnica, analizarla y generar resultados para ponerlos a disposición de los actores.

También sería deseable sumar a aquellos actores que generan, procesan y ponen a disposición del público información geográfica digital, como el personal del Instituto Nacional de Geografía y Estadística (INEGI). A nivel estatal, siempre será importante sumar a las instituciones responsables de protección civil y medio ambiente; y en el municipal, destaca el sumar las direcciones relacionadas con el ordenamiento territorial, y la gestión de los recursos hídricos (p. ej., los organismos operadores) y de protección ambiental.

3.2. Recorridos prospectivos para seleccionar los sitios de estudio

A la selección de los sitios de estudio le precede una serie de actividades y análisis. Lo primero consiste en visitas prospectivas a tramos de ríos que sean de interés. En este sentido, las reuniones entre el equipo de trabajo y la CONAGUA son de suma importancia puesto que es en ellas en las que se discuten los intereses, la infraestructura instalada, la requerida, las vías de acceso y el personal con el que se cuenta en campo. De igual modo, en estas reuniones la CONAGUA manifiesta sus necesidades y con ello se abren las oportunidades para el robustecimiento del sistema actual.

Dado que las estaciones hidrométricas existentes o en operación, así como las históricas, en general cuentan con lo básico de infraestructura y gente de las comunidades familiarizada con su funcionamiento, idealmente los sitios de trabajo deberán ubicarse allí o estar cercanos a ellas. Para ese fin, se recomienda consultar el [catálogo de estaciones hidrométricas en operación de México](#), transformar el archivo en formato utilizable en sistemas de información geográfica (SIG): QGIS, ArcGIS o Google Earth, y ubicar el conjunto disponible en la zona de interés (figura 1).

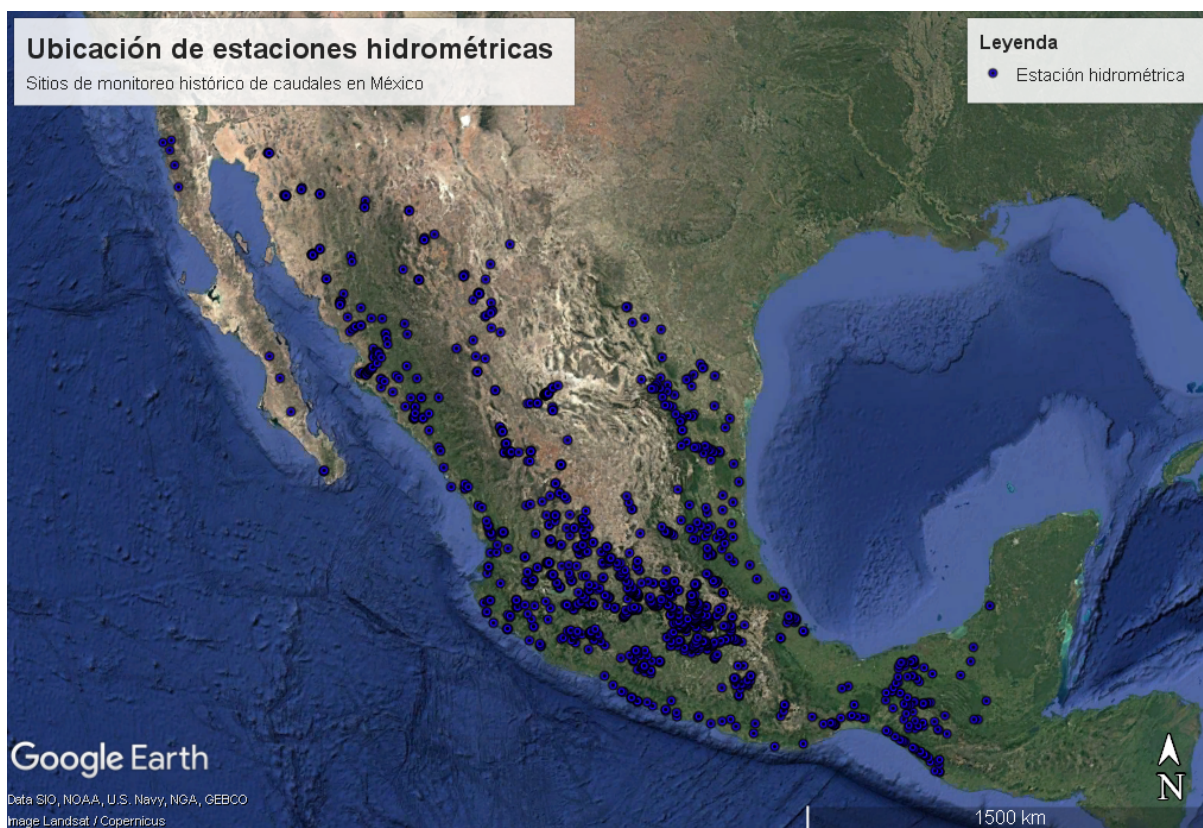


Figura 1. Ubicación de estaciones hidrométricas en México. Fuente: Google Earth con información de CONAGUA (2017).

Dicho catálogo cuenta con información como el identificador de la estación hidrométrica (clave), el nombre de la cuenca, río y corriente, gasto o caudal mínimo, máximo, medio en metros cúbicos por segundo (m^3/s) y el volumen anual registrado (millones de metros cúbicos, $\text{Hm}^3/\text{año}$), así como el municipio, estado y las coordenadas geográficas de ubicación. Puesto que la ubicación de las estaciones hidrométricas es aproximada, su inspección visual en gabinete a través del SIG es de utilidad para identificar las de interés y exponerlas ante la CONAGUA en calidad de sitios potenciales para discutir la infraestructura instalada, la requerida, las vías de acceso y el personal con el que se cuenta en campo para el desarrollo de las actividades.

Durante el recorrido de prospección es importante contar con el acompañamiento de personal de la CONAGUA, dado que se encuentra más familiarizado con las rutas y horarios de acceso, y con el personal que opera en las estaciones. En caso de que el sitio de trabajo sea nuevo y/o cercano a una estación hidrométrica, es preciso identificar un tramo de río relativamente recto con una longitud de al menos cinco veces el ancho del cauce. Este criterio es de gran importancia para el desarrollo del modelo hidráulico.

3.3. Equipo de trabajo e instrumentos de campo

Los instrumentos requeridos para el monitoreo varían según la selección del sitio de trabajo, los especialistas que conforman el grupo y los acuerdos de colaboración institucional con los actores relevantes. A continuación, se enlistan el equipo indispensable, su función y alternativas en caso de tener dificultades en su disponibilidad (tabla 1). En resumen, se requiere elaborar un perfil topobatimétrico en puntos estratégicos de la sección transversal del cauce del río, llevar a cabo un muestreo de velocidades de corriente, instalar sensores subacuáticos y colocar cámaras trampa, ambos para el registro de niveles del agua. Para ríos vadeables¹ ello puede realizarse mediante GPS GNSS o RTK, además de una estación topográfica total, un nivel topográfico y estadales graduados. Sin duda, lo más eficiente sería trabajar con un GPS GNSS o RTK puesto que las coordenadas geográficas en latitud, longitud y altitud, con relación al nivel medio del mar, serían recogidas en campo y procesadas con *softwares* especializados. De no contar con esta posibilidad, entonces se recomienda el uso de una estación topográfica total o un nivel topográfico y estadales graduados. En caso de ser así, entonces se deben tomar las muestras de puntos de control y georreferenciarlos con base en los puntos de la [Red Geodésica Nacional Pasiva – Integrada](#) del INEGI. Para ríos no vadeables, además del equipo topográfico, se requiere ecosonda o perfilador de corriente acústico Doppler.

Tabla 1. Instrumentos para el monitoreo remoto-digital de caudales y niveles de inundación.

Artículo	Función	Alternativas
GPS, GNSS o RTK con bastón, bípode, trípode, cerebros y controladora.	Levantamiento topográfico en puntos estratégicos de la sección transversal de trabajo.	Uso de una estación topográfica total, un nivel topográfico y estadales graduados.
Flujómetro, correntómetro o molinete.	Toma de muestras de velocidades de corriente en ríos vadeables y, en algunos casos, también en ríos no vadeables.	En ríos donde el uso de flujómetros sea demasiado complicado o arriesgado, por cuestiones de seguridad, se requerirá un perfilador de corriente acústico.
Ecosonda y transductor.	Toma de muestras de profundidades en ríos no vadeables.	En casos donde no sea posible el complemento de toma de datos con flujómetro se requerirá entonces un perfilador de corriente acústico.
Perfilador de corriente acústico Doppler.	Toma de muestras de velocidades de corriente y profundidades en ríos vadeables y no vadeables.	GPS, GNSS o RTK con conexión remota (p. ej., bluetooth) a ecosonda y transductor.
Sensor (p. ej., Hobo U20L-01).	Registrador (datalogger) de nivel de agua.	Cámara trampa y tarjeta SD.
Lanzadera impermeable para uso en ambientes acuáticos o húmedos (p. ej., Hobo Onset U-DTW-1).	Lector del sensor subacuático que registra o almacena los niveles de agua.	Cámara trampa y tarjeta SD.

¹Río o corriente de agua poco profunda donde se puede trabajar para el muestreo de fondo a pie en condiciones relativamente seguras para el personal que lo realiza.

Tabla 1. Continuación.

Artículo	Función	Alternativas
Estación USB para uso en ambientes terrestres o secos (p.e. Hobo Onset Base-U-4).	Base óptica de conexión USB para la transferencia de información al ordenador.	Cámara trampa y tarjeta SD.
Ancla bajo el agua, cuerda resistente y cinchos.	Base para fijar de manera estable el sensor bajo el agua.	Poste, palo o vara firme o resistente, block.
Cámara trampa.	Dispositivo para la toma de fotografías a escala de nivel del agua.	Conjunto para el registro de niveles de agua a través de sensores subacuáticos (p. ej., sensor, lanzadera impermeable, estación USB y ancla).
Tarjetas SD.	Dispositivo de almacenamiento de fotografías.	Conjunto para el registro de niveles de agua a través de sensores subacuáticos (p. ej., sensor, lanzadera impermeable, estación USB y ancla).
Poste de madera o PVC.	Base para fijar de manera estable la cámara trampa.	Posta de cerca ganadera, reja, malla, árbol o cualquier estructura firme y fija con ángulo de visión a escala de nivel.
Escala de nivel.	Escala graduada en metros y centímetros para registrar de forma visual el nivel del agua.	Escalas de nivel previamente instaladas en caso de que el sitio cuente con infraestructura de CONAGUA, o bien, pintar la escala graduada en base de puente o alguna estructura fija construida en el lecho del río.
Computadora portátil y ordenador.	Dispositivo para la descarga y procesamiento de información de niveles registrados por el sensor subacuático y fotografías.	iPad o tableta digital.
GPS convencional.	Dispositivo para la toma de coordenadas geográficas.	App para telefonía celular instalada en sistema operativo Android o IOS..
Lector de tarjetas SD.	Dispositivo para lectura y transferencia de fotografías de tarjeta SD a computadora.	Dispositivos de adaptadores de conexión USB.
Caja de herramientas menores.	Conjunto de herramientas para la instalación del equipo en campo.	Instrumentos indispensables.
Escalera.	Herramienta para instalar la cámara trampa en suficiente altura y en ángulo de visión a la escala.	Banco, vehículo.

Fuente: Elaboración propia.

3.4. Ecohidrología y ecohidráulica aplicada: teoría y procedimientos

El rango natural de variabilidad de caudales es clave en el entendimiento del ecosistema acuático. La variabilidad en magnitud de caudales y su frecuencia, duración, momento de ocurrencia (*timing*) y tasa de cambio (ascenso y descenso) del régimen de escurrimientos en ciclos anuales (p. ej., temporadas de estiaje y lluvias) y a lo largo de los años (p. ej., condiciones secas, medias o húmedas), sostienen las fuentes de energía, calidad del agua, hábitat para la biodiversidad y sus interacciones que, en conjunto, determinan la integridad

ecológica y salud de los ecosistemas de agua dulce (Poff *et al.*, 1997; Mathews y Richter, 2007; Poff, 2018) (figura 2). Esta diversidad estacional de hábitat sincroniza las estrategias de vida de los organismos que ahí habitan, mantiene el funcionamiento de la conectividad del sistema y evita condiciones que favorezcan el establecimiento de especies exóticas e invasoras (Bunn y Arthington, 2002).

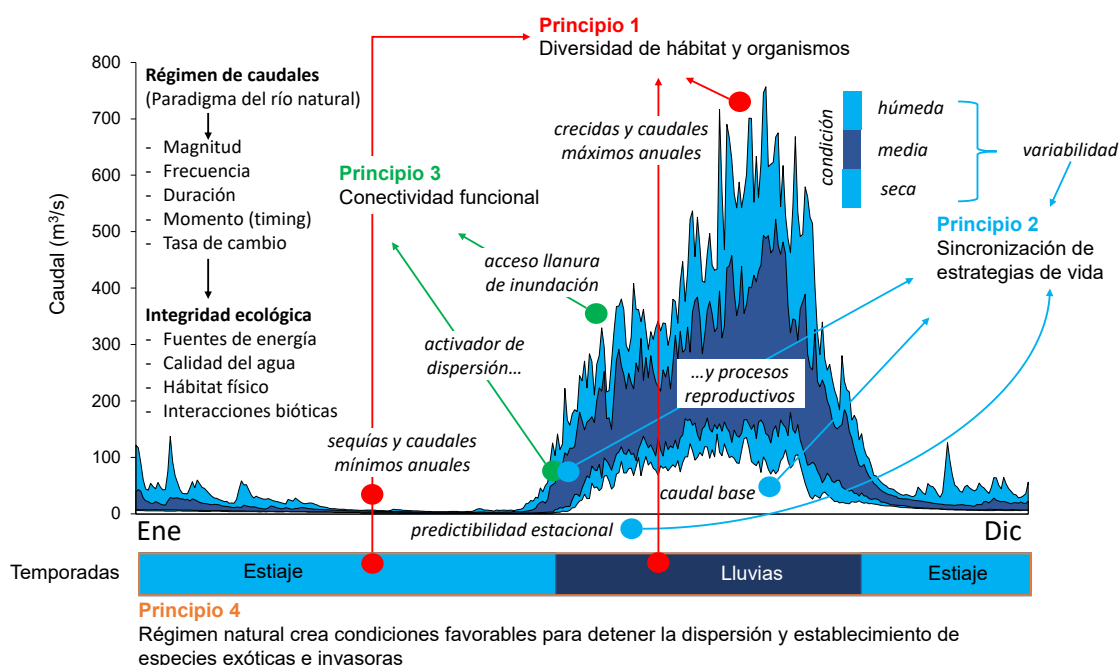


Figura 2. Papel del régimen natural de caudales sobre la integridad ecológica y los principios ecohidrológicos que gobiernan los ecosistemas acuáticos. Fuente: Salinas Rodríguez y Martínez Rivera (2024) con base en Poff *et al.* (1997), Bunn y Arthington (2002) y Mathews y Richter (2007).

El caudal ecológico describe la cantidad, calidad y régimen de caudales o niveles de agua dulce necesarios para sostener los ecosistemas acuáticos que, a cambio, dotan del soporte cultural, económico y los medios de vida sostenibles para el bienestar humano (Arthington *et al.*, 2018). Los caudales extremadamente bajos, bajos, altos o pulsos y las pequeñas y grandes inundaciones son componentes del régimen que desempeñan diversas funciones en el ecosistema acuático (Richter *et al.*, 2006; Mathews y Richter, 2007) (tabla 2).

Tabla 2. Funciones ecológicas de los componentes del régimen de caudales.

Componente	Rol ecológico
Caudales bajos	Nivel ordinario o de condiciones medias o normales • Provisión adecuada de hábitat y espacio para organismos acuáticos. • Mantenimiento adecuado de temperatura, oxígeno disuelto y calidad del agua. • Mantenimiento de niveles de la lámina de agua en llanura de inundación, y humedad del suelo para plantas. • Provisión de agua para animales terrestres. • Mantenimiento de huevos de peces y anfibios en suspensión. • Permite a la ictiofauna moverse para alimentarse, reproducirse u ovopositar. • Soporte del medio hiporréico para organismos que habitan en sedimentos o suelo saturado.
	Nivel extraordinario de sequía • Permite el reclutamiento de especies específicas de plantas en la llanura de inundación. • Purga o eliminación de especies invasoras, introducidas o exóticas del medio acuático y ripario. • Concentración de presas en áreas específicas para el beneficio de organismos depredadores.
Caudales o pulsos altos	• Moldean la forma física (geometría) del cauce, incluyendo rápidos y pozas. • Determinan tamaño de sustrato en el lecho del río (arenas, gravas o cantos rodados). • Previene el establecimiento de vegetación riparia dentro del cauce. • Reestablecen condiciones de calidad del agua tras periodos prolongados de caudales bajos, lavando el fondo de material orgánico y contaminantes. • Promueve la aireación de sitios de ovoposición (p. ej., gravas) y previenen la compactación por asolvamiento del fondo. • Mantiene condiciones de salinidad adecuadas en estuarios.
Inundaciones	Nivel extraordinario de desbordamiento • Proporcionan señales de migración y desove para los peces. • Desencadenan una nueva fase en el ciclo de vida (p. ej., insectos). • Permiten que los peces desoven en la llanura de inundación y proporcionan un área de crianza para los peces juveniles. • Proporcionan nuevos espacios o los renuevan para la alimentación de peces y aves acuáticas. • Infiltración del agua o recarga del nivel freático en la llanura de inundación. • Mantienen la diversidad de tipos de bosques de la llanura de inundación mediante inundaciones prolongadas (p. ej., diferentes especies de plantas tienen diferentes tolerancias al medio acuático). • Crean sitios para el reclutamiento de plantas colonizadoras. • Dan forma al hábitat físico-espacial de la llanura de inundación. • Depositan grava y cantos rodados en áreas de desove. • Arrastran materiales orgánicos (alimentos) y restos leñosos que dan forma y estructura al hábitat acuático dentro del cauce. • Eliminan las especies invasoras e introducidas o exóticas de las comunidades acuáticas y semiacuáticas. • Distribuyen semillas y frutos de plantas en ambientes semiacuáticos. • Promueven el movimiento lateral del río a los humedales adyacentes en la llanura de inundación, formando nuevos hábitats como canales secundarios y lagunas en forma de meandros. • Proporcionan humedad del suelo para el establecimiento de plántulas.

Fuente: Adaptado de Richter *et al.* (2006) y Mathews y Richter (2007).

Tanto el estado del arte como la [norma mexicana NMX-AA-159-SCFI-2012 Que establece el procedimiento para la determinación de caudales ecológicos en cuencas hidrológicas](#)² parten del reconocimiento de que alterar las características de variabilidad del régimen en alguno de sus atributos o componentes implica degradar en cierta proporción las condiciones fisicoquímicas, bióticas, abióticas o ambientales, p. ej., las condiciones hidrológicas anuales y, por consecuencia, la integridad ecológica del sistema (Salinas-Rodríguez *et al.*, 2020, 2022). A partir de este entendimiento surgen hipótesis de trabajo cuya lógica consiste en identificar indicadores y métricas para la evaluación del régimen bajo diferentes condiciones hidrológicas que respondan a cambios inducidos por alteraciones antrópicas (Salinas Rodríguez y Rivera Martínez, 2024). Los objetos de conservación se refieren a procesos, servicios o funciones ecológicas o sociales provistos por el régimen, o bien, a especies, hábitats o ecosistemas que dependan de este (Salinas-Rodríguez *et al.*, 2021). Estos indicadores se evalúan a partir del monitoreo de variables hidromorfológicas, fisicoquímicas, biológicas, ecológicas y sociales para sustentar la integridad ecológica del sistema (figura 3).

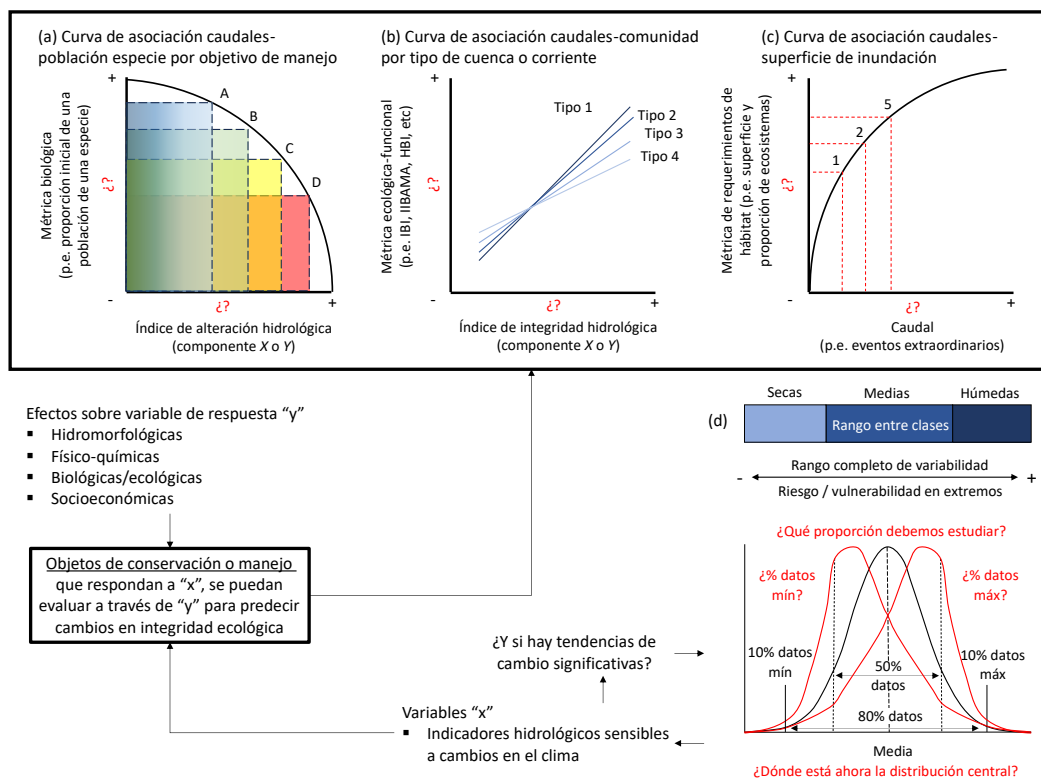


Figura 3. Proceso de la formulación de hipótesis de trabajo y ejemplos para evaluar el efecto que tiene el régimen de caudales sobre diferentes objetos de conservación o manejo de los ecosistemas acuáticos según (a) el estado de una población respecto al objetivo ambiental o de manejo (estado ecológico deseado), (b) tipos de cuenca (endorréica, exorréica) o corriente (perenne, intermitente o efímera) y (c) superficies de inundación. Las variables para la construcción de indicadores hidrológicos se seleccionan en función del grado de sensibilidad al cambio climático, (d) número de eventos y días consecutivos de pico máximo anuales, caudales extremadamente bajos o de sequía con tendencias significativas de cambio. Fuente: Salinas Rodríguez y Martínez Rivera (2024).

²Si bien la norma mexicana actualizada se encuentra en proceso de publicación en el *Diario Oficial de la Federación*, los procedimientos que se detallan en este libro permanecen vigentes en el PROY-NMX-AA-159-SCFI-2023.

Es en tal contexto que se evalúa y analiza el régimen de caudales, para lo cual partimos de análisis ecohidrológicos desarrollados a través de la aproximación según la frecuencia de ocurrencia de condiciones hidrológicas (años muy secos, secos, medios y húmedos), los atributos de magnitud, frecuencia, duración, momento de ocurrencia y tasa de cambio, y los componentes del régimen, en particular los extremadamente bajos y las inundaciones a diferentes periodos de retorno (Salinas-Rodríguez *et al.*, 2020, 2022).

3.4.1. Hidrología

3.4.1.1. Condiciones ordinarias

Las condiciones o caudales ordinarios también son llamados caudales bajos o caudales de base (*low flows* o *baseflows*), según la fuente que se consulte. Para efectos del análisis de caudales, estos son los intraanuales o estacionales que escurren por el cauce de los ríos bajo condiciones ordinarias, por lo que el agua no alcanza la llanura aluvial o de inundación donde normalmente se ubican los humedales adyacentes que dependen del régimen de inundaciones. En el contexto de los componentes del régimen (Mathews y Richter, 2007), los caudales de condiciones ordinarias corresponden a eventos de caudales extremadamente bajos, bajos y pulsos altos, los cuales son fundamentales para mantener la conectividad longitudinal a lo largo del río y la cuenca vertiente y, en muchos casos, la expresión superficial del agua subterránea debido a los flujos subsuperficiales (conectividad vertical).

Análisis histórico del régimen: ¿natural o alterado?

El análisis histórico del régimen de caudales tiene por objetivo evaluar si la serie de trabajo es representativa de condiciones naturales, y se inspira en los *Indicadores de Alteración Hidrológica* propuestos por Richter *et al.* (1996), quien establece 32–33 parámetros hidrológicos de relevancia ecológica organizados en grupos para caracterizar estadísticamente la variabilidad del régimen.

Con el fin de conocer el grado de “naturalidad” del régimen (o alteración, en su caso), la aproximación se basa en la implementación del método en dos secciones diferentes de la serie completa de caudales. El punto en el tiempo que normalmente sirve para dividir la serie en dos subconjuntos (periodos de referencia y evaluación) obedece a la construcción e inicio de operaciones de infraestructura hidráulica o hidroeléctrica cuyo nivel de alteración sobre el régimen se desea analizar. No obstante, este mismo procedimiento también puede servir para evaluar qué tanto el régimen de caudales ha variado por efecto de la no estacionariedad o cambio climático.

El análisis se enfoca en el régimen de caudales medios mensuales y anuales y la lógica consiste en evaluar cuantitativamente en qué proporción el conjunto de información sujeta a evaluación se encuentra dentro del rango de variabilidad “permisible” (periodo de referencia). Para ejemplificar el procedimiento, utilizamos la serie de datos de la estación hidrométrica González (clave 30062) que se ubica en el río Carrizal en el estado de Tabasco (en el Apéndice A1 se muestra la síntesis del río De la Sierra). La

serie se dividió en 1957–1971, como periodo de referencia, y en 1972–2014, como el de evaluación (figura 4), esto debido a que a partir de entonces el régimen del río presenta un comportamiento errático y a que ha habido una serie de transformaciones sobre la red hidrográfica en el Bajo Grijalva con el propósito de derivar el agua que llega a la ciudad de Villahermosa y otras localidades de la región. En este sentido, lo primero que hay que hacer es organizar las series de caudales medios mensuales y anuales (tabla 3).

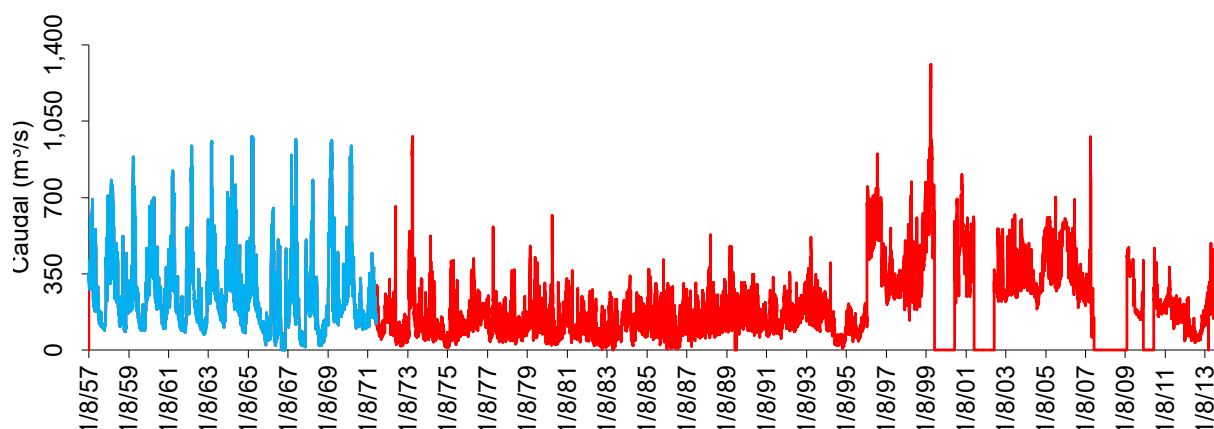


Figura 4. Régimen histórico de caudales a escala diaria en la estación hidrométrica González sobre el río Carrizal (clave 30062). Periodo de referencia 1957–1971 (azul) y de evaluación de alteración al régimen mensual y anual 1972–2014. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3. Series de caudales medios mensuales y anuales (m^3/s) del río Carrizal en la estación hidrométrica González (clave 30062) para los periodos de referencia 1957–1971 y evaluación 1972–2014.

m^3/s	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Prom
Periodo de referencia													
1957								323	506	346	217	278	334
1958	217	139	127	106	106	328	472	385	509	528	358	354	303
1959	269	133	141	196	102	212	188	232	241	467	447	252	240
1960	194	120	107	113	103	241	328	385	549	440	364	248	266
1961	274	241	191	124	127	202	260	283	351	460	448	196	263
1962	208	132	107	144	92	169	276	267	591	535	250	165	245
1963	183	161	150	94	82	109	320	274	471	512	344	282	249
1964	252	184	155	163	127	267	469	326	493	457	252	368	293
1965	219	236	168	100	114	175	287	322	325	673	309	241	264
1966	192	152	129	100	90	54	80	59	217	532	211	68	157
1967	219	321	202	2	8	184	204	159	294	503	262	235	216
1968	232	147	45	35	25	170	303	192	322	530	284	164	204
1969	160	64	39	63	105	117	150	437	750	614	227	195	243
1970	179	203	168	190	230	256	301	397	717	545	276	149	301
1971	150	143	197	172	136	122	145	189	253	260	226	169	180
Prom	215	172	133	110	101	191	280	289	453	510	304	228	256

Tabla 3. Continuación.

m ³ /s	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Prom
Periodo de evaluación													
1972	161	107	89	96	111	177	175	184	165	131	114	163	139
1973	73	71	60	74	76	128	68	156	308	526	235	142	160
1974	84	121	122	159	80	81	111	73	172	150	91	95	112
1975	91	75	72	124	76	31	22	30	125	166	184	61	88
1976	114	88	101	114	118	94	107	122	141	172	186	186	129
1977	118	205	172	160	184	180	143	128	83	123	206	156	155
1978	127	119	105	147	137	172	100	79	91	155	86	80	116
1979	97	107	115	90	96	113	123	127	203	140	117	201	127
1980	101	197	159	145	180	196	73	94	137	126	165	57	136
1981	43	130	95	94	118	151	265	196	160	104	93	85	128
1982	71	116	89	142	166	128	96	92	160	98	94	83	111
1983	96	62	51	91	122	117	48	55	185	118	20	58	85
1984	124	92	70	85	149	166	132	171	217	103	48	102	122
1985	140	168	165	165	139	115	149	233	197	139	94	131	153
1986	196	140	117	191	191	191	124	136	157	70	99	75	140
1987	52	57	101	112	142	190	169	173	126	117	88	65	116
1988	151	152	120	104	177	126	94	159	244	234	147	170	157
1989	118	133	106	157	162	237	176	136	223	280	178	219	177
1990	192	142	127	190	197	231	155	157	157	152	129	147	165
1991	126	209	118	140	148	149	144	97	91	173	137	97	136
1992	169	104	104	96	151	202	169	190	121	211	136	111	147
1993	140	126	195	181	186	213	257	250	240	263	202	144	200
1994	202	194	202	197	194	204	206	134	132	163	94	132	171
1995	34	37	41	55	40	30	72	144	162	167	92	94	81
1996	105	77	74	91	126	140	173	419	515	607	512	566	284
1997	601	685	575	599	399	389	379	245	279	341	320	269	423
1998	279	270	269	297	318	350	284	297	346	375	464	287	320
1999	250	330	297	348	435	484	645	605	661	953	853	583	537
2000													
2001	417	550	369	464	726	523	421	457	320	349	415	408	452
2002													
2003	322	301	346	249	375	331	248	253	320	363	327	332	314
2004	346	293	355	404	471	428	409	371	343	323	307	301	363
2005	255	234	255	273	279	414	506	523	471	524	406	446	382
2006	403	404	430	457	497	564	578	563	525	419	390	371	467
2007	415	396	306	301	328	306	281	297	282	395	269	123	308
2008													
2009									437	377	354	365	383
2010	217	177	168	155	162	263							190
2011	314	315	210	200	201	188	204	218	253	285	206	169	230
2012	172	175	165	181	173	172	139	150	193	103	73	68	147
2013	72	62	50	57	76	120	132	164	212	255	275	306	148

Tabla 3. Continuación.

m³/s	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Prom
2014	277	278	257	284	284	364	400	278	207	205	221	190	270
Prom	186	190	174	189	206	219	210	216	246	262	218	196	212

Fuente: Elaboración propia.

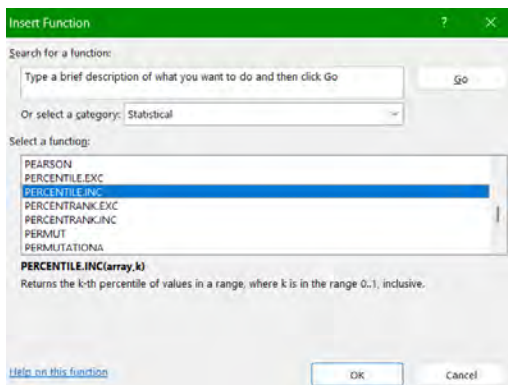
Enseguida, se establecen las condiciones de caudales medios mensuales y anuales mínimos y máximos del rango de variabilidad del periodo de referencia. Los parámetros utilizados corresponden a los percentiles 10 y 90 ya que estos son los criterios mínimos y máximos establecidos en el Apéndice B de la Norma Mexicana de Caudal Ecológico (NMX-AA-159-SCFI-2012). Sin embargo, para evaluaciones más detalladas se recomienda analizar también el rango de condiciones medias, esto es la mediana $\pm 25\%$, para lo que se usan los percentiles 25 y 75, o bien, los cuartiles 1 y 3 (Richter *et al.*, 1997; Mathews y Richter, 2007; Salinas-Rodríguez *et al.*, 2020, 2022). El objetivo de este análisis consiste en someter a prueba el rango de variabilidad de los caudales medios mensuales y anuales del periodo de evaluación con relación al de referencia (tabla 4). Para el cálculo en Microsoft Office (MO) Excel, se inserta función en la barra de comando (f_x) y se escoge PERCENTIL.INC (percentil incluyente) en la categoría “Estadísticas”. Posteriormente, se selecciona la matriz i por el rango j y se coloca el valor k (figura 5); en este caso se trata de los valores de cada mes para el periodo de referencia. Con ello, la función devuelve el percentil k -ésimo de los valores del rango, donde k esta en el rango 0–1, esto es 0.1 para el percentil 10 y 0.9 para el percentil 90.

Tabla 4. Caudales medios mensuales y anuales (m³/s) del río Carrizal en la estación hidrométrica González (clave 30062) para los periodos de (1) referencia 1957–1971 (percentiles 10 y 90) y (2) evaluación 1972–2014.

m³/s	Referencia		Periodo de evaluación									
Mes	p10	p90	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979	...	2014
Ene.	166	264	161	73	84	91	114	118	127	97	...	277
Feb.	124	240	107	71	121	75	88	205	119	107	...	278
Mar.	64	195	89	60	122	72	101	172	105	115	...	257
Abr.	43	185	96	74	159	124	114	160	147	90	...	284
May.	42	133	111	76	80	76	118	184	137	96	...	284
Jun.	111	264	177	128	81	31	94	180	172	113	...	364
Jul.	146	426	175	68	111	22	107	143	100	123	...	400
Ago.	171	392	184	156	73	30	122	128	79	127	...	278
Sep.	246	666	165	308	172	125	141	83	91	203	...	207
Oct.	384	587	131	526	150	166	172	123	155	140	...	205
Nov.	221	414	114	235	91	184	186	206	86	117	...	221
Dic.	155	325	163	142	95	61	186	156	80	201	...	190
Anual	1,873	4,092	1,674	1,918	1,340	1,059	1,542	1,858	1,397	1,529	...	3,244
Prom.	156	341	139	160	112	88	129	155	116	127	...	270

Fuente: Elaboración propia.

a)



b)

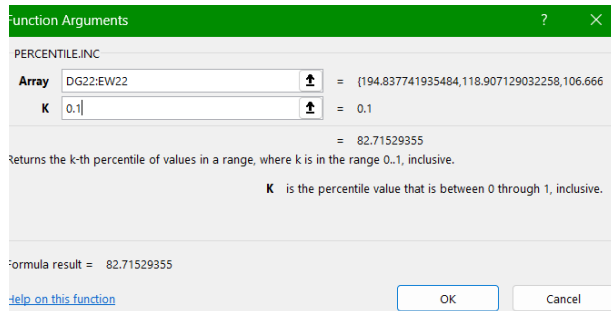


Figura 5. Cuadros de diálogo en MO Excel para (a) insertar función de percentiles que (b) devuelve el k -ésimo valor 0.1 y 0.9 establecido (percentil 10 y 90), respectivamente. Fuente: Elaboración propia.

La siguiente etapa consiste en inspeccionar y analizar gráfica o cualitativamente, mediante un hidrograma, cómo se comporta cada régimen mensual según el año y el caudal medio mensual de la serie sometida a evaluación con relación al límite de referencia dado por los percentiles 10 y 90 (figura 6). Este mismo concepto se repite para la evaluación a escala anual.

a)



b)

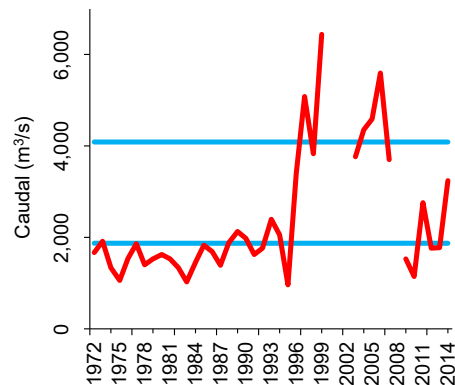


Figura 6. Desempeño del régimen de caudales sujeto a evaluación (1972–2014) del río Carrizal en la estación hidrométrica González (clave 30062) con relación a los límites inferior y superior establecidos conforme al periodo de referencia de 1957–1971 (líneas azules, percentiles 10 y 90, respectivamente). (a) Régimen de caudal medio mensual 1972–2014 y (b) anual (línea roja). Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente, con base en la ecuación 1, se cuenta el número de veces que el valor medio mensual de cada año del periodo sometido a prueba estuvo dentro de rango y se obtiene el porcentaje de cumplimiento (tabla 5). De acuerdo con el Apéndice B de la Norma Mexicana de Caudal Ecológico (NMX-AA-159-SCFI-2012), para considerar el régimen en buen estado se espera que al menos el 50+1% del régimen evaluación estén dentro del rango conforme al periodo de referencia en ambas escalas: estacional

y anual. En este sentido y a partir de la evaluación cuantitativa, se trata de analizar y eventualmente concluir si a escala anual y mensual del periodo de evaluación se encuentra dentro del rango deseado ($\geq 51\%$).

$$\text{Porcentaje de cumplimiento} = \frac{\# \text{ Meses dentro de rango}}{\# \text{ Meses de evaluación}} \times 100 \quad (1)$$

Tabla 5. Síntesis de resultados del análisis de alteración del régimen hidrológico del río Carrizal en la estación hidrométrica González (clave 30062). Periodo de referencia 1957–1971 (límites inferior y superior conforme a los percentiles 10 y 90), periodo de evaluación 1972–2014. En rojo se identifican los meses que no cumplen con el porcentaje de cumplimiento (50+1%).

Mes (m ³ /s)	Límite inferior (p10)	Límite superior (p90)	Caudal medio mensual (1972–2014)	# Meses dentro rango p10-p90	# Meses de evaluación	Porcentaje cumplimiento
Ene.	166	264	186	8	39	21%
Feb.	124	240	192	14	39	36%
Mar.	64	195	175	23	39	59%
Abr.	43	185	191	25	39	64%
May.	42	133	210	10	39	26%
Jun.	111	264	222	25	39	64%
Jul.	146	426	210	18	38	47%
Ago.	171	392	215	14	38	37%
Sep.	246	666	240	13	39	33%
Oct.	384	587	255	4	39	10%
Nov.	221	414	216	10	39	26%
Dic.	155	325	196	12	39	31%
Anual	1,873	4,092	2,509	12	41.00	29%
Prom.	156	341	209	13	38.83	33%

Fuente: Elaboración propia.

Rango de variabilidad de caudales

El rango de variabilidad de caudales es una técnica estadística que se usa en hidrología para ordenar y describir estratégicamente el régimen. Esta aproximación ha sido ampliamente utilizada, incluso por encima de las curvas de duración de caudales, debido a la ventaja que representa para visualizar y comprender la información. Para ejemplificar el procedimiento, en esta sección utilizamos la serie de datos de la estación hidrométrica Pueblo Nuevo (clave 30016) ubicada en el río De la Sierra en el estado de Tabasco para el periodo 1947–2014 (figura 7). En el Apéndice A2 se muestra la información tras la aplicación de este y el resto de los procedimientos hidrológicos del río Carrizal en la estación hidrométrica González, clave 30062, periodo 1957–1971, a la luz de los resultados del análisis de alteración del régimen.

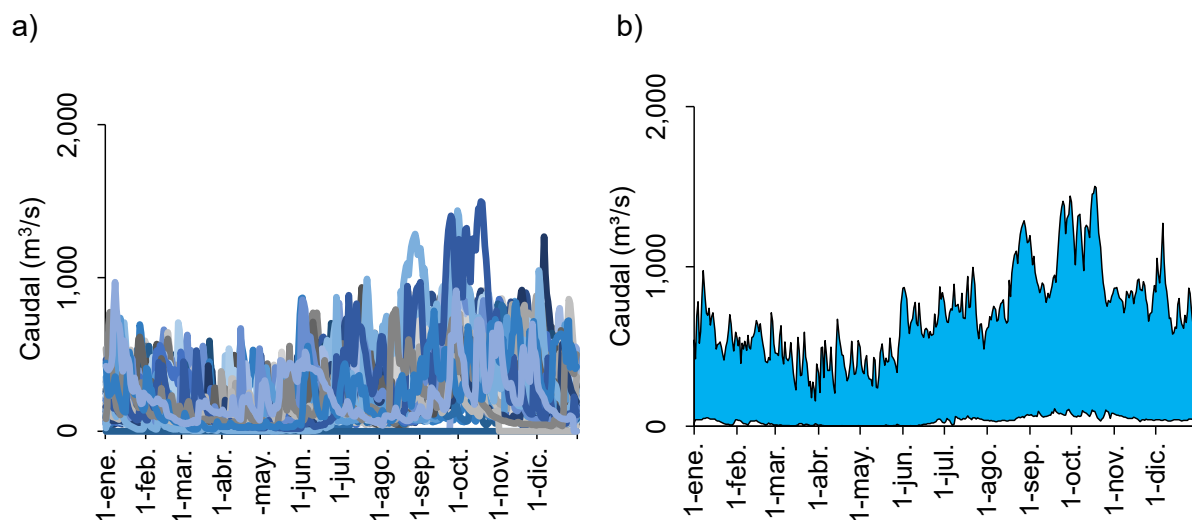


Figura 7. Rango de variabilidad del régimen de caudales de 1947–2014 en la estación hidrométrica Pueblo Nuevo (clave 30016) ubicada en el río De la Sierra. (a) Regímenes anuales desplegados en el hidrograma; (b) hidrograma desplegado con base en el modelo del rango de variabilidad de caudales en función de los percentiles 0 y 100. Fuente: Elaboración propia.

Con base en la organización y visualización de la información en el hidrograma, el régimen se inspecciona de forma cualitativa y, en función de los parámetros utilizados, se obtienen métricas ecológicamente relevantes que se usan para la evaluación cuantitativa. El ejercicio se fundamenta en la frecuencia con la que diferentes condiciones hidrológicas ocurren de forma estacional o intraanual e interanual (Richter *et al.*, 1997; Mathews y Richter, 2007; Salinas-Rodríguez *et al.*, 2020, 2022). Para iniciar, es preciso identificar el rango de condiciones medias (mediana $\pm 25\%$) ya que este congrega el 50% de la población de análisis. La porción que está por encima que representa las condiciones húmedas (25% de la cola con datos máximos) y la que está por debajo las condiciones secas (25% de la cola con datos mínimos; figura 8).

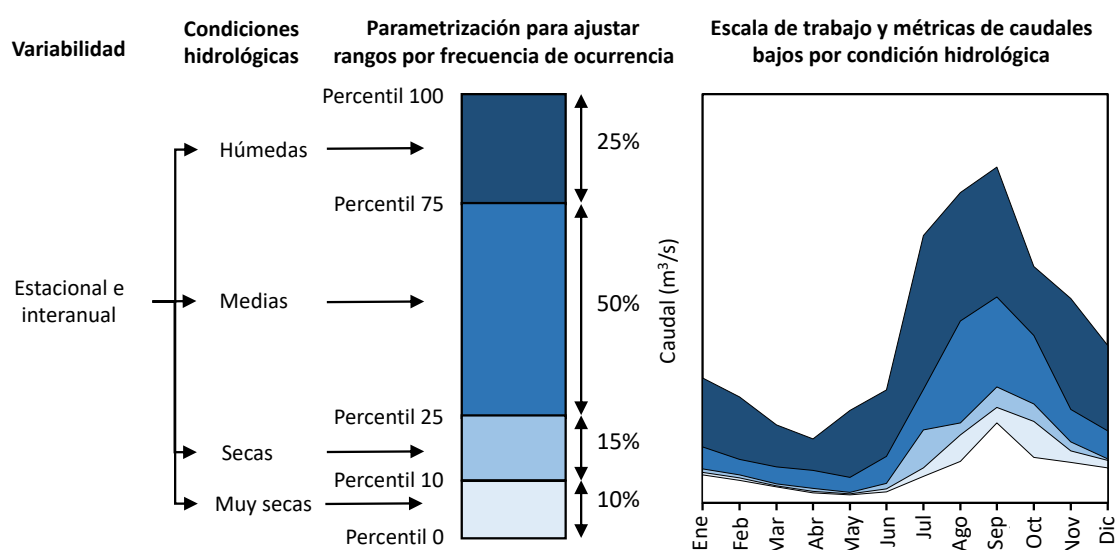


Figura 8. Procedimiento conceptual para establecer las condiciones hidrológicas tipo que caracterizan la variabilidad estacional (intraanual) e interanual en función de la frecuencia de ocurrencia. Fuente: Adaptado de Salinas-Rodríguez *et al.* (2020).

Para efectos de cálculo, se utilizan los percentiles 0, 10, 25 y 75, ya que estos establecen los límites inferiores de cada condición, es decir, muy seca, cuyo rango es de 0–10; seca, 10–25; media, 25–75, y húmeda >75 (Salinas-Rodríguez *et al.*, 2020, 2022). Para realizar el cálculo en MO Excel, se reproduce el procedimiento conforme a lo descrito anteriormente (sección *Análisis histórico del régimen: ¿natural o alterado?*) para los percentiles 0, 10, 25, 50, 75 y 90, tanto a escala diaria ($i = \text{día } 1 \dots 365 = \text{enero} - 31 \text{ diciembre}$, donde $j = \text{año de inicio} - \text{año final}$), como mensual ($i = \text{mes } 1 \dots 12 = \text{enero} - \text{diciembre}$; $j = \text{año de inicio} - \text{año final}$). Los percentiles 50 y 90 se obtienen con el propósito de identificar la mediana y el límite superior³, respectivamente. Asimismo, se recomienda calcular la media aritmética o promedio sobre las mismas matrices para evaluar si esta es similar a la mediana (indicativo de cercanía a la normalidad en la distribución estadística), o bien, si sobreestima o subestima.

A través de la figura 9 se visualiza el rango de variabilidad de caudales a escala diaria, así como la diferencia gráfica entre la media aritmética y la mediana. Es importante destacar cómo, en este caso, la media aritmética sobreestima en comparación a la mediana. Este es un fenómeno que suele ocurrir en series de datos donde se presentan valores atípicos (*outliers*) máximos. En el caso de series de caudales suele ocurrir en regímenes con gran variabilidad estacional e interanual, razón por la cual la media aritmética en México no resulta en un parámetro robusto para hacer gestión de los recursos hídricos. Por lo que respecta a la figura 10, igualmente despliega el rango de variabilidad de caudales, pero a escala mensual. En este caso se repite la misma observación con relación a las diferencias entre la media aritmética y la mediana.

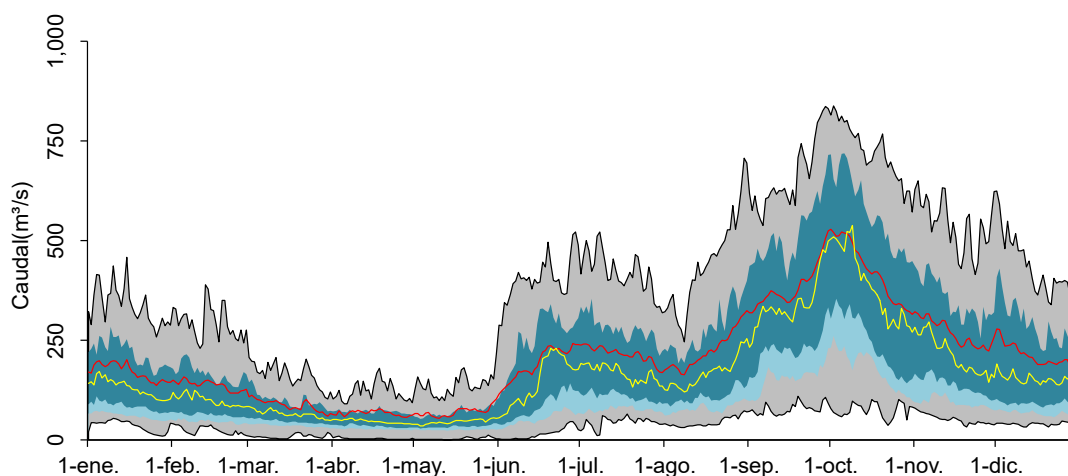


Figura 9. Modelo del rango de variabilidad de caudales a escala diaria de 1947–2014 en la estación hidrométrica Pueblo Nuevo (clave 30016) ubicada en el río De la Sierra. El área verde oscuro representa el rango de condiciones medias (percentiles 25–75, mediana en línea amarilla y la media en roja), la zona gris, el rango de condiciones húmedas (percentil 75–90) y secas (percentil 10–25). El área verde en tono claro representa las condiciones muy secas (percentil 0–10). Fuente: Elaboración propia.

³Aunque ciertamente el límite máximo está definido por el percentil 100, se omite por efectos prácticos con el propósito de visualizar mejor los rangos del resto de las condiciones.

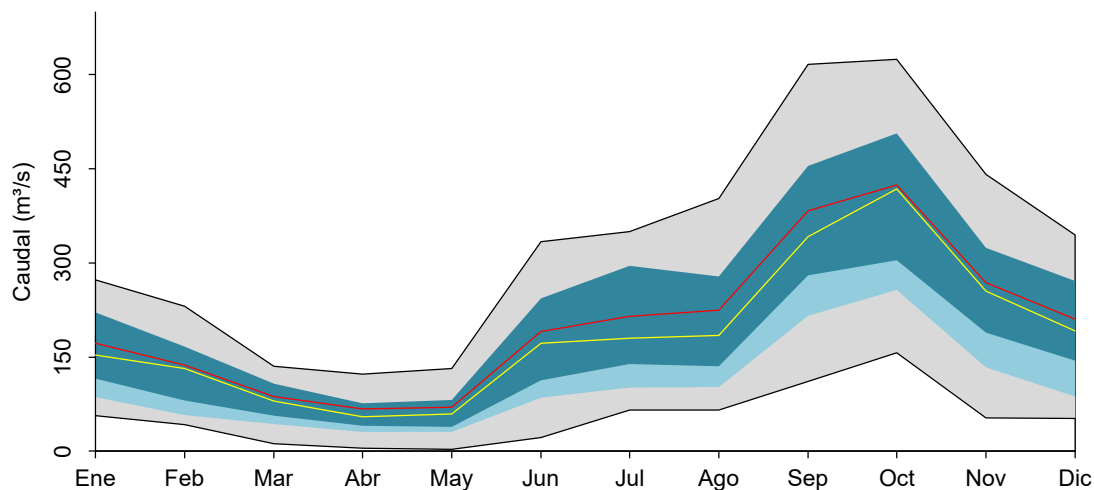


Figura 10. Modelo del rango de variabilidad de caudales a escala mensual de 1947–2014 en la estación hidrométrica Pueblo Nuevo (clave 30016) ubicada en el río De la Sierra. Comparación de condiciones (muy secas, secas, medias y húmedas) con la mediana (línea amarilla) y la media aritmética (rojo). Fuente: Elaboración propia.

3.4.1.2. Régimen de inundaciones: condiciones extraordinarias

El régimen de inundaciones, avenidas o crecidas consiste en la tipificación y caracterización de un conjunto de eventos pico, extraordinarios o máximos anuales que llenan y superan los niveles ordinarios del cauce. Estos juegan un papel fundamental para mantener la conectividad lateral entre el río y los humedales ubicados sobre la llanura aluvial o de inundación, así como la vertical debido a que promueven la infiltración de agua al subsuelo.

Tipificación de caudales máximos extraordinarios (magnitud y frecuencia)

Para los objetivos del análisis, los caudales se tipifican en al menos tres categorías de acuerdo con su magnitud: (a) intraanuales e interanuales (b) de baja y (c) media magnitud. Los eventos pico intraanuales (Cat I) corresponden a las avenidas cuya magnitud ocurre estadísticamente año con año. Las pequeñas inundaciones o de baja magnitud (Cat II) son las que superan los niveles ordinarios del cauce (*bankfull* en inglés), por lo que es la magnitud a punto del desborde. Las inundaciones de mediana magnitud (Cat III) son aquellas que desbordan y alcanzan parte de la llanura aluvial o de inundación. En México, estas últimas sirven de criterio hidrológico e hidráulico para la delimitación del espacio federal de los cuerpos de agua nacionales⁴. Si a juicio experto se cree conveniente, adicionalmente se pueden incorporar al análisis categorías de inundaciones de (d) gran magnitud (Cat IV) y (e) excepcionales (Cat V).

Para llevar al plano operativo el entendimiento conceptual del régimen de inundaciones, lo que se hace es asociar las magnitudes (Cat I, II, III, IV y V) en función de su probabilidad de ocurrencia (frecuencia). Esto es el periodo de retorno definido como la probabilidad

⁴Creciente máxima ordinaria dentro del cauce sin que se produzca el desbordamiento (Artículo 4to. Fracción I del Reglamento de la Ley de Aguas Nacionales).

de que dentro de un periodo de años (N) los caudales sean igualados o superados (T). En este sentido, la probabilidad de ocurrencia de los eventos intraanuales, baja (*bankfull*), media y gran magnitud, así como aquellas excepcionales es a 1, 1.5, 5, 10 y 20 años de periodo de retorno, respectivamente.

Existen varias aproximaciones para modelar estas distribuciones de eventos máximos. Entre las más populares se encuentran los históricos con base en observaciones (modelo empírico), así como los modelos teóricos de Gumbel, Log-Pearson Tipo III y Log-Normal, cada uno con sus ventajas e inconvenientes que están en función de la longitud de la muestra y de la simetría/asimetría de los datos directamente relacionada con la variabilidad climática, principalmente (Chow *et al.*, 1994). Se recomienda utilizar al menos dos modelos; a continuación, lo ejemplificamos a través de la distribución histórica y con base en Gumbel. Para modelar las distribuciones de los eventos pico, primero, de la serie de caudales diarios se obtiene el máximo anual (figura 11). En el caso del ejemplo, se omite el valor del año 2007 debido a que la serie para ese año tiene un vacío.

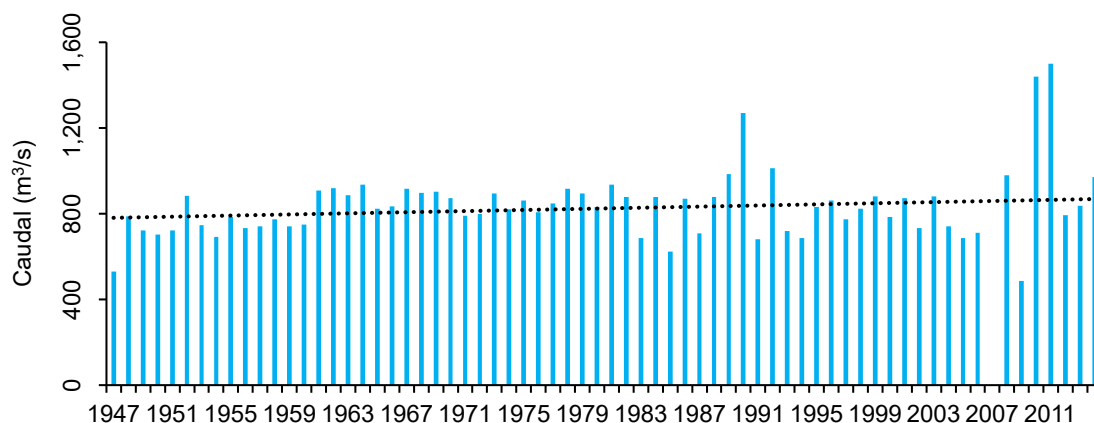


Figura 11. Serie de caudales diarios máximos anuales (m^3/s) de 1947 a 2014 en la estación hidrométrica Pueblo Nuevo (clave 30016) ubicada en el río De la Sierra. El valor del año 2007 se omite para el resto del procedimiento dado que ese año presenta un vacío en la serie. Fuente: Elaboración propia.

Enseguida, sobre la serie resultante y tras la omisión del valor de 2007, se modela la distribución histórica o empírica. Para ello se ordena la serie de mayor a menor caudal y se asigna un número consecutivo. Posteriormente, sobre cada caudal máximo anual de la serie ordenada, se calcula el logaritmo base 10 [$\text{LOG}_{10}(X)$]. Finalmente, se aplica la ecuación 2:

$$ARI(T) = \frac{N + 1}{m} \quad (2)$$

donde,

N = Número de observaciones o total de datos

m = Rango de años o número consecutivo de registro

ARI = Escala de frecuencia o periodo de retorno en años

En el modelo de distribución histórica los eventos extraordinarios a 1, 1.5, 5, 10 y 20 años de periodo de retorno tienen magnitudes de 488, 775, 905, 973 y 1,270 m³/s ya que son los valores que más se acercan a las frecuencias de referencia (tabla 6).

Tabla 6. Tabla resumen de distribución de eventos extraordinarios con base en el modelo histórico o empírico (observaciones) en la estación hidrométrica Pueblo Nuevo (clave 30016) ubicada en el río De la Sierra. En amarillo se resaltan la magnitud de caudales (m³/s) asociada a 1, 1.5, 5, 10 y 20 años de periodo de retorno.

Id	Q _{max}	Log _{max}	ARI(T)	Id	Q _{max}	Log _{max}	ARI(T)
1	1,500	3.18	68.00	35	825	2.92	1.94
2	1,441	3.16	34.00	36	825	2.92	1.89
3	1,270	3.10	22.67	37	822	2.91	1.84
4	1,012	3.01	17.00	38	807	2.91	1.79
5	985	2.99	13.60	39	800	2.90	1.74
6	979	2.99	11.33	40	792	2.90	1.70
7	973	2.99	9.71	41	790	2.90	1.66
8	937	2.97	8.50	42	788	2.90	1.62
9	937	2.97	7.56	43	786	2.90	1.58
10	919	2.96	6.80	44	784	2.89	1.55
11	918	2.96	6.18	45	775	2.89	1.51
12	917	2.96	5.67	46	774	2.89	1.48
13	908	2.96	5.23	47	749	2.87	1.45
14	905	2.96	4.86	48	747	2.87	1.42
15	897	2.95	4.53	49	743	2.87	1.39
16	896	2.95	4.25	50	742	2.87	1.36
17	896	2.95	4.00	51	741	2.87	1.33
18	888	2.95	3.78	52	734	2.87	1.31
19	884	2.95	3.58	53	734	2.87	1.28
20	882	2.95	3.40	54	722	2.86	1.26
21	881	2.95	3.24	55	722	2.86	1.24
22	878	2.94	3.09	56	721	2.86	1.21
23	878	2.94	2.96	57	712	2.85	1.19
24	877	2.94	2.83	58	708	2.85	1.17
25	873	2.94	2.72	59	703	2.85	1.15
26	873	2.94	2.62	60	693	2.84	1.13
27	871	2.94	2.52	61	687	2.84	1.11
28	863	2.94	2.43	62	686	2.84	1.10
29	861	2.93	2.34	63	686	2.84	1.08
30	849	2.93	2.27	64	681	2.83	1.06
31	838	2.92	2.19	65	623	2.79	1.05
32	835	2.92	2.13	66	532	2.73	1.03
33	833	2.92	2.06	67	488	2.69	1.01
34	833	2.92	2.00				

Fuente: Elaboración propia.

Para calcular las magnitudes de eventos extraordinarios asociados a los mismos periodos de retorno según el modelo teórico de Gumbel, primero se obtiene el factor con base en la ecuación 3:

$$F(xt) = \frac{ARI(T) - 1}{ARI(T)} \quad (3)$$

donde, $ARI(T)$ = Escala de frecuencia o periodo de retorno en años que, a diferencia de la distribución histórica que está dada por la serie de observaciones, en este caso se puede modelar por la extensión de tiempo que se desee. Posteriormente, se obtiene el factor Z a partir de la ecuación 4:

$$Z = \frac{-LN(-LN(F(xt))) - \mu_y}{\sigma_y} \quad (4)$$

donde, $\mu_y = 0.5548$ y $\sigma_y = 1.1854$ son parámetros de referencia en función de la cantidad de datos deseados para la salida del modelo (70 años). Finalmente, se obtiene el valor de caudal modelado X a partir la serie de caudales máximos anuales históricos u observados de 1947 a 2014 (Q_{max_ob} , con excepción del valor correspondiente a 2007) conforme a la ecuación 5:

$$X = \sigma Q_{max_ob} \times Z + \mu Q_{max_ob} \quad (5)$$

donde,

σQ_{max_ob} = *Desviación estándar*

μQ_{max_ob} = *Media o promedio*

Para el caso del modelo de distribución de Gumbel, los eventos extraordinarios a 1, 1.5, 5, 10 y 20 años de periodo de retorno tienen magnitudes de 556, 750 y 965, 1,066 y 1,163 m³/s, respectivamente (tabla 7). La ventaja de modelar los caudales eventos máximos tipo con diferentes modelos estriba en que se puede analizar cuál tiene mejor desempeño; en el caso del ejemplo provisto, la distribución con base en el modelo de Gumbel muestra muy buen desempeño ($R^2 > 0.97$) (figura 12).

Para continuar con la caracterización del momento, duración y tasa de cambio se considerarán las siguientes magnitudes tipo de caudales extraordinarios 525, 765, 935, 1,020 y 1,220 m³/s para el régimen de inundaciones categorías I, II, III, IV y V, respectivamente. Estos valores se obtienen a partir del promedio de magnitudes tipo a 1, 1.5, 5, 10 y 20 años de periodo de retorno de ambos modelos, redondeado según el múltiplo superior base cinco [(MULTIPLO.SUPERIOR (X,5)).

Tabla 7. Tabla resumen de distribución de eventos extraordinarios con base en el modelo teórico de Gumbel en la estación hidrométrica Pueblo Nuevo (clave 30016) ubicada en el río De la Sierra. En amarillo se resaltan la magnitud de caudales (m^3/s) asociada a 1, 1.5, 5, 10 y 20 años de periodo de retorno.

ARI(T)	F(xt)	Z	X
1.01	0.00990099	-1.758172753	556
1.1	0.090909091	-1.205830423	645
1.2	0.166666667	-0.960011879	684
1.3	0.230769231	-0.790929223	711
1.4	0.285714286	-0.65813353	732
1.5	0.333333333	-0.547366144	750
1.6	0.375	-0.451698255	765
1.7	0.411764706	-0.367160001	779
1.8	0.444444444	-0.291232263	791
1.9	0.473684211	-0.222200845	802
2	0.5	-0.158838434	812
2.5	0.6	0.098639271	853
3	0.666666667	0.293504687	884
3.5	0.714285714	0.450851729	910
4	0.75	0.583009384	931
4.5	0.777777778	0.697022458	949
5	0.8	0.79731735	965
5.5	0.818181818	0.886865232	979
6	0.833333333	0.967760549	992
6.5	0.846153846	1.041536746	1,004
7	0.857142857	1.109351033	1,015
7.5	0.866666667	1.172098614	1,025
8	0.875	1.230486484	1,034
8.5	0.882352941	1.285082883	1,043
9	0.888888889	1.336351466	1,051
9.5	0.894736842	1.384675546	1,059
10	0.9	1.430375677	1,066
15	0.933333333	1.787541835	1,123
20	0.95	2.037620423	1,163
30	0.966666667	2.386953344	1,219
40	0.975	2.633243848	1,258
50	0.98	2.823636459	1,289
60	0.983333333	2.978870232	1,314
70	0.985714286	3.109928716	1,335

Fuente: Elaboración propia.

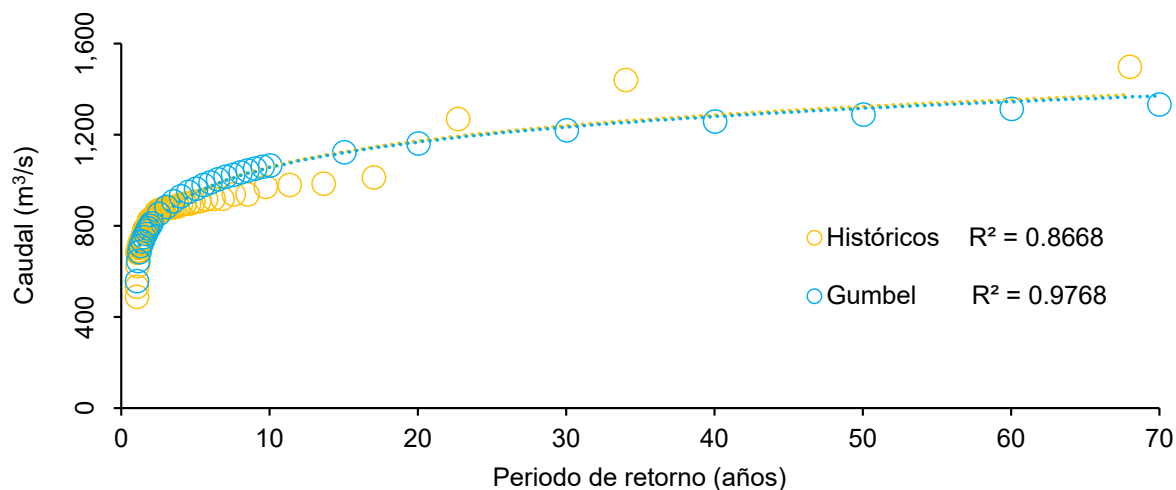


Figura 12. Funciones de distribución de caudales extraordinarios (m^3/s) de acuerdo con los modelos histórico o empírico con base en observaciones (1947–2014) y Gumbel (teórico) en la estación hidrométrica Pueblo Nuevo (clave 30016) ubicada en el río De la Sierra. Fuente: Elaboración propia.

Momento y duración de los eventos pico o caudales extraordinarios

El momento y la duración se obtienen a partir de la inspección y conteo de eventos que igualan o superan cada uno de los eventos pico o extraordinarios para las categorías I, II, III, IV y V, es decir, a 1, 1.5, 5, 10 y 20 años de periodo de retorno (figura 13). El procedimiento se aplica con base en la ecuación 6 sobre la serie completa (1947–2014). En la tabla 8 se muestra la identificación y filtrado de los eventos que igualan o superan las avenidas intraanuales para el mes de septiembre. Una vez filtrados los eventos extraordinarios que igualan o superan las avenidas interanuales, se realiza el conteo de eventos donde $i = \text{mes}$ y $j = \text{año}$ (tabla 9). Posteriormente, se realiza el conteo de los días consecutivos en los que cada uno de los eventos de la serie ocurre (tabla 10).

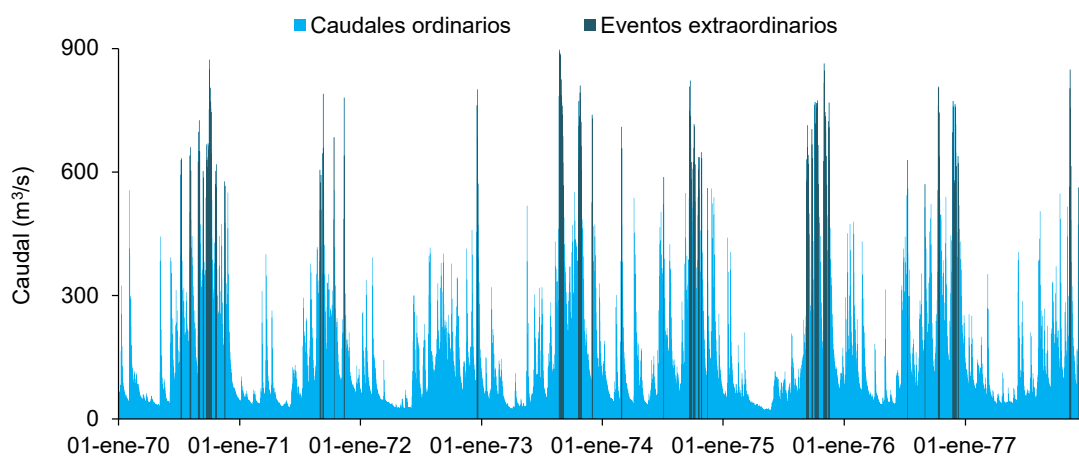


Figura 13. Identificación y filtrado de eventos pico o extraordinarios (m^3/s) de la serie de caudales ordinarios en la estación hidrométrica Pueblo Nuevo (clave 30016) ubicada en el río De la Sierra. Fuente: Elaboración propia.

$$\text{Tipo de evento} = \begin{cases} \text{Caudal ordinario,} & \text{si } Q_i < 525 \\ \text{Intraanual (Cat I),} & \text{si } Q_i \geq 525 < 765 \\ \text{Baja magnitud (Cat II),} & \text{si } Q_i \geq 765 < 935 \\ \text{Media magnitud (Cat III),} & \text{si } Q_i \geq 935 < 1,020 \\ \text{Gran magnitud (Cat IV),} & \text{si } Q_i \geq 1,020 < 1,220 \\ \text{Excepcional (Cat V),} & \text{si } Q_i \geq 1,220 \end{cases} \quad (6)$$

Tabla 8. Identificación y filtrado de los eventos pico intraanuales (Cat I) en el mes de septiembre de la serie de caudales (m³/s, 1947–2014) en la estación hidrométrica Pueblo Nuevo (clave 30016) en el río De la Sierra.

Fecha	1948	1949	1950	1951	1952	1953	1954	1955	1956	1957	1958	...	2014
1-sep.												...	
2-sep.												...	
3-sep.								536				...	
4-sep.												...	
5-sep.												...	
6-sep.												...	
7-sep.										577		...	
8-sep.										601		...	
9-sep.				612			549			556		...	
10-sep.				608	529		608				560	...	
11-sep.				591	568		562					...	
12-sep.				609	538	553	539					...	
13-sep.						539						...	
14-sep.												...	
15-sep.												...	
16-sep.												...	
17-sep.												...	
18-sep.												...	
19-sep.							580			554		...	
20-sep.				690			653					...	
21-sep.				619			653		562			...	
22-sep.				555			608		562			...	
23-sep.				553			558		567			...	
24-sep.				532	543		572		584			...	
25-sep.							599		601			...	623
26-sep.					561		650		637			...	598
27-sep.					652		672		592			...	590
28-sep.	549				646		689			538		...	830
29-sep.	588	607			634		693	673		609		...	918
30-sep.	565	616			717		647	630		709		...	815

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 9. Conteo de días en los que se presentaron caudales que igualaron o superaron la

avenida intraanual (Cat I) por mes y año de la serie de análisis (1947–2014) en la estación hidrométrica Pueblo Nuevo (clave 30016) en el río De la Sierra.

Mes	1948	1949	1950	1951	1952	1953	1954	1955	1956	1957	1958	...	2014
Ene.	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	...	8
Feb.	0	0	2	0	0	0	0	2	0	0	0	...	0
Mar.	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	...	0
Abr.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	...	0
May.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	...	0
Jun.	0	0	1	0	0	0	1	0	6	0	9	...	0
Jul.	0	0	0	0	4	0	5	1	0	0	6	...	0
Ago.	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	...	0
Sep.	3	2	0	9	9	2	16	3	7	7	1	...	6
Oct.	8	4	11	5	23	7	0	15	10	2	0	...	10
Nov.	5	3	0	12	0	4	0	5	1	0	3	...	6
Dic.	1	0	0	1	7	1	0	0	0	5	3	...	0
Total	18	10	14	27	45	14	25	26	24	14	22	...	30

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 10. Número de eventos a lo largo de cada año y conteo de días consecutivos en los que igualaron o superaron la avenida intraanual (Cat I, 1947–2014) en la estación hidrométrica Pueblo Nuevo (clave 30016) en el río De la Sierra.

#Eventos	1948	1949	1950	1951	1952	1953	1954	1955	1956	1957	1958	...	2014
1	8	6	6	5	28	7	12	12	10	5	9	...	8
2	3	3	5	5	4	4	4	7	7	3	6	...	6
3	3	1	2	4	3	2	3	3	6	3	3	...	5
4	1		1	4	3	1	2	2	1	2	2	...	4
5	1			3	2		2	1		1	1	...	3
6	1			3	2		1	1			1	...	2
7	1			3	2		1					...	1
8					1							...	1

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, este procedimiento se repite para las subseries de eventos que igualan o superan las avenidas de baja, media y gran magnitud, así como las excepcionales (Cat II, III, IV y V), y se obtiene la síntesis de momento y duración con base en frecuencias absolutas y relativas (tablas 11 y 12). Como era de esperarse, tanto el momento como la duración suelen ocurrir en la temporada de lluvias.

Tabla 11. Momento característico del año en el que ocurre el régimen de avenidas según la serie de análisis (1947–2014) y de acuerdo con la tipificación establecida de eventos intraanuales de baja, media y gran magnitud, así como excepcionales (Cat I, II, III, IV y V) en la estación hidrométrica Pueblo Nuevo (clave 30016) en el río De la Sierra.

Mes	Cat I		Cat II		Cat III		Cat IV		Cat V		Todas las categorías	
	1 año Pr		1.5 años Pr		5 años Pr		10 años Pr		20 años Pr		#Días	%
	#Días	%	#Días	%	#Días	%	#Días	%	#Días	%	#Días	%
Ene.	37	2.0	4	1.0	1	1.1	0	0.0	0	0.0	42	1.7
Feb.	23	1.2	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	23	0.9
Mar.	6	0.3	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	6	0.2
Abr.	6	0.3	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	6	0.2
May.	3	0.2	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	3	0.1
Jun.	83	4.4	11	2.6	0	0.0	0	0.0	0	0.0	94	3.8
Jul.	112	5.9	8	1.9	2	2.3	0	0.0	0	0.0	122	4.9
Ago.	149	7.9	43	10.3	16	18.4	11	21.6	4	15.4	223	9.0
Sep.	483	25.5	119	28.4	30	34.5	15	29.4	7	26.9	654	26.4
Oct.	641	33.9	178	42.5	33	37.9	22	43.1	14	53.8	888	35.9
Nov.	221	11.7	38	9.1	0	0.0	0	0.0	0	0.0	259	10.5
Dic.	128	6.8	18	4.3	5	5.7	3	5.9	1	3.8	155	6.3
Total	1,892	100.0	419	100.0	87	100.0	51	100.0	26	100.0	2,475	100.0

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 12. Duración característica en número de días consecutivos en el que ocurre el régimen de avenidas según la serie de análisis (1947–2014) y de acuerdo con la tipificación establecida de eventos intraanuales de baja, media y gran magnitud, así como excepcionales (Cat I, II, III, IV y V) en la estación hidrométrica Pueblo Nuevo (clave 30016) en el río De la Sierra.

Duración (#días)	Cat I		Cat II		Cat III		Cat IV		Cat V		Todas las Categorías	
	1 año Pr		1.5 años Pr		5 años Pr		10 años Pr		20 años Pr		#Evnt	%
	#Evnt	%	#Evnt	%	#Evnt	%	#Evnt	%	#Evnt	%	#Evnt	%
1	104	26	24	22	5	21	2	11	2	13	137	24
2	80	20	21	19	2	8	2	11	1	6	106	19
3	47	12	19	17	3	13	1	6	1	6	71	13
4	36	9	13	12	1	4	0	0	2	13	52	9
5	23	6	8	7	0	0	1	6	1	6	33	6
6	22	5	1	1	0	0	0	0	1	6	24	4
7	21	5	4	4	0	0	1	6	0	0	26	5
8	9	2	1	1	2	8	1	6	0	0	13	2
9	5	1	4	4	0	0	0	0	0	0	9	2
10	6	1	1	1	0	0	1	6	0	0	8	1
11	1	0	1	1	1	4	0	0	0	0	3	1
12	6	1	0	0	0	0	1	6	0	0	7	1
13	11	3	1	1	1	4	1	6	1	6	15	3
14	4	1	1	1	1	4	1	6	1	6	8	1
>15	26	6	10	9	8	33	6	33	6	38	56	10
Total	401	100	109	100	24	100	18	100	16	100	568	100

Fuente: Elaboración propia.

Caracterización de la tasa de cambio

La tasa de cambio indica la velocidad relativa donde la magnitud de los caudales iguala o supera el criterio establecido de eventos pico o extraordinarios en al menos un año de periodo de retorno (Cat I $\geq 525 \text{ m}^3/\text{s}$) y se obtiene con base en la ecuación 7 (figura 14). Mediante una inspección de la tasa de cambio, se observa que la velocidad de ascenso supera la tasa de descenso. Esto tiene sentido si consideramos que los caudales extraordinarios están asociados a eventos climatológicos extremos como depresiones, tormentas tropicales o huracanes. La gráfica de cajas y bigotes (*boxplots*) revela que el rango central de distribución de las tasas de ascenso oscila entre 2.1 y 9.9, mientras que en la tasa de descenso va de -9.8 a -2.9 con medianas de 4.9 y -6.1 , respectivamente.

$$\text{Tasa de cambio} = \frac{Q_i - Q_{i-1}}{Q_{i-1}} \times 100 \quad (7)$$

donde,

Q_i = Caudal del día de interés(x)

Q_{i-1} = Caudal del día anterior

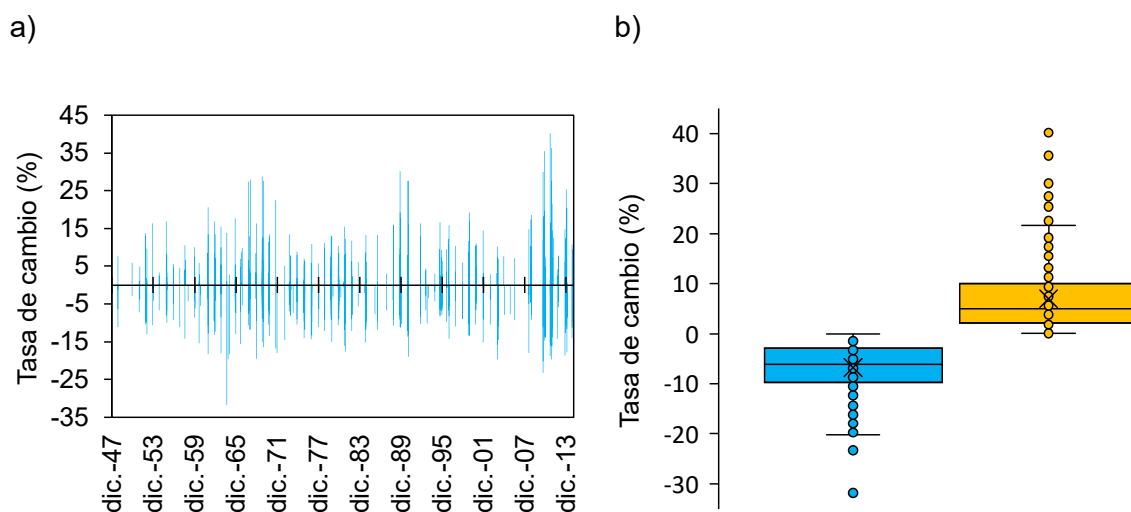


Figura 14. Tasa de cambio de (a) los eventos pico o extraordinarios y (b) gráficas de cajas (*boxplots*) tanto de ascenso (naranja) como descenso (azul), según los datos de la serie de análisis (1947–2014) en la estación hidrométrica Pueblo Nuevo (clave 30016) en el río De la Sierra. Fuente: Elaboración propia.

3.4.1.3. Régimen de caudales ecológicos

La propuesta de caudal ecológico se realiza con base en el método ecohidrológico-holístico de escritorio más detallado descrito en el Apéndice D, aplicación 2 de la Norma Mexicana de Caudal Ecológico NMX-AA-159-SCFI-2012, actualizado y robustecido a

la luz de los resultados obtenidos tras su implementación sistemática en cerca de 350 cuencas por todo el país, así como en otras partes del mundo con climas muy diversos que incluyen África, Asia, Europa, Centro y Sudamérica. La aproximación desarrollada para ríos con regímenes hidrológicos altamente variables ha probado ser consistente en zonas tropicales, áridas y semiáridas y, actualmente, es reconocida en el estado del arte de la ciencia de caudales ecológicos (Poff *et al.*, 2017; Opperman *et al.*, 2018; Salinas-Rodríguez *et al.*, 2018, 2020, 2021, 2022). El método consiste en evaluar las necesidades hídricas del ambiente en función de la frecuencia de ocurrencia de los caudales ordinarios estacionales y del régimen de inundaciones, ajustado a un sistema de objetivos ambientales o de manejo, en línea con la teoría ecohidrológica (figura 15).

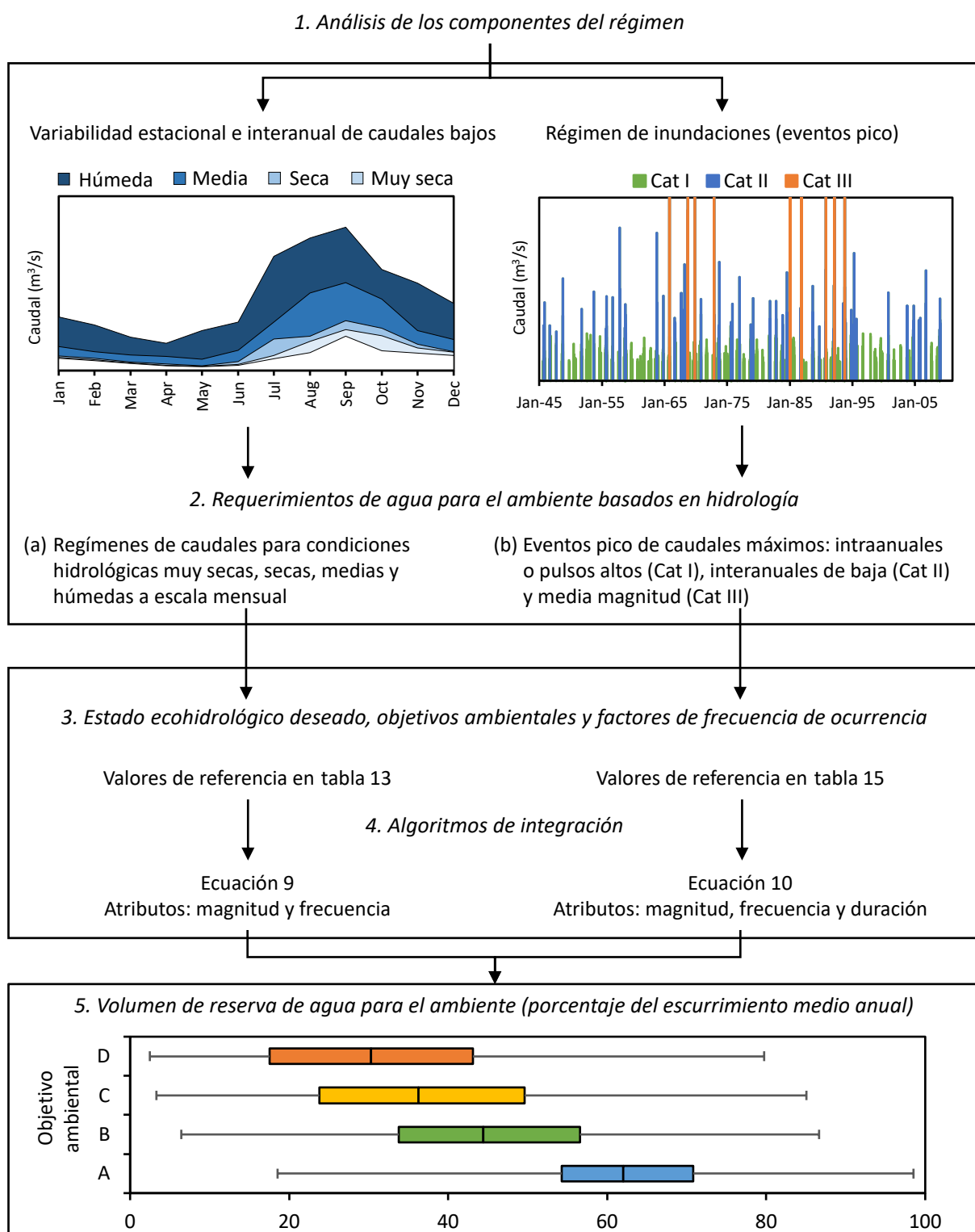


Figura 15. Procedimiento conceptual para integrar los regímenes de caudales ordinarios e inundaciones de caudales ecológicos. Fuente: Adaptado de Salinas-Rodríguez *et al.* (2020).

El estado ecológico deseado: objetivos ambientales o de manejo del régimen

Los objetivos ambientales o de manejo, a diferencia del estado ecohidrológico actual del régimen, representan el estado que se desea alcanzar. Se fundamentan en los principios sobre funciones ecológicas que el régimen juega en el ecosistema acuático y en el gradiente de la condición biológica (Bunn y Arthington, 2002; Davies y Jackson, 2006).

Dichos objetivos son clave para generar políticas estratégicas encaminadas a conservar, manejar, recuperar o restaurar los componentes del régimen, es decir, para limitar las alteraciones por el uso ambientalmente insostenible del agua o para reconstruirlos (Acreman *et al.*, 2014a, 2014b). Según la fuente, el sistema de manejo varía de cuatro a seis clases (A–D o A–F) que representan el rango de *muy buen estado deseado* a *deficiente* o *severamente modificado*. Hay inclusive planteamientos de objetivos que diferencian cuerpos de agua naturales de los altamente modificados (p. ej., Directiva Marco del Agua, European Commission, 2015) y hoy en día los países del mundo reportan avances en la implementación de caudales ecológicos como parte del [indicador 6.4.2. sobre el nivel de estrés hídrico en el contexto de los Objetivos de Desarrollo Sostenible](#) (FAO, 2019).

Para el caso mexicano, la Norma de Caudal Ecológico NMX-AA-159-SCFI-2012 establece un sistema de cuatro clases de objetivos ambientales (*A = Muy bueno*, *B = Bueno*, *C = Moderado* y *D = Deficiente*) que son determinados a partir del grado de explotación de los recursos hídricos (presión de uso) y la importancia ecológica (Salinas-Rodríguez *et al.*, 2018, 2020, 2021, 2022) (figura 16). El Apéndice A de la norma establece los objetivos ambientales para todas las cuencas del país. La actualización puede encontrarse en Salinas-Rodríguez y Pacheco Martínez (2024). O bien, se recomienda reevaluar los objetivos ambientales con base en los principios y procedimientos establecidos en la norma mexicana y a la última actualización de la disponibilidad media anual de agua superficial y subterránea.

Importancia Ecológica	Muy alta	A	A	B	C
	Alta	A	B	C	D
	Media	B	C	C	D
	Baja	B	C	D	D
		Baja	Media	Alta	Muy alta
		Presión de uso			

Figura 16. Matriz de objetivos ambientales. Fuente: Norma de Caudal Ecológico NMX-AA-159-SCFI-2012.

Régimen de caudales ordinarios

Este componente se integra según la frecuencia con la que ocurren diferentes condiciones hidrológicas. La lógica se fundamenta y parte de la parametrización de la frecuencia de ocurrencia, debido a que se trabaja con cuatro condiciones hidrológicas de variabilidad estacional e interanual –muy secas, secas, medias y húmedas– y a que

fueron parametrizadas con base en los percentiles 0, 10, 25 y 75. Dicha frecuencia representa el estado natural, lo que implica el 50% para el rango de condiciones medias (mediana $\pm 25\%$), 25% para húmedas, 15% secas y 10% muy secas. A la luz de hallazgos recientes en relación con la dependencia diferenciada que tienen los ríos a la variabilidad estacional e interanual, la integración del régimen de caudales ordinarios se realiza según valores de referencia por tipo de corriente (tabla 13; Salinas-Rodríguez *et al.*, 2022). Para diferenciar e identificar el tipo de corriente, por su utilidad y practicidad, se puede utilizar la aproximación por curva de duración de caudales a escala diaria en función de los criterios provistos en la ecuación 8 (Salinas-Rodríguez *et al.*, 2022).

$$\text{Tipo de corriente} = \begin{cases} \text{efímera,} & \text{si } Q > 0,5 \leq 30\% \\ \text{intermitente,} & \text{si } Q > 0,5 > 30\% < 90\% \\ \text{perenne,} & \text{si } Q > 0,5 \geq 90\% \end{cases} \quad (8)$$

Tabla 13. Factores de frecuencia de ocurrencia para la integración de caudales ordinarios por condición hidrológica, tipo de corriente y objetivo ambiental.

Objetivo ambiental	Condición hidrológica			
	Húmeda	Media	Seca	Muy seca
Efímera				
A	0.25	0.50	0.15	0.10
B	0.15	0.45	0.20	0.20
C	0.10	0.30	0.30	0.30
D	0.05	0.25	0.35	0.35
Intermitente				
A	0.20	0.45	0.25	0.20
B	0.10	0.40	0.30	0.20
C	0.05	0.30	0.40	0.25
D	0.05	0.20	0.40	0.35
Perenne				
A	0.10	0.40	0.30	0.20
B	0.00	0.20	0.40	0.40
C	0.00	0.00	0.40	0.60
D	0.00	0.00	0.00	1.00

Fuente: Adaptado de Salinas-Rodríguez *et al.* (2022).

Con base en el análisis de alteración hidrológica del régimen, el cálculo de los caudales ordinarios se realiza sobre las series de caudales diarios mensuales de acuerdo con los percentiles 0, 10, 25 y 75, sobre el periodo de referencia o completo, según se demuestre si hay o no alteración significativa. De esta forma, si la frecuencia de ocurrencia de forma natural se parametrizó en 25%, 50%, 15% y 10% para las condiciones húmedas, medias, secas y muy secas, conforme a los valores de referencia y para una clase de objetivo ambiental “A” de una corriente perenne, entonces la

integración a efectos de asignación de agua al ambiente se configura de acuerdo con un 10%, 40%, 30% y 20%, respectivamente, y para ello se utiliza la ecuación 9 (figura 17).

Esto implica que, bajo este estado deseado del régimen sobre un horizonte temporal de 10 años, por ejemplo, los caudales ordinarios para condiciones húmedas ocurran una vez cada 10 años, para condiciones medias, cuatro; en secas, tres; y muy secas, dos, lo que representa leves modificaciones a la frecuencia natural parametrizada.

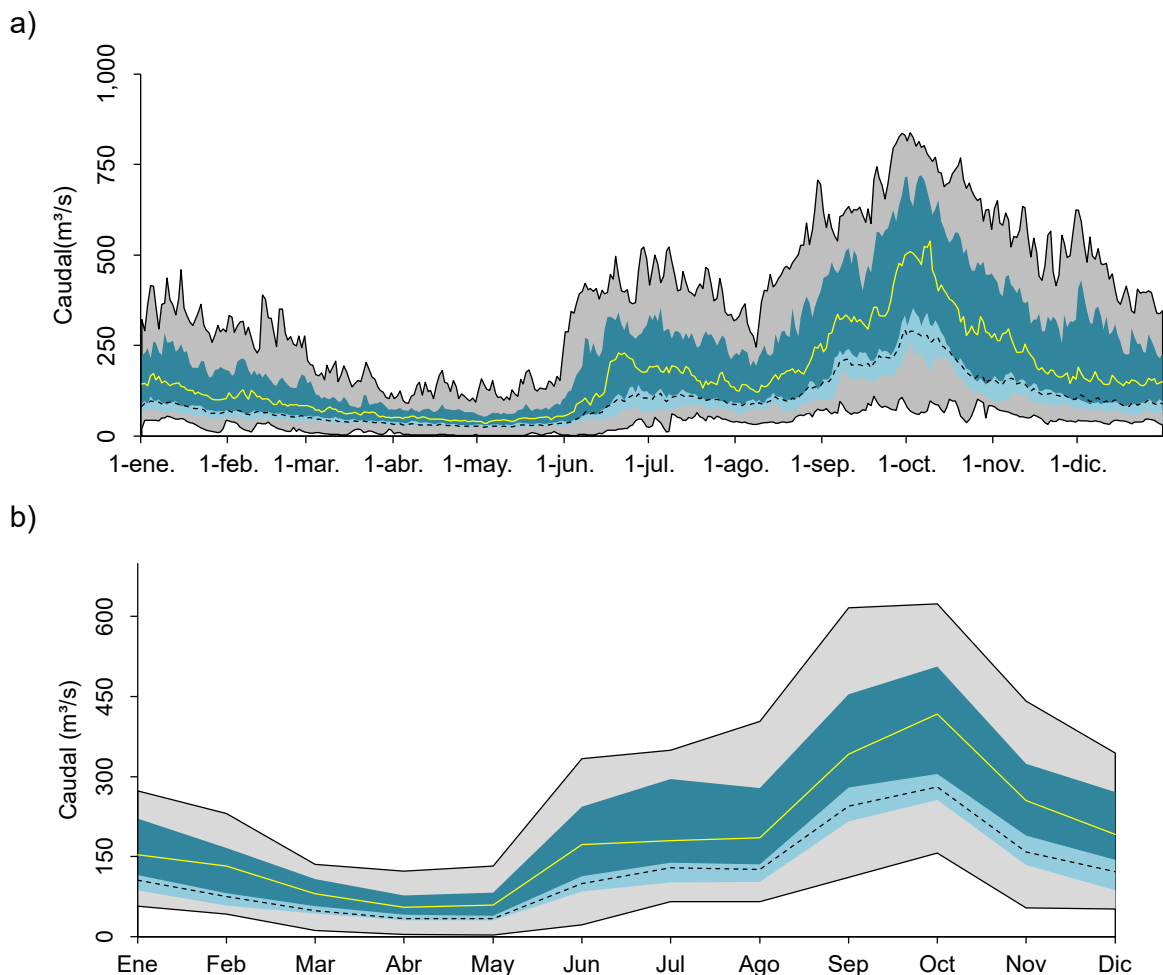


Figura 17. Caudales ordinarios estacionales para condiciones hidrológicas muy secas (gris inferior), secas (verde claro), medias (verde oscuro) y húmedas (gris superior) a escala diaria (a) y mensual (b) en el río De la Sierra (estación hidrométrica Pueblo Nuevo, clave 30016). El caudal ordinario integrado (línea negra punteada) conforme a las frecuencias de ocurrencia para un objetivo ambiental “A” se muestra para efectos comparativos con la mediana (línea amarilla). Fuente: Elaboración propia.

$$VT_{Coe} = (F_{CoeH} \times Q_{CoeH}) + (F_{CoeM} \times Q_{CoeM}) + (F_{CoeS} \times Q_{CoeS}) + (F_{CoeMS} \times Q_{CoeMS}) \quad (9)$$

donde,

VT_{Coe} = Volumen total de caudal ordinario estacional

F = Frecuencia de ocurrencia para la condición hidrológica i (tabla 13)

Q = Volumen de caudales a escala mensual o anual (m^3/s , Hm^3/mes , $Hm^3/año$)

i = Condición hidrológica de caudales ordinarios donde H = Húmedad, M = Media, S = Seca y MS = Muy seca

Nótese que los valores de referencia del modelo decrecen en la integridad de frecuencia de ocurrencia de acuerdo con el objetivo ambiental, de tal forma que para una clase “B” se pierde o deja de ocurrir la condición húmeda, decrece a 20% la media, y aumenta la seca y muy seca a 40% cada una. En la clase “C” desaparecen las condiciones húmedas y medias, las secas se mantienen en 40% y las muy secas aumentan a 60%, y en la clase “D” permanentemente (100%) se emula el régimen de condiciones muy secas. No obstante, el modelo de frecuencias de ocurrencia es congruente con el nivel de dependencia del tipo de corriente a la variabilidad estacional e interanual (efímera > intermitente > perenne; Salinas-Rodríguez *et al.*, 2020, 2022). Para llevar la propuesta a la implementación, se presentan los volúmenes de caudales ordinarios estacionales a escala mensual y anual (Hm³) (tabla 14).

Tabla 14. Volúmenes mensuales y anuales (Hm³) para la asignación de agua para protección ecológica por condición hidrológica de caudales ordinarios estacionales en el río De la Sierra (estación hidrométrica Pueblo Nuevo, clave 30016). Escurrimiento medio anual (EMA) de 6,447 Hm³ (1947–2014).

	Condición hidrológica anual				Reserva de agua por objetivo ambiental			
	Húmeda	Media	Seca	Muy seca	A	B	C	D
Ene.	592	310	231	152	283	215	184	152
Feb.	403	196	140	102	181	136	117	102
Mar.	288	152	117	31	131	90	65	31
Abr.	199	105	80	12	88	58	39	12
May.	220	104	82	9	90	57	38	9
Jun.	631	293	220	56	258	169	122	56
Jul.	790	372	272	175	344	253	214	175
Ago.	745	362	274	176	337	253	215	176
Sep.	1,178	726	560	288	634	485	397	288
Oct.	1,356	815	687	420	752	606	527	420
Nov.	839	490	347	139	412	292	222	139
Dic.	727	385	233	139	325	226	177	139
Total	7,966	4,312	3,244	1,700	3,834	2,840	2,318	1,700
% EMA	124	67	50	26	59	44	36	26

Fuente: Elaboración propia.

Régimen de inundaciones

Similar al caso de los caudales ordinarios, la implementación de los eventos de inundaciones se realiza de acuerdo con la magnitud de caudales asociados a 1, 1.5, 5, 10 y 20 años de periodo de retorno (frecuencia) (Cat I, II, III, IV y V). Para completar la información necesaria, a continuación, los criterios de manejo.

- La duración de los caudales extraordinarios es aquella en que la suma de dichos eventos ocurra 75–85% del tiempo (frecuencia). Para el caso de estudio en el

ejemplo mostrado, eso representa 8 días para las inundaciones intraanuales y las de baja magnitud ($Cat I = 525 m^3/s$, $Cat II = 765 m^3/s$) y 14 días para las de media y gran magnitud, así como las excepcionales ($Cat III = 935 m^3/s$, $Cat IV = 1.020 m^3/s$, $Cat V = 1,220 m^3/s$). Si se consideran todas las categorías, 6 días congregan el 74% de los eventos.

- De forma similar, el momento en el que dichos eventos deberán ocurrir será aquel donde se concentre el 80–90% de acuerdo con el análisis histórico (frecuencia). Eso es entre agosto y noviembre en el ejemplo, es decir, el pico de la temporada de lluvias.
- Para la adopción de la tasa de cambio se usa la aproximación del rango central de distribuciones sobre los valores relativos (frecuencia). Las tasas de descenso y ascenso se caracterizan con los percentiles 10 y 90 (–13% y 16%).

La integración de los volúmenes de reservas de agua para la protección ecológica se realiza en línea con el modelo de frecuencias de ocurrencia conforme a la ecuación 10, similar al de los caudales ordinarios estacionales, ajustado por tipo de corriente, la cantidad de eventos por año y la clase de objetivo ambiental (tabla 15). Para el caso de corrientes de flujo perenne con objetivo de manejo clase “A”, como el ejemplo, en 10 años se deberán considerar al menos 10 eventos anuales, 6 de baja, 2 de media y 1 de gran magnitud, y 1 excepcional cada 20 años (0.5). Es decir, los eventos de acuerdo con la parametrización de la frecuencia de ocurrencia natural (1, 1.5, 5, 10 y 20 años de periodo de retorno).

Tabla 15. Factores de frecuencia de ocurrencia para la integración del régimen de inundaciones por categoría de evento, tipo de corriente y objetivo ambiental en volumen anual.

Objetivo ambiental	Caudales extraordinarios				
	Cat I	Cat II	Cat III	Cat IV	Cat V
Efímera					
A	10	6	2	1	0.5
B	9	5	2	1	0.5
C	7	4	2	1	0.5
D	6	3	2	1	0.5
Intermitente					
A	10	6	2	1	0.5
B	8	4	2	1	0.5
C	6	3	2	1	0.5
D	4	2	2	1	0.5
Perenne					
A	10	6	2	1	0.5
B	5	3	2	1	0.5
C	3	2	1	1	0.5
D	2	1	1	1	0.5

Fuente: Adaptado de Salinas-Rodríguez *et al.* (2022).

Al igual que en los caudales ordinarios, los valores de referencia del modelo decrecen de integridad de frecuencia de ocurrencia en función del objetivo ambiental. Para el caso de una clase “B” se pierden 5 eventos anuales y 3 de baja y permanecen 2 de media y 1 de gran magnitud, y 0.5 excepcional en el mismo horizonte temporal (excepcional cada 20 años). En la clase “C” la frecuencia de eventos decrece a 3 anuales, 2 de baja y 1 de media y gran magnitud y 0.5 excepcional, y en la clase “D” a 2, 1 para baja, media y gran magnitud y 0.5 excepcional en 10 años, respectivamente. El modelo de integración de volúmenes en función de las frecuencias es igualmente congruente con el nivel de dependencia del tipo de corriente a la variabilidad estacional e interanual y a los pulsos de inundación que ocurren en la temporada de lluvias (efímera > intermitentes > perennes; Salinas-Rodríguez *et al.*, 2022). En la tabla 16 se presentan los volúmenes para la asignación de agua para protección ecológica.

$$VT_{Ri} = \frac{(F_{CatI} \times D_{CatI} \times Q_{CatI}) + (F_{CatII} \times D_{CatII} \times Q_{CatII}) + (F_{CatIII} \times D_{CatIII} \times Q_{CatIII}) + (F_{CatIV} \times D_{CatIV} \times Q_{CatIV}) + (F_{CatV} \times D_{CatV} \times Q_{CatV})}{10} \quad (10)$$

donde,

VT_{Ri} = Volumen total correspondiente al régimen de inundaciones

F = Frecuencia de ocurrencia para la inundación i (tabla 15)

D = Duración del evento de caudal extraordinario i

Q = Volumen de caudal del evento i por día ($Hm^3/día$)

i = Categoría (Cat) de evento de inundación donde $I = 1.0$, $II = 1.5$, $III = 5.0$, $IV = 10.0$ y $V = 20.0$ años de periodo de retorno

Tabla 16. Atributos del régimen de inundaciones y volúmenes para la asignación de agua para protección ecológica en el río De la Sierra (estación hidrométrica Pueblo Nuevo, clave 30016).

Atributo	Unidad	Cat I	Cat II	Cat III	Cat IV	Cat V
Magnitud	m^3/s	525	775	935	1,020	1,220
	$Hm^3/día$	45.4	66.1	80.8	88.1	105.4
Frecuencia	Periodo de retorno	1	1.5	5	10	20
Duración	#días			6		
Momento	Meses		Agosto – Noviembre			
Tasa de cambio	Ascenso (%)			16		
	Descenso %			-13		
Reserva de agua por objetivo ambiental ($Hm^3/año$; % EMA)	"A"		691.5; 10.7			
	"B"		436.5; 6.8			
	"C"		293.9; 4.6			
	"D"		227.1; 3.5			

Fuente: Elaboración propia.

Integración de la reserva de agua para protección ecológica

Finalmente, el volumen global de reserva de agua para la protección ecológica se obtiene sumando los volúmenes correspondientes a los caudales ordinarios estacionales y del régimen de avenidas. En el ejemplo son 4,526 Hm³/año equivalente al 70.2% del escurrimiento medio anual (EMA) para un objetivo ambiental “A”, 3,276.4 Hm³/año para la clase “B”, 2,611.4 Hm³/año clase “C” y 1,926.8 Hm³/año clase “D”.

En cuanto a la implementación administrativa de reserva de agua, el volumen se integra al balance de disponibilidad media anual de agua superficial con el propósito de excluirlo para usos productivos.

3.4.2. Hidráulica

La utilidad de la hidráulica consiste en dimensionar los caudales en términos físico-espaciales y temporales a través de parámetros como los tirantes de profundidad del agua en el río según niveles en metros (p. ej., de la lámina o espejo al fondo) en una sección determinada (corte transversal), su georreferenciación con relación al nivel medio del mar (altitud o elevación en metros) y las velocidades de corriente (p. ej., metros por segundo, m/s) que están asociadas al caudal de interés (p. ej., metros cúbicos por segundo, m³/s).

La hidráulica sirve de interfase para analizar y evaluar lo que implican los caudales en la geometría del cauce a lo largo del tiempo. Es fundamental puesto que mediante los parámetros de análisis se pueden realizar evaluaciones detalladas sobre lo que implican los atributos y componentes del régimen de caudales para el soporte de procesos ecológicos, como la conectividad longitudinal, lateral y vertical y la provisión de hábitat acuático o semiacuático según los requerimientos de las especies que allí habiten.

El monitoreo de caudales y niveles de inundación es fundamental para la gestión integrada de recursos hídricos per se, y junto con la hidrología, son piedras angulares para la evaluación del desempeño de los caudales ecológicos, y lo que estos implican como solución basada en la naturaleza ante eventos extremos como las sequías e inundaciones. En la figura 18 se muestra el procedimiento sobre la toma de información en campo y el trabajo en gabinete para generar modelos hidráulicos dinámicos de utilidad en análisis ecohidrológicos y ecohidráulicos.

El desarrollo de modelos hidráulicos requiere del muestreo estratégico y coordinado en campo con el equipo de trabajo para la recolección de datos y su procesamiento, y con diversos actores interinstitucionales y comunitarios. Consta de tres etapas: (1) el levantamiento de información topobatimétrica y velocidades de corriente en la sección transversal del cauce de estudio, (2) su procesamiento en gabinete para el desarrollo del modelo hidráulico y (3) la validación de resultados.

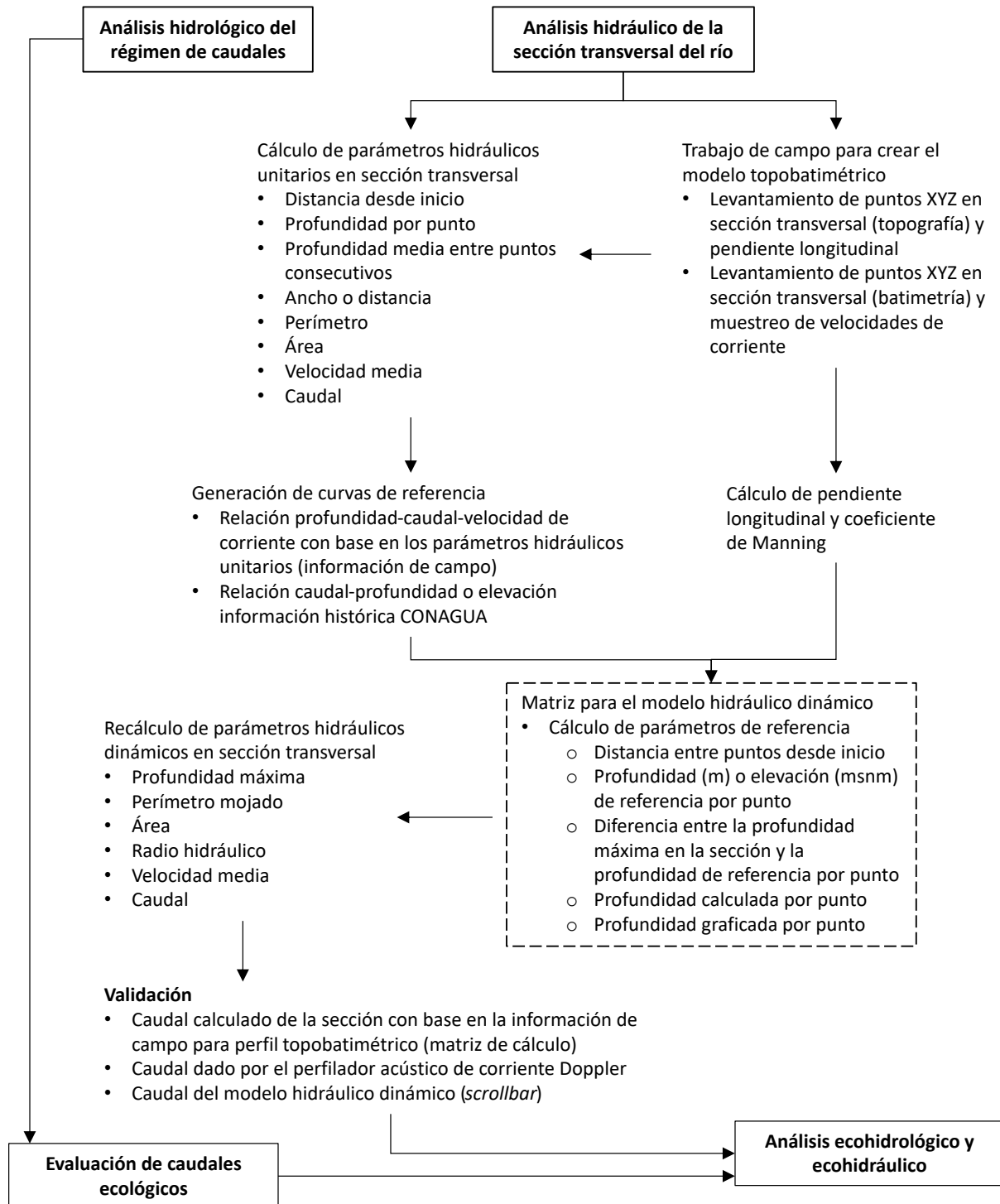


Figura 18. Proceso para generar la modelación hidráulica dinámica y su utilidad en el análisis de los caudales ecológicos. Fuente: Elaboración propia.

3.4.2.1. Muestreos en campo

Topografía

Tras la ubicación del sitio de estudio, ya sea que cuente con barras de escala graduadas en sistema métrico decimal por estaciones hidrométricas existentes o por la instalación de nuevas (figura 19), el primer paso consiste en tomar coordenadas geográficas de la sección transversal del río; el levantamiento topográfico se realiza en sus márgenes izquierda y derecha con GPS GNSS RTK en puntos estratégicos que denoten el relieve. En general, es deseable que cuanto más escarpada sea la ribera, mayor sea la densidad de puntos que se tomen. Asimismo, la toma de datos comienza desde el punto en la margen izquierda a mayor elevación del fondo del río, hasta la lámina o espejo de agua, y en sentido inverso, es decir, de la lámina de agua en la margen derecha a hacia el punto de mayor elevación. La información clave por punto es: (1) identificador único (clave o código), (2) fecha y hora, (3) latitud, longitud y altitud o elevación (msnm), (3) sistema de coordenadas geográficas o UTM, incluyendo datum, zona y geoide⁵, y (4) descripción o notas en general, p. ej., lectura de la barra de escala a la lámina o espejo de agua (tirante)⁶.

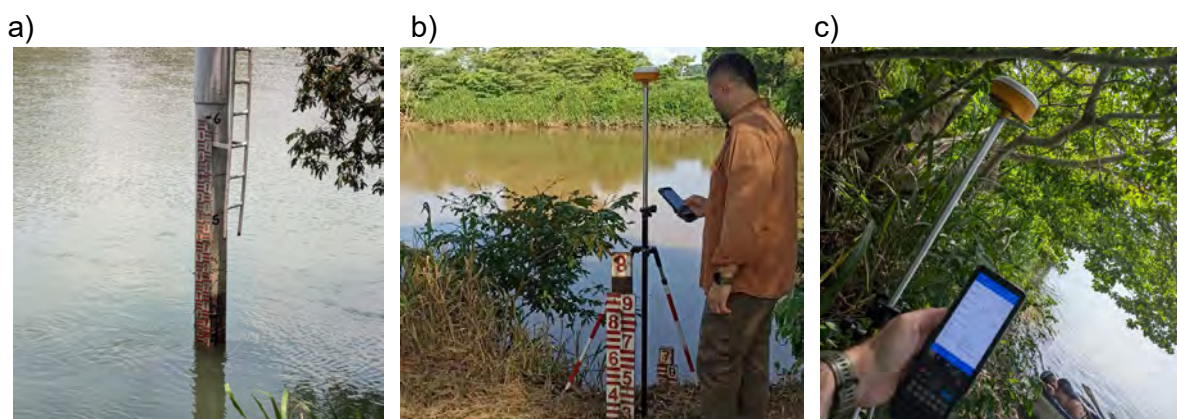


Figura 19. Sección transversal para el levantamiento de información topográfica y batimétrica ubicada en la posición de la barra de escala graduada en sistema métrico decimal. (a) Barra de escala continua. (b) Barra de escala escalonada por metros. (c) Base (cerebro) y controladora de GPS GNSS y RTK. Fotografías: Proyecto “Construyendo bases para el monitoreo remoto-digital de caudales ecológicos para la gestión del agua”.

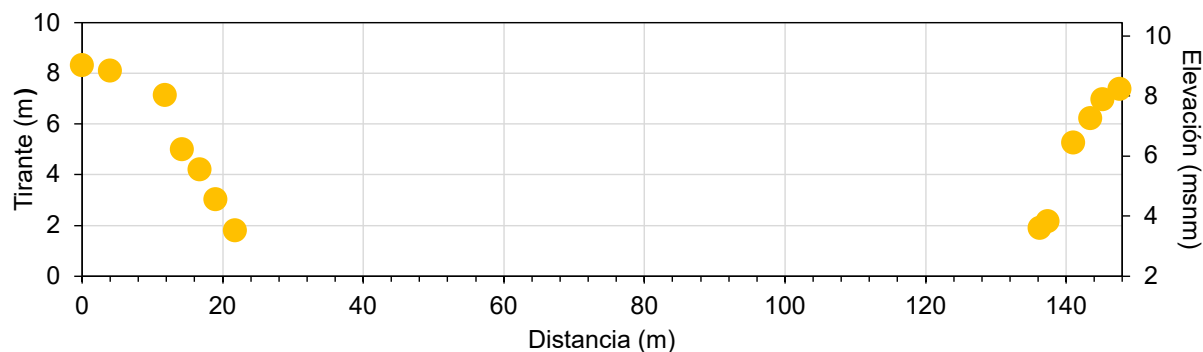
Los puntos deben vincularse a la Red Geodésica Nacional [Activa](#) o [Pasiva](#) de INEGI y ajustarse durante el posproceso o proceso en gabinete en etapa posterior al trabajo de campo. Cuando no se cuente con un GPS GNSS RTK, el levantamiento de puntos deberá realizarse con estación total o nivel topográfico y estatales, a partir de la ubicación de alguna placa de la Red Geodésica Nacional de INEGI, con el propósito de contar con la información por punto respecto a la profundidad máxima del cauce y la altitud o elevación media sobre el nivel del mar con precisión topográfica sobre el orden de centímetros (figura 20).

⁵Se recomienda utilizar la configuración del INEGI, p. ej., UTM_15N_ITRF08_GGM10.

⁶Información extraordinariamente importante en casos donde el levantamiento topográfico de los datos sea muy espaciado a lo largo del día o cuando este y el batimétrico se realice en días distintos.

En caso de que no haya alguna placa cercana de INEGI, podrían considerarse las instaladas por CONAGUA o autoridades estatales con coordenadas geográficas visibles y, en última instancia, donde incluso no haya alguna de estas, la toma de datos referenciará únicamente el nivel de profundidad respecto al fondo del río (tirante).

a)



b)

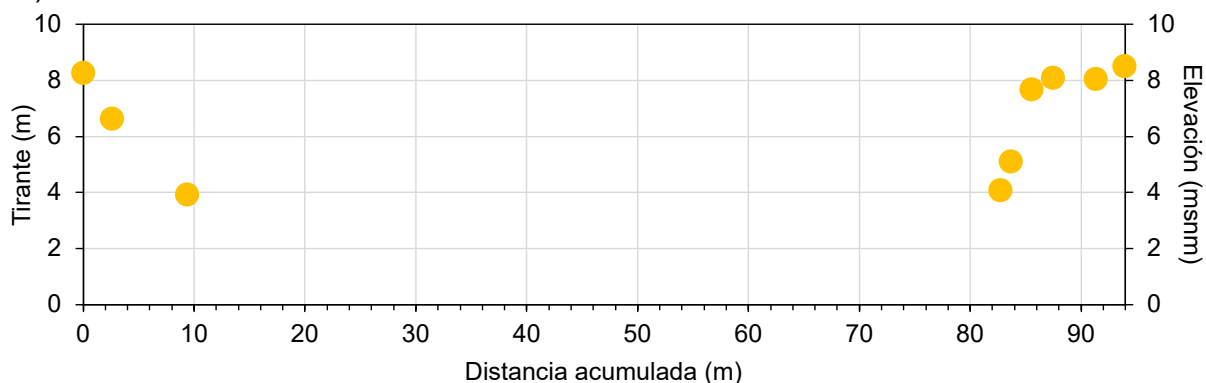


Figura 20. Levantamiento topográfico de puntos en las riberas, margen izquierda y derecha en el río (a) Carrizal y (b) De la Sierra, Tabasco. Fuente: Elaboración propia.

Por último, también deberán tomarse un par de puntos de forma longitudinal al cauce ubicados en la orilla, es decir, donde llegue la lámina de agua en la margen izquierda o derecha. Los puntos deberán estar espaciados al menos la misma distancia total de la sección topográfica transversal. Esta toma de puntos sirve para calcular la pendiente longitudinal cuyo procedimiento se detalla en la subsección de cálculo de parámetros hidráulicos de este libro.

Topobatimetría y velocidad de corriente

La sección transversal topográfica del cauce se complementa con el levantamiento batimétrico, es decir, con la muestra y medición de profundidades bajo la lámina de agua. En el caso de ríos vadeables, el procedimiento de la sección anterior puede repetirse con el uso del bastón y base o cerebro móvil para la lectura de profundidades subacuáticas, vinculado a la base o cerebro fijo en bípode o trípode y la controladora desde terreno seco en la ribera.

Cuando no se cuente con equipo GPS GNSS RTK, se deberá usar la estación total o nivel y estadales topográficos.

Además del levantamiento de profundidades, también se realizará un muestreo de velocidad de corriente o aforo en la sección transversal. La toma de muestra se realiza con un flujómetro o molinete a ~40% de tirante, es decir, al 60% desde la superficie, en caso de que la profundidad sea menor a 0.5 m y conforme al nivel de la lámina o espejo del agua por espacio de 30 segundos por punto (figura 21). Si la profundidad es mayor a 0.5 m se recomiendan mediciones a 20% y 80% de profundidad desde la superficie. Lo anterior debido a que la velocidad de corriente es variable a lo largo del tiempo y del espacio. Por lo tanto, la captura de datos, por al menos un lapso estándar de tiempo, se requiere para que el molinete registre la lectura del punto con base en el promedio de los datos. En el caso de ríos no vadeables, la muestra de profundidades se puede realizar con el apoyo de una embarcación (lancha o cayuco), ecosonda, su transductor y el molinete. Cuando las profundidades sean mayores a la posibilidad de uso del molinete, la alternativa de muestreo recae en un perfilador acústico de corriente Doppler (figura 22).

a)



b)

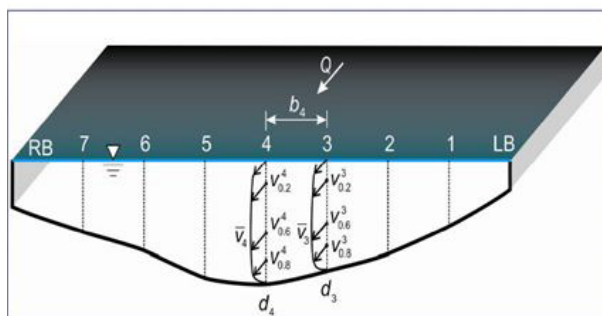


Figura 21. (a) Flujómetro o molinete. (b) Sección transversal y divisiones verticales de referencia para el aforo o toma de muestras de velocidad de corriente. Fuente: Imágenes de referencia tomadas de Global Water Flow Probe ([MaximEnvironmental](https://www.maximenvironmental.com/)) y Herrero (2017).

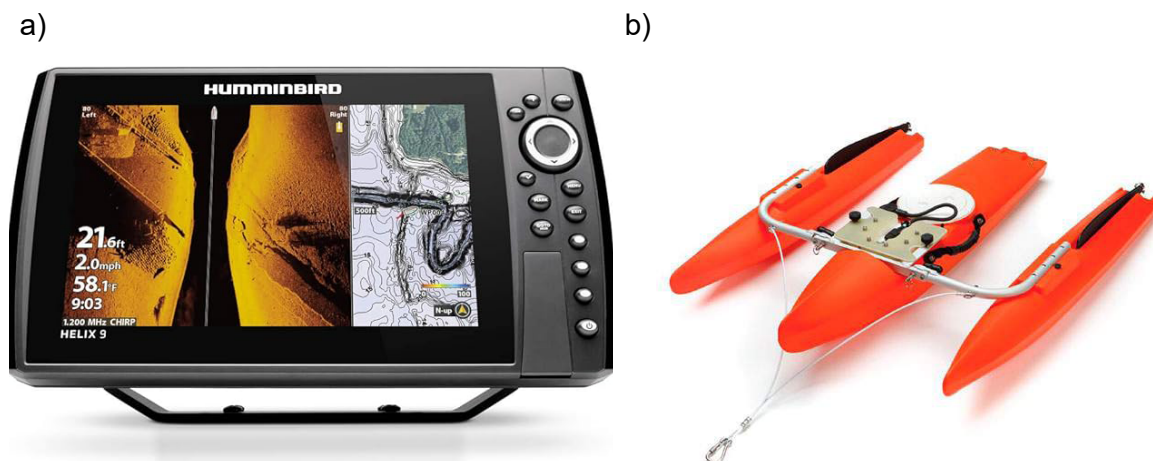


Figura 22. Instrumentos para el levantamiento de información batimétrica en ríos no navegables. (a) Ecosonda y (b) perfilador acústico de corriente Doppler. Fuente: Imágenes de referencia en [Humminbird Johnson Outdoors](#) y [TecnoOceano](#).

La ventaja de trabajar con un perfilador acústico de corriente Doppler es que, además de tomar muestra de las profundidades, también toma la velocidad de corriente. La operación consiste en realizar el muestreo de profundidades y velocidades en la misma sección transversal desde la embarcación, procurando que la línea de navegación sobre la sección imaginaria se mantenga durante el recorrido lo más recta posible (figura 23). Dado que es previsible la complicación en la toma de muestras por la corriente, se recomienda atar un lazo en la margen izquierda y derecha para que sirva como guía y sostén durante el recorrido. La toma de muestras del perfilador acústico de corriente Doppler implica realizar de 4 a 6 transectos de la margen derecha del río a la margen izquierda a una velocidad constante de 4 km/h o hasta que el equipo obtenga la muestra requerida de datos para calibrar y validar las lecturas.



Figura 23. Operación para el uso del perfilador acústico de corriente Doppler. (a) Descarga del equipo de la embarcación al río. (b) Acomodo e inicio del recorrido sobre la sección transversal. (c) Recepción de datos a través de antena y seguimiento a la toma de datos en tiempo real en *software* especializado desde una computadora en alguna de las márgenes del río. Fotografías: Proyecto “Construyendo bases para el monitoreo remoto-digital de caudales ecológicos para la gestión del agua”.

Por lo que respecta al uso del perfilador acústico de corriente Doppler, se debe comenzar por el armado de la embarcación. Este paso dependerá del modelo y marca del equipo, se recomienda poner atención a las conexiones ya que necesitan quedar herméticamente cerradas. Además, hay que revisar y asegurarse de que el GPS del perfilador acústico se encuentre encendido ya que la lectura de ambos dispositivos se transmite y conecta vía señal de radio, wifi o Bluetooth (según el modelo) a la computadora que recibe la información desde la ribera.

Para realizar la conexión entre el perfilador acústico y la computadora se inicia el *software* [WinRiver II de Teledyne RD Instruments](#) y se desarrollan las pruebas de conexión de acuerdo con el manual de usuario. Una vez que los equipos estén sincronizados, se establece desde el *software* de cuál margen se inicia la toma de datos (derecha o izquierda) y se configura la distancia o tiempo entre puntos para su recolección. Si se trabaja con un GPS externo, se deben actualizar fecha y hora. Estos pasos son muy relevantes porque la calidad de los datos depende de la posición geográfica y parametrización.

Una vez todo el equipo sincronizado y la parametrización establecida, se coloca el perfilador acústico en posición para iniciar el transecto y se indica desde el *software* el inicio de la captura de datos. Desde el *software* se sigue la toma de datos en tiempo real, por lo que si aparecen puntos sin lectura se debe disminuir la velocidad para la recolección de los datos. Al llegar al margen opuesto del inicio se detiene el transecto y se repite la medición con otro transecto en dirección opuesta a la inicial. Lo recomendable es realizar al menos 4 transectos y revisar la calidad de los datos recolectados. Si la dispersión es $\leq 5\%$ con relación a la media o mediana de la muestra (según la normalidad estadística de los datos), se puede detener y concluir el muestreo. Se guardan los datos en el *software*, se desconecta el equipo y se devuelve el perfilador acústico a su contenedor o maletín.

La información mínima de registro en campo para procesamiento en gabinete consiste en (1) identificador único (clave o código), (2) fecha y hora, (3) latitud, longitud y profundidad, (4) sistema de coordenadas geográficas o UTM con los mismos parámetros que el levantamiento topográfico (o por lo menos consciente de la necesidad de homologación), (5) velocidad de corriente, (6) distancia acumulada entre puntos y (7) descripción o notas en general, p. ej., lectura de la barra de escala a la lámina o espejo de agua (tirante). La toma de puntos puede programarse a juicio experto por distancia recorrida, tiempo o variación de profundidades entre punto y punto. Los datos deben vincularse a los puntos topográficos ya procesados y vinculados a la Red Geodésica Nacional del INEGI, y las profundidades ajustarse a la elevación en metros sobre el nivel medio del mar para modelar el continuo topobatimétrico (figura 24).

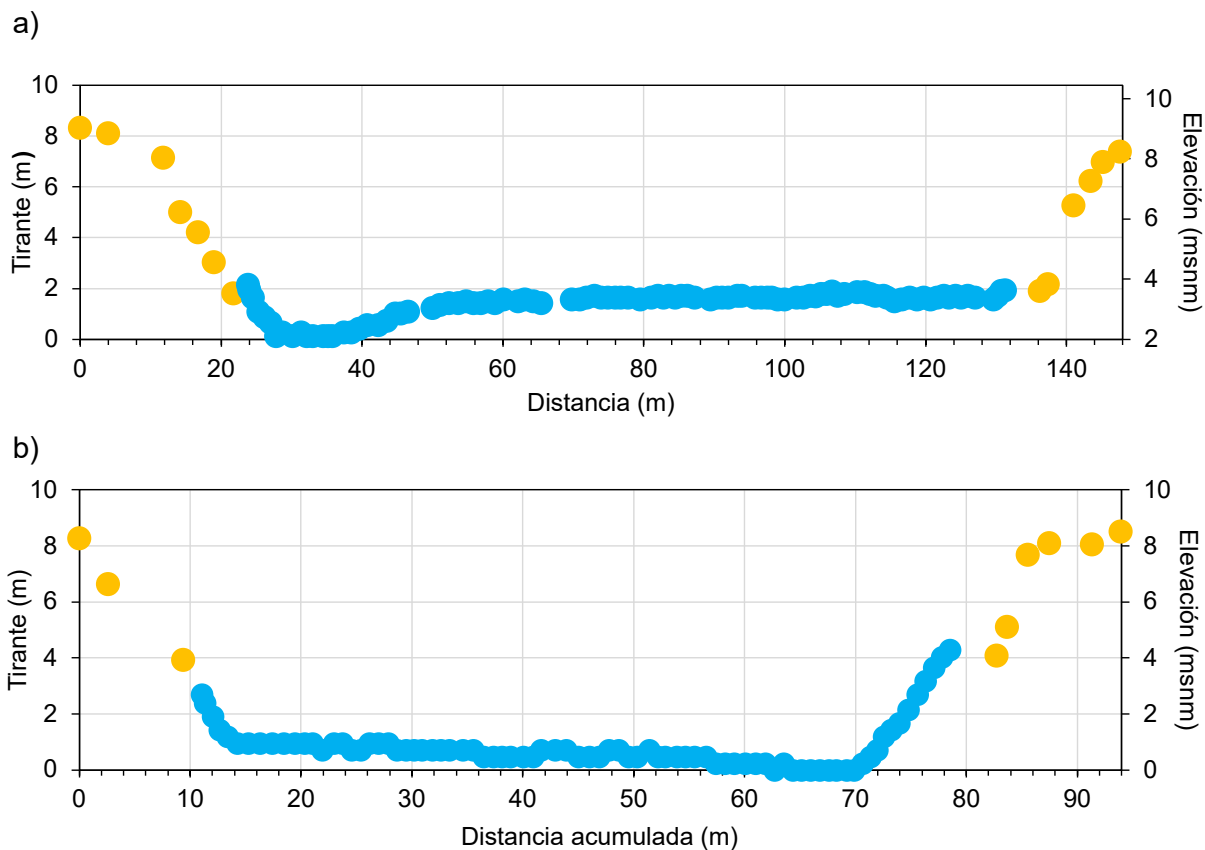


Figura 24. Modelos topobatimétricos en el río (a) Carrizal y (b) De la Sierra, Tabasco. Nube de puntos topográficos (naranja) y batimétricos (azules) para aquellos tomados bajo el agua. Fuente: Elaboración propia.

3.4.2.2. Cálculo de parámetros hidráulicos

El modelo hidráulico de la sección transversal se desarrolla a partir de un conjunto de parámetros sobre los puntos ordenados de la margen izquierda a la derecha en el perfil completo y la sección mojada al momento de la toma de datos (tabla 17).

Tabla 17. Parámetros hidráulicos por punto de muestreo (unitarios) por calcular en la sección transversal, d_{max} = profundidad máxima de la sección, d_{aj} = profundidad del punto de muestra ajustada a la elevación (metros sobre el nivel medio del mar), w = ancho, i = punto de muestra, m = metros, s = segundos.

Parámetro	Perfil completo	Sección mojada	Ecuación	
Distancia acumulada desde el inicio	X	X	$D = m$	(11)
Profundidad del punto de muestra	X	X	$d = d_{max} - d_{aj} = m$	(12)
Profundidad media entre puntos continuos	X	X	$d_{\mu} = \frac{d_0 + d_1}{2} = m$	(13)
Ancho o distancia entre puntos continuos	X	X	$w = i_1 - i_0 = m$	(14)
Perímetro	X	X	$P = \left(w^2 + (d_{i+1} - d_1)^2 \right)^{\frac{1}{2}}$	(15)
Área	X	X	$A = d_{\mu} \times w$	(16)
Velocidad media		X	$V = m/s$	(17)
Descarga, gasto o caudal		X	$Q = A \times V = m^3/s$	(18)

Fuente: Elaboración propia.

En adición a lo anterior, se debe calcular la profundidad media y máxima, así como las sumatorias del perímetro y el área de la sección, del perfil completo y la sección mojada. En cuanto a esta última, también se calcula la velocidad media de la corriente de la sección (V_{μ}) y la descarga, gasto o caudal total asociado (caudal unitario de la sección), y se grafica la relación unitaria profundidad-descarga y profundidad-velocidad de corriente (figura 25).

La variabilidad de profundidades asociadas a velocidades, y por consecuencia los caudales unitarios calculados, dependen de la cantidad de datos muestreados en campo y su repetición a lo largo del tiempo (p. ej., niveles en temporadas de estiaje y lluvias). Para mejorar el desempeño de las regresiones logarítmicas se recomienda repetir la toma de muestras hasta que se alcance el nivel deseado (p. ej., $R^2 \geq 0.80$). En el Apéndice A3 se muestran las matrices de cálculo para los ejemplos mostrados en este documento (ríos Carrizal y De la Sierra).

Alternativamente, en caso de que la sección de modelación hidráulica se encuentre en una estación hidrométrica operada por CONAGUA, se recomienda utilizar la información histórica de niveles y caudales para obtener la curva caudal-elevación o profundidad en una muestra que sea representativa de la variabilidad estacional e interanual (figura 26). El ajuste de las funciones logarítmica, potencial o exponencial, dependerá del comportamiento de cada río, así como de su contexto (p. ej., alteraciones hidrogeomorfológicas), por lo que queda a juicio experto.

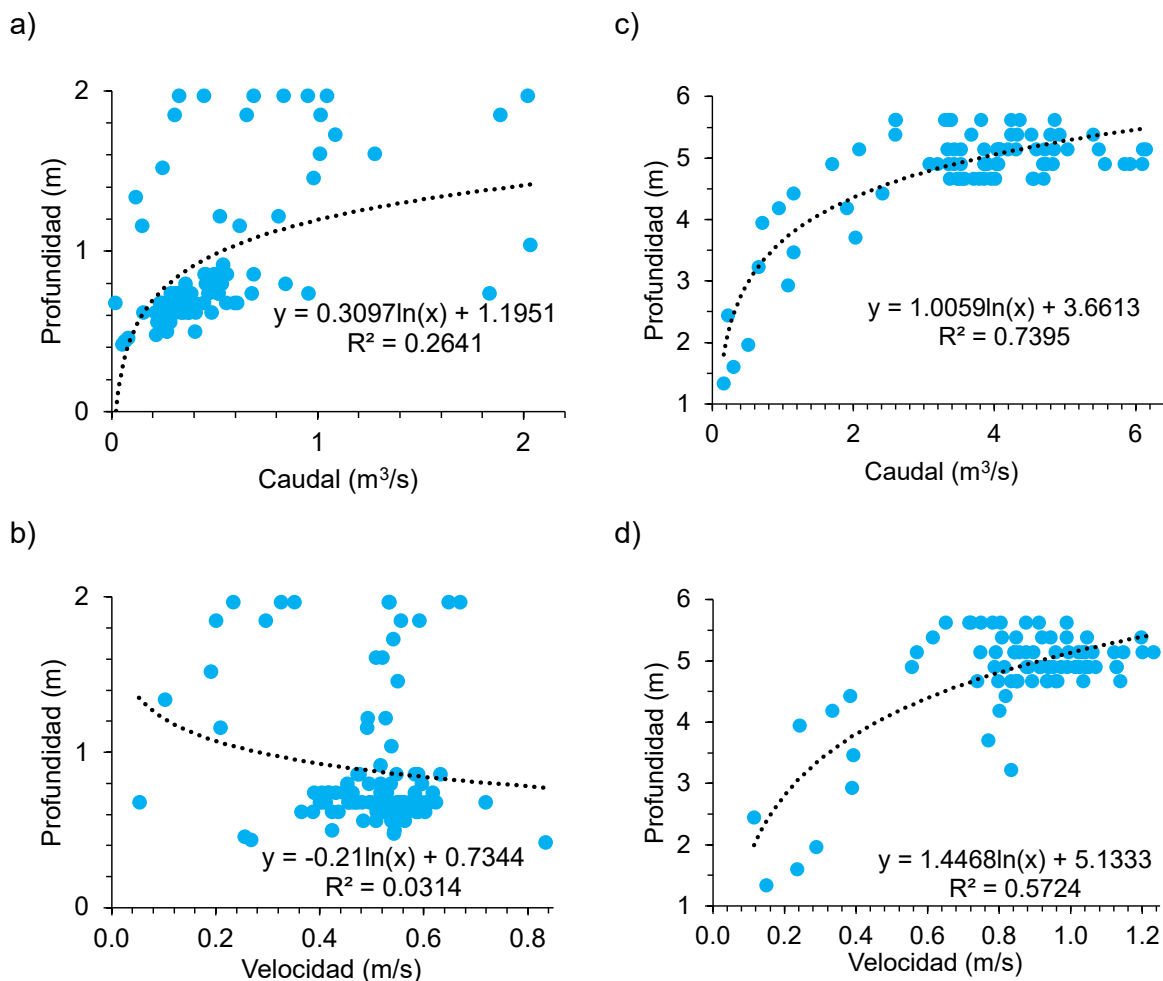


Figura 25. Curvas profundidad-caudal y profundidad-velocidad de corriente (regresión logarítmica) del conjunto de puntos muestreados en campo de los ríos Carrizal (a y b) y De la Sierra (c y d). Fuente: Elaboración propia.

Enseguida, se calcula la pendiente longitudinal de la lámina de agua (S) y el coeficiente de rugosidad o Manning (n). Para el cálculo de la pendiente longitudinal del río se utiliza la diferencia entre las elevaciones o alturas sobre el nivel medio del mar dividido por la distancia entre los puntos del transecto tomados con el GPS GNSS RTK, estación total o nivel topográfico (ecuación 19). El coeficiente de rugosidad o de Manning, por su parte, es un indicador de resistencia al flujo de agua en el cauce ya que establece su relación con la velocidad de corriente y la pendiente longitudinal del río. Se calcula con base en la ecuación 20 (Chow, 1994):

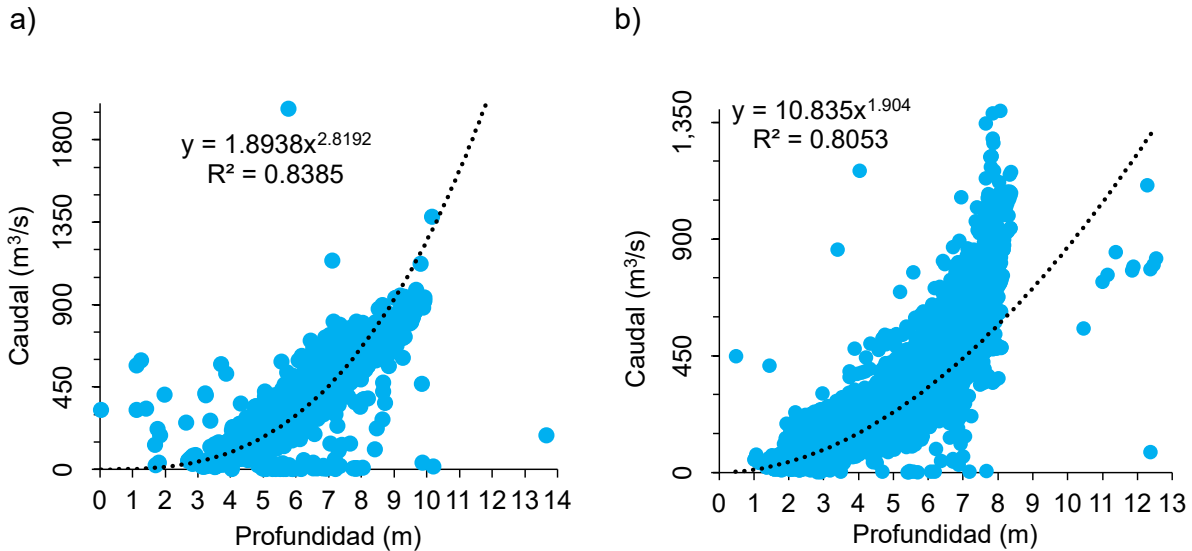


Figura 26. Curvas caudal-profundidad (regresión potencial) del conjunto de puntos muestreados en campo por la CONAGUA en las estaciones hidrométricas (a) González (clave 30062) sobre el río Carrizal y (b) Pueblo Nuevo (clave 30016) en el río De la Sierra. Fuente: Elaboración propia.

$$S = \frac{h_1 - h_2}{D} \quad (19)$$

donde,

h = Elevación o altura entre puntos longitudinales al río

D = Distancia entre puntos longitudinales al río

$$n = \frac{R^{\frac{2}{3}} \times S^{\frac{1}{2}}}{V} \quad (20)$$

donde,

n = Coeficiente de rugosidad o Manning

R = Radio hidráulico (área de la sección/perímetro mojado)

S = Pendiente longitudinal del agua

V = Velocidad media de la corriente (m/s)

En casos donde no se cuente con información suficiente muestreada en campo, se puede calcular el coeficiente de rugosidad o Manning a partir de lo reportado por la literatura especializada, preferiblemente en el sitio de estudio; o bien, se puede recurrir a bibliografía general, por ejemplo, los provistos por el [United States Geological Survey](#) o Chow (1994) para canales abiertos (tabla 18).

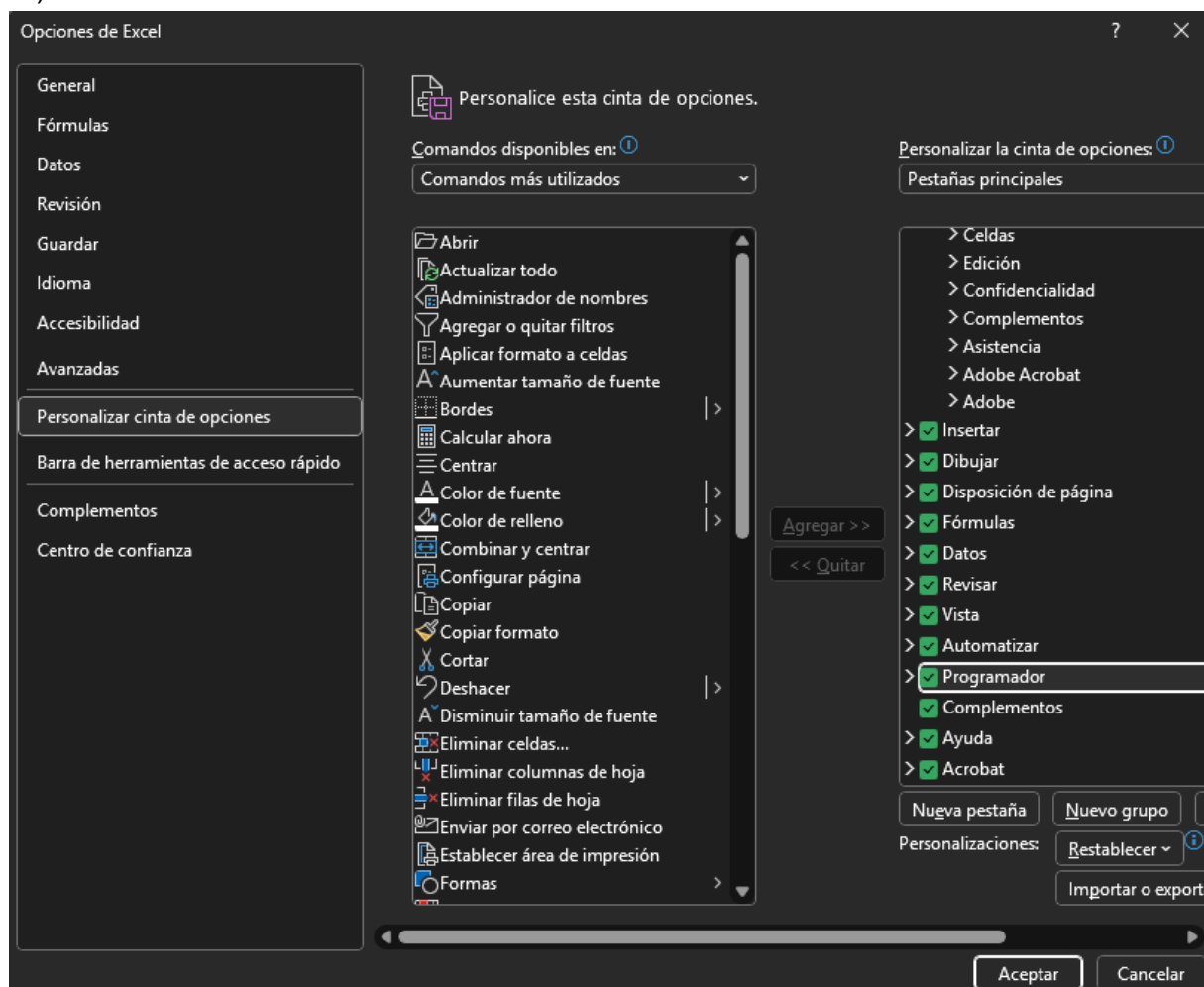
Tabla 18. Coeficientes de rugosidad de Manning (n).

Material	n
Concreto	0.012
Fondo de grava con lados de:	
Concreto	0.020
- Piedra	0.023
- Riprap	0.033
Canales naturales	
- Limpios y rectos	0.030
- Limpios y curvos	0.040
- Curvos con hierbas y piscinas	0.050
- Con matorrales y árboles	0.100
Planicies de inundación	
- Pastos	0.035
- Cultivos	0.040
- Hierbas y pequeños matorrales	0.050
- Matorrales densos	0.070
Árboles densos	0.100

Fuente: Adaptado de Chow (1994).

Hecho lo anterior, se desarrolla el modelo hidráulico de la sección con base en los parámetros unitarios calculados sobre el perfil topobatimétrico de acuerdo con las ecuaciones 11–18 (tabla 17) y 19–20. Para construir el modelo dinámico o interactivo en MO Excel, se instala una barra de desplazamiento (*scrollbar*), por lo que se añade a través de la herramienta de programador (menú Archivo/Opciones/Personalizar cinta de opciones/Programador: figura 27).

a)



b)

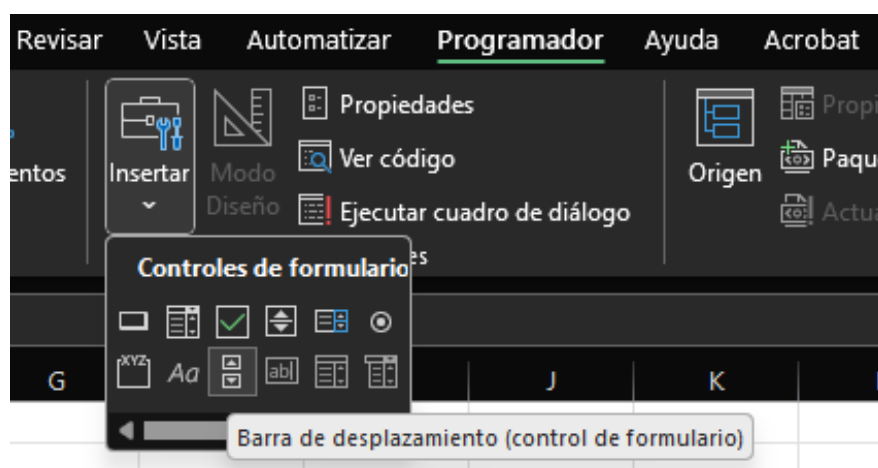


Figura 27. Cuadros de diálogo en MO Excel para (a) activar la herramienta de Programador e (b) insertar una barra de desplazamiento. Fuente: Elaboración propia.

Acto seguido, se establecen los parámetros de la sección, es decir, la profundidad mínima registrada o altura máxima del fondo del río al banco o bordo en las riberas (0 m), profundidad máxima registrada del fondo o altura mínima al banco de las riberas (Río Carrizal = 8.32 m, Río De La Sierra = 8.50 m). Posteriormente, se inserta la barra de desplazamiento (menú Programador/Insertar/Barra de desplazamiento) en la parte deseada de la hoja de cálculo o libro de MO Excel donde se esté trabajando; se establece su parametrización (clic derecho sobre la barra, Formato de control: figura 28); se vincula con una celda con valor de 100⁷ y se crea un gráfico dinámico de la matriz topobatimétrica con base en los siguientes parámetros por punto:

- Distancia entre puntos desde el inicio de la sección.
- Profundidad o elevación de referencia con relación al nivel medio del mar del punto.
- Diferencia del punto con relación al fondo máximo del río (profundidad máxima del punto).
- Profundidad calculada (ecuación 21).
- Profundidad graficada (ecuación 22).

$$\text{Profundidad calculada} = d_i - d_{\max} + \left(\frac{\text{Scrollbar_Value}}{100} \times (d_{\max} + d_{\min}) \right) \quad (21)$$

donde,

d_i = Profundidad o elevación con relación al nivel medio del mar del punto

$d_{\max}$ = Profundidad máxima registrada en la sección

$d_{\min}$ = Profundidad mínima registrada en la sección

Scrollbar_Value = Celda con valor 100

$$\text{Profundidad graficada} = \begin{cases} \text{si } x_i > 0, x_i \\ \text{si } x_i \leq 0, 0 \end{cases} \quad (22)$$

donde,

x_i = Profundidad calculada para el punto i

Sobre el gráfico dinámico, se recomienda un gráfico de áreas apiladas con dos series, una para desplegar el perfil con la forma del fondo ($S_1 = \text{Tierra}$) vinculada a la columna con la profundidad calculada de cada punto en la matriz topobatimétrica, y otra para la lámina de agua ($S_2 = \text{Agua}$); ambas con la distancia entre puntos como eje horizontal ($x = \text{Distancia}$). Si se desea desplegar tanto la profundidad como la elevación en metros sobre el nivel medio del mar, entonces el procedimiento se realiza con base en 4 series ($y_1 = s_1$ y $s_2 = m$; $y_2 = s_3$ y $s_4 = msnm$).

⁷Celda de cálculo automático en función del desplazamiento de la barra en 100 partes.

a)

Formato de control

Tamaño Proteger Propiedades Texto alternativo Control

Valor actual: 100

Valor mínimo: 0

Valor máximo: 100

Incremento: 1

Cambio de página: 10

Vincular con la celda: 'Matriz topobat'!\$B\$7

☒ Sombreado 3D

b)

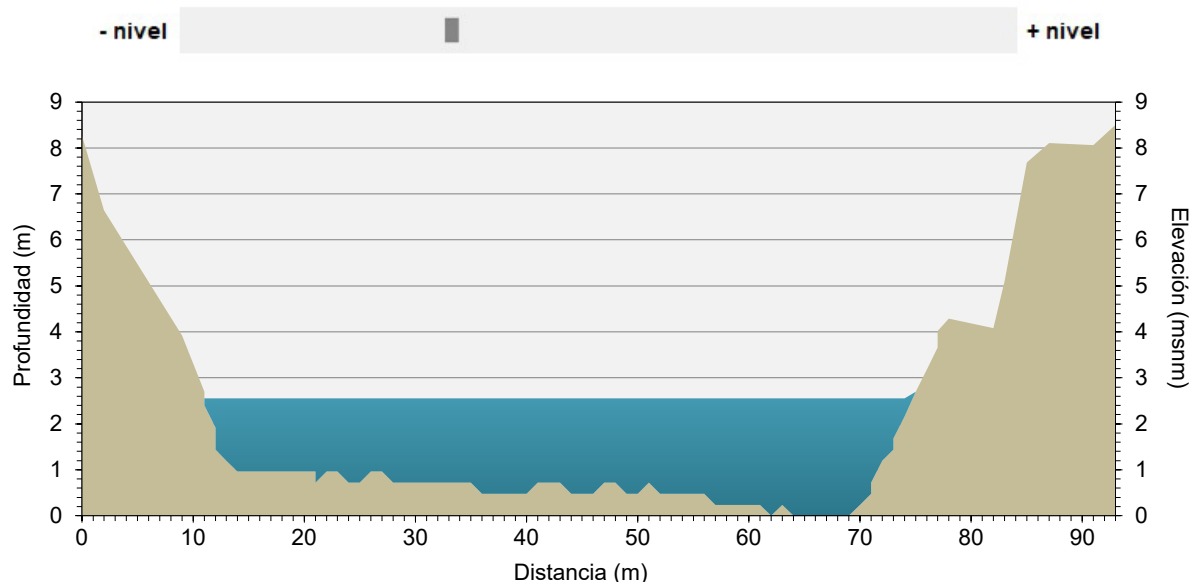


Figura 28. Configuración y graficado del modelo llenado/vaciado de la sección topobatimétrica. (a) Cuadro de diálogo de Formato de control para la parametrización de la barra de desplazamiento. Y (b) gráfico dinámico con barra de desplazamiento horizontal en Microsoft Office Excel. Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, se calculan los parámetros hidráulicos despejando las ecuaciones de referencia (tabla 19) sobre la matriz topobatimétrica de donde surge el gráfico dinámico. Con esto creamos un modelo dinámico que podemos relacionar con los caudales ordinarios estacionales y el régimen de avenidas evaluados en la sección de hidrología (tabla 20).

Tabla 19. Ecuaciones para crear el modelo hidráulico dinámico de la sección de estudio.

Parámetro	Ecuación
Profundidad máxima (m):	
	$d_{\max i} \quad (23)$
donde i va desde el punto de inicio al de término j en la sección mojada	
Perímetro mojado (m):	
	$P = \sum_{i=0}^j P_i = P_1 + P_2 + \dots + P_j \quad (24)$
donde i va desde el punto de inicio al de término j en la sección mojada	
Área (m ²):	
	$A = \sum_{i=0}^j P_i \times d_i = P_1 \times d_1 + P_2 \times d_2 + \dots + P_j \times d_j \quad (25)$
donde i va desde el punto de inicio al de término j en la sección mojada	
Radio hidráulico (m):	
	$R = \frac{A}{P} \quad (26)$
Velocidad media (m/s):	
	$V_{\mu} = \frac{R^{\frac{2}{3}} \times S^{\frac{1}{2}}}{n} \quad (27)$
donde n es el coeficiente de Manning calculado (constante)	
Descarga, gasto o caudal (m ³ /s):	
	$Q = A \times V_{\mu} \quad (28)$

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 20. Parámetros hidráulicos asociados a los caudales ordinarios estacionales y eventos extraordinarios (régimen de avenidas) en las secciones de las estaciones hidrométricas González (clave 30062), en el río Carrizal, y Pueblo Nuevo (clave 30016), en el río De la Sierra. Caudales aproximados dada la precisión del modelo. El río De la Sierra desborda a $Q = 580 \text{ m}^3/\text{s}$, 1 m/s , $R = 6.03$, $A = 582.29 \text{ m}^2$, $P = 96.63 \text{ m}$ y $d_{\max} = 8.50 \text{ m}$.

Parámetro	Q	V_{μ}	R	A	P	$d_{\max}$
Río Carrizal						
Caudal medio interanual (1957–1971)	253	0.91	2.29	279.00	121.82	3.50
Caudal medio anual por condición hidrológica						
Muy seca (percentil 0)	103	0.64	1.35	160.80	119.33	2.50
Seca (percentil 10)	160	0.76	1.76	210.05	119.33	2.91
Media (percentil 25)	197	0.82	1.97	239.60	121.82	3.16
Húmeda (percentil 75)	284	0.95	2.45	298.76	121.82	3.66
Régimen de avenidas						
Categoría I (1 año periodo de retorno)	479	1.16	3.31	412.25	124.46	4.58

Tabla 20. Continuación.

Parámetro	Q	V_{μ}	R	A	P	d_{max}
Categoría II (1.5 años periodo de retorno)	764	1.37	4.22	559.83	132.54	5.74
Categoría III (5 años periodo de retorno)	959	1.48	4.78	646.61	135.18	6.41
Categoría IV (10 años periodo de retorno)	1,042	1.53	5.03	679.56	135.18	6.66
Categoría V (20 años de periodo de retorno)	1,099	1.57	5.19	701.75	135.18	6.82
Río De la Sierra						
Caudal medio interanual (1947–2014)	188	0.67	3.35	278.75	83.17	4.85
Caudal medio anual por condición hidrológica						
Muy seca (percentil 0)	55	0.45	1.86	121.26	65.22	2.55
Seca (percentil 10)	105	0.57	2.64	182.38	69.16	3.49
Media (percentil 25)	136	0.59	2.78	228.69	82.40	4.17
Húmeda (percentil 75)	256	0.75	3.91	330.92	84.53	5.53
Régimen de avenidas						
Categoría I (1 año periodo de retorno)	525	0.98	5.90	535.45	90.81	7.99
Categoría II (1.5 años periodo de retorno)	765	-	-	-	-	-
Categoría III (5 años periodo de retorno)	935	-	-	-	-	-
Categoría IV (10 años periodo de retorno)	1,020	-	-	-	-	-
Categoría V (20 años periodo de retorno)	1,220	-	-	-	-	-

Fuente: Elaboración propia.

3.4.2.3. Validación del modelo hidráulico

El primer aspecto para validar el modelo hidráulico consiste en la comparación de resultados del caudal unitario de la sección calculado a partir de los datos de campo (perfil topobatimétrico) del que surge la tabla 16 y el dado por el perfilador acústico de corriente Doppler el día de la toma de muestras. El segundo aspecto por comparar es el resultado de caudal generado por el modelo hidráulico dinámico con la barra de desplazamiento del que surge la tabla 18 al nivel de profundidad máxima y el dado por el perfilador acústico de corriente Doppler el día de la toma de muestras. Ante diferencias en torno al 5%, el desempeño del modelo será considerado como muy bueno, ~10% bueno y ≤15% aceptable (tabla 21).

Tabla 21. Validación del modelo hidráulico en las estaciones hidrométricas González (clave 30062), sobre el río Carrizal, y Pueblo Nuevo (clave 30016), en el río De la Sierra.

Parámetro	Profundidad máxima (m)	Caudal (m ³ /s)	Diferencia (Δ%)
Río Carrizal			
Perfil topobatimétrico (matriz de cálculo)	1.97	48	8
Modelo hidráulico dinámico (<i>scrollbar</i>)	2.00	49	11
Perfilador acústico de corriente Doppler	1.97	44	-

Tabla 21. Continuación.

Parámetro	Profundidad máxima (m)	Caudal (m ³ /s)	Diferencia (Δ%)
Río De la Sierra			
Perfil topobatimétrico (matriz de cálculo)	5.63	287	9
Modelo hidráulico dinámico (<i>scrollbar</i>)	5.61	256	3
Perfilador acústico de corriente Doppler	5.63	264	-

Fuente: Elaboración propia.

Un aspecto adicional para tomar en cuenta en la validación del modelo es el conocimiento local o los caudales modelados por la CONAGUA el día de la toma de datos en campo, con el propósito de compararlos al mismo nivel de profundidad máxima el día de la toma de muestras. De requerirse, el modelo hidráulico dinámico puede calibrarse a partir del ajuste del coeficiente de rugosidad o Manning, siempre y cuando se cuente con información bibliográfica que así lo sustente.

3.4.3. Sensores remotos

Regularmente los niveles a la lámina de agua son monitoreados mediante la observación de un operador utilizando un estadal referenciado. A pesar de que este método ha sido ampliamente usado y ha aportado información valiosa, tiene sus desventajas: si las condiciones climáticas no son favorables el operador estaría impedido de realizar las mediciones; las observaciones pueden estar sesgadas debido a su experiencia; los costos logísticos de hacer visitas frecuentes se elevan, y las mediciones pudieran realizarse en periodos no representativos del día. Además, las observaciones no se llevan a cabo en alta frecuencia temporal (p. ej., 15–30 minutos) por periodos prolongados. Para disminuir estas desventajas, los avances tecnológicos ofrecen sensores para obtener información en alta frecuencia temporal.

Los sensores remotos son útiles para las mediciones de ciertas variables biofísicas. Existen los que son discretos y automáticos. Los primeros realizan mediciones discretas de las variables biofísicas con ayuda de un operador, mientras que los automáticos están diseñados para levantar mediciones continuas en intervalos de tiempo determinados (cada 5, 10, 15, 30, 60 minutos). Ambos tipos generan información valiosa, pero tienen ventajas y desventajas. En el caso de los discretos, regularmente son utilizados para realizar mediciones discretas en el tiempo (p. ej., una vez al mes), pero con una amplia distribución espacial. Los automáticos, por su parte, se usan para monitorear las variaciones temporales (p. ej., diurno, mensual, estacional, anual, decadal), aunque suelen estar limitados en su resolución espacial al menos que se coloquen distintos dispositivos en ubicaciones estratégicas.

Entre las mayores ventajas de los sensores automáticos es que requieren una mínima inversión de tiempo de un operador y son capaces de monitorear las variables

biofísicas de manera continua sin importar la eventualidad ambiental (p. ej., en días lluviosos), siempre y cuando estén en las condiciones ambientales límites que marque el fabricante.

Para el monitoreo de los niveles a la lámina de agua se utilizan sensores barométricos que registran los cambios de presión atmosférica. Estas observaciones son de gran importancia porque dichas lecturas se utilizan para emplear modelos hidráulicos con el propósito de derivar caudales a partir de niveles. Dependiendo de la profundidad del río, se selecciona el sensor, ya que los límites superiores de medición pueden sobrepasarse llevando a subestimaciones. Otro factor por considerar es que los sensores deben ser resistentes al agua, ya que estarán en contacto permanente con ella en el río. Por último, el sensor barométrico automático debe instalarse en un sitio fijo para que las mediciones sean congruentes en espacio y tiempo.

En principio, los sensores barométricos no obtienen mediciones de los niveles a la lámina de agua, pero sí de cambios de presiones. Por ejemplo, la presión de la columna de agua aumenta ante un mayor nivel de agua sobre el sensor y disminuye cuando hay niveles bajos. Para estimar el nivel a la lámina de agua se utiliza la ecuación 29:

$$H = \frac{P - P_R}{\rho \times g} \quad (29)$$

donde,

H = nivel de la lámina de agua (m)

P = presión barométrica (kPa) medida por el sensor dentro del río

P_R = presión atmosférica de referencia (kPa)

ρ = densidad del agua del río (1,000 kg m³ para agua dulce)

g = aceleración ejercida por la gravedad

Una alternativa a los sensores automáticos barométricos es un híbrido entre el monitoreo por operadores y el uso de escalas referenciadas. En años recientes, el uso de cámaras automáticas ha permitido el monitoreo de diferentes variables biofísicas. Una cámara automática tiene la capacidad de tomar fotografías en intervalos definidos (15, 30, 60 minutos) por periodos prolongados. El uso de cámaras automáticas es un recurso que, además de recolectar información de manera constante y frecuente, sirve para crear un acervo fotográfico sobre las condiciones de los ríos y podría evidenciar cómo cambian los niveles en el tiempo. Para el monitoreo de los niveles a la lámina de agua, las cámaras automáticas deben instalarse en un sitio fijo y permanente a fin de que las mediciones sean congruentes en espacio y tiempo. Las ventajas de este tipo de monitoreo son que, a diferencia de los operadores, las cámaras se encuentran *in situ* pese a las condiciones ambientales; el acervo fotográfico es factible de revisarse y ser verificado posteriormente por otros operadores, p. ej., constatar si existen discrepancias abruptas en los niveles a la lámina de agua; y son una referencia para los sensores barométricos, entre otros.

Es así como el uso de cámaras automáticas resulta ser una alternativa y/o complemento para el monitoreo de niveles a la lámina de agua con sensores de mayor grado de especialización.

3.4.3.1. Requerimientos de instalación y operación de sensores

Antes de la salida a campo para la instalación de los sensores automáticos se recomienda una visita prospectiva para conocer las condiciones del sitio a monitorearse. También, es necesario realizar pruebas de los sensores en oficina o laboratorio para comprobar su correcto funcionamiento previo a su instalación en campo. En general, se aconseja que, para la salida a campo a instalar los sensores, se cuente con mesa y sillas plegables, cinchos de medidas varias, toallas de tela, cinta *duct tape* (gris de uso industrial), navaja de campo, rafia de nylon, tijeras de campo, baterías AA o AAA, memorias SD y herramienta en general: mazo, desarmadores, pinzas de agarre, segueta, pala, llave creciente. Esta lista no es exhaustiva y deberán considerarse otros requerimientos dependiendo del sitio de estudio y tipo de instalación.

El sensor de profundidad permite medir los cambios de nivel de agua en diferentes ambientes. Está diseñado para colocarse a una profundidad que asegure que siempre se encuentre bajo el agua y se deben cuidar aspectos como que el equipo permanezca fijo durante todo el tiempo y sujetarlo con cuerdas para recuperarlo. Paralelamente, es recomendable colocar un sensor con las mismas características, cercano al primero, pero fuera del agua a fin de compensar los valores durante el análisis de la información. La instalación del sensor barométrico necesita prever que este sea recuperable para la descarga de datos. Cuidar que el sitio donde se instale sea de fácil acceso, pues podría requerirse de balsa, kayak o buceo para su recuperación. Además, se sugiere ampliamente que el sensor barométrico esté protegido por una carcasa externa (p. ej., tubo de PVC perforado), que permita el libre flujo del agua vertical y horizontalmente, y que no esté expuesto a la corriente del río, ya que arrastra detritos que pueden dañar la operación del sensor. Evítese que sea soterrado por acumulación de sedimentos.

La instalación del sensor puede realizarse en un muelle o utilizando anclas prefabricadas (figura 29). El ancla servirá de peso para fijar el sensor barométrico en el fondo del río. El sensor debe colocarse verticalmente dentro de la carcasa, aunque esto dependerá de su tipo. Tomar previsión de que el ancla sea recuperable cada vez que se descarguen datos, por ello se debe asegurar en un lugar fijo, como un poste, o un árbol, y con cuerda resistente a la humedad. Se requiere tomar en cuenta la tasa de sedimentación del río ya que una alta concentración de sedimentos podría enterrar el ancla, dificultando o imposibilitando su recuperación.

a)



b)



Figura 29. (a) Ancla prefabricada donde (b) el sensor barométrico Hobo U20L-01 (b) se encuentra instalado. Fotografías: Proyecto “Construyendo bases para el monitoreo remoto-digital de caudales ecológicos para la gestión del agua”.

Cabe subrayar que cada vez que el sensor sea recuperado y reinstalado en el sitio de monitoreo se debe de tomar lectura del nivel a la lámina de agua según el estadal o barra de escala, dado que esta altura de referencia es necesaria para el cálculo del nivel a la lámina de agua.

Antes de instalar el sensor en el sitio de estudio, para el tipo barométrico Hobo U20L-01, se le debe iniciar utilizando el [software HOBOWare](#). Hay que seguir las instrucciones del fabricante para su correcto funcionamiento. Conviene que esto se haga en condiciones controladas en oficina o laboratorio. Para la recolecta de los datos, se extrae el sensor del agua, se le seca y conecta a la computadora de acuerdo con las instrucciones del fabricante.

La selección de la cámara automática es fundamental. No todas las cámaras de fototrampeo pueden adquirir fotografías de manera continua. Por ello, durante la prospección de cámaras hay que indagar en los manuales y asegurarse de que cuenten con la opción *time lapse* y opciones de intervalos para tomar las fotografías (figura 30). Es ampliamente recomendable recurrir a paneles solares para el uso de las cámaras; el conjunto de cámaras automáticas y paneles solares aumenta las probabilidades de un registro continuo de los niveles a la lámina de agua. Depender de baterías requiere de visitas frecuentes a campo y su eventual agotamiento causa vacíos de información. Por esto, en caso de utilizarlas, se les debe cambiar frecuentemente.



Figura 30. Cámara trampa para el monitoreo de niveles a la lámina de agua. Fotografía: Proyecto “Construyendo bases para el monitoreo remoto-digital de caudales ecológicos para la gestión del agua”.

Para la instalación de la cámara automática se recomienda hacerlo en un mástil fijo. El sitio donde se instale debe contar con escalas referenciales para determinar la altura del nivel a la lámina de agua (estadales o barras de escala), y que la cámara esté lo suficientemente cerca para tomar las fotografías a las escalas disponibles (figura 31). Para esto, elíjase un ángulo favorable de modo que las barras de escala puedan ser vistas por la cámara automática. Idealmente, y dependiendo de dónde estén instaladas las escalas de referencia, la cámara requiere ver hacia el norte con el fin de evitar que el sol interfiera en sus tomas. Es importante que la cámara quede fijada en el mástil utilizando cinta de abrazadera o cinchos de aseguramiento. Esto se hace para prevenir movimientos de la cámara ocasionados por ventarrones, animales, o por los mismos operadores.



Figura 31. Instalación de cámara automática y ejemplo de fotografía de referencia. Fotografías: Proyecto “Construyendo bases para el monitoreo remoto-digital de caudales ecológicos para la gestión del agua”.

3.4.3.2. Descarga y procesamiento de información

Para la descarga de la información de las cámaras automáticas se recomienda contar con tarjetas de memoria extra que reemplazarán a las instaladas en el sitio de monitoreo. Esto agiliza el intercambio de información en campo, y evita perder las lecturas realizadas. Para la descarga de información del sensor barométrico, dependiendo de su tipo, será necesario recuperarlo de donde esté instalado. Una vez que la información se haya descargado del sensor y de la cámara, se aconseja respaldarla en diferentes repositorios: nube o discos duros externos, procurando promover la redundancia de información; es mejor que existan diferentes copias de la información. De preferencia en la nube, ya que los almacenamientos físicos o fallan o pierden vigencia.

El procesamiento de la información consiste en el renombramiento de los archivos mediante el *software* Advance Renamer (<https://www.advancedrenamer.com/>) (figura 32). Los archivos se renombran de manera que tengan un identificador único del sitio de monitoreo, y los metadatos de año, mes, día y hora en que se tomaron las fotografías. Se sugiere la nomenclatura “País-Sitio_Año_Mes_Día_Hora”, por ejemplo, “MX-Car_2024_01_01_231501”. De esta forma los nombres de los archivos contendrán información relacionada con el tipo de mediciones que se están realizando.

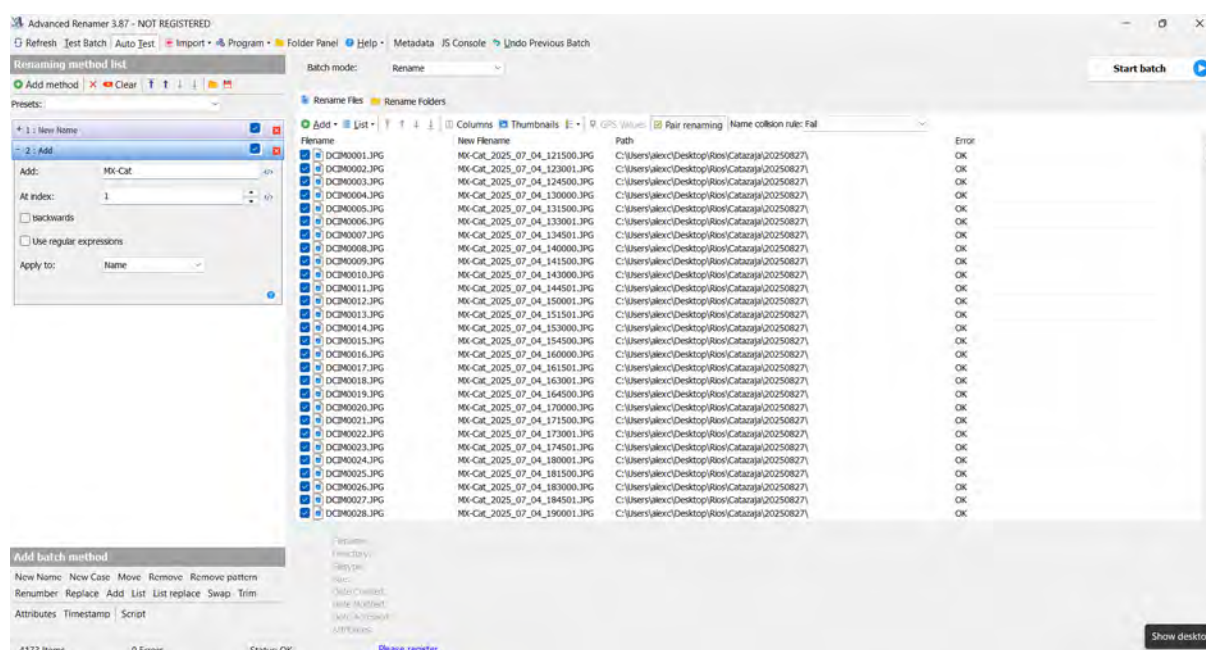


Figura 32. Pantalla de inicio del *software* Advance Renamer. Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente, es necesario crear una lista junto con la información de las fotografías con el fin de compararla con los datos del sensor barométrico. Para esto, se utiliza el lenguaje de programación R (<https://cran.r-project.org/>). Esta actividad podría realizarse manualmente, pero dada la cantidad de archivos que podría ser de miles al mes, son útiles estas herramientas.

Las líneas de código que se muestran en el cuadro 1 son un ejemplo para producir un archivo en formato “.csv” que contiene la información en columnas de todos los archivos que se hayan producido por las cámaras automáticas.

Cuadro 1. Líneas de código en lenguaje de programación R para organizar y crear listas de información.

```
#####
Author: Alejandro Cueva
Email: alejandro.cueva@ecosur.mx
#####

fotos_dir <- "C:/Rios/"
setwd("C:/Rios/")
fotos <- list.files()
columnas <- strsplit(fotos, "_")
columnas <- t(data.frame(columnas))
rownames(columnas) <- NULL
columnas <- data.frame(columnas)
columnas$hh <- substring(columnas$X5, 1,2)
columnas$mm <- substring(columnas$X5, 3,4)
columnas$ss <- substring(columnas$X5, 5,6)
colnames(columnas) <- c("site", "year", "month", "day", "hhmmss", "hh", "mm", "ss")
columnas$usadas <- columnas$mm == "00"| columnas$mm == "15"|columnas$mm == "30"|
columnas$mm == "45"
# identify directory to move the images to
usadas <- paste0(fotos_dir, 'usadas')
no_usadas <- paste0(fotos_dir, 'no_usadas')
# if a new directory, create new directory at this file path
dir.create(usadas, showWarnings = FALSE)
dir.create(no_usadas, showWarnings = FALSE) # copy the files to the new directories
fotos_mat <- data.frame(columnas$usadas,fotos)
fotos_mat <- subset(fotos_mat, columnas.usadas==TRUE)
file.copy(fotos_mat$fotos, to = usadas)
fotos <- list.files(usadas)
columnas <- strsplit(fotos, "_")
columnas <- t(data.frame(columnas))
rownames(columnas) <- NULL
columnas <- data.frame(columnas)
columnas$hh <- substring(columnas$X5, 1,2)
columnas$mm <- substring(columnas$X5, 3,4)
columnas$ss <- substring(columnas$X5, 5,6)
colnames(columnas) <- c("site", "year", "month", "day", "hhmmss", "hh", "mm", "ss")
write.csv(columnas, paste0(usadas,"/","lista_fotos.csv"))
```

Fuente: Elaboración propia.

Creado el archivo con la lista de los metadatos de las fotografías capturadas por la cámara automática, se procesan las imágenes. Actualmente, la adquisición de la información de las fotografías es manual y debe procesarse cada imagen, lo que consume tiempo. En la figura 33 hay dos ejemplos que muestran dos condiciones distintas: (1) diferentes escalas referenciadas, y (2) diferencias de día y de noche. Cada dato que se recopile de las fotografías deberá ser incorporado al nuevo archivo que incluya los metadatos en una columna debidamente identificada. Siempre será recomendable que se conozca la referencia de las escalas que se estén utilizando (p. ej., profundidad del río o elevación sobre el nivel del mar).



Figura 33. Identificación del nivel a la lámina de agua en condiciones diferentes. Fotografías: Proyecto “Construyendo bases para el monitoreo remoto-digital de caudales ecológicos para la gestión del agua”.

Para el procesamiento de la información recabada por el sensor barométrico, en este caso el Hobo U20L-01, se utiliza el *software* HOBOWare Pro, en especial el módulo “Asistente de compensación barométrica” (figura 34). Desde el *software* se parametriza el nivel de agua que se tenía al momento de colocar o sacar el sensor. También se podrán indicar las densidades del agua en la que se está monitoreando, así como el tiempo de referencia donde se tomó la altura de referencia cuando se instaló el sensor barométrico. Enseguida, se indica el archivo para tomar los datos de presión atmosférica como referencia para usarlo en la transformación. Posteriormente, se realiza la transformación de los datos de presión en valores de nivel de agua. Obtenidos los valores estimados del nivel a la lámina del agua, se exportan a un archivo “.csv”, “.txt” o “.xml”.

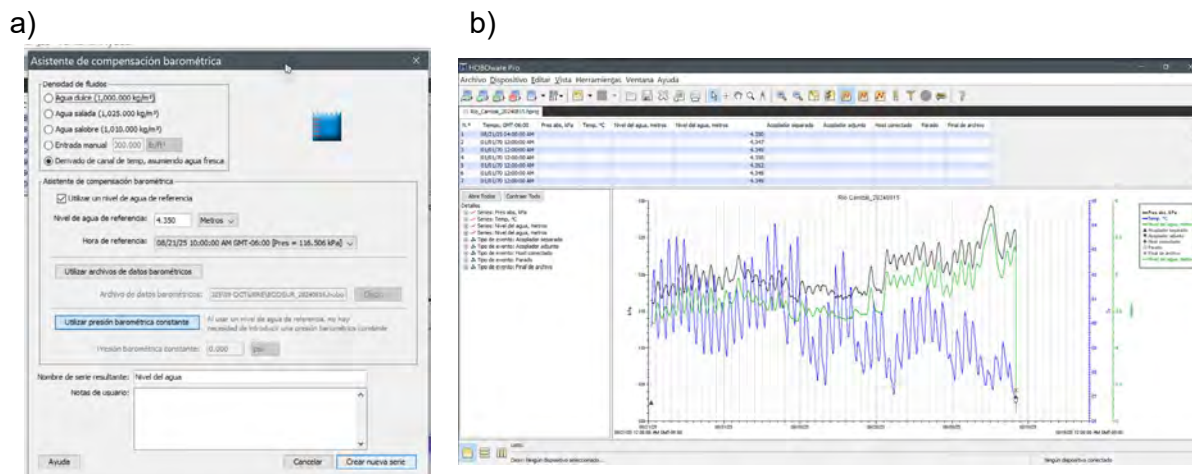


Figura 34. HOBOWare. (a) Módulo de “Asistente de compensación barométrica” y (b) pantalla de datos. Fuente: Elaboración propia.

Respecto al procesamiento de la información recabada en campo por el perfilador acústico, se inicia el programa [WinRiver II de Teledyne RD Instruments](#) y se recupera la información del muestreo realizado (figura 35).

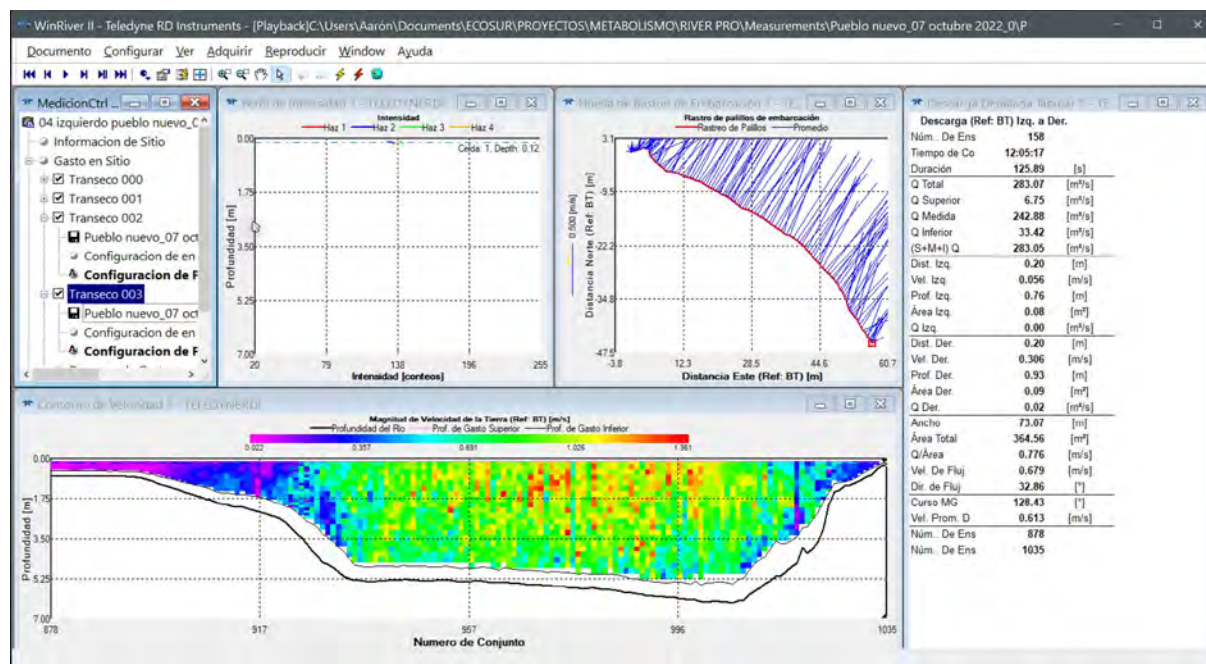


Figura 35. Ventana de trabajo desde el software [WinRiver II de Teledyne RD Instruments](#) para la descarga y procesamiento de la información batimétrica (profundidades y velocidades de corriente por punto). Fuente: Elaboración propia.

Enseguida, desde el menú “Configurar” se selecciona “Generic ASCII Output OFF” para iniciar la descarga de los datos de cada transecto. Posteriormente, se selecciona “Create New ASCII Output Template” y se abre una ventana donde se seleccionan los datos de interés por punto para el estudio (figura 36). En este caso, por punto, la coordenada de ubicación (latitud, longitud y profundidad), velocidad de corriente y

distancia recorrida entre puntos. Otros parámetros que también son de interés serían la relación caudal-área de la sección ($Q/\text{área}$), *distance made good* (ref.(BT)) y *Q top model*.

Se recomienda tener en cuenta cómo se solicitan los datos para después poder descargarlos en formato “.txt”, para ello se seleccionan los delimitadores del archivo según las preferencias o necesidades. Asimismo, se indica que los datos se coloquen en el mismo archivo para mantenerlos en el mismo directorio de trabajo. Estando ya en el transecto que estamos trabajando se reprocesan los datos para exportarlos en formato “.txt”, hecho esto se abren y continúa el procesamiento de integración con la información topográfica desde MO Excel o algún otro procesador de datos.

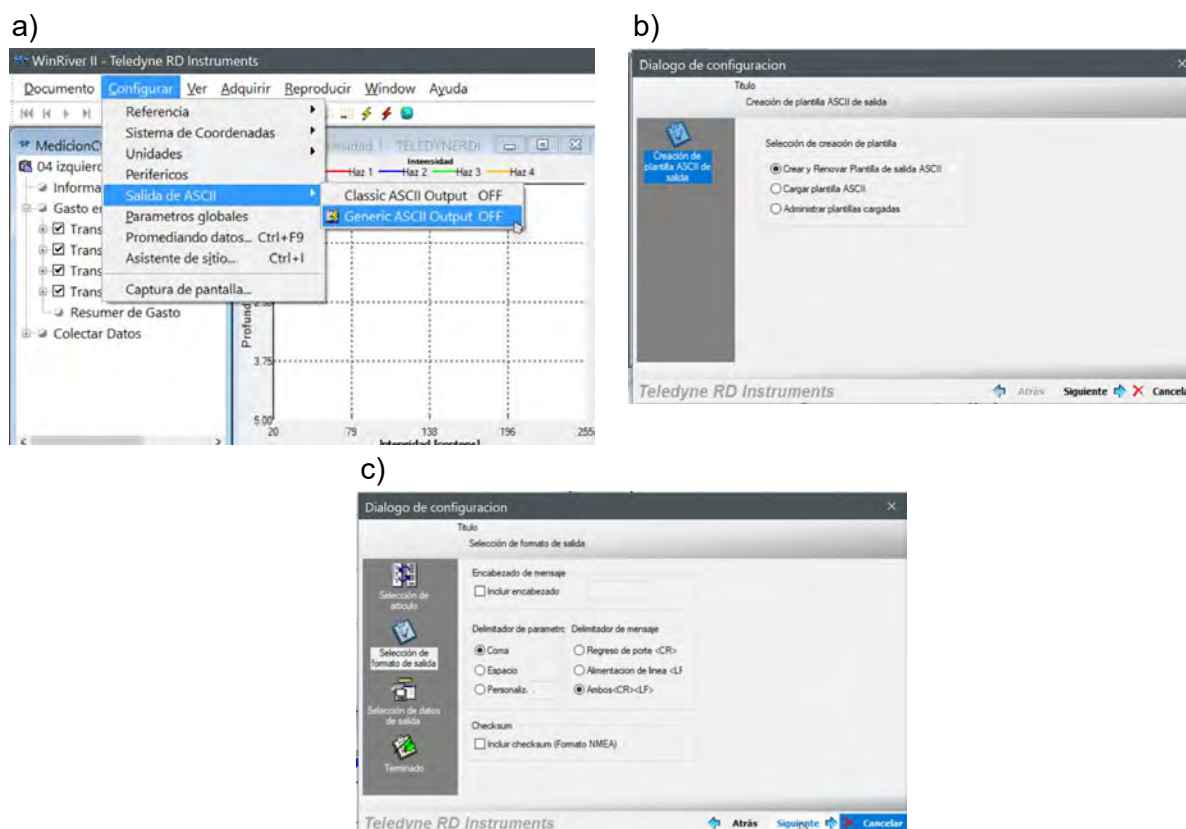


Figura 36. Cuadros de diálogo del [software WinRiver II de Teledyne RD Instruments](#) para configurar la descarga de la información batimétrica (profundidades y velocidades de corriente por punto). Fuente: Elaboración propia.

3.4.3.3. Modelación caudal-elevación a partir de los sensores

Conocido el nivel a la lámina de agua registrado por el sensor subacuático y la cámara trampa, se calcula el promedio para contar con un indicador de tendencia central en el caso donde existan lecturas para ambos y estas sean consistentes, y para llenar vacíos si así fuera requerido (figura 37). Luego, se calculan y grafican los caudales sobre la serie de registro promedio de niveles (figura 38). Esto se hace mediante la ecuación del modelo caudal-profundidad o elevación, preferentemente a partir de la serie histórica conforme al muestreo a largo plazo que hace la CONAGUA

en la estación hidrométrica, o bien, con el levantamiento de información en campo (batimetría y velocidades de corriente).

En el contexto de los casos de estudio en este ejemplo, para el río Carrizal se utilizó la ecuación de la curva caudal-profundidad conforme a su regresión potencial de la serie histórica de CONAGUA ($N = 9,081$, $y = 1.8938x^{2.8192}$, $R^2 = 0.8385$). En contraste, el modelo caudal-profundidad o elevación derivado de la información histórica de CONAGUA en el río De la Sierra se ajustó al rango de valores posterior a 2011 dado que, previo a esta fecha, se construyó unos kilómetros río abajo de la estación hidrométrica un conjunto de escotaduras para promover inundaciones laterales cuando se alcanzan elevaciones de 5.8 msnm, esto con el propósito de derivar una parte del agua del cauce principal a la llanura de inundación y evitar afectaciones en la ciudad de Villahermosa. Realizado el ajuste, se utilizó la ecuación de la curva caudal-profundidad conforme a su regresión potencial ($N = 4,328$, $y = 12.358x^{1.8301}$, $R^2 = 0.8069$).

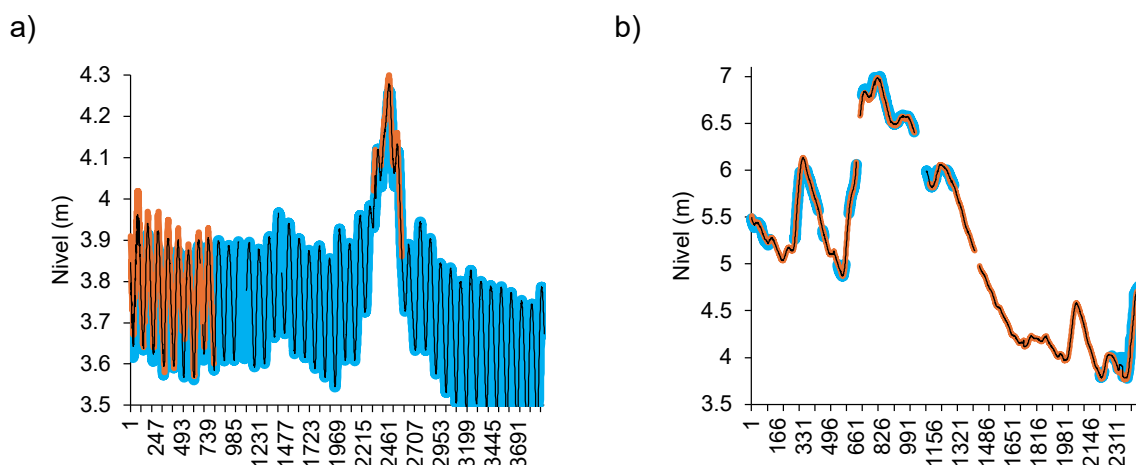
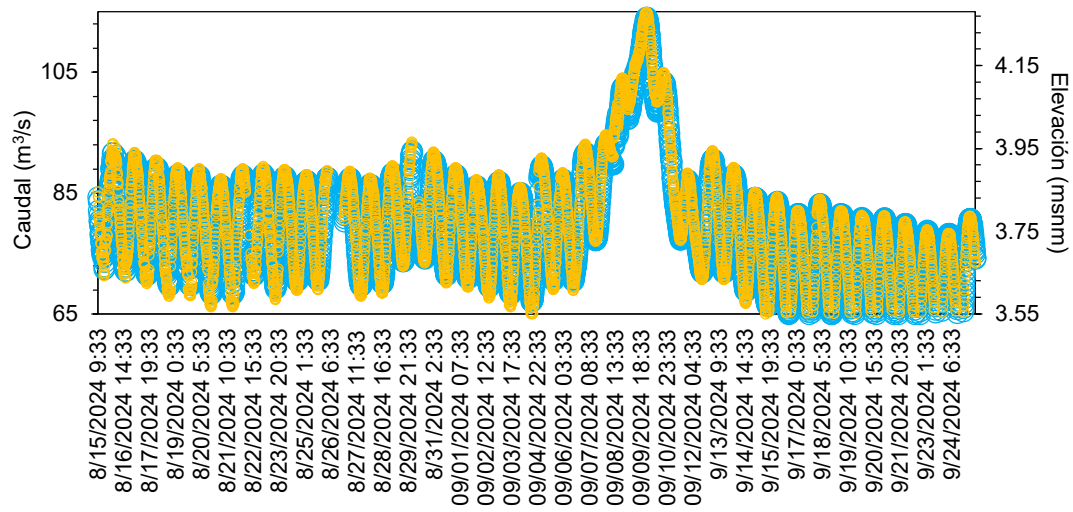


Figura 37. Niveles de profundidad máxima a la lámina de agua registrados en los ríos Carrizal (a) y De la Sierra (b) por los sensores subacuáticos (línea azul, 3,935 y 2,321 registros), cámaras trampa (línea naranja, 1,004 y 956) y el promedio de lectura (línea negra). Fuente: Elaboración propia.

a)



b)

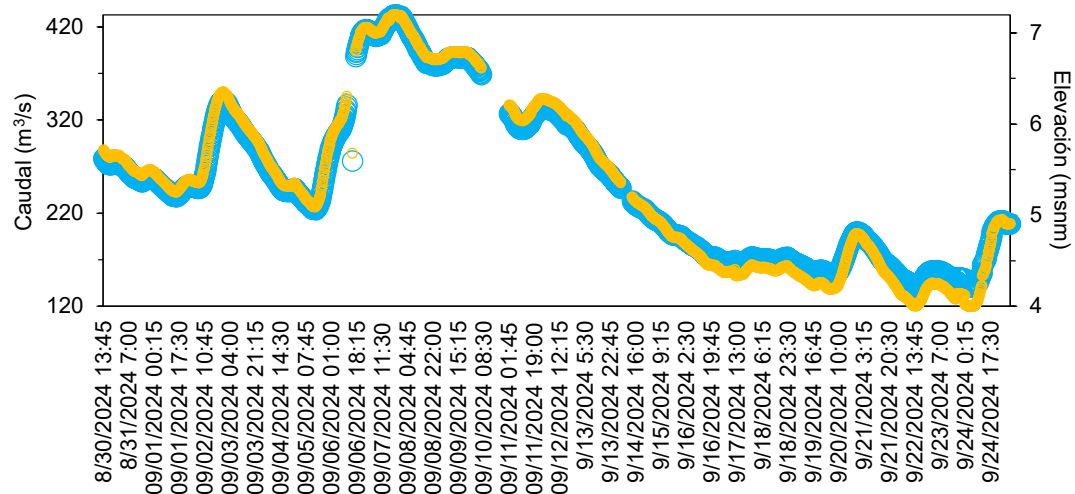
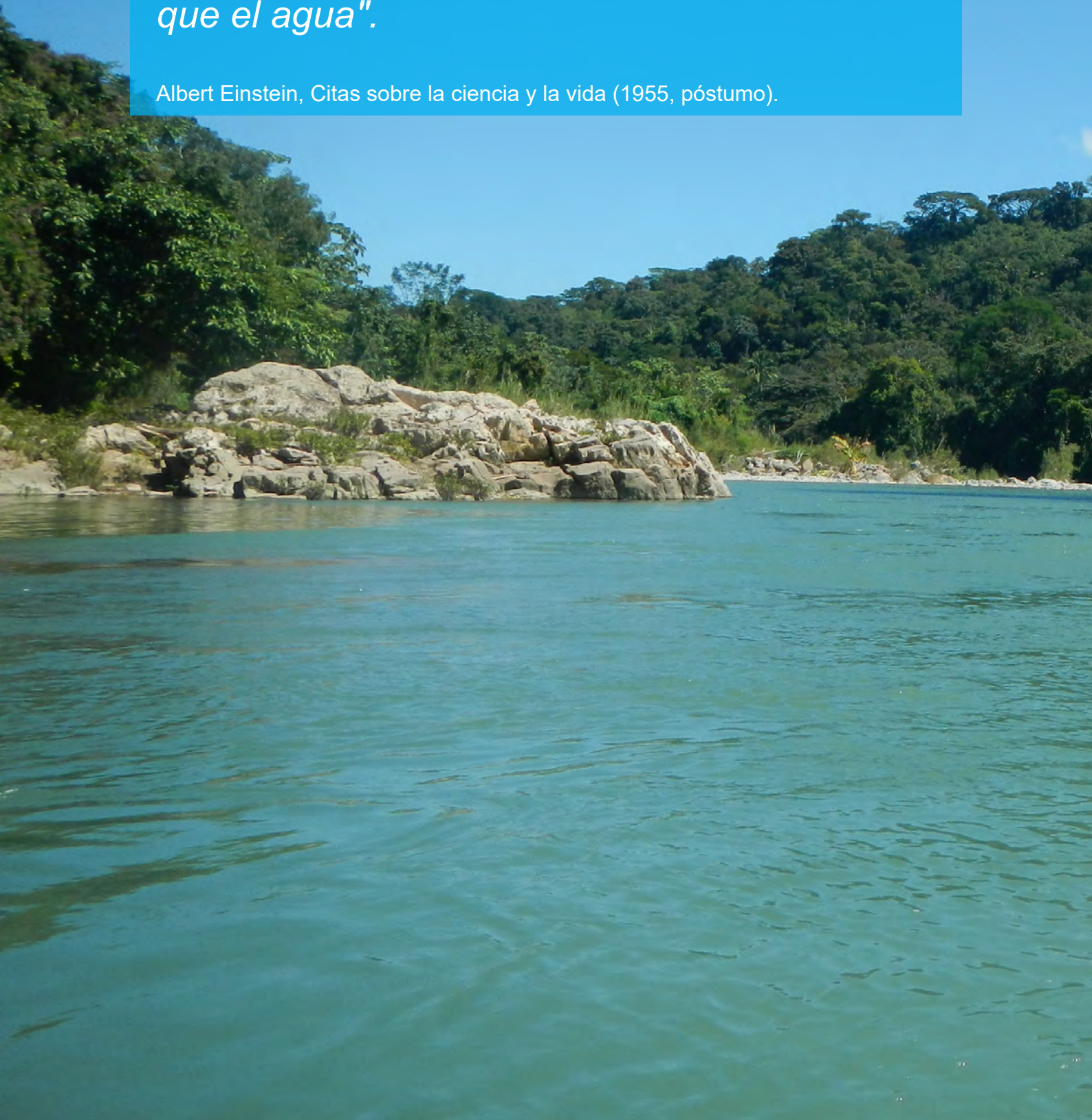


Figura 38. Caudales modelados (azul) a partir de los niveles de profundidad máxima (amarillo) en los ríos Carrizal (a) y De la Sierra (b). Fuente: Elaboración propia.

4. EVALUACIÓN DE DESEMPEÑO: VALIDACIÓN ENTRE SENSORES Y CAUDAL ECOLÓGICO

"No hay nada más importante para la vida que el agua".

Albert Einstein, Citas sobre la ciencia y la vida (1955, póstumo).



4.1. Relación de sensores

Se evaluó la relación de la lectura de nivel a la lámina de agua entre el sensor barométrico y la cámara automática. La toma de mediciones de ambos sensores fue programada a 15 minutos de resolución temporal, lo que permitiría 96 registros por día. Para esta evaluación se utilizaron las métricas del coeficiente de determinación (R^2), el error cuadrático medio (RMSE), la pendiente e intercepto de la regresión lineal entre ambas estimaciones. Para la evaluación del río Carrizal se obtuvo una muestra de 1,004 registros, y para el río De la Sierra 956 registros. Estas muestras están limitadas al procesamiento de las imágenes de las cámaras automáticas.

Todas las relaciones 1:1 entre el nivel a la lámina de agua entre el sensor barométrico y la cámara automática fueron significativas ($P < 0.05$) (figura 39). La relación del río Carrizal ($n = 1,004$) tuvo un coeficiente de determinación alto ($r^2 = 0.9639$) con una pendiente cercana a 1 y el intercepto de la relación es relativamente bajo (0.03 m). El error cuadrático medio de la relación fue de 0.053 m. Tanto el intercepto de la relación lineal como el RMSE sugieren una incertidumbre de las estimaciones del nivel a la lámina de agua de 3 y 5 cm, respectivamente. El río De la Sierra ($n = 956$), por su lado, mostró también un coeficiente de determinación alto ($r^2 = 0.9967$) con pendiente cercana a 1 e intercepto relativamente bajo (0.04 m) y error cuadrático medio de 0.045 m en congruencia con el intercepto de la relación lineal. Al igual que en el caso anterior, el intercepto de la relación lineal y el RMSE sugieren una incertidumbre de las estimaciones del nivel a la lámina de agua de 4 cm. La relación general entre el nivel a la lámina de agua entre el sensor barométrico y la cámara automática de ambos ríos ($N = 1,960$) mostró un coeficiente de determinación alto ($R^2 = 0.9989$), pendiente cercana a 1 e intercepto levemente mayor, pero aún bajo en los casos individuales (0.07 m). El error cuadrático medio de la relación fue de 0.049 m.

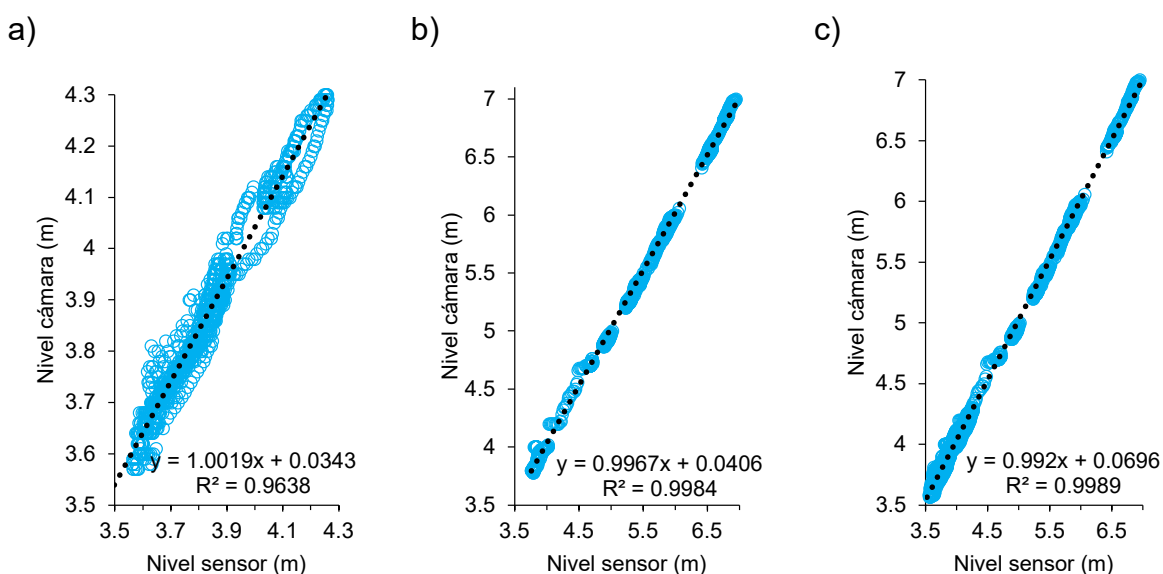


Figura 39. Relación 1:1 entre el nivel a la lámina de agua entre la cámara automática y el sensor barométrico. (a) río Carrizal ($n = 1,004$), (b) río de la Sierra ($n = 956$) y (c) el conjunto total ($N = 1,960$). Fuente: Elaboración propia.

Al momento de analizar la relación general que incorpora ambos ríos se puede ver que la relación entre los dos métodos es comparable. Sin embargo, cuando se analizan de manera independiente, las relaciones entre el sensor barométrico y la cámara automática cambian. Estas diferencias son atribuibles a diferentes factores. Por ejemplo, en el río Carrizal fue más frecuente que la barra de escala de referencia estuviera cubierta de sedimentos, lo que complicó la identificación de las escalas. Además, la posición de la escala de referencia en este río promovió la presencia de sombras que, en conjunto con la cobertura de sedimentos, dificultaron la identificación. Por su parte, en el río Carrizal la escala referenciada es solo una regla o estadal vertical a una distancia definida de la cámara, mientras que en el río De la Sierra son varios estadales escalonados que se acercan a la cámara automática. Esto sugiere que la distancia de la cámara automática a las escalas de referencia puede ser una limitante al reconocer los patrones de graduación para la lectura de niveles.

4.2. Caudal ecológico

La evaluación de desempeño de caudal ecológico se trabajó en tres aspectos. El primero consistió en comparar los caudales medios diarios que se presentaron durante el periodo de la toma de datos, es decir, del 15 de agosto al 25 de septiembre de 2024 en el río Carrizal y del 30 de agosto al 25 de septiembre de 2024 en el río De la Sierra, en relación con los caudales ecológicos evaluados para condiciones ordinarias a escala diaria. Este análisis se acotó a caudales ordinarios debido a que en el periodo reportado de lectura de niveles y cálculo de caudales no se presentó ningún evento extraordinario. Dado que los caudales ecológicos fueron evaluados con base en la aproximación metodológica por frecuencias de ocurrencia, la comparación de caudales medios diarios de 2024 se hizo con base en el caudal ordinario integrado, esto es, aquel que integra condiciones hidrológicas muy secas, secas, medias y húmedas (Salinas-Rodríguez *et al.*, 2020, 2022).

El segundo aspecto de comparación consistió en analizar los caudales medios diarios de 2024 siguiendo la aproximación por límites de sostenibilidad ambiental propuesta por Richter (2010) y Richter *et al.* (2012). Este método establece que, ante desviaciones de $\pm 10\%$ del caudal conforme a la mediana (percentil 50), es de esperarse que la integridad ecológica se mantenga en buen estado, entre 10% – 20% en estado moderado y $>20\%$ se anticipa que el estado será malo. En ambos casos, en el de los caudales ecológicos integrados con base en frecuencias de ocurrencia y en el de la aproximación por límites de sostenibilidad ambiental, se utilizó la parametrización de desviación descrita líneas arriba y el indicador de desempeño se construyó conforme a la siguiente expresión (ecuación 30):

$$\text{Índice de desempeño} = \frac{Q_{i2024} - Q_i}{Q_i} \times 100 \quad (30)$$

donde,

Q_{i2024} = Caudal medio del día i según la muestra de cada río

Q_i = Caudal ecológico integrado o caudal conforme a la mediana del día i

Finalmente, el tercer aspecto considerado fue la presencia de los caudales medios diarios registrados en 2024 según la aproximación por el rango de variabilidad desarrollada por Richter *et al.* (1997) y Mathews y Richter (2007), y adaptada por Salinas-Rodríguez *et al.* (2020, 2022) para la parametrización del método de evaluación de caudales ecológicos desarrollado en México. En este sentido, el desempeño se calculó con base en la siguiente expresión (ecuación 31):

$$\text{Indicador de desempeño} = \begin{cases} \text{Bueno, si } Q_{i2024} \geq Q_{p25} \leq Q_{p75} \\ \text{Moderado, si } Q_{i2024} \geq Q_{p10} \leq Q_{p25} \text{ y } \geq Q_{p75} \leq Q_{p90} \\ \text{Malo, si } Q_{i2024} < Q_{p10} \text{ y } > Q_{p90} \end{cases} \quad (31)$$

donde, Q_{p10} , Q_{p25} , Q_{p75} , Q_{p90} representan los caudales de referencia para condiciones secas, medias, húmedas y muy húmedas, respectivamente.

El cumplimiento del caudal ecológico y reserva de agua para los casos de estudio ilustrados según la muestra tomada en campo, en general, es variable (figura 40). Por un lado, el río Carrizal destaca por tener un mal cumplimiento en el 100% de la muestra ($n = 42$ días). Incluso, levemente superiores en una gran proporción de la muestra a los caudales mínimos históricos de (percentil 0) y, en poco más de un tercio, por debajo de estos (tabla 22). El río De la Sierra, en cambio, tiene un desempeño variable. Mientras que el cumplimiento del caudal ecológico de referencia es bueno en el 7% de la muestra, es moderado 11% y 81% malo. En el contexto de los límites de sostenibilidad ambiental de Richter (2010) y Richter *et al.* (2012), el nivel de cumplimiento se incrementa para ser bueno en el 30% de la muestra, 15% moderado y 56% malo. En cambio, en el contexto del rango natural de variabilidad de Richter *et al.* (1997) y Mathews y Richter (2007) adaptado por Salinas-Rodríguez *et al.* (2020, 2022), el desempeño mejora sustancialmente a bueno en el 52% de la muestra, 22% moderado y 26% malo.

El propósito de contar con tres indicadores de desempeño de cumplimiento de caudal ecológico estriba en entender los alcances y limitaciones de los resultados según la fuente de referencia. La comparación de los caudales medios diarios sujetos a evaluación con los caudales ecológicos integrados es de utilidad para tener una cuantificación objetiva respecto al cumplimiento con la reserva de agua establecida para protección ecológica.

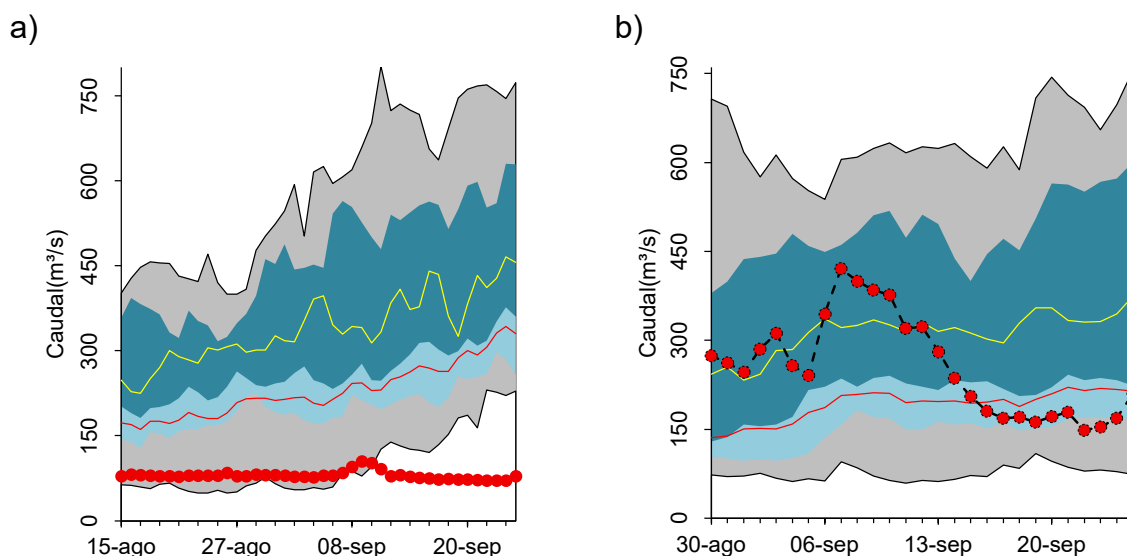


Figura 40. Caudales medios diarios registrados en 2024 del río Carrizal (a) y De la Sierra (b) (línea punteada negra con marcadores rojos). El área verde oscuro representa el rango de condiciones medias (percentiles 25–75) y verde claro las secas (percentil 10–25), en gris las muy húmedas (percentil 75–90) y muy secas (percentil 0–10). El caudal ecológico ordinario integrado y los caudales medios diarios conforme a la mediana (percentil 50) se muestran en las líneas roja y amarilla, respectivamente. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 22. Desempeño de los caudales medios diarios registrados en 2024 en el río Carrizal y De la Sierra según la fuente de comparación.

Nivel de cumplimiento	Indicador y fuente de referencia		
	Caudal ecológico ¹ (Salinas-Rodríguez et al., 2020, 2022)	Límites de sostenibilidad ambiental (Richter et al., 2010, 2012)	Rango de variabilidad (Richter et al. (1997) y Mathews y Richter (2007))
Río Carrizal			
Bueno	0	0	0
Moderado	0	0	0
Malo	0	0	0
Total	42	42	42
Río De la Sierra			
Bueno	2	8	14
Moderado	3	4	6
Malo	22	15	7
Total	27	27	27

Fuente: Elaboración propia.

¹Para objetivo ambiental clase A, según la clasificación de estas cuencas en la NMX-AA-159-SCFI-2012 y las reservas de agua establecidas en consecuencia.

Para el río De la Sierra, este resultado pareciera ser el peor. Sin embargo, a diferencia del río Carrizal, cuyo régimen de caudales está alterado, se debe considerar que el río De la Sierra no cuenta con infraestructura hidráulica o hidroeléctrica que altere significativamente el régimen, por lo que el resultado es representación fiel al rango natural de variabilidad de caudales. En este sentido, el caudal ecológico es variable a lo largo de los años y ello se da en función del tipo de condiciones hidrológicas de referencia que se presenten, es decir, años muy secos, secos, medios o húmedos. Por otro lado, la comparación con relación a la mediana y a la frecuencia en la que los registros caen en el rango de condiciones de referencia, es de utilidad para ponderar el desempeño en sentido amplio sustentado en literatura científica internacional.

Para el río De la Sierra, los resultados muestran una mejora con relación al caudal ecológico de referencia para el cumplimiento de la reserva de agua. Y, dado que el método surge y está adaptado al rango natural de variabilidad de caudales, dichos resultados tienen mayor significancia a largo plazo, en el contexto en el que esas condiciones hidrológicas se presentan.

4.3. Utilidad del modelo en la gestión de riesgos y análisis de vulnerabilidad

Respecto al modelo hidráulico, ante el acumulado de precipitaciones, el pronóstico y los escurrimientos que afectan a Villahermosa, el Instituto de Protección Civil del Estado de Tabasco emitió el 20 de octubre de 2024, a las 6:00 hrs., el boletín con el Semáforo de Niveles de los Ríos (figura 41). En este documento se alertó sobre el estado de los ríos Carrizal y De la Sierra, el primero en semáforo “normal” y el segundo en “alerta”. Lo anterior porque los niveles en las escalas estaban en 4.42 m en el río Carrizal y 7.82 m en el De la Sierra, este último había superado por 0.33 m el Nivel de Aguas Máximo Ordinario (NAMO, 7.49 msnm). En este contexto, el modelo hidráulico dinámico revela que en dicha lectura se registraron caudales por 501 m³/s con velocidad media de 0.96 m/s en un área de sección de 520.71 m², perímetro de 90.81 m y radio hidráulico de 5.73 m (figura 42).

En el análisis hidrológico e hidráulico del componente de eventos extraordinarios o régimen de avenidas de los caudales ecológicos, el evento alertado por las autoridades estuvo muy cerca de alcanzar la categoría I, es decir, a un año de periodo de retorno (525 m³/s) y de desbordar en la sección donde se encuentra la estación hidrométrica (580 m³/s). El boletín sobre el Semáforo de Niveles de los Ríos que emiten las autoridades se vería significativamente robustecido si, además de publicar la información que ya contiene, muestra el perfil topobatimétrico y los parámetros hidráulicos asociados a los niveles de inundación reportados.

El gráfico representativo del nivel de inundación reportado, así como el de los caudales y velocidades, es información de gran utilidad para la toma de decisiones de las autoridades, y para que la ciudadanía mejore su comprensión de las implicaciones. Más allá del acumulado de precipitaciones, referencia el pronóstico del clima, el alcance lateral en tiempo real de las inundaciones, los caudales y velocidades de

corriente asociados y la población asentada en los márgenes de los ríos, son factores de gran relevancia para evaluar el grado de vulnerabilidad, exposición, sensibilidad y riesgo. Asociar estos factores al régimen de escurrimientos en ríos con regímenes alterados o naturales, con caudales ecológicos implementados o no permitiría evaluar su contribución como solución basada en la naturaleza para la adaptación al cambio climático, a partir de los ecosistemas.



PROTECCIÓN CIVIL
INSTITUTO DE PROTECCIÓN CIVIL
DEL ESTADO DE TABASCO



SEMÁFORO DE NIVELES DE RÍOS

FECHA: 20 DE OCTUBRE DE 2024 06:00 hrs.				Pronóstico de lluvias:				Intensidad: 1.75 - 1.50					
NOMBRE DEL RÍO	ESTACIÓN DE MEDICIÓN NIVEL DE RÍO	NAMO (msnm)	NAMINO	DÍA DE AYER	DÍA DE HOY	COMPORTAMIENTO DE LOS NIVELES			SEMÁFORO	56.4	31.0	22.0	
				ESCALA	ESCALA	DIFERENCIA DEL NIVEL	CAPACIDAD REGULACIÓN EN MTS						
Samaria	Samaria	14.90	11.50	12.26	14.08	1.82	0.82	NORMAL					
Carrizal	González	8.77	2.70	3.97	4.42	0.45	4.35	NORMAL					
Oxolotán	Oxolotán	39.53	31.20	37.34	37.34	0.00	2.19	ALERTA	S/D	S/D	S/D		
Tacotalpa	Tapijulapa	24.63	15.25	17.38	17.38	0.00	7.25	ALERTA	S/D	S/D	S/D		
Puyacatengo	Puyacatengo	29.65	24.12	26.56	26.46	-0.10	3.19	NORMAL	75.9	29.0	22.0		
Teapa	Teapa	37.71	33.49	37.86	37.60	-0.26	0.11	PREVENCIÓN	75.0	29.0	22.0		
De la Sierra	Pueblo Nuevo	7.49	1.41	4.90	7.82	2.92	-0.33	ALERTA	58.9	28.0	24.0		
Pichucalco	San Joaquín	23.12	18.12	23.02	24.42	1.40	-1.30	ALERTA	109.5	29.0	24.0		
Grijalva	Gaviotas	5.42	0.48	2.75	3.18	0.43	2.24	NORMAL	54.3	29.8	25.0		
	Porvenir	4.74	0.15	1.78	2.58	0.80	2.16	NORMAL	61.9	30.0	22.0		
Tulija	Salto de Agua	10.99	1.92	8.16	11.11	2.95	-0.12	ALERTA	100.1	26.5	23.0		
Puxcatán	Macuspana	9.85	0.45	4.03	7.98	3.95	1.87	NORMAL	86.0	28.5	23.5		
Usumacinta	Boca del Cerro	19.21	11.01	14.19	15.03	0.84	4.18	NORMAL	89.0	29.0	23.5		
San Pedro	San Pedro	9.01	7.58	8.77	8.81	0.04	0.20	NORMAL	58.0	29.0	24.5		
PRESAS		NAMO (msnm)		DÍA DE AYER	DÍA DE HOY	COMPORTAMIENTO DE LOS NIVELES		CLIMATOLOGÍA					
				ESCALA	ESCALA	DIFERENCIA DEL NIVEL	CAPACIDAD DE ALMACENAMIENTO EN MTS	LLUVIAS					
Angostura		533.00		522.77	522.88	0.11	10.12		0.0				
Chicoasén		392.00		391.05	391.01	-0.04	0.99		0.0				
Malpaso		182.50		165.06	166.02	0.96	16.48		0.0				
Peñitas		87.40		85.53	87.69	2.16	-0.29		0.0				
OBSERVACIONES:													
Tapijulapa 117.0 mm. Datos del S.M.N.													
San Joaquín 109.5 mm; Salto de Agua 100.1 mm; Boca del Cerro 89.0 mm;													
Macuspana 86.0 mm; Puyacatengo 75.9 mm; Samaria 75.7 mm; Teapa 75.0 mm; Porvenir 61.9 mm; Pueblo Nuevo 58.9 mm; San Pedro 58.0 mm; González 56.4 mm; Gaviotas 54.3 mm.													
ESTACIONES AUTOMÁTICAS													
El Refugio 108.5 mm; Cumuapa 100.6 mm; Poblado C-11 96.8 mm; Huimanguillo (Inifap) 86.5 mm; Comalcalco 69.3 mm; Pte. Tonalá 61.4 mm;													
Posta 60.7 mm; Jonuta 47.0 mm; Jonuta 2 (Puente) 43.2 mm; Los Agaves 15.4 mm; Tepetitán 12.9 mm; Tecoluta 0.2 mm; Francisco I. Madero 0.1 mm; Puente Solidaridad 0.1 mm.													
En el Instituto , permanece con personal de guardia las 24 horas de los 365 días del año, para atención de llamadas de emergencias de la ciudadanía al teléfono CONMUTADOR 993-58-13-60.EXT: 100 Y 114 Y 9933-58-11 25 Correos electrónicos : emergencias_delta@hotmail.com													

TÉRMINOS IMPORTANTES:

NMO.- Nivel Máximo de Operación.

NAMO.- Nivel de Aguas Máximo Ordinario (Escala Crítica).

NAMINO (Nivel de Aguas Mínimas de Operación)

MSNM.- Metros Sobre el nivel del mar

ESCALA DE LLUVIAS POR COLOR

LLUVIAS 0.1 - 5.0 mm
LLUVIAS MODERADAS 5.1 - 25 mm
LLUVIAS FUERTES 25 - 50 mm
LLUVIAS MUY FUERTES 50 - 75 mm
LLUVIAS INTENSAS 75 - 150 mm
LLUVIAS TORRENCIALES 150 - 250 mm
LLUVIAS EXTRAORDINARIAS 250 mm

FUENTE: Información Hidroclimática y de Presas,
Dirección Local Tabasco de la CONAGUA
Dirección Técnica del Organismo de Cuenca Frontera Sur de la CONAGUA

Figura 41. Semáforo de niveles de los ríos de Tabasco el 20 de octubre de 2024 emitido por el Instituto de Protección Civil del Estado de Tabasco.

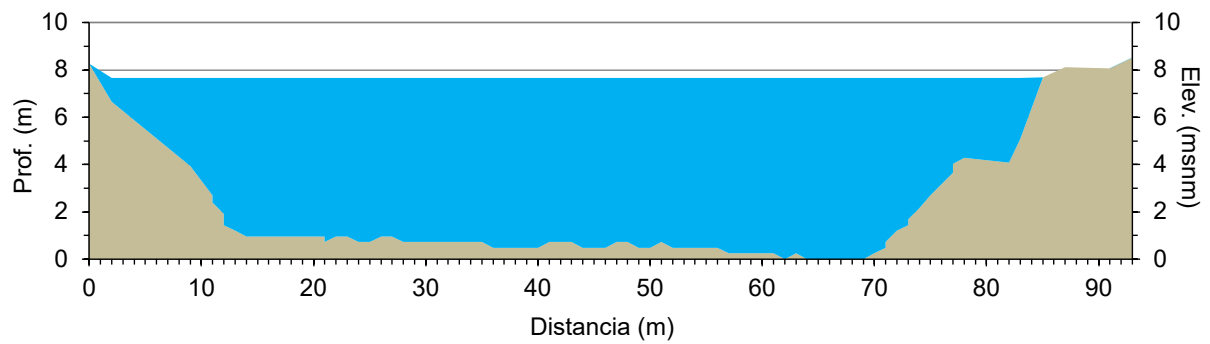
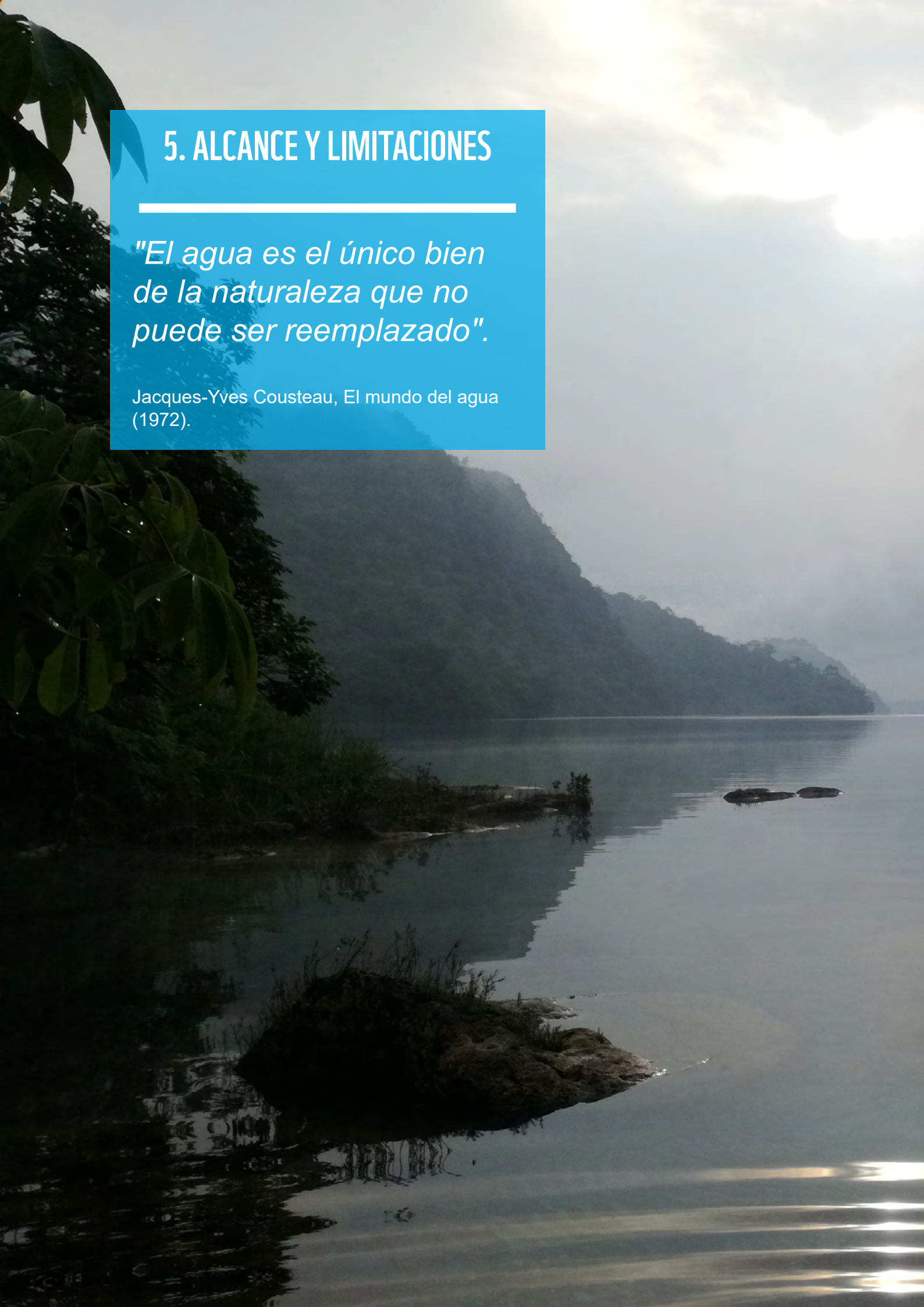


Figura 42. Sección transversal del río De la Sierra y niveles de profundidad máxima y su elevación en relación con el nivel medio del mar conforme a lo alertado por el Instituto de Protección Civil del Estado de Tabasco el 20 de octubre de 2024 a las 6:00 hrs. Fuente: Elaboración propia.

5. ALCANCE Y LIMITACIONES

"El agua es el único bien de la naturaleza que no puede ser reemplazado".

Jacques-Yves Cousteau, El mundo del agua (1972).



Si bien la prueba de concepto del método para monitorear niveles a través de fotogrametría de alta resolución, como una alternativa robusta, práctica y de bajo costo para modelar caudales, está limitada a 42 y 27 días en los ríos Carrizal y De la Sierra, respectivamente, la relación 1:1 entre lecturas de los sensores subacuáticos y las cámaras es muy robusta ($R^2 = 0.9989$, $RMSE = 0.049$ m). Esto se debe a la abundancia de muestras pareadas dada la programación de resolución temporal o frecuencia con la que se toman ($N = 1,960$), en este caso, cada 15 minutos.

Por otro lado, la toma de muestras para la prueba de concepto se realizó al inicio de la temporada de lluvias, justo cuando la variabilidad natural de niveles de agua incrementa. En este sentido, es recomendable mantener el monitoreo de niveles y modelación de caudales, idealmente a lo largo de todo el año hidrológico, con el propósito de contar con la muestra completa de variabilidad, tanto de temporada de lluvias y estiaje como de los momentos en los que ambas se agudizan (octubre y mayo). A la luz de los resultados, el método es innovador, por lo que en primera instancia se recomienda incrementar la variedad de casos de estudio con el objetivo de recoger experiencias de implementación, sistematizarlas y evaluar el desempeño del sistema en sentido amplio. Ello permitiría diseñar una estrategia de escalamiento en otras regiones del país.

En cuanto a la implementación de las cámaras automáticas, las condiciones preexistentes de las escalas de referencia fueron una limitante al seleccionar su posición y ubicación. A pesar de que se aprovechó la infraestructura presente, esta no fue diseñada y/o instalada con el propósito de ser documentada de manera frecuente por una cámara automática. Entonces, la posición de la escala referenciada no favorecía las condiciones de iluminación, en especial al crear sombras que hacen que la determinación del nivel a la lámina de agua se dificulte, ello crea incertidumbre en las estimaciones. Otro aspecto por cuidar es que las estimaciones de los niveles a la lámina de agua a partir de fotografías fueron realizadas por distintos usuarios. Aunque corregible, esto puede crear incertidumbre en las estimaciones dado que los usuarios pueden interpretar las imágenes de modo similar, pero con un sesgo sistemático causado por la interpretación del operador.

Otra limitación estriba en el procesamiento de las fotografías obtenidas de las cámaras automáticas dada la cantidad de información producida; por día se obtuvieron 96 imágenes, de modo que la cantidad de imágenes por procesar es vasta. Por ejemplo, 30 días de información en un solo sitio de estudio recabaría 2,880 imágenes, un año de monitoreo resultaría en 35,040 imágenes. La identificación del nivel a la lámina del agua se realiza de manera manual, es decir, el usuario identifica el nivel en cada una de las imágenes, lo que representa una inversión de tiempo considerable. Por ello, habría que integrar técnicas de reconocimiento de patrones en las imágenes utilizando inteligencia artificial para disminuir el tiempo de procesamiento, y realizar evaluaciones de sensibilidad entre criterios que abonen a desarrollar métodos robustos para la reducción de incertidumbre.

Otra opción complementaria podría ser utilizar métodos de ciencia ciudadana, en los que se involucre a voluntarios que identifiquen los niveles a la lámina de agua de manera participativa.

En cuanto a los sensores barométricos, el reto principal consiste en su instalación estable y duradera en campo. La instalación de este sensor, idealmente, debe ser en un sitio fijo que impida su movimiento. Sin embargo, debido a las características y condiciones de los ríos monitoreados fue necesario utilizar anclas. Las anclas pueden ser movidas o enterradas por la corriente, sedimentos o detritos mayores que los ríos transportan, lo que afecta las mediciones de los sensores barométricos y hace que estos pierdan información. A pesar de que se detectaron movimientos de los sensores barométricos en las series temporales, la lectura fue corregida en posprocesamiento. Ello fue posible porque se contó con la información del nivel a la lámina de agua provista por las cámaras automáticas. Esto resalta la importancia de los dos tipos de mediciones para estimar el nivel a la lámina de agua. Los sensores subacuáticos y las cámaras trampa son dispositivos complementarios que disminuyen la pérdida de información y robustecen el sistema en general.

Por último, en el ámbito de la gestión y gobernanza del agua, el desarrollo de modelos ecohidrológicos y ecohidráulicos no solo son de utilidad para evaluar indicadores hidrológicos de relevancia ecológica y el desempeño de caudales ecológicos, sino que también han probado serlo para la comprensión de indicadores de riesgo y alcances de inundaciones. El método, además de robusto, muestra potencial de réplica y escalamiento atractivo para, en el corto y mediano plazo, se desarrollen estrategias de implementación y mecanismos de comunicación para establecer acuerdos que permitan poner a disposición del público de forma expedita (p. ej., en tiempo real o cercano) los niveles de agua en los ríos junto con los parámetros hidráulicos asociados de una forma gráfica y dinámica, por ahora ausente en el sistema de monitoreo que realiza la autoridad. En este sentido, vale resaltar la colaboración entre instituciones de diferentes órdenes de gobierno, los actores locales en las comunidades y de la academia a la cual sería deseable incorporar organizaciones de la sociedad civil.

6. RECOMENDACIONES FINALES

"El agua es el único bien de la naturaleza que no puede ser reemplazado".

Jacques-Yves Cousteau, El mundo del agua (1972).



La información generada a través de monitoreos remotos digitales de alta resolución temporal puede ser multipropósito, especialmente si se crean bases de datos de acceso abierto. Por ejemplo, la información de los sensores subacuáticos y las cámaras automáticas puede ser insumo para la calibración, verificación y validación de productos satelitales relacionados con el nivel a la lámina de agua y la pendiente de su superficie, p. ej., *Surface Water and Ocean Topography* (SWOT). Además, la adquisición de las fotografías en alta resolución temporal de la cámara automática podría ser el insumo para entrenar, validar y verificar algoritmos de inteligencia artificial para la determinación y estimación de niveles a la lámina de agua en otros sitios de estudio.

El método desarrollado es también una oportunidad de fortalecimiento institucional en torno al monitoreo de niveles de los ríos, y la evaluación de desempeño de caudales ecológicos y su contribución como soluciones basadas en la naturaleza ante eventos extremos, a través de los parámetros hidráulicos que inciden sobre la capacidad de resiliencia del socioecosistema. Además, es factible de promoverse mediante un esfuerzo colaborativo de ciencia ciudadana. La participación de actores institucionales, comunitarios, de la sociedad civil y la academia, en el monitoreo, gestión participativa y gobernanza de los niveles de agua en los ríos y otros humedales, promueve y sienta las bases para construir relaciones de confianza sustentadas en la generación de información y su intercambio para la toma de decisiones oportuna, participativa y transparente, virtudes clave para la gestión adaptativa del sistema y la prevención de riesgos.

7. REFERENCIAS

"El agua no tiene fronteras".

Ban Ki-moon, Declaración de las Naciones Unidas sobre el agua (2010).



- Acreman, M. C., Arthington, A. H., Colloff, M. J., Couch, C., Crossman, N. D., Dyer, F., Overton, I., Pollino, C. A., Stewardson, M. J., y Young, W. (2014a). Environmental flows for natural, hybrid, and novel riverine ecosystems in a changing world. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 12(8), 466–473. <http://dx.doi.org/10.1890/130134>.
- Acreman, M. C., Overton, I. C., King, J., Wood, P. J., Cowx, I. G., Dunbar, M. J., Kendy, E., y Young, W. J. (2014b). The changing role of ecohydrological science in guiding environmental flows. *Hydrological Sciences Journal*, 59(3–4), 433–450. <http://dx.doi.org/10.1080/02626667.2014.886019>.
- Arthington, A. H., Bhaduri, A., Bunn, S. E., Jackson, S. E., Tharme, R. E., Tickner, D., Young, B., Acreman, M., Baker, N., Capon, S., Horne, A. C., Kendy, E., McClain, M. E., Poff, N. L., Richter, B. D., y Ward, S. (2018). The Brisbane declaration and global action agenda on environmental flows. *Frontiers in Environmental Science*, 6(45), 1–15. <http://dx.doi.org/10.3389/fenvs.2018.00045>.
- Bunn, S. E., y Arthington, A. H. (2002). Basic principles and ecological consequences of altered flow regimes for aquatic biodiversity. *Environmental Management*, 30, 492–507. <https://doi.org/10.1007/s00267-002-2737-0>.
- Chow, V. T., Maidment, D. R., y Mays, L. W. (1994). *Hidrología aplicada*. McGraw-Hill Interamericana.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2017). Inventario de la red hidrométrica de CONAGUA. Datos abiertos. Recuperado el 12 de junio de 2025, de https://datos.gob.mx/dataset/estaciones_sistema_informacion_hidrologica/resource/3cfc549d-1aa4-4ee0-b4d4-82b21a19136f.
- Davies, S. P., y Jackson, S. K. (2006). The biological condition gradient: A descriptive model for interpreting change in aquatic ecosystems. *Ecological Applications*, 16(54), 1251–1266. [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(2006\)016\[1251:TBCGAD\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(2006)016[1251:TBCGAD]2.0.CO;2).
- European Commission. (2015). *Ecological flows in the implementation of the Water Framework Directive*. Guidance Document No. 31. European Union. Recuperado el 3 de septiembre de 2021, de <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/b2369e0f-d154-11e5-a4b5-01aa75ed71a1/language-en>.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2019). *Incorporating environmental flows into “water stress” indicator 6.4.2—Guidelines for a minimum standard method for global reporting*. Roma. Recuperado el 3 de septiembre de 2021, de <http://www.fao.org/documents/card/es/c/ca3097en/>.
- Herrero, R. (2017). La realización de aforos: un pilar básico de la hidrometría. *Es el agua*. Recuperado el 30 de octubre de 2024, de <http://eselagua.com/2017/04/30/la-realizacion-de-aforos-un-pilar-basico-de-la-hidrometria/>.
- Krabbenhoft, C. A., Allen, G. H., Lin, P., Godsey, S. E., Allen, D. C., Burrows, R. M., DelVecchia, A. G., Fritz, K. M., Shanafield, M. Burgin, A. J., Zimmer, M. A., Datry, T., Dodds, W. K., Jones, C. N., Mims, M. C., Franklin, C., Hammond, J. C., Zipper, S.,

Ward, A. S., Costigan, K. H., Beck, H. E., y Olden, J. D. (2022). Assessing placement bias of the global river gauge network. *Nature Sustainability*, 5, 586–592. <https://doi.org/10.1038/s41893-022-00873-0>.

Manfreda, S., Miglino, D., Saddi, K. C., Jomaa, S., Eltner, A., Perks, M., Peña-Haro, S., Bogaard, T., Van Emmerik, T. H. M., Mariani, S., Maddock, I., Tauro, F., Grimaldi, S., Zeng, Y., Gonçalves, G., Strelnikova, D., Bussettini, M., Marchetti, G., Lastoria, B., Su, Z., y Rode, M. (2024). Advancing river monitoring using image-based techniques: challenges and opportunities. *Hydrological Sciences Journal*, 69(6), 657–677. <https://doi.org/10.1080/02626667.2024.2333846>.

Mathews, R., y Richter, B. (2007). Application of the Indicators of Hydrologic Alteration software in environmental flow setting. *Journal of the American Water Resources Association*, 43(6), 1400–1413. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2007.00099.x>.

Opperman, J. J., Kendy, E., Tharme, R. E., Warner, A. T., Barrios, E., y Richter, B. D. (2018). A three-level framework for assessing and implementing environmental flows. *Frontiers in Environmental Science*, 6(76), 1–13. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2018.00076>.

Poff, N. L. (2018). Beyond the natural flow regime? Broadening the hydro-ecological foundation to meet environmental flow challenges in a non-stationary world. *Freshwater Biology*, 63(8), 1011–1021. <https://doi.org/10.1111/fwb.13038>.

Poff, N. L., Allan, D., Bain, M. B., Karr, J. R., Prestegard, K. L., Richter, B. D., Sparks, R. E., y Stromberg, J. C. (1997). The natural flow regime. *BioScience*, 47(11), 769–784. <https://doi.org/10.2307/1313099>.

Poff, N. L., Tharme, R. E., y Arthington, A. H. (2017). Evolution of environmental flows assessment science, principles, and methodologies. En A. C. Horne, J. A. Webb, M. J. Stewardson, B. Richter, y M. Acreman (eds.), *Water for the environment: From policy and science to implementation and management*. Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803907-6.00011-5>.

Richter, B., Baumgartner, J., Powell, J., y Braun, D. (1996). A method for assessing hydrological alteration within ecosystems. *Conservation Biology*, 10(4), 1163–1174. <https://www.jstor.org/stable/2387152>.

Richter, B., Baumgartner, J., Wigington, R., y Braun, D. (1997). How much water does a river need? *Freshwater Biology*, 37(1), 231–249. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2427.1997.00153.x>.

Richter, B. D., Warner, A. T., Meyer, J. L., y Lutz, K. (2006). A collaborative and adaptive process for developing environmental flow recommendations. *River Research and Applications*, 22(3), 297–318. <https://doi.org/10.1002/rra.892>.

Richter, B. D. (2010). Re-thinking environmental flows: From allocations and reserves to sustainability boundaries. *River Research and Applications*, 26(8), 1052–1063. <https://doi.org/10.1002/rra.1320>.

Richter, B. D., Davis, M. M., Aspe, C., y Konrad, C. (2012). A presumptive standard for environmental flow protection. *River Research and Applications*, 28(8), 1312–1321. <https://doi.org/10.1002/rra.1511>.

Salinas-Rodríguez, S. A., Barba-Macías, E., Infante Mata, D., Nava-López, M. Z., Neri-Flores, I., Domínguez Varela, R., y González Mora, I. D. (2021). What do environmental flows mean for long-term freshwater ecosystems' protection? Assessment of the Mexican Water Reserves for the Environment Program. *Sustainability*, 13(3), 1240. <https://doi.org/10.3390/su13031240>.

Salinas-Rodríguez, S. A., Barrios Ordóñez, E., Sánchez Navarro, R., y Wichel, A. J. (2018). Environmental flows and water reserves: Principles, strategies, and contributions to water and conservation policies in Mexico. *River Research and Applications*, 34(8), 1057–1084. <https://doi.org/10.1002/rra.3334>.

Salinas Rodríguez, S. A., y Martínez Rivera, L. M. (2024). La disponibilidad del agua para el bien común: Monitoreo y evaluación del agua en el ambiente para la gestión sostenible de reservas, su gobernanza y la adaptación al cambio climático. *La Noria Digital*, 15, 5–11. <https://cimav.edu.mx/lanoriadigital/upload/portfolio/LaNoriaDigital15.pdf>.

Salinas-Rodríguez, S. A., y Martínez Pacheco, A. I. (2024). Water reserves for the environment: A strategic and temporal analysis (2012–2022) for the implementation of environmental flows in Mexico. *Diversity*, 16(3), 190. <https://doi.org/10.3390/d16030190>.

Salinas-Rodríguez, S. A., Sánchez Navarro, R., y Barrios Ordóñez, E. (2020). Frequency of occurrence of flow regime components: A hydrology-based approach for environmental flow assessments and water allocation for the environment. *Hydrological Sciences Journal*, 66(2), 193–213. <https://doi.org/10.1080/02626667.2020.1849705>.

Salinas Rodríguez, S. A., Van de Giesen, N. C., y McClain M. E. (2022). Inter-annual and seasonal variability of flows: Delivering climate-smart environmental flow reference values. *Water*, 14(9), 1489. <https://doi.org/10.3390/w14091489>.

APÉNDICES

Apéndice A1. Análisis de alteración del régimen de caudales del río De la Sierra

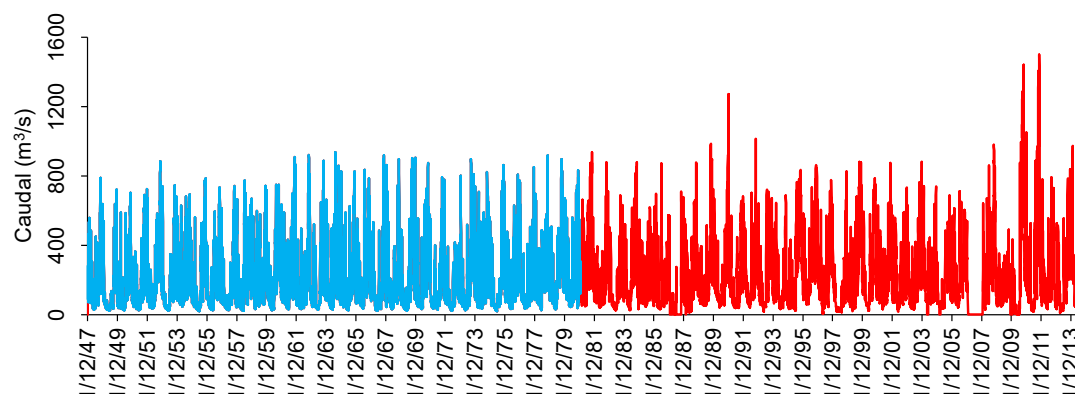


Figura A1.1. Régimen histórico de caudales a escala diaria en la estación hidrométrica Pueblo Nuevo sobre el río De la Sierra (clave 30016). Periodo de referencia 1947–1980 (azul) y de evaluación de alteración al régimen mensual y anual 1981–2014. Fuente: Elaboración propia.

Tabla A1.1. Series de caudales medios mensuales y anuales (m³/s) del río De la Sierra en la estación hidrométrica Pueblo Nuevo (clave 30016) para los periodos de referencia 1947–1980 y evaluación 1981–2014.

m ³ /s	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Prom.
Periodo de referencia													
1947												247	662
1948	195	205	92	42	73	166	194	129	252	407	401	207	517
1949	119	42	42	36	31	60	80	73	318	281	237	52	300
1950	107	135	54	59	39	195	173	174	276	428	137	89	408
1951	92	94	79	48	30	88	221	137	478	340	441	192	490
1952	73	72	47	70	66	203	335	317	422	646	162	279	593
1953	83	57	37	28	39	147	160	113	324	331	255	228	396
1954	150	100	202	88	127	291	286	180	520	300	157	111	551
1955	64	154	59	37	23	66	271	185	376	539	297	162	490
1956	65	43	70	29	155	376	154	118	351	397	212	155	467
1957	124	62	48	43	33	124	128	145	419	242	97	276	382
1958	152	59	56	30	64	396	335	140	323	303	272	344	543
1959	239	45	127	273	81	194	122	135	111	278	441	258	506
1960	189	82	60	50	43	180	359	325	452	339	187	184	539
1961	193	153	110	55	74	168	211	278	196	475	320	77	507
1962	153	53	45	163	64	103	160	171	406	471	170	69	445
1963	135	139	140	41	34	57	233	242	566	285	197	176	492
1964	214	81	54	115	53	299	421	171	333	289	103	356	547
1965	137	169	134	44	50	90	180	191	217	588	190	192	480
1966	213	132	106	77	48	211	327	149	373	447	233	159	543
1967	225	160	72	43	37	160	76	94	230	662	205	215	478
1968	274	159	96	49	61	129	156	109	310	394	189	164	458

Tabla A1.1. Continuación.

m³/s	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Prom.
1969	158	63	41	50	37	104	221	409	633	326	380	152	565
1970	98	156	53	41	102	180	282	360	498	479	324	81	582
1971	57	45	122	76	34	81	139	255	382	259	236	85	389
1972	131	121	49	30	36	148	161	184	215	188	146	279	370
1973	94	112	47	41	83	154	136	433	357	522	224	270	544
1974	89	166	108	177	56	199	274	119	430	508	245	178	558
1975	138	78	61	32	26	82	88	103	426	505	490	109	468
1976	244	172	78	58	68	154	255	186	279	395	383	393	585
1977	126	113	92	50	46	148	81	194	168	199	310	270	394
1978	191	116	127	64	91	264	296	249	334	488	212	223	584
1979	206	126	78	37	67	237	297	284	681	407	255	471	691
1980	134	194	135	85	61	290	168	188	421	332	476	225	592
Prom	147	111	82	65	59	174	212	198	366	395	260	204	503
Periodo de evaluación													
1981	84	303	196	75	85	334	459	497	562	432	198	158	282
1982	131	168	108	66	106	195	120	167	566	460	258	207	213
1983	221	67	51	40	34	131	149	179	435	260	182	179	161
1984	231	133	61	32	131	340	298	336	666	374	132	131	239
1985	176	134	83	129	58	107	246	251	288	223	97	200	166
1986	291	111	101	55	95	377	141	135	147	192	253	206	175
1987		75	80	62	67	107			212	342	199	109	139
1988	273	233	82	54	24	205	153	403	314	507	169	152	214
1989	110	115	70	78	82	167	156	183	572	616	273	325	229
1990	217	165	127	75	64	100	155	108	289	351	486	525	222
1991	169	279	81	62	42	110	154	66	238	459	306	291	188
1992	328	194	104	66	61	299	182	207	282	559	322	221	236
1993	118	111	80	35	49	245	295	330	350	431	287	134	206
1994	287	229	156	139	49	61	65	168	273	345	93	63	161
1995	91	138	79	62	48	309	449	465	631	632	255	236	283
1996	237	123	89	90	176	299	368	403	283	603	459	293	285
1997	152	257	87	65	65	121	216	98	372	528	342	276	215
1998	118	75	23	33	23	22	83	102	175	345	367	126	124
1999	104	166	61	92	46	195	300	244	615	674	377	175	254
2000	209	121	64	45	78	317	149	286	617	605	179	233	242
2001	116	248	93	83	145	139	99	220	325	479	276	186	201
2002	189	386	237	41	52	156	126	77	319	264	387	274	209
2003	167	65	67	87	47	213	163	147	313	453	498	375	216
2004	362	188	80		229	193	118	127	237	308	245	132	202
2005	63		42	52	42	221	301	277	303	254	117	189	169
2006	244	250	104	65	67	342	287	206	275	482	305	272	242
2007													
2008	224	95	111	154	134	449	323	215	537	741	217	71	273
2009	127	122	92	101	109	157	126	169	257	157			142

Tabla A1.1. Continuación.

m³/s	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Prom.
2010	101	49	12	5	3	109	387	854	862	657	293	345	306
2011	167	206	188	30	24	89	482	462	772	1,080	302	127	327
2012	281	140	85	73	142	177	121	398	374	274	53	177	191
2013	265	144	35	29	33	225	240	191	455	428	553	461	255
2014	439	149	109	140	306	334	105	90	297	443	388	141	245
Prom	197	164	92	69	82	207	219	252	400	453	277	218	218

Fuente: Elaboración propia.

Tabla A1.2. Caudales medios mensuales y anuales (m³/s) del río De la Sierra en la estación hidrométrica Pueblo Nuevo (clave 30016) en los periodos de (1) referencia 1947–1980 conforme los percentiles 10 y 90 y (2) evaluación 1981–2014.

m³/s	Referencia		Periodo de evaluación									
Mes	p10	p90	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	...	2014
Ene.	166	264	84	131	221	231	176	291		273	...	439
Feb.	124	240	303	168	67	133	134	111	75	233	...	149
Mar.	64	195	196	108	51	61	83	101	80	82	...	109
Abr.	43	185	75	66	40	32	129	55	62	54	...	140
May.	42	133	85	106	34	131	58	95	67	24	...	306
Jun.	111	264	334	195	131	340	107	377	107	205	...	334
Jul.	146	426	459	120	149	298	246	141		153	...	105
Ago.	171	392	497	167	179	336	251	135		403	...	90
Sep.	246	666	562	566	435	666	288	147	212	314	...	297
Oct.	384	587	432	460	260	374	223	192	342	507	...	443
Nov.	221	414	198	258	182	132	97	253	199	169	...	388
Dic.	155	325	158	207	179	131	200	206	109	152	...	141
Anual	1,225	3,478	3,383	2,553	1,927	2,865	1,994	2,103	1,252	2,566	...	2,941
Prom.	102	290	282	213	161	239	166	175	139	214	...	245

Fuente: Elaboración propia.

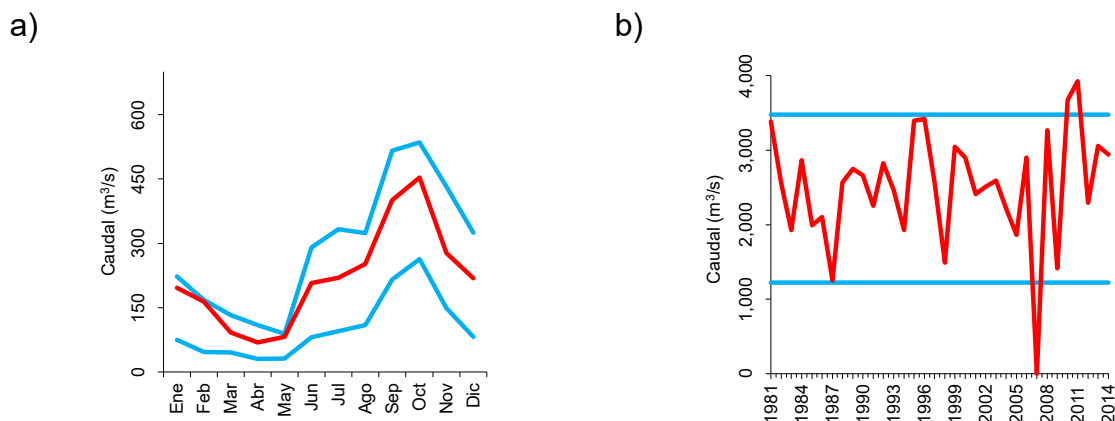


Figura A1.2. Desempeño del régimen de caudales sujeto a evaluación (1981–2014) del río De la Sierra en la estación hidrométrica Pueblo Nuevo (clave 30016) con relación a los límites inferior y superior establecidos conforme al periodo de referencia de 1947–1980 (líneas azules, percentiles 10 y 90, respectivamente). (a) Régimen de caudal medio mensual 1981–2014. (b) Anual (línea roja). Fuente: Elaboración propia.

Tabla A1.3. Síntesis de resultados del análisis de alteración del régimen hidrológico del río De la Sierra en la estación hidrométrica Pueblo Nuevo (clave 30016). Periodo de referencia 1947–1980 (límites inferior y superior conforme a los percentiles 10 y 90), periodo de evaluación 1981–2014. Fuente: Elaboración propia.

Mes m³/s	Límite inferior (p10)	Límite superior (p90)	Caudal medio mensual (1981–2014)	# Meses dentro rango p10–p90	# Meses de evaluación	Porcentaje cumplimiento
Ene.	75	222	197	19	32	59%
Feb.	47	168	164	21	32	66%
Mar.	45	133	92	25	33	76%
Abr.	31	109	69	25	32	78%
May.	32	89	82	19	33	58%
Jun.	81	291	207	21	33	64%
Jul.	95	333	219	25	32	78%
Ago.	110	324	252	17	32	53%
Sep.	216	516	400	20	33	61%
Oct.	263	535	453	19	33	58%
Nov.	149	433	277	23	32	72%
Dic.	82	325	218	25	32	78%
Anual	1,225	3,478	2,632	31	33	94%
Prom.	102	290	219	31	32	96%

Apéndice A2. Rango natural de variabilidad de caudales del río Carrizal

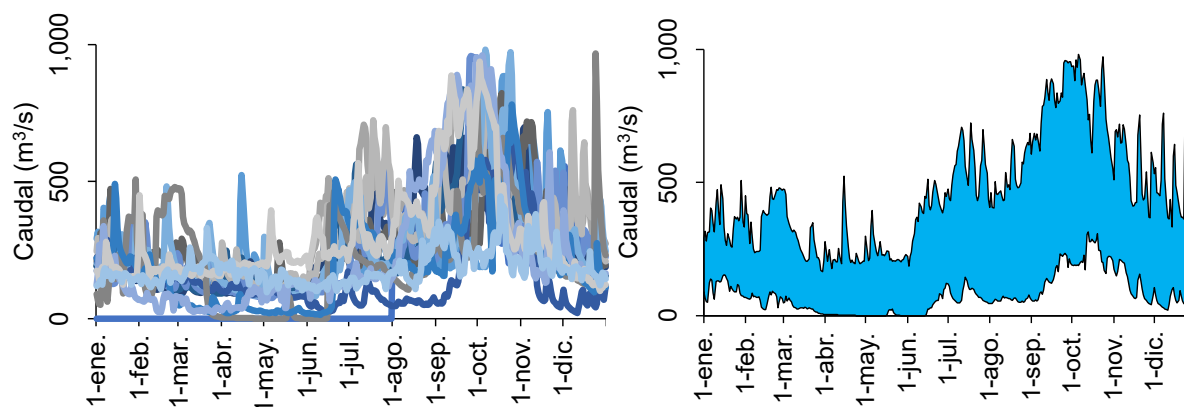


Figura A2.1. Rango de variabilidad del régimen de caudales de 1957–1971 en la estación hidrométrica González (clave 30062) ubicada en el río Carrizal. (a) Regímenes anuales desplegados en el hidrograma. (b) Hidrograma desplegado con base en el modelo del rango de variabilidad de caudales en función de los percentiles 0 y 100. Fuente: Elaboración propia.

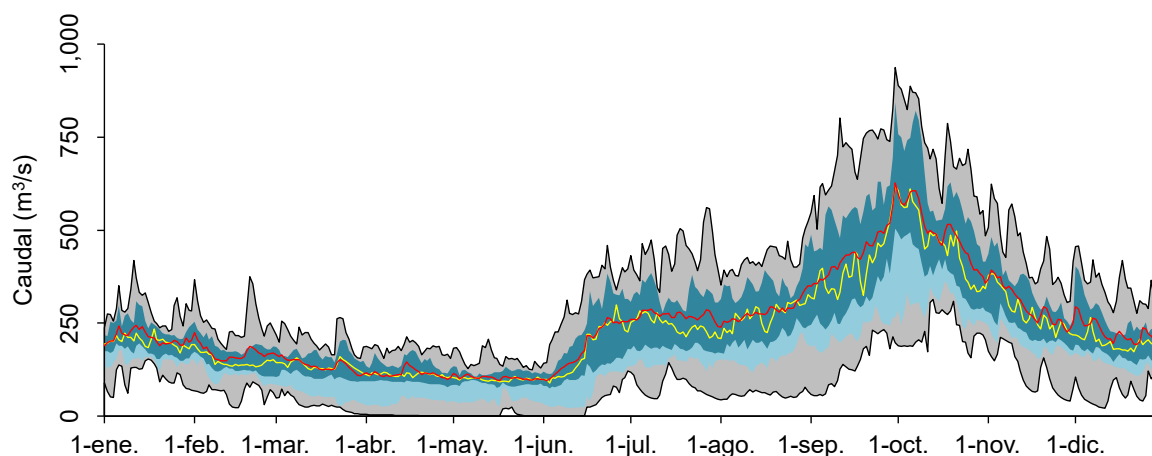


Figura A2.2. Modelo del rango de variabilidad de caudales a escala diaria de 1957–1971 en la estación hidrométrica González (clave 30062) ubicada en el río Carrizal. El área verde oscuro representa el rango de condiciones medias (percentiles 25–75, mediana en línea amarilla y la media en roja), la zona gris el rango de condiciones húmedas (percentil 75–90) y secas (percentil 10–25). El área verde claro representa las condiciones muy secas (percentil 0–10). Fuente: Elaboración propia.

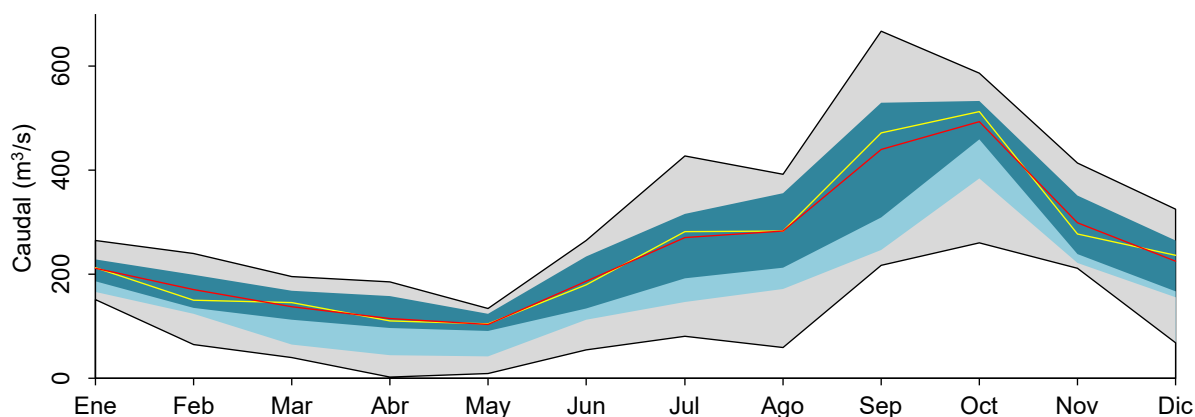


Figura A2.3. Modelo del rango de variabilidad de caudales a escala mensual de 1957–1971 en la estación hidrométrica González (clave 30062) ubicada en el río Carrizal. Comparación de condiciones (muy secas, secas, medias y húmedas) con la mediana (línea amarilla) y la media aritmética (rojo). Fuente: Elaboración propia.

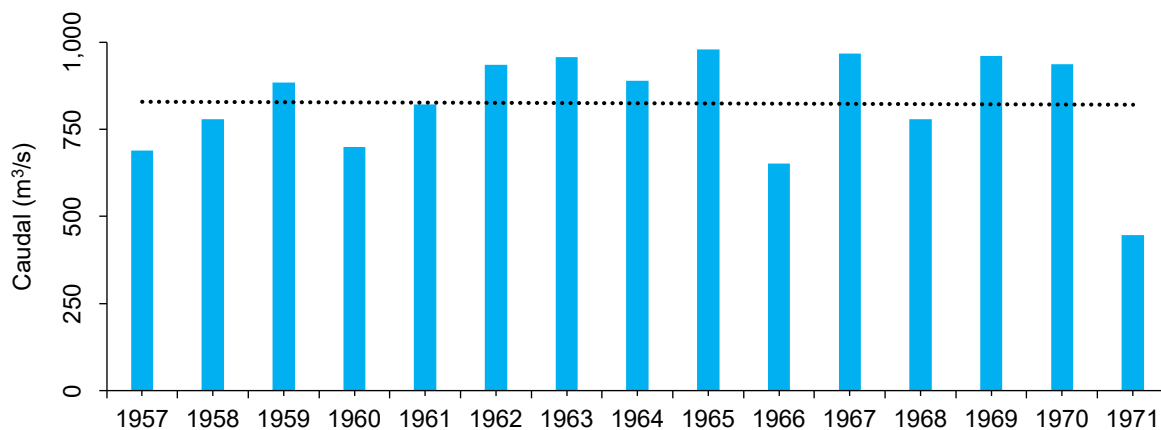


Figura A2.4. Serie de caudales diarios máximos anuales (m^3/s) de 1957 a 1971 en la estación hidrométrica González (clave 30062) ubicada en el río Carrizal. Fuente: Elaboración propia.

Tabla A2.1. Tabla resumen de distribución de eventos extraordinarios con base en el modelo histórico o empírico (observaciones) en la estación hidrométrica González (clave 30062) ubicada en el río Carrizal. En amarillo se resaltan la magnitud de caudales (m^3/s) asociada a 1, 1.5, 5, 10 y 20 años de periodo de retorno.

Id	$Q_{\max}$	$\text{Log}_{\max}$	ARI(T)
1	2.99	16.00	980
2	2.99	8.00	967
3	2.98	5.33	961
4	2.98	4.00	958
5	2.97	3.20	937
6	2.97	2.67	936
7	2.95	2.29	889
8	2.95	2.00	885
9	2.91	1.78	822
10	2.89	1.60	780
11	2.89	1.45	779
12	2.84	1.33	699
13	2.84	1.23	690
14	2.81	1.14	653
15	2.65	1.07	446

Fuente: Elaboración propia.

Tabla A2.2. Tabla resumen de distribución de eventos extraordinarios con base en el modelo de teórico de Gumbel en la estación hidrométrica González (clave 30062) ubicada en el río Carrizal. En amarillo se resaltan la magnitud de caudales (m^3/s) asociada a 1, 1.5, 5, 10 y 20 años de periodo de retorno.

ARI(T)	F(xt)	Z	X	ARI(T)	F(xt)	Z	X
1.01	0.009900099	-2.000919049	521	5.5	0.818181818	1.071222855	989
1.1	0.090909091	-1.35938799	618	6	0.833333333	1.165180634	1,003
1.2	0.166666667	-1.07387623	662	6.5	0.846153846	1.250869742	1,016
1.3	0.230769231	-0.877491183	692	7	0.857142857	1.329634249	1,028
1.4	0.285714286	-0.723252486	715	7.5	0.866666667	1.40251391	1,039
1.5	0.333333333	-0.594599086	735	8	0.875	1.470329882	1,049
1.6	0.375	-0.483483354	752	8.5	0.882352941	1.533742161	1,059
1.7	0.411764706	-0.385294401	767	9	0.888888889	1.593289269	1,068
1.8	0.444444444	-0.297106334	780	9.5	0.894736842	1.649416414	1,077
1.9	0.473684211	-0.216928162	792	10	0.9	1.702495912	1,085
2	0.5	-0.143334391	804	15	0.933333333	2.117334991	1,148
2.5	0.6	0.155719177	849	20	0.95	2.407794679	1,192
3	0.666666667	0.382050221	884	30	0.966666667	2.813535659	1,254
3.5	0.714285714	0.564804664	911	40	0.975	3.099595589	1,298
4	0.75	0.718302296	935	50	0.98	3.320731587	1,331
4.5	0.777777778	0.850725477	955	60	0.983333333	3.501031524	1,359
5	0.8	0.967215351	973	70	0.985714286	3.653252498	1,382

Fuente: Elaboración propia.

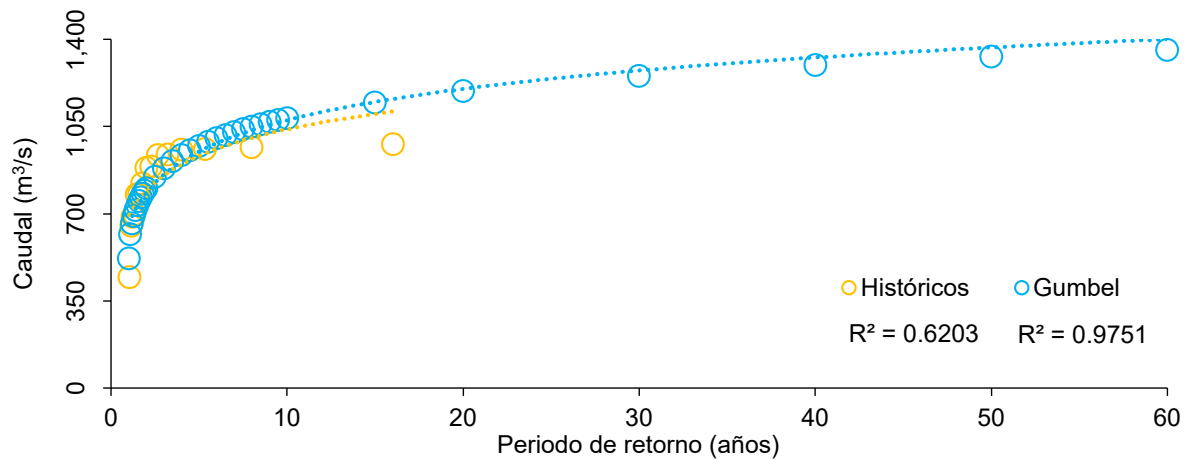


Figura A2.5. Funciones de distribución de caudales extraordinarios (m^3/s) de acuerdo con los modelos histórico o empírico con base en observaciones (1957–1971) y Gumbel (teórico) en la estación hidrométrica González (clave 30062) ubicada en el río Carrizal. Fuente: Elaboración propia.

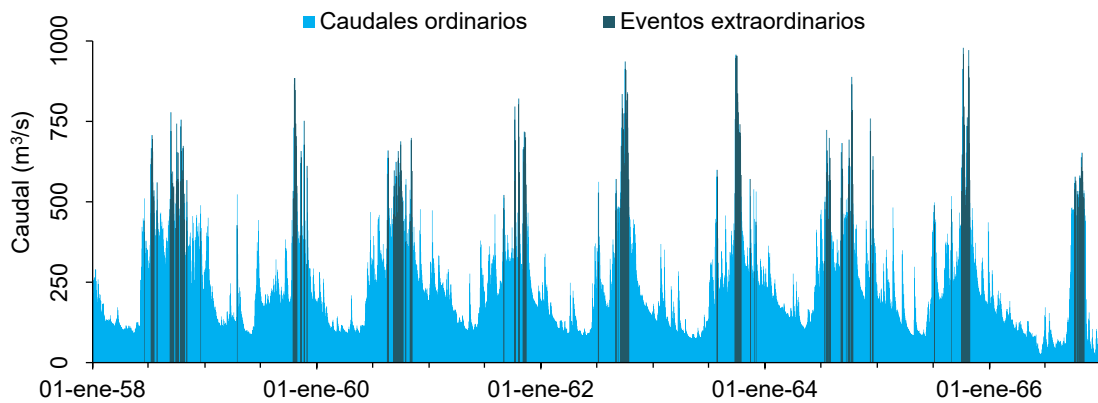


Figura A2.6. Identificación y filtrado de eventos pico o extraordinarios (m^3/s) de la serie de caudales ordinarios en la estación hidrométrica González (clave 30062) ubicada en el río Carrizal. Fuente: Elaboración propia.

Tabla A2.3. Identificación y filtrado de los eventos pico intraanuales (Cat I) en el mes de septiembre de la serie de caudales (m³/s, 1957–1971) en la estación hidrométrica González (clave 30062) ubicada en el río Carrizal.

Fecha	1957	1958	1959	1960	1961	1962	1963	1964	1965	1966	1967	...	1971
1-sep.					513	570						...	
2-sep.						535						...	
3-sep.								513				...	
4-sep.								655				...	
5-sep.								682				...	
6-sep.	583			516				603				...	
7-sep.	592			549		487		579				...	
8-sep.	603			598				509				...	
9-sep.	563	509		545								...	
10-sep.	530	720										...	
11-sep.	504	779										...	
12-sep.	523	587		557								...	
13-sep.	541	521		624								...	
14-sep.	625	509		580								...	
15-sep.	600	538		576		508						...	
16-sep.	604	595		531		529						...	
17-sep.	556	558				594						...	
18-sep.	514	516				674						...	
19-sep.	556	544		520		731						...	
20-sep.	555	548		628		836		507				...	
21-sep.	539	498		658		775						...	
22-sep.				637		791						...	
23-sep.				593		775	527					...	
24-sep.				548		725	758					...	
25-sep.				541		718	948					...	
26-sep.				584		648	958	512				...	
27-sep.		495		621		612	954	556				...	
28-sep.	563	525		688		621	948	613				...	
29-sep.	585	565		677		776	953	693				...	
30-sep.	618	742		597		914	954	636	533		895	...	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla A2.4. Conteo de días en los que se presentaron caudales que igualaron o superaron la avenida intraanual (Cat I) por mes y año de la serie de análisis (1957–1971) en la estación hidrométrica González (clave 30062) ubicada en el río Carrizal.

Mes	1957	1958	1959	1960	1961	1962	1963	1964	1965	1966	1967	...	1971
Ene.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	...	0
Feb.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	...	0
Mar.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	...	0
Abr.	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	...	0
May.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	...	0
Jun.	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	...	0
Jul.	0	14	0	0	0	2	3	13	2	0	0	...	0
Ago.	0	0	0	4	1	1	0	0	1	0	0	...	0
Sep.	19	17	0	21	1	19	8	12	1	0	1	...	0
Oct.	4	21	14	9	11	12	14	9	28	25	13	...	0
Nov.	0	2	10	5	11	0	3	0	0	4	0	...	0
Dic.	2	1	0	0	0	0	1	6	0	0	3	...	0
Total	25	56	25	39	24	34	29	40	32	29	18	...	0

Fuente: Elaboración propia.

Tabla A2.5. Número de eventos a lo largo de cada año y conteo de días consecutivos en los que igualaron o superaron la avenida intraanual (Cat I, 1957–1971) en la estación hidrométrica González (clave 30062) ubicada en el río Carrizal.

#Eventos	1957	1958	1959	1960	1961	1962	1963	1964	1965	1966	...	1971
1	212	13	14	17	11	28	22	8	29	19	...	
2	16	12	5	5	6	3	3	6	2	6	...	
3	7	12	3	5	5	2	2	6	1	4	...	
4	1	11	2	4	2	1	1	6			...	
5	1	2	1	4			1	5			...	
6		2		2				3			...	
7		2		1				3			...	
8		1		1				2			...	
9		1						1				

Fuente: Elaboración propia.

Tabla A2.6. Momento característico del año en el que ocurre el régimen de avenidas según la serie de análisis (1957–1971) y de acuerdo con la tipificación establecida de eventos intraanuales, de baja, media y gran magnitud, así como excepcionales (Cat I, II, III, IV y V) en la estación hidrométrica González (clave 30062) ubicada en el río Carrizal.

Mes	Cat I 1 año Pr		Cat II 1.5 años Pr		Cat III 5 años Pr		Cat IV 10 años Pr		Cat V 20 años Pr		Todas las categorías	
	#Días	%	#Días	%	#Días	%	#Días	%	#Días	%	#Días	%
Ene.	2	0.4	0	0.0	0	0.0	La serie de 1957–1971 no presenta eventos extraordinarios en estas magnitudes; sin embargo, en 1999 se presentó un evento de 1,310 m ³ /s, por lo que se sugiere mantener los eventos en el mismo momento que la categoría III a 5 años de periodo de retorno				2	0.3
Feb.	0	0.0	0	0.0	0	0.0					0	0.0
Mar.	0	0.0	0	0.0	0	0.0					0	0.0
Abr.	1	0.2	0	0.0	0	0.0					1	0.2
May.	0	0.0	0	0.0	0	0.0					0	0.0
Jun.	3	0.6	0	0.0	0	0.0					3	0.5
Jul.	36	7.3	0	0.0	0	0.0					36	6.1
Ago.	21	4.2	0	0.0	0	0.0					21	3.5
Sep.	164	33.1	43	44.3	0	0.0					207	34.8
Oct.	219	44.2	52	53.6	2	100.0					273	45.9
Nov.	37	7.5	0	0.0	0	0.0					37	6.2
Dic.	13	2.6	2	2.1	0	0.0					15	2.5
Total	496	100.0	97	100.0	2	100.0					595	100.0

Fuente: Elaboración propia.

Tabla A2.7. Duración característica en número de días consecutivos en el que ocurre el régimen de avenidas según la serie de análisis (1957–1971) y de acuerdo con la tipificación establecida de eventos intraanuales, de baja, media y gran magnitud, así como excepcionales (Cat I, II, III, IV y V) en la estación hidrométrica González (clave 30062) ubicada en el río Carrizal.

Duración (#días)	Cat I		Cat II		Cat III		Cat IV		Cat V		Todas las Categorías	
	#Evnt	%	#Evnt	%	#Evnt	%	#Evnt	%	#Evnt	%	#Evnt	%
1	20	27	5	24	2	67	La serie de 1957-1971 no presenta eventos extraordinarios en estas magnitudes; sin embargo, en 1999 se presentó un evento de 1,310 m ³ /s, por lo que se sugiere mantener los eventos con la misma duración que la categoría III a 5 años de periodo de retorno				27	27
2	13	17	2	10	0	0					15	15
3	7	9	1	5	0	0					8	8
4	5	7	4	19	0	0					9	9
5	5	7	3	14	0	0					8	8
6	5	7	1	5	0	0					6	6
7	2	3	0	0	0	0					2	2
8	1	1	0	0	0	0					1	1
9	0	0	1	5	0	0					1	1
10	0	0	1	5	0	0					1	1
11	2	3	1	5	0	0					3	3
12	3	4	0	0	0	0					3	3
13	2	3	0	0	0	0					2	2
14	1	1	0	0	0	0					1	1
>15	9	12	2	10	1	5					12	12
Total	75	100	21	100	3	71					99	100

Fuente: Elaboración propia.

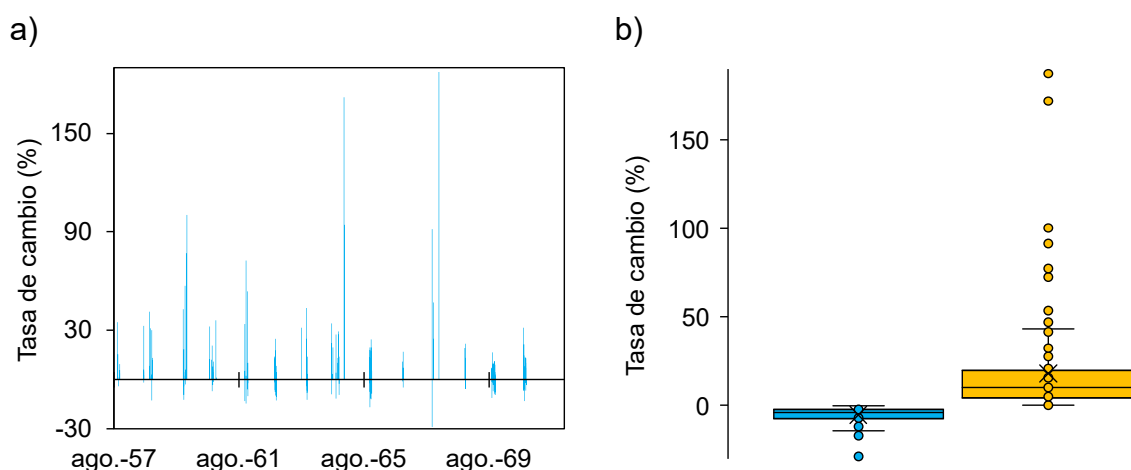


Figura A2.7. Tasa de cambio de (a) los eventos pico o extraordinarios y (b) gráficas de cajas (boxplots) tanto de ascenso (naranja) como descenso (azul) según los datos de la serie de análisis (1957–1971) en la estación hidrométrica González (clave 30062) ubicada en el río Carrizal. Fuente: Elaboración propia.

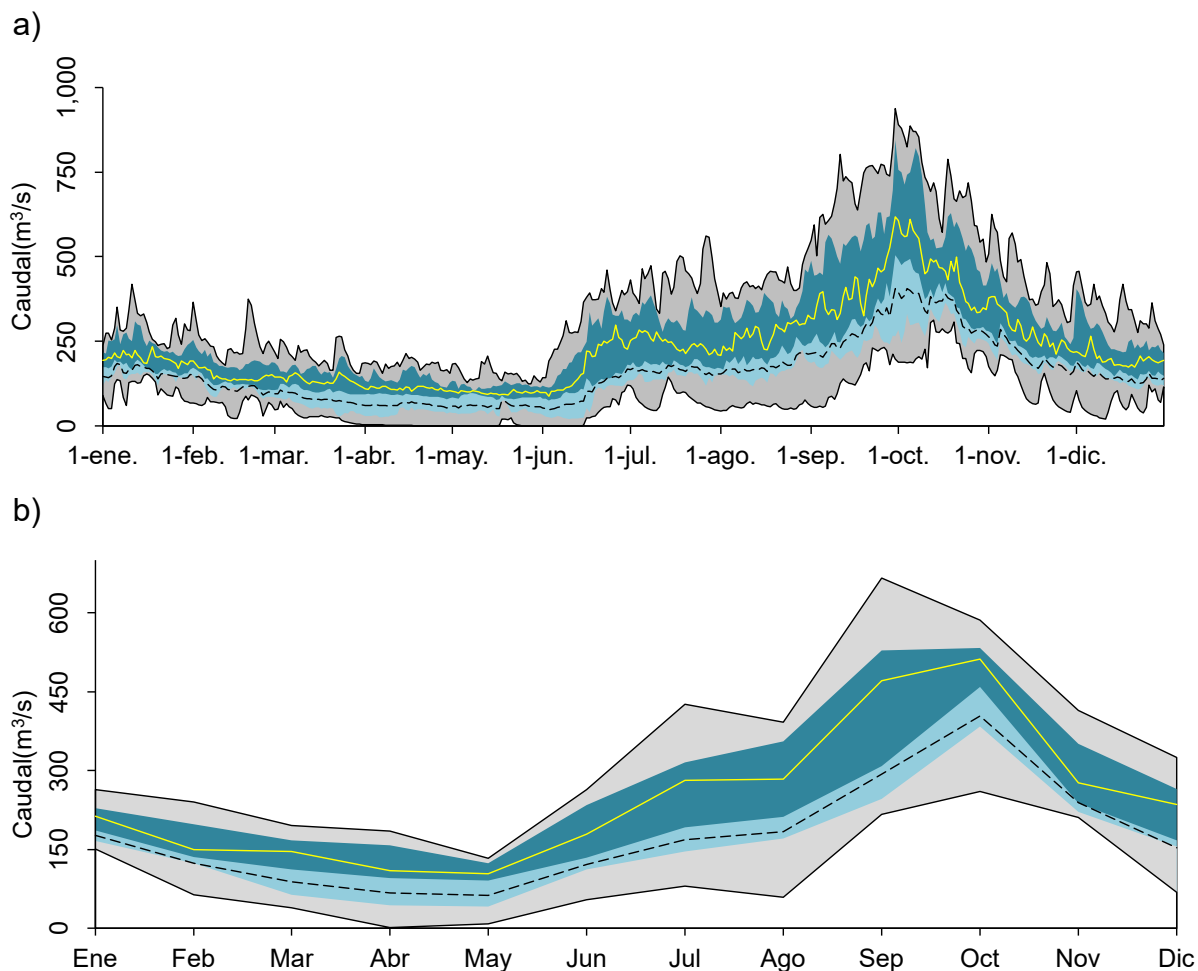


Figura A2.8. Caudales ordinarios estacionales para condiciones hidrológicas muy secas (gris inferior), secas (verde claro), medias (verde oscuro) y húmedas (gris superior) a escala diaria (a) y mensual (b) en el río Carrizal (estación hidrométrica González, clave 30062). El caudal ordinario integrado (línea negra punteada) conforme a las frecuencias de ocurrencia para un objetivo ambiental “A” se muestra para efectos comparativos con la mediana (línea amarilla). Fuente: Elaboración propia.

Tabla A2.8. Volúmenes mensuales y anuales en millones de metros cúbicos (Hm^3) para la asignación de agua para protección ecológica por condición hidrológica de caudales ordinarios estacionales en el río Carrizal (estación hidrométrica González, clave 30062). Escurrimiento medio anual (EMA) de 7,794 Hm^3 (1957–1971).

	Condición hidrológica anual				Reserva de agua por objetivo ambiental			
	Húmeda	Media	Seca	Muy seca	A	B	C	D
Ene.	612	497	444	403	474	438	419	403
Feb.	479	326	299	154	299	247	212	154
Mar.	449	301	171	105	237	170	131	105
Abr.	410	248	113	4	175	96	48	4
May.	331	243	112	22	168	102	58	22
Jun.	606	347	289	140	314	241	200	140
Jul.	846	514	392	213	451	345	285	213
Ago.	953	569	458	157	492	360	277	157
Sep.	1,371	799	638	561	760	640	592	561

Tabla A2.8. Continuación.

	Condición hidrológica anual				Reserva de agua por objetivo ambiental			
	Húmeda	Media	Seca	Muy seca	A	B	C	D
Oct.	1,428	1,228	1,028	695	1,082	935	828	695
Nov.	911	617	573	547	619	571	557	547
Dic.	710	447	415	182	410	328	275	182
Total	9,105	6,135	4,931	3,184	5,481	4,473	3,883	3,184
% EMA	117	79	63	41	70	57	50	41

Fuente: Elaboración propia.

Tabla A2.9. Atributos del régimen de inundaciones y volúmenes correspondientes para integrar la reserva de agua para protección ecológica en el río Carrizal (estación hidrométrica González, clave 30062).

Atributo	Unidad	Cat I	Cat II	Cat III	Cat IV	Cat V
Magnitud	m³/s	485	760	970	1,030	1,090
	Hm³/día	41.9	65.7	83.8	89.0	94.5
Frecuencia	Periodo de retorno	1	1.5	5	10	20
Duración	#días			7		
Momento	Meses		Agosto – Noviembre			
Tasa de cambio	Ascenso (%)			35		
	Descenso %			-12		
Reserva de agua por objetivo ambiental	"A"		781.7 ; 10.0			
	"B"		530.1 ; 6.8			
(Hm³/año; % EMA)	"C"		333.8 ; 4.3			
	"D"		258.6 ; 3.3			

Fuente: Elaboración propia.

Tabla A2.10. Volúmenes de la reserva de agua para protección ecológica en el río Carrizal (estación hidrométrica González, clave 30062) considerando tanto el componente de caudales ordinarios estacionales como el régimen de avenidas y su proporción con relación al escurrimiento medio anual (EMA).

Objetivo ambiental	A	B	C	D
Total (Hm³/año)	6,262.4	5,003.2	4,216.8	3,443.0
%EMA	80.4	64.2	54.1	44.2

Fuente: Elaboración propia.

Apéndice A3. Parámetros para calcular caudales unitarios en la sección mojada

Tabla A3.1. Parámetros hidráulicos por punto de muestreo del perfil transversal completo del río Carrizal. Distancia total = 147.57 m, profundidad media = 6.83 m, profundidad máxima = 8.32 m, perímetro = 151.35 m y área = 909.97 m².

Id	Distancia desde el inicio (m)	Profundidad (m)	Profundidad media entre dos puntos continuos (m)	Ancho entre puntos (m)	Perímetro (m)	Área (m ²)
1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	3.98	0.20	0.10	3.98	3.99	0.40
3	11.76	1.16	0.68	7.78	7.84	5.29
4	14.22	3.32	2.24	2.46	3.27	5.50
5	16.74	4.10	3.71	2.52	2.64	9.37
6	18.94	5.28	4.69	2.20	2.49	10.29
7	21.72	6.52	5.90	2.78	3.05	16.41
8	23.75	6.61	6.57	2.03	2.04	13.35
9	23.93	6.77	6.69	0.18	0.24	1.18
10	24.44	7.03	6.90	0.51	0.57	3.52
11	25.21	7.51	7.27	0.77	0.90	5.57
12	26.10	7.69	7.60	0.90	0.91	6.82
13	27.00	7.87	7.78	0.90	0.91	6.97
14	27.80	8.32	8.10	0.80	0.92	6.45
15	28.59	8.20	8.26	0.80	0.81	6.58
16	30.12	8.32	8.26	1.53	1.54	12.65
17	31.28	8.20	8.26	1.16	1.17	9.59
18	32.10	8.32	8.26	0.82	0.83	6.76
19	32.92	8.32	8.32	0.82	0.82	6.81
20	34.45	8.32	8.32	1.53	1.53	12.74
21	35.10	8.32	8.32	0.64	0.64	5.37
22	35.75	8.32	8.32	0.66	0.66	5.46
23	37.42	8.20	8.26	1.67	1.67	13.79
24	38.41	8.20	8.20	0.99	0.99	8.10
25	39.53	8.08	8.14	1.12	1.13	9.12
26	40.69	7.96	8.02	1.16	1.17	9.31
27	42.25	7.96	7.96	1.56	1.56	12.45
28	43.42	7.81	7.89	1.16	1.17	9.16
29	44.64	7.57	7.69	1.23	1.25	9.43
30	45.46	7.57	7.57	0.82	0.82	6.19
31	46.52	7.51	7.54	1.06	1.06	8.02
32	49.96	7.39	7.45	3.44	3.44	25.62
33	51.02	7.27	7.33	1.06	1.07	7.79
34	52.34	7.21	7.24	1.31	1.31	9.50
35	53.56	7.21	7.21	1.23	1.23	8.85
36	54.72	7.15	7.18	1.16	1.16	8.34
37	55.79	7.21	7.18	1.06	1.07	7.64
38	56.77	7.21	7.21	0.99	0.99	7.12

Tabla A3.1. Continuación.

Id	Distancia desde el inicio (m)	Profundidad (m)	Profundidad media entre dos puntos continuos (m)	Ancho entre puntos (m)	Perímetro (m)	Área (m²)
39	57.84	7.15	7.18	1.06	1.06	7.63
40	58.83	7.21	7.18	0.99	0.99	7.10
41	60.05	7.09	7.15	1.23	1.23	8.77
42	62.10	7.15	7.12	2.04	2.04	14.55
43	63.08	7.09	7.12	0.99	0.99	7.03
44	64.24	7.15	7.12	1.16	1.16	8.27
45	65.41	7.21	7.18	1.16	1.16	8.34
46	69.74	7.09	7.15	4.33	4.33	30.98
47	70.86	7.09	7.09	1.12	1.12	7.95
48	71.80	7.03	7.06	0.94	0.94	6.63
49	72.96	6.97	7.00	1.16	1.16	8.13
50	73.90	7.03	7.00	0.94	0.94	6.58
51	74.88	7.03	7.03	0.99	0.99	6.94
52	75.87	7.03	7.03	0.99	0.99	6.94
53	76.69	7.03	7.03	0.82	0.82	5.75
54	77.68	7.03	7.03	0.99	0.99	6.94
55	79.48	7.09	7.06	1.80	1.80	12.74
56	81.00	7.03	7.06	1.52	1.52	10.72
57	81.98	6.97	7.00	0.99	0.99	6.91
58	82.74	7.03	7.00	0.76	0.76	5.31
59	83.56	6.97	7.00	0.82	0.82	5.72
60	84.38	7.03	7.00	0.82	0.82	5.73
61	85.29	6.97	7.00	0.91	0.91	6.36
62	86.10	6.97	6.97	0.82	0.82	5.69
63	87.17	7.03	7.00	1.06	1.07	7.45
64	89.45	7.09	7.06	2.29	2.29	16.16
65	90.27	7.03	7.06	0.82	0.82	5.78
66	91.09	7.03	7.03	0.82	0.82	5.75
67	91.91	7.03	7.03	0.82	0.82	5.75
68	93.22	6.97	7.00	1.31	1.31	9.19
69	93.87	6.97	6.97	0.66	0.66	4.57
70	95.75	7.03	7.00	1.88	1.88	13.16
71	96.66	7.03	7.03	0.91	0.91	6.39
72	97.48	7.03	7.03	0.82	0.82	5.75
73	98.14	7.03	7.03	0.66	0.66	4.61
74	98.95	7.09	7.06	0.82	0.82	5.78
75	99.94	7.09	7.09	0.99	0.99	7.00
76	101.66	7.03	7.06	1.72	1.72	12.14
77	102.57	7.03	7.03	0.91	0.91	6.38
78	103.56	6.97	7.00	0.99	0.99	6.92
79	104.37	7.00	6.99	0.82	0.82	5.71

Tabla A3.1. Continuación.

Id	Distancia desde el inicio (m)	Profundidad (m)	Profundidad media entre dos puntos continuos (m)	Ancho entre puntos (m)	Perímetro (m)	Área (m ²)
80	105.13	6.91	6.96	0.76	0.76	5.28
81	105.89	6.91	6.91	0.76	0.76	5.24
82	106.65	6.83	6.87	0.76	0.76	5.21
83	107.47	6.97	6.90	0.82	0.83	5.64
84	108.45	6.91	6.94	0.99	0.99	6.85
85	110.26	6.85	6.88	1.80	1.80	12.41
86	111.24	6.85	6.85	0.99	0.99	6.77
87	112.06	6.91	6.88	0.82	0.82	5.62
88	112.88	6.97	6.94	0.82	0.82	5.68
89	113.94	6.97	6.97	1.06	1.06	7.41
90	114.45	7.03	7.00	0.51	0.51	3.58
91	115.52	7.15	7.09	1.06	1.07	7.54
92	116.58	7.09	7.12	1.06	1.06	7.57
93	117.73	7.03	7.06	1.15	1.15	8.13
94	118.72	7.09	7.06	0.99	0.99	6.97
95	119.70	7.03	7.06	0.99	0.99	6.98
96	120.64	7.09	7.06	0.94	0.94	6.63
97	121.58	7.03	7.06	0.94	0.94	6.63
98	122.52	6.97	7.00	0.94	0.94	6.58
99	123.28	7.03	7.00	0.76	0.76	5.31
100	124.22	6.97	7.00	0.94	0.94	6.58
101	124.95	7.03	7.00	0.74	0.74	5.16
102	125.89	6.97	7.00	0.94	0.94	6.58
103	127.00	7.03	7.00	1.11	1.11	7.75
104	129.60	7.09	7.06	2.61	2.61	18.40
105	130.18	6.97	7.03	0.58	0.59	4.08
106	130.74	6.81	6.89	0.55	0.58	3.81
107	131.25	6.79	6.80	0.51	0.51	3.47
108	136.22	6.41	6.60	4.97	4.99	32.84
109	137.30	6.16	6.29	1.08	1.11	6.80
110	140.96	3.04	4.60	3.66	4.81	16.83
111	143.42	2.09	2.57	2.46	2.64	6.31
112	145.13	1.33	1.71	1.70	1.87	2.91
113	147.57	0.94	1.13	2.44	2.48	2.77

Fuente: Elaboración propia.

Tabla A3.2. Parámetros hidráulicos por punto de muestreo de la sección mojada del río Carrizal. Distancia total = 107.50 m, profundidad media = 0.89 m, profundidad máxima = 1.97, perímetro = 108.15 m, área = 98.12 m², velocidad media = 0.49 m/s y caudal = 47.96 m³/s.

Id	Distancia desde el inicio (m)	Prof. (m)	Prof. media en puntos continuos (m)	Ancho entre puntos (m)	Perímetro (m)	Área (m ²)	Vel. media (m/s)	Caudal (m ³ /s)
1	0.00	0.26					0.31	
2	0.18	0.42	0.34	0.18	0.24	0.06	0.83	0.05
3	0.69	0.68	0.55	0.51	0.57	0.28	0.05	0.01
4	1.45	1.16	0.92	0.77	0.90	0.70	0.21	0.15
5	2.35	1.34	1.25	0.90	0.91	1.12	0.10	0.11
6	3.25	1.52	1.43	0.90	0.91	1.28	0.19	0.24
7	4.04	1.97	1.75	0.80	0.92	1.39	0.23	0.32
8	4.84	1.85	1.91	0.80	0.81	1.52	0.20	0.30
9	6.37	1.97	1.91	1.53	1.54	2.92	0.33	0.95
10	7.53	1.85	1.91	1.16	1.17	2.22	0.30	0.65
11	8.35	1.97	1.91	0.82	0.83	1.56	0.53	0.83
12	9.17	1.97	1.97	0.82	0.82	1.61	0.65	1.04
13	10.70	1.97	1.97	1.53	1.53	3.02	0.67	2.02
14	11.34	1.97	1.97	0.64	0.64	1.27	0.35	0.45
15	12.00	1.97	1.97	0.66	0.66	1.29	0.53	0.69
16	13.67	1.85	1.91	1.67	1.67	3.19	0.59	1.88
17	14.66	1.85	1.85	0.99	0.99	1.83	0.56	1.01
18	15.78	1.73	1.79	1.12	1.13	2.01	0.54	1.08
19	16.94	1.61	1.67	1.16	1.17	1.94	0.52	1.01
20	18.50	1.61	1.61	1.56	1.56	2.52	0.51	1.28
21	19.66	1.46	1.54	1.16	1.17	1.78	0.55	0.98
22	20.89	1.22	1.34	1.23	1.25	1.64	0.49	0.81
23	21.71	1.22	1.22	0.82	0.82	1.00	0.53	0.53
24	22.77	1.16	1.19	1.06	1.06	1.26	0.49	0.62
25	26.21	1.04	1.10	3.44	3.44	3.78	0.54	2.03
26	27.27	0.92	0.98	1.06	1.07	1.04	0.52	0.54
27	28.58	0.86	0.89	1.31	1.31	1.17	0.59	0.69
28	29.81	0.86	0.86	1.23	1.23	1.05	0.48	0.50
29	30.97	0.8	0.83	1.16	1.16	0.96	0.49	0.48
30	32.03	0.86	0.83	1.06	1.07	0.88	0.63	0.56
31	33.02	0.86	0.86	0.99	0.99	0.85	0.58	0.49
32	34.08	0.8	0.83	1.06	1.06	0.88	0.52	0.46
33	35.07	0.86	0.83	0.99	0.99	0.82	0.55	0.45
34	36.30	0.74	0.80	1.23	1.23	0.98	0.52	0.51
35	38.34	0.8	0.77	2.04	2.04	1.57	0.54	0.84
36	39.33	0.74	0.77	0.99	0.99	0.76	0.62	0.47
37	40.49	0.8	0.77	1.16	1.16	0.89	0.60	0.53
38	41.65	0.86	0.83	1.16	1.16	0.96	0.47	0.46
39	45.98	0.74	0.80	4.33	4.33	3.47	0.53	1.83

Tabla A3.2. Continuación.

Id	Distancia desde el inicio (m)	Prof. (m)	Prof. media en puntos continuos (m)	Ancho entre puntos (m)	Perímetro (m)	Área (m²)	Vel. media (m/s)	Caudal (m³/s)
40	47.10	0.74	0.74	1.12	1.12	0.83	0.46	0.38
41	48.04	0.68	0.71	0.94	0.94	0.67	0.41	0.27
42	49.20	0.62	0.65	1.16	1.16	0.75	0.54	0.41
43	50.14	0.68	0.65	0.94	0.94	0.61	0.53	0.33
44	51.13	0.68	0.68	0.99	0.99	0.67	0.59	0.40
45	52.12	0.68	0.68	0.99	0.99	0.67	0.48	0.32
46	52.94	0.68	0.68	0.82	0.82	0.56	0.51	0.29
47	53.92	0.68	0.68	0.99	0.99	0.67	0.47	0.32
48	55.73	0.74	0.71	1.80	1.80	1.28	0.40	0.52
49	57.24	0.68	0.71	1.52	1.52	1.08	0.55	0.59
50	58.23	0.62	0.65	0.99	0.99	0.64	0.58	0.37
51	58.99	0.68	0.65	0.76	0.76	0.49	0.56	0.27
52	59.81	0.62	0.65	0.82	0.82	0.53	0.55	0.29
53	60.62	0.68	0.65	0.82	0.82	0.53	0.55	0.29
54	61.53	0.62	0.65	0.91	0.91	0.59	0.52	0.31
55	62.35	0.62	0.62	0.82	0.82	0.51	0.59	0.30
56	63.41	0.68	0.65	1.06	1.07	0.69	0.49	0.34
57	65.70	0.74	0.71	2.29	2.29	1.62	0.42	0.68
58	66.52	0.68	0.71	0.82	0.82	0.58	0.47	0.27
59	67.34	0.68	0.68	0.82	0.82	0.56	0.57	0.32
60	68.15	0.68	0.68	0.82	0.82	0.56	0.60	0.34
61	69.47	0.62	0.65	1.31	1.31	0.85	0.57	0.48
62	70.12	0.62	0.62	0.66	0.66	0.41	0.54	0.22
63	72.00	0.68	0.65	1.88	1.88	1.22	0.50	0.61
64	72.91	0.68	0.68	0.91	0.91	0.62	0.46	0.28
65	73.73	0.68	0.68	0.82	0.82	0.56	0.51	0.28
66	74.38	0.68	0.68	0.66	0.66	0.45	0.52	0.23
67	75.20	0.74	0.71	0.82	0.82	0.58	0.58	0.34
68	76.19	0.74	0.74	0.99	0.99	0.73	0.41	0.30
69	77.91	0.68	0.71	1.72	1.72	1.22	0.45	0.56
70	78.81	0.68	0.68	0.91	0.91	0.62	0.62	0.38
71	79.80	0.62	0.65	0.99	0.99	0.64	0.54	0.35
72	80.62	0.65	0.64	0.82	0.82	0.52	0.55	0.28
73	81.38	0.56	0.61	0.76	0.76	0.46	0.56	0.26
74	82.14	0.56	0.56	0.76	0.76	0.42	0.54	0.23
75	82.89	0.48	0.52	0.76	0.76	0.39	0.54	0.21
76	83.71	0.62	0.55	0.82	0.83	0.45	0.51	0.23
77	84.70	0.56	0.59	0.99	0.99	0.58	0.48	0.28
78	86.50	0.5	0.53	1.80	1.80	0.96	0.42	0.40
79	87.49	0.5	0.50	0.99	0.99	0.49	0.54	0.27

Tabla. A3.2. Continuación.

Id	Distancia desde el inicio (m)	Prof. (m)	Prof. media en puntos continuos (m)	Ancho entre puntos (m)	Perímetro (m)	Área (m ²)	Vel. media (m/s)	Caudal (m ³ /s)
80	88.31	0.56	0.53	0.82	0.82	0.43	0.51	0.22
81	89.13	0.62	0.59	0.82	0.82	0.48	0.44	0.21
82	90.19	0.62	0.62	1.06	1.06	0.66	0.51	0.34
83	90.70	0.68	0.65	0.51	0.51	0.33	0.72	0.24
84	91.76	0.8	0.74	1.06	1.07	0.79	0.45	0.36
85	92.83	0.74	0.77	1.06	1.06	0.82	0.39	0.32
86	93.98	0.68	0.71	1.15	1.15	0.82	0.55	0.45
87	94.96	0.74	0.71	0.99	0.99	0.70	0.44	0.31
88	95.95	0.68	0.71	0.99	0.99	0.70	0.46	0.32
89	96.89	0.74	0.71	0.94	0.94	0.67	0.43	0.29
90	97.83	0.68	0.71	0.94	0.94	0.67	0.40	0.27
91	98.77	0.62	0.65	0.94	0.94	0.61	0.60	0.37
92	99.52	0.68	0.65	0.76	0.76	0.49	0.56	0.28
93	100.46	0.62	0.65	0.94	0.94	0.61	0.42	0.26
94	101.20	0.68	0.65	0.74	0.74	0.48	0.61	0.29
95	102.14	0.62	0.65	0.94	0.94	0.61	0.36	0.22
96	103.25	0.68	0.65	1.11	1.11	0.72	0.40	0.29
97	105.85	0.74	0.71	2.61	2.61	1.85	0.52	0.95
98	106.43	0.62	0.68	0.58	0.59	0.39	0.39	0.15
99	106.99	0.46	0.54	0.55	0.58	0.30	0.26	0.08
100	107.50	0.44	0.45	0.51	0.51	0.23	0.27	0.06

Fuente: Elaboración propia.

Tabla A3.3. Parámetros hidráulicos por punto de muestreo del perfil transversal completo del río De la Sierra. Distancia total = 93.93 m, profundidad media = 7.12 m, profundidad máxima = 8.50 m, perímetro = 99.27 m y área = 582.29 m².

Id	Dist. desde inicio (m)	Prof. (m)	Prof. media en puntos continuos (m)	Ancho entre puntos (m)	Perímetro (m)	Área (m ²)
1	0.0	0.24				
2	2.60	1.86	1.05	2.60	3.06	2.72
3	9.38	4.58	3.22	6.78	7.31	21.84
4	11.04	5.80	5.19	1.66	2.06	8.64
5	11.30	6.10	5.95	0.25	0.39	1.52
6	12.06	6.58	6.34	0.76	0.90	4.82
7	12.66	7.06	6.82	0.60	0.77	4.12
8	13.34	7.30	7.18	0.69	0.73	4.92
9	14.25	7.54	7.42	0.91	0.94	6.73
10	15.24	7.54	7.54	0.99	0.99	7.47
11	16.26	7.54	7.54	1.02	1.02	7.67

Tabla A3.3. Continuación.

Id	Dist. desde inicio (m)	Prof. (m)	Prof. media en puntos continuos (m)	Ancho entre puntos (m)	Perímetro (m)	Área (m ²)
12	17.41	7.54	7.54	1.15	1.15	8.65
13	18.42	7.54	7.54	1.01	1.01	7.62
14	19.42	7.54	7.54	1.01	1.01	7.60
15	20.33	7.54	7.54	0.90	0.90	6.81
16	21.05	7.54	7.54	0.72	0.72	5.42
17	21.89	7.78	7.66	0.85	0.88	6.48
18	22.94	7.54	7.66	1.05	1.07	8.03
19	23.74	7.54	7.54	0.80	0.80	6.04
20	24.55	7.78	7.66	0.82	0.85	6.25
21	25.37	7.78	7.78	0.81	0.81	6.31
22	26.15	7.54	7.66	0.79	0.82	6.04
23	26.97	7.54	7.54	0.81	0.81	6.14
24	27.85	7.54	7.54	0.88	0.88	6.66
25	28.62	7.78	7.66	0.77	0.81	5.93
26	29.46	7.78	7.78	0.84	0.84	6.52
27	30.17	7.78	7.78	0.71	0.71	5.54
28	30.88	7.78	7.78	0.71	0.71	5.54
29	31.80	7.78	7.78	0.92	0.92	7.13
30	32.59	7.78	7.78	0.79	0.79	6.18
31	33.39	7.78	7.78	0.80	0.80	6.20
32	34.55	7.78	7.78	1.16	1.16	9.04
33	35.49	7.78	7.78	0.94	0.94	7.34
34	36.44	8.02	7.90	0.95	0.98	7.49
35	37.34	8.02	8.02	0.90	0.90	7.19
36	38.11	8.02	8.02	0.77	0.77	6.17
37	38.87	8.02	8.02	0.76	0.76	6.10
38	40.03	8.02	8.02	1.17	1.17	9.37
39	40.89	8.02	8.02	0.86	0.86	6.87
40	41.66	7.78	7.90	0.77	0.80	6.05
41	42.90	7.78	7.78	1.24	1.24	9.65
42	43.90	7.78	7.78	1.01	1.01	7.83
43	44.98	8.02	7.90	1.08	1.10	8.50
44	46.00	8.02	8.02	1.02	1.02	8.21
45	46.88	8.02	8.02	0.89	0.89	7.11
46	47.77	7.78	7.90	0.88	0.91	6.96
47	48.65	7.78	7.78	0.88	0.88	6.86
48	49.51	8.02	7.90	0.86	0.90	6.82
49	50.30	8.02	8.02	0.79	0.79	6.32
50	51.37	7.78	7.90	1.07	1.10	8.48
51	52.15	8.02	7.90	0.78	0.81	6.15
52	52.81	8.02	8.02	0.66	0.66	5.30
53	53.84	8.02	8.02	1.03	1.03	8.29

Tabla A3.3. Continuación.

Id	Dist. desde inicio (m)	Prof. (m)	Prof. media en puntos continuos (m)	Ancho entre puntos (m)	Perímetro (m)	Área (m ²)
54	54.65	8.02	8.02	0.81	0.81	6.50
55	55.49	8.02	8.02	0.84	0.84	6.74
56	56.51	8.02	8.02	1.02	1.02	8.20
57	57.39	8.26	8.14	0.87	0.91	7.11
58	58.24	8.26	8.26	0.85	0.85	7.03
59	59.07	8.26	8.26	0.84	0.84	6.92
60	60.04	8.26	8.26	0.97	0.97	8.00
61	60.99	8.26	8.26	0.95	0.95	7.83
62	61.84	8.26	8.26	0.85	0.85	7.01
63	62.70	8.50	8.38	0.87	0.90	7.28
64	63.53	8.26	8.38	0.83	0.86	6.92
65	64.32	8.50	8.38	0.79	0.83	6.63
66	65.09	8.50	8.50	0.77	0.77	6.53
67	65.96	8.50	8.50	0.87	0.87	7.42
68	66.79	8.50	8.50	0.83	0.83	7.03
69	67.57	8.50	8.50	0.78	0.78	6.65
70	68.27	8.50	8.50	0.71	0.71	6.01
71	69.21	8.50	8.50	0.94	0.94	7.96
72	69.85	8.50	8.50	0.64	0.64	5.48
73	70.62	8.26	8.38	0.77	0.80	6.42
74	71.31	8.02	8.14	0.69	0.73	5.65
75	71.92	7.78	7.90	0.61	0.65	4.81
76	72.57	7.30	7.54	0.64	0.80	4.86
77	73.22	7.06	7.18	0.65	0.70	4.70
78	73.93	6.82	6.94	0.71	0.75	4.96
79	74.73	6.34	6.58	0.79	0.93	5.21
80	75.59	5.80	6.07	0.86	1.02	5.24
81	76.30	5.32	5.56	0.71	0.86	3.95
82	77.10	4.84	5.08	0.80	0.93	4.05
83	77.79	4.48	4.66	0.70	0.78	3.25
84	78.51	4.21	4.35	0.72	0.77	3.13
85	82.72	4.42	4.32	4.21	4.22	18.18
86	83.63	3.40	3.91	0.91	1.36	3.56
87	85.55	0.82	2.11	1.92	3.22	4.06
88	87.45	0.40	0.61	1.90	1.95	1.16
89	91.32	0.45	0.42	3.86	3.86	1.64
90	93.93	0.00	0.22	2.61	2.65	0.58

Fuente: Elaboración propia.

Tabla A3.4. Parámetros hidráulicos por punto de muestreo de la sección mojada del río De la Sierra. Distancia total = 67.47 m, profundidad media = 4.78 m, profundidad máxima = 5.63, perímetro = 69.58 m, área = 325.95 m², velocidad media = 0.84 m/s y caudal = 286.99 m³/s.

Id	Dist. desde inicio (m)	Prof. (m)	Prof. media en puntos continuos (m)	Ancho entre puntos (m)	Perímetro (m)	Área (m ²)	Vel. media (m/s)	Caudal (m ³ /s)
1	0	2.93					0.35	
2	0.25	3.23	3.08	0.25	0.39	0.79	0.83	0.65
3	1.01	3.71	3.47	0.76	0.90	2.64	0.77	2.03
4	1.62	4.19	3.95	0.60	0.77	2.38	0.80	1.91
5	2.30	4.43	4.31	0.69	0.73	2.95	0.82	2.41
6	3.21	4.67	4.55	0.91	0.94	4.13	0.85	3.49
7	4.20	4.67	4.67	0.99	0.99	4.63	0.83	3.85
8	5.22	4.67	4.67	1.02	1.02	4.75	0.80	3.78
9	6.36	4.67	4.67	1.15	1.15	5.36	0.85	4.55
10	7.38	4.67	4.67	1.01	1.01	4.72	0.96	4.54
11	8.38	4.67	4.67	1.01	1.01	4.70	0.85	4.00
12	9.29	4.67	4.67	0.90	0.90	4.22	0.93	3.94
13	10.00	4.67	4.67	0.72	0.72	3.35	1.03	3.47
14	10.85	4.91	4.79	0.85	0.88	4.05	0.95	3.85
15	11.90	4.67	4.79	1.05	1.07	5.02	0.74	3.70
16	12.70	4.67	4.67	0.80	0.80	3.74	0.96	3.57
17	13.51	4.91	4.79	0.82	0.85	3.91	0.88	3.42
18	14.32	4.91	4.91	0.81	0.81	3.98	1.01	4.03
19	15.11	4.67	4.79	0.79	0.82	3.77	0.89	3.37
20	15.93	4.67	4.67	0.81	0.81	3.80	0.93	3.54
21	16.81	4.67	4.67	0.88	0.88	4.12	1.14	4.69
22	17.58	4.91	4.79	0.77	0.81	3.71	1.05	3.89
23	18.42	4.91	4.91	0.84	0.84	4.11	0.81	3.34
24	19.13	4.91	4.91	0.71	0.71	3.49	0.88	3.08
25	19.84	4.91	4.91	0.71	0.71	3.49	0.91	3.19
26	20.76	4.91	4.91	0.92	0.92	4.49	1.04	4.69
27	21.55	4.91	4.91	0.79	0.79	3.90	0.99	3.86
28	22.35	4.91	4.91	0.80	0.80	3.91	0.79	3.07
29	23.51	4.91	4.91	1.16	1.16	5.70	1.02	5.84
30	24.45	4.91	4.91	0.94	0.94	4.63	1.04	4.82
31	25.40	5.15	5.03	0.95	0.98	4.77	0.86	4.08
32	26.30	5.15	5.15	0.90	0.90	4.62	0.99	4.59
33	27.07	5.15	5.15	0.77	0.77	3.96	0.84	3.33
34	27.83	5.15	5.15	0.76	0.76	3.91	1.04	4.07
35	28.99	5.15	5.15	1.17	1.17	6.02	1.02	6.14
36	29.85	5.15	5.15	0.86	0.86	4.41	0.87	3.85
37	30.62	4.91	5.03	0.77	0.80	3.85	0.91	3.52
38	31.85	4.91	4.91	1.24	1.24	6.08	0.97	5.92
39	32.86	4.91	4.91	1.01	1.01	4.94	1.13	5.56

Tabla.A3.4. Continuación.

Id	Dist. desde inicio (m)	Prof. (m)	Prof. media en puntos continuos (m)	Ancho entre puntos (m)	Perímetro (m)	Área (m ²)	Vel. media (m/s)	Caudal (m ³ /s)
40	33.94	5.15	5.03	1.08	1.10	5.41	0.75	4.04
41	34.96	5.15	5.15	1.02	1.02	5.27	0.89	4.71
42	35.84	5.15	5.15	0.89	0.89	4.56	1.20	5.47
43	36.72	4.91	5.03	0.88	0.91	4.43	1.07	4.73
44	37.61	4.91	4.91	0.88	0.88	4.33	0.94	4.05
45	38.47	5.15	5.03	0.86	0.90	4.34	0.79	3.43
46	39.26	5.15	5.15	0.79	0.79	4.05	1.06	4.30
47	40.33	4.91	5.03	1.07	1.10	5.40	1.13	6.09
48	41.11	5.15	5.03	0.78	0.81	3.92	1.03	4.05
49	41.77	5.15	5.15	0.66	0.66	3.40	1.23	4.19
50	42.80	5.15	5.15	1.03	1.03	5.32	1.15	6.10
51	43.61	5.15	5.15	0.81	0.81	4.17	0.84	3.52
52	44.45	5.15	5.15	0.84	0.84	4.32	1.12	4.84
53	45.47	5.15	5.15	1.02	1.02	5.26	0.96	5.03
54	46.34	5.39	5.27	0.87	0.91	4.60	0.92	4.23
55	47.20	5.39	5.39	0.85	0.85	4.58	1.05	4.79
56	48.03	5.39	5.39	0.84	0.84	4.51	1.20	5.39
57	49.00	5.39	5.39	0.97	0.97	5.22	0.94	4.92
58	49.95	5.39	5.39	0.95	0.95	5.10	0.85	4.32
59	50.79	5.39	5.39	0.85	0.85	4.57	0.99	4.52
60	51.66	5.63	5.51	0.87	0.90	4.78	0.91	4.35
61	52.49	5.39	5.51	0.83	0.86	4.55	0.81	3.67
62	53.28	5.63	5.51	0.79	0.83	4.36	0.87	3.80
63	54.05	5.63	5.63	0.77	0.77	4.33	0.78	3.38
64	54.92	5.63	5.63	0.87	0.87	4.91	0.99	4.85
65	55.74	5.63	5.63	0.83	0.83	4.65	0.72	3.35
66	56.53	5.63	5.63	0.78	0.78	4.40	0.75	3.29
67	57.23	5.63	5.63	0.71	0.71	3.98	0.65	2.59
68	58.17	5.63	5.63	0.94	0.94	5.27	0.80	4.23
69	58.81	5.63	5.63	0.64	0.64	3.63	0.71	2.60
70	59.58	5.39	5.51	0.77	0.80	4.22	0.61	2.59
71	60.27	5.15	5.27	0.69	0.73	3.66	0.57	2.08
72	60.88	4.91	5.03	0.61	0.65	3.06	0.55	1.70
73	61.53	4.43	4.67	0.64	0.80	3.01	0.38	1.15
74	62.18	4.19	4.31	0.65	0.70	2.82	0.33	0.94
75	62.89	3.95	4.07	0.71	0.75	2.91	0.24	0.70
76	63.69	3.47	3.71	0.79	0.93	2.94	0.39	1.15
77	64.55	2.93	3.20	0.86	1.02	2.76	0.39	1.07
78	65.26	2.45	2.69	0.71	0.86	1.91	0.11	0.22
79	66.05	1.97	2.21	0.80	0.93	1.76	0.29	0.51

Tabla.A3.4. Continuación.

Id	Dist. desde inicio (m)	Prof. (m)	Prof. media en puntos continuos (m)	Ancho entre puntos (m)	Perímetro (m)	Área (m ²)	Vel. media (m/s)	Caudal (m ³ /s)
80	66.75	1.61	1.79	0.70	0.78	1.25	0.23	0.29
81	67.47	1.34	1.48	0.72	0.77	1.06	0.15	0.16

Fuente: Elaboración propia.



*Monitoreo remoto-digital de caudales ecológicos para la gestión del agua.
Análisis y modelación ecohidrológica se terminó de editar en diciembre de 2025.*

SALUD AL AMBIENTE
AGUA PARA LA GENTE



Con el apoyo de

RÍO ARRONTE
FUNDACIÓN



ECOSUR