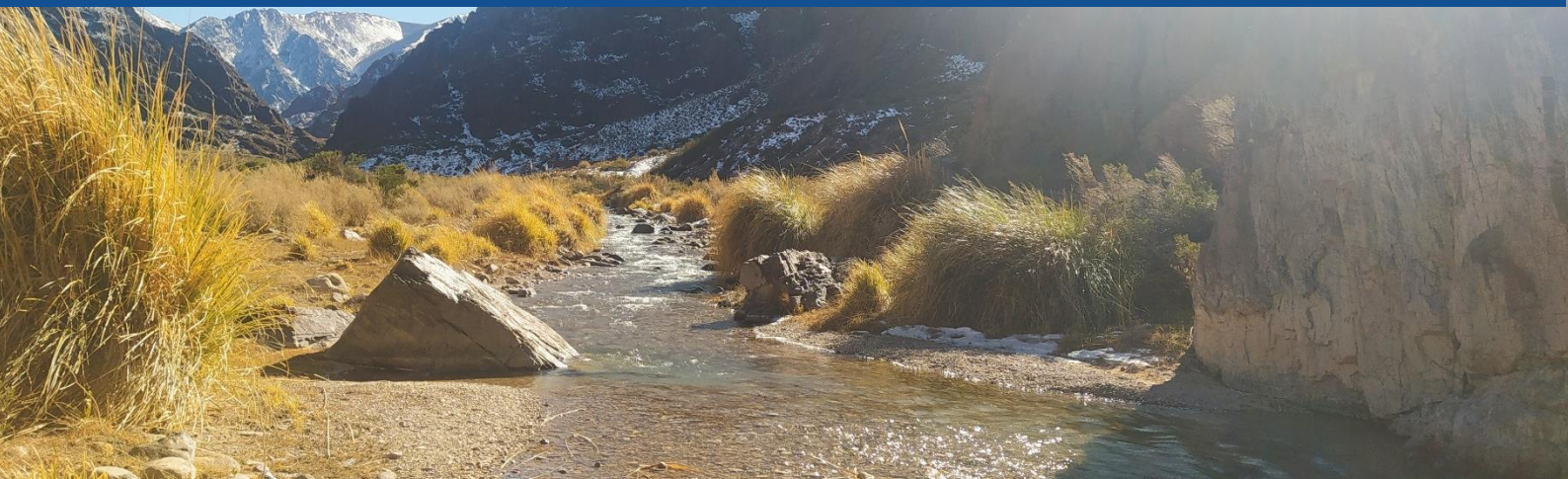


INA Subgerencia Centro Regional Andino – septiembre 2022
INA Subgerencia Centro Regional Andino

**PROPUESTA DE MONITOREO DE CAUDALES EN EL
ARROYO SAN ALBERTO
EN EL MARCO DEL PROYECTO INT 5-156**

**CONVENIO DE COLABORACIÓN TÉCNICA
Instituto Nacional del Agua / CNEA**



INA Subgerencia Centro Regional Andino
Informe Técnico IT N° 224 – SCRA / 2022

INA Subgerencia Centro Regional Andino

**PROPUESTA DE MONITOREO DE CAUDALES EN EL
ARROYO SAN ALBERTO
EN EL MARCO DEL PROYECTO INT 5-156**

**CONVENIO DE COLABORACIÓN TÉCNICA
Instituto Nacional del Agua / CNEA**

Equipo de Trabajo INA-SCRA

Responsable: Ing. Patricia López
Ing. Adriana Mariani
Ing. Francisco Frau

Contenido

INTRODUCCIÓN.....	1
¿POR QUÉ ES IMPORTANTE MEDIR CAUDALES?	1
¿POR QUÉ ES NECESARIO MEDIR EL NIVEL DE AGUA EN RÍOS?	1
SECCIÓN DE AFORO.....	1
CÁLCULO DE CAUDALES CON EL MÉTODO ÁREA-VELOCIDAD	2
ESTIMACIÓN DE CURVA DE DESCARGA	3
PROPUESTA DEL EQUIPO DE TRABAJO PARA EL MONITOREO DE CAUDALES	3
SECCIÓN SELECCIONADA PARA EL MONITOREO DE CAUDALES CON CORRENTÓMETRO	7
DIFICULTADES ENCONTRADAS.....	9
INCERTIDUMBRES	10
FRECUENCIA DE LOS AFOROS	10
MÉTODOS ALTERNATIVOS DE MONITOREO DE CAUDALES	10
MEDICIÓN CONTINUA DE NIVELES	11
RECOMENDACIONES	13
LISTADO DE TABLAS	14
LISTADO DE FIGURAS	14
BIBLIOGRAFÍA	14

ESTA PÁGINA HA SIDO DEJADA EN BLANCO PARA MEJORAR EL DISEÑO E IMPRESIÓN DEL INFORME

Introducción

El objetivo de este informe es presentar aspectos generales de la medición de caudales y la propuesta del equipo de trabajo para su monitoreo en la cuenca del Arroyo San Alberto, con el propósito de obtener información que facilite la caracterización del escurrimiento superficial, comprendida en la componente A del proyecto INT 5-156 Building capacity and generating evidence for climate change impacts on soil, sediments and water resources in mountainous regions. Caso de Estudio: Impacto del cambio climático en cuencas intermontanas de los Andes Centrales: caso de estudio del Valle de Uspallata/Yalguaráz.

¿Por qué es importante medir caudales?

El caudal de un río es la cantidad de agua que fluye a través de una sección transversal en un tiempo dado, posibilitando diferentes usos: doméstico, comercial e industrial; agua de riego para cultivos; dilución y transporte de desechos; generación de energía hidroeléctrica; navegación fluvial; recreación, entre otros.

Los registros continuos de caudal proporcionan información de la oferta y disponibilidad de agua superficial en una cuenca y su variabilidad en tiempo y espacio, constituyendo de esta forma datos básicos para la planificación y gestión, el diseño de obras, la calibración de modelos hidrológicos y el pronóstico de escurrimientos.

¿Por qué es necesario medir el nivel de agua en ríos?

El nivel o altura de agua es la elevación de la superficie de una corriente fluvial, lago u otra masa de agua respecto de un valor de referencia (ISO, 1988). Este valor puede ser usado para delimitar áreas de riesgo de crecidas, predicción de flujos y diseño de estructuras hidráulicas.

Las mediciones de altura en una sección pueden realizarse con medidores no registradores (escala limnimétrica graduada) o medidores registradores (limnógrafos), los cuales cuentan con requerimientos de instalación y mantenimiento propios.

La frecuencia de medición de niveles deberá determinarse en función del régimen hidrológico de la masa de agua y del propósito de la recopilación de datos. En el caso de existir hielo en el curso, se recomienda contar con observadores capacitados apropiadamente para registrar información importante como: fechas de los primeros flujos de hielo flotante, de hielo fijo, comienzo y desaparición del deshielo; cociente entre la superficie de hielo flotante y estacionario y espesor del hielo; entre otros. Estos datos no pueden ser medidos mediante instrumentos y deberán ser evaluados subjetivamente y registrados en forma descriptiva (OMM, 2020).

Una vez estimada la relación entre nivel de agua y caudal en una sección, se pueden obtener caudales con las mediciones de niveles (curva H-Q).

Sección de aforo

De acuerdo con la Organización Meteorológica Mundial (OMM, 2020), una sección de aforo responde al propósito de obtener registros sistemáticos de altura y caudal. Un sitio ideal es aquel que responde a los siguientes criterios:

- Cauce rectilíneo de aproximadamente 100m hacia aguas arriba y abajo del sitio de medición.
- Confinamiento total del flujo en un canal para todo el rango de alturas, sin contar con flujos subsuperficiales.
- El lecho no experimenta erosión, deposición ni cuenta con malezas.

- Las márgenes son estables y lo suficientemente elevadas para contener crecidas y sin matorrales.
- Cuenta con controles naturales inalterables, como afloramientos rocosos estables en caudales bajos, estrechamientos del canal en flujos altos o saltos que no queden sumergidos para obtener una relación estable de altura y caudal.
- Se dispondrá de un sitio inmediatamente aguas arriba para el registro de alturas.
- El emplazamiento se encuentra lo suficientemente lejos corriente arriba de un afluente.
- Aún en presencia de hielo es posible aforar.
- No existen olas ni ondulaciones en la superficie del agua.



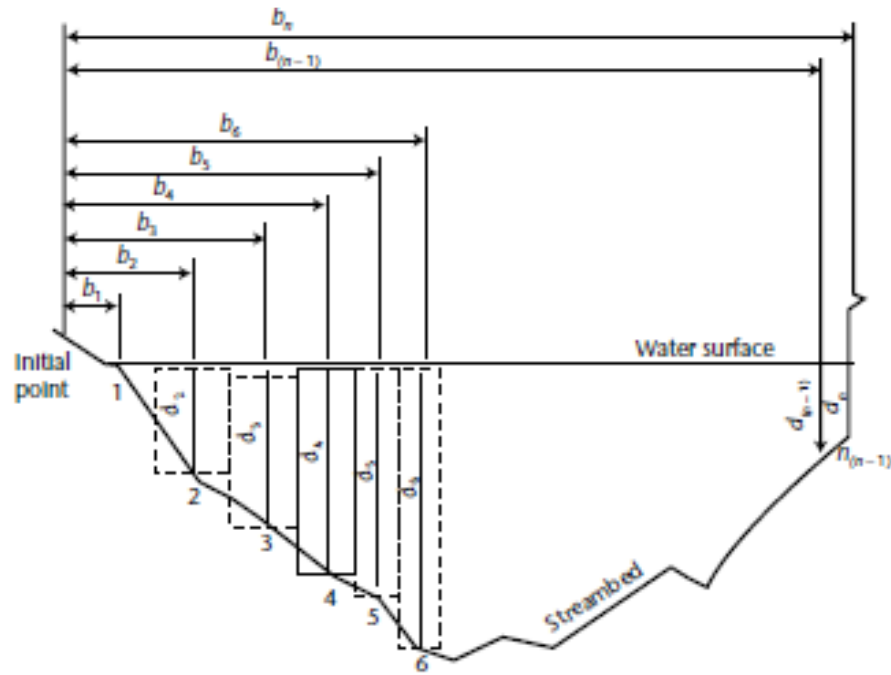
Figura 1. Ejemplo de una sección de aforo

Cálculo de caudales con el método Área-Velocidad

Para cada aforo, este método requiere de un dispositivo para medir la velocidad de la corriente (correntómetro), subdividir la sección transversal en segmentos (áreas parciales o paneles), medir la profundidad y la velocidad en una vertical dentro de cada segmento (Figura 2). El cálculo del caudal en la sección puede realizarse con el método de semi-sección o sección media, según:

$$Q = \sum_{i=1}^n a_i v_i$$

donde, Q es el caudal en la sección, a_i es el área y v_i la velocidad en cada segmento i .



Notes:

1,2, 3,..... n: Observation verticals

$b_1, b_2, b_3, \dots, b_n$: Distance, in metres, from the initial point to the observation vertical

$d_1, d_2, d_3, \dots, d_n$: Depth of water, in metres, at the observaion vertical

Dashed lines: Boundaries of subsections: the one heavily outlined is discussed in text.

Figura 2. Esquema para el cálculo de caudales empleando el método Área-Velocidad. Fuente: Manual on stream gauging. Volume I - Fieldwork. WMO Nº 1044. 2010

Estimación de curva de descarga

A partir de los datos obtenidos en los aforos se puede estimar la curva de descarga mediante la aplicación de tres modelos (ISO, 1982) (WMO, 1980):

- Modelo potencial:

$$Q = A (H - H_0)^B$$

- Modelo exponencial:

$$Q = A B^H$$

- Modelo parabólico:

$$Q = A H^2 + B H + C$$

dónde A, B y C son los parámetros de calibración, H la altura hidrométrica, H_0 el nivel para caudal igual a 0 y Q el caudal.

Propuesta del equipo de trabajo para el monitoreo de caudales

El 20 de julio se realizó una visita a la cuenca del Arroyo San Alberto con el objetivo de determinar una sección de aforo para realizar el monitoreo de caudales con correntómetro, teniendo en cuenta las recomendaciones mencionadas previamente.

El recorrido se inició desde el aforador del Departamento General de Irrigación (DGI) que se muestra en la Figura 3. Se observó que, si bien el aforador estaba en buenas condiciones, la cámara de quietamiento estaba embancada y el cable del sensor de medición de niveles desconectado (Figura 4).

Luego, se recorrieron 2.5 km aguas arriba del aforador del DGI hasta llegar al sitio de coordenadas 32° 27' 25.80" S y 69° 26' 35.07" W, cercano a la sección donde personal del IANIGLA realizó un aforo en septiembre de 2021 (Figura 5). En este sitio se observó acumulación de nieve en margen derecha y hielo en ambos márgenes del cauce (Figura 6). La presencia de hielo puede originar inconvenientes en la realización de aforos en los meses de invierno.



Figura 3. Aforador y escala



Figura 4. Cámara de quietamiento y sensor



Figura 5. Recorrido de la visita del 20 de julio de 2022



Figura 6. Márgenes del arroyo San Alberto

Continuando el recorrido hacia aguas arriba, se observó una bifurcación del cauce y una casilla con escala linimétrica cerca de un aforador en desuso (Figura 7 y Figura 9).

La bifurcación continúa 200 metros aguas arriba hasta que converge nuevamente en un solo cauce (Figura 8). La estación hidrométrica abandonada consta de una escala y un salto hidráulico con sección erosionada y colmatada de grava y sedimentos (Figura 10).



Figura 7. Bifurcación del cauce, casilla y aforador abandonados vista hacia aguas arriba



Figura 8. Cauce único al finalizar la bifurcación vista hacia aguas arriba



Figura 9. Cauce izquierdo de la bifurcación vista hacia aguas abajo



Figura 10. Escala y salto hidráulico en desuso

Sección seleccionada para el monitoreo de caudales con correntómetro

Del recorrido realizado, se propone como sección de aforo con correntómetro por vadeo el sitio de coordenadas $32^{\circ} 27' 24.88''$ S, $69^{\circ} 26' 42.37''$ (Figura 11, Figura 12, Figura 13 y Figura 14), ya que se observó una adecuada linealidad del cauce junto con un lecho mayormente uniforme, sin presencia de grandes rocas ni turbulencia considerable.

Asimismo, se notó una sección ancha, que permitiría regularidad de aforos tanto en época de crecidas como en estiaje. El muro rocoso, retrocede sobre la margen izquierda, por lo que permite aforos por vadeo más viables y la instalación de puntos fijos para referenciar la sección a utilizar en todos los aforos a ejecutar.

Tanto la sección propuesta en este informe como la utilizada por el IANIGLA presentan el inconveniente de incluir aportes laterales de agua no controlados.



Figura 11. Imagen satelital del sitio de aforo propuesto



Figura 12. Vista transversal del sitio de aforo propuesto



Figura 13. Vista aguas arriba del sitio de aforo propuesto



Figura 14. Vista aguas abajo del sitio de aforo propuesto



Figura 15. Ubicación de aportes laterales de agua no controlados

El arroyo San Alberto presenta características típicas de los cursos de montaña, por lo tanto, la sección elegida como potencial sitio de aforo, no cumple estrictamente con todos los requisitos previamente descritos. El recorrido realizado permitió identificar dificultades e incertidumbres para realizar el monitoreo de caudales que se presentan a continuación.

Dificultades encontradas

- Tramos rectos de corta longitud
- Presencia de hielo en márgenes y cauce
- Velocidades en época de estiaje de $\approx 1 \text{ m s}^{-1}$

- Presencia de piedras en el lecho
- Transporte de piedras y guijarros
- Lecho poco profundo (15 – 30 cm)
- Aportes laterales de aguano controlados

Incertidumbres

- Presencia de hielo que dificulta los aforos invernales
- En verano, las velocidades elevadas podrían impedir la realización de aforos por vadeo
- Inestabilidad de la sección por erosión/deposición
- Importancia del arrastre de piedras y guijarros
- Magnitud de las precipitaciones que generan los aportes laterales no controlados.

Frecuencia de los aforos

Con el propósito de obtener información que facilite la caracterización del escurrimiento superficial en la cuenca del arroyo San Alberto, se deberían realizar varios aforos en los meses de crecida y al menos uno en los de estiaje. Éstos últimos permitirían obtener una estimación del aporte del acuífero al arroyo.

En la Tabla 1 se presenta la propuesta del número de aforos mes a mes, en correspondencia con la frecuencia de aforos de la estación Guido del río Mendoza.

Tabla 1. Frecuencia mensual de aforos

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total anual
N°	5	5	4	2	1	1	1	1	1	2	4	5	32

Métodos alternativos de monitoreo de caudales

Considerando las dificultades y las incertidumbres planteadas para realizar aforos con correntómetro, se proponen dos alternativas:

- A. Medición de caudales por el método de dilución de inyección repentina, que requeriría determinar:
- ✓ Sitio apropiado para lograr una mezcla adecuada
 - ✓ Solución a inyectar.

Es importante estimar la longitud de mezcla óptima y analizar la variación de las concentraciones del trazador a lo largo del cauce, evaluando a modo general los aportes y pérdidas subterráneas y subsuperficiales del arroyo.

Si el agua contiene una elevada salinidad, se debe descartar el uso de sales (NaCl, KCl, KBr) puesto que no se pueden lograr las concentraciones deseadas para evidenciar diferencias. Por otro lado, el uso de trazadores tales como la fluoresceína pueden salvar esta dificultad si es que se cuenta con un equipo que sea capaz de medirlo con la sensibilidad requerida.

Finalmente, para determinar los aportes y evaluar el flujo del subálveo, el Radón o la Rodamina pueden ser de utilidad, mencionando que todos estos trazadores se pueden combinar y usar en su conjunto para determinar con un solo aforo la mayor cantidad de parámetros de relevancia.

- B. Empleo del aforador del DGI, que requeriría conocer su relación H-Q.

Medición continua de niveles

En las reuniones realizadas en mayo de este año con los integrantes del proyecto, se planteó la posibilidad de realizar mediciones continuas de niveles. Éstas se pueden efectuar con varios instrumentos que implican diferentes costos de adquisición, instalación y mantenimiento.

Las escalas hidrométricas (Figura 16) son poco costosas y de fácil instalación, pero precisan de un observador que realice todos los días del año y varias veces por día la lectura y el registro del nivel.

Un metro de escala sería suficiente para el arroyo San Alberto y la instalación vertical podría realizarse con una estructura metálica sencilla.



Figura 16. Ejemplo escala hidrométrica instalada sobre el estribo de un puente

Los sensores de medición que registran niveles en un datalogger, como los de presión o de radar, presentan otra alternativa. Se podría prescindir de la telemetría y buscar la información con una frecuencia acorde a la capacidad de almacenamiento del datalogger.

El sensor de presión (Figura 17) mide el nivel piezométrico o altura de un fluido, es más costoso que las escalas hidrométricas y su instalación requiere disponer de una cámara de aquietamiento que debe mantenerse libre de sedimentos.

Estos instrumentos no son recomendables para cursos con alta concentración de sedimentos, ya que ésta altera la medición del sensor; el arrastre de guijarros o cantos rodados puede dañar el instrumental. En los meses de estiaje, el descenso del nivel del agua puede exponer al aire libre al sensor y la presencia de hielo en las márgenes también pueden entorpecer su normal funcionamiento (Figura 18). Por estos motivos, el sensor de presión no sería recomendable para el arroyo San Alberto.

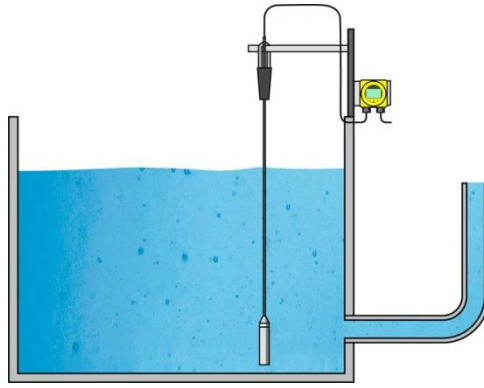


Figura 17. Esquema de un sensor de presión



Figura 18. Imágenes instalación sensor de presión sobre una margen congelada en época invernal

El sensor de radar no presenta las dificultades anteriores al no estar sumergido, su costo es elevado y requiere de una estructura adecuada que lo mantenga suspendido sobre agua. El rango de medición es de 0 a 15 m, posee buena sensibilidad y funciona bien en ríos turbulentos, de alta concentración de sedimentos o de gran arrastre de cantos rodados y grava (Figura 19). Por estos motivos, el sensor de radar sería recomendable para el arroyo San Alberto.



Figura 19. Imágenes instalación sensor de radar

Recomendaciones

De la visita realizada a la cuenca, se propone como sección de aforo con correntómetro por vadeo el sitio de coordenadas $32^{\circ} 27' 24.88''$ S y $69^{\circ} 26' 42.37''$, pese a no cumplir estrictamente con todos criterios de una sección ideal de acuerdo con la OMM.

Cuando se presenten inconvenientes para realizar aforos en el sitio elegido (presencia de hielo en márgenes, insuficiente nivel de agua, velocidades elevadas, etc.) y a fin de cumplir con la frecuencia de aforos establecida, se propone obtener los caudales en los aforadores del DGI.

Estos aforos permitirán la caracterización del escurrimiento superficial (magnitud y variabilidad) del arroyo San Alberto y ajustar una curva de descarga.

La medición continua de niveles, empleando escalas hidrométricas o sensor de radar, posibilitaría la obtención de caudales en función de la curva de descarga, los que contribuirán a la calibración y validación del modelo hidrológico de la cuenca.

Listado de Tablas

TABLA 1. FRECUENCIA MENSUAL DE AFOROS	10
---	----

Listado de Figuras

FIGURA 1. EJEMPLO DE UNA SECCIÓN DE AFORO	2
FIGURA 2. ESQUEMA PARA EL CÁLCULO DE CAUDALES EMPLEANDO EL MÉTODO ÁREA-VELOCIDAD. FUENTE: MANUAL ON STREAM GAUGING. VOLUME I - FIELDWORK. WMO N° 1044. 2010	3
FIGURA 3. AFORADOR Y ESCALA.....	4
FIGURA 4. CÁMARA DE AQUIETAMIENTO Y SENSOR.....	4
FIGURA 5. RECORRIDO DE LA VISITA DEL 20 DE JULIO DE 2022	5
FIGURA 6. MÁRGENES DEL ARROYO SAN ALBERTO	5
FIGURA 7. BIFURCACIÓN DEL CAUCE, CASILLA Y AFORADOR ABANDONADOS VISTA HACIA AGUAS ARRIBA.....	6
FIGURA 8. CAUCE ÚNICO AL FINALIZAR LA BIFURCACIÓN VISTA HACIA AGUAS ARRIBA	6
FIGURA 9. CAUCE IZQUIERDO DE LA BIFURCACIÓN VISTA HACÍA AGUAS ABAJO	7
FIGURA 10. ESCALA Y SALTO HIDRÁULICO EN DESUSO.....	7
FIGURA 11. IMAGEN SATELITAL DEL SITIO DE AFORO PROPUESTO	8
FIGURA 12. VISTA TRANSVERSAL DEL SITIO DE AFORO PROPUESTO	8
FIGURA 13. VISTA AGUAS ARRIBA DEL SITIO DE AFORO PROPUESTO.....	8
FIGURA 14. VISTA AGUAS ABAJO DEL SITIO DE AFORO PROPUESTO	9
FIGURA 15. UBICACIÓN DE APORTES LATERALES DE AGUA NO CONTROLADOS.....	9
FIGURA 16. EJEMPLO ESCALA HIDROMÉTRICA INSTALADA SOBRE EL ESTRIBO DE UN PUENTE.....	11
FIGURA 17. ESQUEMA DE UN SENSOR DE PRESIÓN.....	12
FIGURA 18. IMÁGENES INSTALACIÓN SENSOR DE PRESIÓN SOBRE UNA MARGEN CONGELADA EN ÉPOCA INVERNAL.....	12
FIGURA 19. IMÁGENES INSTALACIÓN SENSOR DE RADAR	12

Bibliografía

Internacional Organization for Standardization (1982). Liquid flow measurement in open channels — Part 2: Determination of the stage-discharge relation. Ginebra.

Internacional Organization for Standardization (1988). Liquid Flow Measurement in Open Channels: Vocabulary and Symbols. Ginebra.

Organización Meteorológica Mundial OMM (2020). Guía de Prácticas Hidrológicas, vol. I: Hidrología – De la medición a la información hidrológica (OMM No. 168)

World Meteorological Organization WMO (1980). Operational hydrology report (OHR)- No. 13. Manual on Stream Gauging, Vol. II: Computation of discharge (WMO No. 519)

World Meteorological Organization WMO (2010). Manual on stream gauging. Volume I – Fieldwork (WMO No. 1044).

IT N° 224 - SCRA

Propuesta de monitoreo de caudales en el Arroyo San Alberto