



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Boletín Ambiental

Fotografía:
Mateo Alzate Jaramillo

Instituto de Estudios Ambientales -IDEA- Sede Manizales

160 | septiembre de
2019

Aforos líquidos en ríos y quebradas de Manizales y del departamento de Caldas

Aforos líquidos en ríos y quebradas de Manizales y del departamento de Caldas

Mateo Alzate Jaramillo, Ingeniero Civil, investigador del Instituto de Estudios Ambientales-IDEA- de la Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales. malzatej@unal.edu.co.

Fernando Mejía Fernández, Ingeniero Civil, M. Sc. en Recursos Hidráulicos, profesor jubilado Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales. fmejiaf@unal.edu.co.

Jeannette Zambrano Nájera, Ingeniera Civil, PhD. Profesora asociada Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales. jdzambrano@unal.edu.co.

Para descargar el boletín en color:

▶ [Http://idea.manizales.unal.edu.co/boletin-ambiental.html](http://idea.manizales.unal.edu.co/boletin-ambiental.html)

Este boletín es parte de una serie de artículos sobre el Sistema Integrado de Monitoreo Ambiental de Caldas -SIMAC-; con ellos se busca explicar cada uno de sus componentes. El primero fue el Boletín Ambiental N° 137 de 2017 sobre los Sistemas de Información Ambiental, después se publicaron:

144. Red de Estaciones Meteorológicas e Hidrometeorológicas Automáticas en el Parque Nacional Natural Los Nevados.

145. Red de Estaciones Meteorológicas e Hidrometeorológicas Automáticas de Manizales. Estaciones para la Gestión del Riesgo ante Desastres por Deslizamientos. PRIMERA PARTE.

146. Red de Estaciones Meteorológicas e Hidrometeorológicas Automáticas de Manizales. Estaciones para la Gestión del Riesgo ante Desastres por Deslizamientos. SEGUNDA PARTE.

147. Red de Estaciones Meteorológicas e Hidrometeorológicas de Alarma Temprana (SAT) de las quebradas Manizales, El Guamo y Olivares ubicadas en el municipio de Manizales.

148. Red de Acelerógrafos de Manizales- Raman, Sistema de Información Sísmico de Manizales- Sisman, Laboratorio de Instrumentación Sísmico Automático-Lisa.

149. Sistema de Vigilancia de Calidad del Aire en Manizales.

155. Sistema de alertas por rayos para Manizales.

Introducción

En este artículo se presentan los avances en la realización de aforos líquidos en los ríos y quebradas del departamento que cuentan con estaciones hidrometeorológicas, y que hacen parte del Sistema Integrado de Monitoreo Ambiental de Caldas -SIMAC- en el que se reúnen, entre otras, las redes de monitoreo que pertenecen a Corpocaldas y a la Unidad Departamental para la Gestión del Riesgo (UDEGER). Para los periodos 2017 y 2018 se realizaron entre 4 y 6 aforos por estación, para un total de 158 en las 37 estaciones que hacen parte de las redes mencionadas (IDEA 2018), y se estima que al finalizar el año 2019 se hayan hecho 70 nuevos aforos líquidos en estos ríos y quebradas.

1 RELACIÓN NIVEL-CAUDAL

Realizar aforos líquidos en una corriente de agua natural o artificial significa determinar el caudal que pasa por la corriente en un instante de tiempo; sin embargo, los aforos no se pueden efectuar con la frecuencia que se necesita debido a los costos que acarrearán y a las dificultades que presentan las condiciones ambientales. Una de las soluciones usuales es correlacionar el nivel del cauce (Z) con el caudal (Q), debido a que el nivel sí se puede determinar fácilmente por medio de observación directa sobre una mira o por medio de un sensor de nivel. De esta manera, los aforos que se realizan determinan la relación entre el nivel y el caudal en un río, conocida como la curva de calibración de la sección de aforos (Figura 1).

Para la determinación adecuada de la curva de calibración se requiere un cierto número de aforos; entre mayor es el número de aforos, mejor es la correlación obtenida. No existe uniformidad en la cantidad de aforos requeridos, por ejemplo, el Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) realiza mínimo dos al año. (IDEAM 2007). Sin embargo, se considera que lo correcto es determinar el número de aforos a realizar según las condiciones del río. Organización Meteorológica Mundial (OMM 2011).

En ríos de morfología constante, estable, o poco variable, la curva de calibración puede ser considerada unívoca y estable. Pero muy pocos ríos llenan esta condición y menos los considerados ríos de montaña (Posada García 1994).

2 DESCRIPCIÓN DE LOS AFOROS

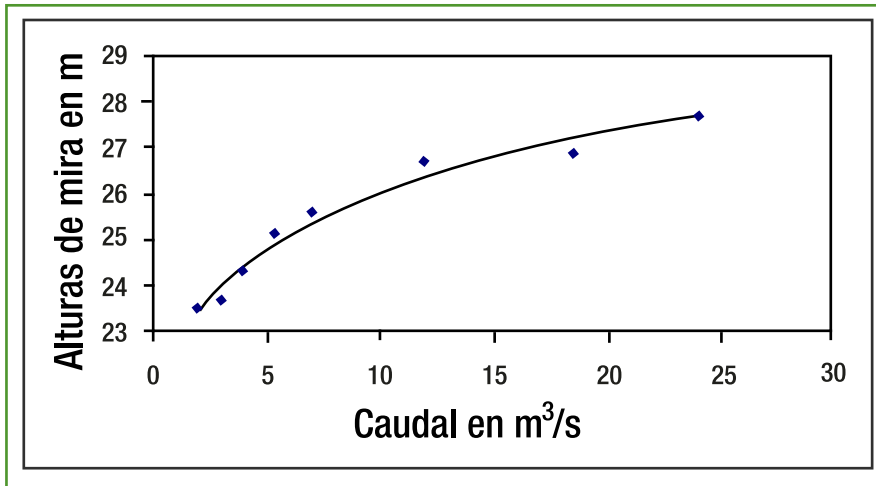


Figura 1. Curva de calibración de una sección típica

2

En total, se han tenido en cuenta en Caldas y Manizales 27 cauces entre ríos y quebradas, en los cuales hay 37 estaciones hidrometeorológicas (Tabla 1) que registran datos de precipitación, temperatura del aire y nivel del agua en la corriente cada 5 minutos.

Tabla 1. Ríos y quebradas del departamento con datos de aforos

Río /Quebrada	Estación	Río /Quebrada	Estación
Río Chinchiná	Bosque Popular	Quebrada El Bohío	Vereda El Águila
	El Bosque	Quebrada El Perro	Expoferias
	Cenicafé	Quebrada El Rosario	San Marcos de León
Río Guacaica	CHEC	Quebrada El Triunfo	Mirador de Villapilar
	El Jordán	Quebrada Guayabal	Recinto del pensamiento
Quebrada El Guamo	CDI San Sebastián	Quebrada La Francia	Los Puentes
	Lavadero Los puentes	Quebrada Las Pavas	Autopistas del Café
Quebrada Olivares	Bocatoma río Blanco	Quebrada Manizales	Skinco
	El Popal	Quebrada Manzanares	Industrias básicas de Caldas
	Aguas de Manizales	Quebrada Marmato	Planta Intermedia CHEC
	Bomberos voluntarios	Quebrada Salinas	EMAS
Quebrada Palogrande	Terminal de transportes	Quebrada Tesorito	Vía al Magdalena
	Ruta 30	Río Doña Juana	Vía la Dorada Norcasia
Río Rioclaro	Vereda la Guayana	Río Pácora	Río Pácora
	La Batea	Río Pensilvania	Microcentral
Río Supía	Supía	Río Pozo	Vía La Merced Pácora
	Los Piononos	Río Risaralda	Camping La Palmera
Quebrada Cristales	Valles de la alhambra	Río Santo Domingo	Manzanares
		Río Tapias	Río Tapias

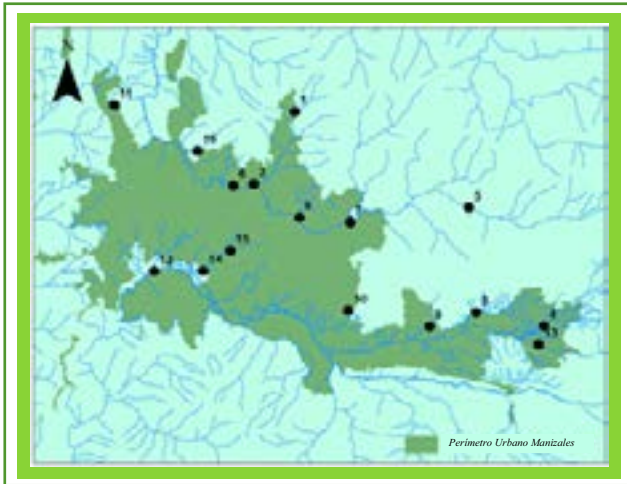


Figura 2. Estaciones aforadas dentro de la ciudad de Manizales

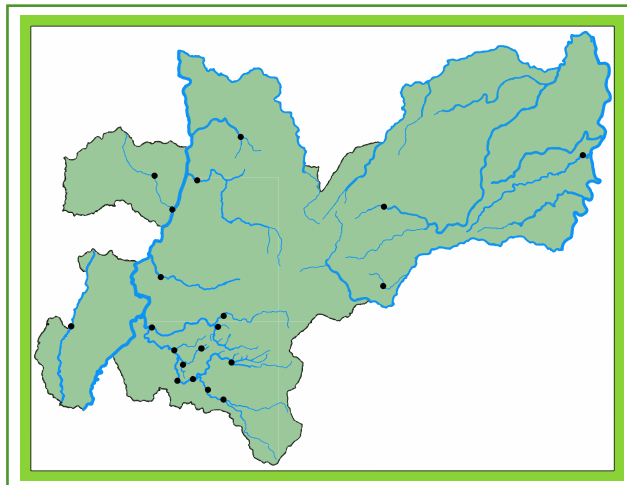


Figura 3. Estaciones aforadas dentro del departamento de Caldas

Las estaciones descritas anteriormente se encuentran en el departamento de Caldas; una gran concentración de las mismas se da en el sur del departamento, específicamente en la ciudad de Manizales (Figura 2), donde se encuentran 16 de las estaciones; sin embargo, el Sistema Integrado de Monitoreo Ambiental de Caldas -SIMAC- administra estaciones en todo el departamento (Figura 3).

3 METODOLOGÍA DEL AFORO

Para tener un control sobre el nivel del agua en las corrientes monitoreadas con una estación hidrometeorológica, conocer su variación y obtener un valor del caudal que circula para cada nivel, se instaló en cada estación un sensor de nivel electrónico, el cual emite una señal cada cinco minutos que genera una medida del nivel de agua en el río en tiempo real referenciado con un nivel o Datum que, en el caso de canales artificiales se hace coincidir con el fondo del canal y en el caso de corrientes naturales se sitúa por debajo del fondo del cauce.

La metodología seguida obedece a las recomendaciones del Protocolo de Monitoreo y Seguimiento del Agua (IDEAM 2007), y algunas recomendaciones prácticas que ha recopilado la Universidad Nacional en el ejercicio de la realización de aforos. En general, el procedimiento para la realización de un aforo es el siguiente:

- Selección del sitio de aforo.
- Levantamiento topográfico.
- Determinación de banca llena.
- Selección del método de aforo líquido.

3.1 Selección de la sección de aforo

No es necesario que el aforo se realice (sección de aforos) en la misma sección donde se ubica el sensor de nivel (sección de niveles) pues, teniendo en cuenta el principio de continuidad, el caudal permanece constante siempre que no tenga afluentes ni efluentes en ese tramo. Por esta razón y con el fin de facilitar la medida, se busca un lugar que tenga ciertas características:

- Debe ser un tramo recto del cauce, para facilitar que las líneas de flujo sean lo más paralelas posible entre sí, y perpendiculares a la sección transversal.
- El lecho del canal debe ser lo más regular posible.
- No debe haber obstrucciones como rocas, troncos de árboles o plantas acuáticas en el lecho.
- La pendiente longitudinal debe ser uniforme, entre otras.

Luego de tener el lugar adecuado para la campaña de aforos, existen en la metodología usada, dos partes fundamentales, la topografía y el aforo líquido. La exactitud de los datos obtenidos depende del trabajo realizado en ambas partes.

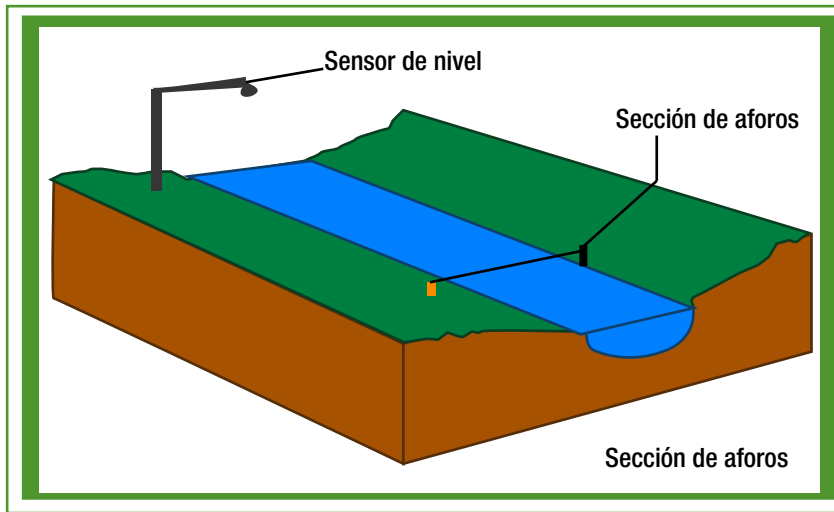


Figura 4. Esquema de la selección del lugar de aforo

3.2 Levantamiento topográfico

En esta parte se realiza un levantamiento de la topografía del terreno y se debe distinguir claramente lo siguiente:

- Perfil transversal de la sección de aforo, no solo del área mojada sino hasta el nivel de banca llena (Figura 5).
- Identificación de banca llena.
- Perfil longitudinal del cauce.

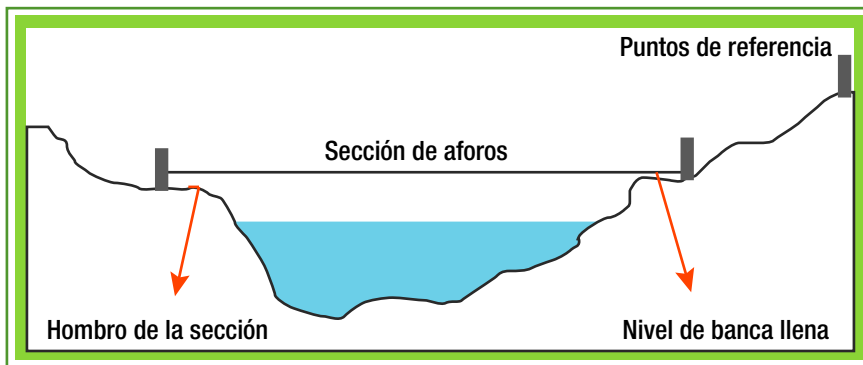


Figura 5. Límites de la topografía de la sección

Para la identificación de banca llena es importante que la topografía realizada en la sección de aforo sea lo más detallada posible, marcando los cambios de pendiente del terreno y el ancho del cauce; en lo posible, se busca abarcar las zonas de inundación (si las hay) y los hombros de la sección. Dentro de la topografía se debe marcar un punto de referencia; en lo posible, este debe estar en estructuras permanentes (puentes, muros, mojones, etc.) y alejado de la sección transversal para que las crecientes no modifiquen su ubicación.

Dentro de la misma campaña de aforos se puede variar la sección transversal, pero, desde el punto de vista de la topografía, facilita en gran medida tener la misma sección; esto permite que se puedan

percibir los cambios geomorfológicos que se presentan.

3.3 Aforo líquido

Después de tener detallada la sección transversal del río se procede a realizar el aforo líquido; en profundidades superiores a 1.50 m y velocidades mayores a 1 m/s se utilizan métodos como el de suspensión (el medidor pende de un cable desde un puente u otra estructura fija que atraviese la corriente); sin embargo, uno de los métodos usuales es el vadeo, en el que el operador entra directamente al cauce a medir la velocidad, tomando las medidas de seguridad necesarias; este método se usa en cauces con bajas profundidades y velocidades que no superen 1 m/s.

El método usado para encontrar el caudal del río es el de área – velocidad, que consiste en subdividir la sección en partes más pequeñas denominadas dovelas y en el centro de estas medir la velocidad del flujo a diferentes profundidades, teniendo en cuenta el nivel de la dovela (Figura 6).

Teniendo en cuenta que el lecho del cauce es irregular, la profundidad de las

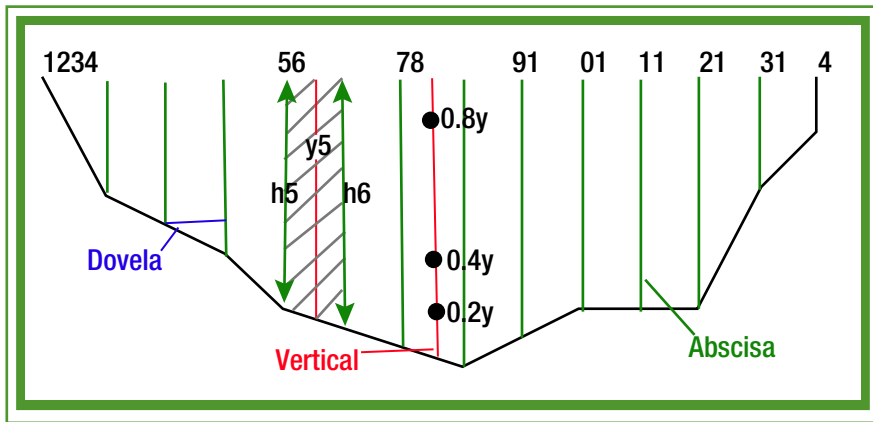


Figura 6. Sección típica de aforo

dovelas varía en el ancho de la sección del río; por esta razón, se toman las velocidades desde la superficie hasta un porcentaje de la profundidad de la dovela, y para determinar la velocidad media de cada dovela se tiene una ecuación que depende del nivel (Tabla 1).

Tabla 2. Distribución de las medidas de velocidad

Profundidad	Lecturas de velocidad (medidas desde la superficie)	Ecuación de velocidad
<0.12	60% de la profundidad	$V = V_{0.6}$
0.12-0.16	20%, 60% y 80% de la profundidad	$V = \frac{V_{0.8} + 2 * V_{0.6} + V_{0.2}}{4}$
>0.16	Fondo, 20%, 60%, 80%, superficie	$V = \frac{V_1 + 3 * V_{0.8} + 2 * V_{0.6} + 3 * V_{0.2} + V_{0.0}}{10}$
Dovela más profunda	Cada 10% de la profundidad	$V = \frac{\sum V_i}{11}$

En cada dovela se calcula el caudal $q_i = v_i * a_i =$ donde a_i es el área de la dovela y v_i es la velocidad media de la dovela; el caudal del río es entonces la sumatoria del caudal en cada una de las dovelas $Q_t = \sum_{Ei=1}^n q_i$

3.4 Curva de calibración

Una curva de calibración es la representación gráfica de las variaciones de los caudales (Q) en la sección transversal de un río, en función de las lecturas de mira o niveles de sensor (z) (Pérez Preciado 1969). Generalmente, los aforos se realizan para niveles medios o bajos del río teniendo en cuenta que las crecientes impiden la realización correcta de los mismos; más aún los ríos de montaña, que

en épocas de crecientes no solo mueven un caudal líquido considerable sino también un caudal sólido de grandes proporciones.

Adicionalmente, cuando se tiene un gran número de aforos de estos niveles medios, la curva de calibración se reduce a una simple relación de niveles y caudales dándole un ajuste matemático y estadístico a la curva, pero el problema reside en extrapolar dichos valores para niveles mayores y en este caso se tienen pocos aforos en cada estación.

Existen diferentes métodos para hacer dicha extrapolación, pero uno de los más acertados es el método de Manning, usado en este caso para realizar las curvas de calibración de las estaciones; la base de este método es $Q = \frac{A}{n} (Rh)^{2/3} S^{1/2}$ donde Q es el caudal medido, Rh es el Radio hidráulico, A es el área de la sección mojada, S es la pendiente longitudinal del cauce y n es el coeficiente de rugosidad de Manning; este último no se puede obtener directamente en campo; sin embargo, con los resultados de los aforos puede despejarse y hallarse un valor cercano.

4 RESULTADOS

Luego del trabajo realizado en campo, se hacen diferentes cálculos, obteniendo las curvas de calibración de cada estación hidrometeorológica y su respectiva ecuación (Tabla 3), el levantamiento topográfico de cada uno de los tramos incluyendo su sección transversal y la relación ente el nivel del cauce y el perímetro y área mojada de la sección.

Tabla 3. Resumen de ecuaciones para cada estación

Río /Quebrada	Estación	Ecuación de caudal	Río /Quebrada	Estación	Ecuación de caudal
Río Chinchiná	Bosque Popular	$0.0736z^{3.7394}$	Quebrada El Bohío	Vereda El Águila	$0.0037z^{2.6883}$
	El Bosque	$0.755z^{2.3661}$	Quebrada El Perro	Expoferias	$0.0006z^{3.6543}$
	Cenicafé	$0.5757z^{1.9337}$	Quebrada El Rosario	San Marcos de León	$0.0217z^{2.2927}$
Río Guacaica	CHEC	$0.1243z^{2.5714}$	Quebrada El Triunfo	Mirador de Villapilar	$0.0067z^{3.1868}$
	El Jordán	$0.6654z^{2.1764}$	Quebrada Guayabal	Recinto del pensamiento	$0.0175z^{2.329}$
Quebrada El Guamo	CDI San Sebastián	$0.0074z^{2.2888}$	Quebrada La Francia	Los Puentes	$0.0354z^{2.193}$
	Lavadero Los puentes	$0.0389z^{2.4612}$	Quebrada Las Pavas	Autopistas del Café	$0.0306z^{2.0534}$
Quebrada Olivares	Bocatoma río Blanco	$0.0309z^{2.0812}$	Quebrada Manizales	Skinco	$0.0225z^{2.2726}$
	El Popal	$0.1203z^{2.062}$	Quebrada Manzanares	Industrias básicas de Caldas	$0.0718z^{2.526}$
	Aguas de Manizales	$0.1733z^{2.2293}$	Quebrada Marmato	Planta Intermedia CHEC	$0.0277z^{2.3762}$
	Bomberos voluntarios	$0.0642z^{2.2069}$	Quebrada Salinas	EMAS	$0.0095z^{1.6542}$
Quebrada Palogrande	Terminal de transportes	$0.0014z^{3.3189}$	Quebrada Tesorito	Vía al Magdalena	$0.0293z^{2.1223}$
	Ruta 30	$8.9946z^{1.7141}$	Río Doña Juana	Vía la Dorada Norcasia	$10.348z^{2.1197}$
Río Rioclaro	Vereda la Guayana	$0.273z^{2.5415}$	Río Pácora	Río Pácora	$0.1408z^{2.4782}$
	La Batea	$0.2645z^{2.4034}$	Río Pensilvania	Microcentral	$0.2348z^{2.3655}$
Río Supía	Supía	$0.9694z^{2.3107}$	Río Pozo	Vía La Merced Pácora	$0.2469z^{2.5484}$
	Los Piononos	$0.3526z^{2.3162}$	Río Risaralda	Camping La Palmera	$0.9329z^{2.1424}$
Quebrada Cristales	Valles de la alhambra	$0.011z^{1.9559}$	Río Santo Domingo	Manzanares	$0.1889z^{2.4036}$
			Río Tapias	Río Tapias	$0.5787z^{2.3802}$

5 CONCLUSIONES

Aunque se garantiza una permanente medición de los niveles de la corriente a través de los sensores de nivel, es necesario realizar los aforos con cierta regularidad, por lo menos anualmente, con el fin de mejorar las curvas de calibración y conocer los cambios que sufren, producto de las crecientes naturales o la intervención humana.

Los resultados de estos aforos son un insumo para nuevas investigaciones en los cauces, geometría hidráulica, restauración de ríos, planificación de cuencas, entre otros, los cuales son algunos de los temas en los que se puede profundizar.

Actualmente, desde el Instituto de Estudios Ambientales -IDEA- se han adelantado algunos trabajos, resultado de los aforos, entre los que se encuentra una clasificación de los cauces en Caldas, presentado en el International Association for Hydro – Environment Engineering and Research (IAHR) World Congress 2019, llevado a cabo en Ciudad de Panamá en el mes de septiembre.

6 REFERENCIAS

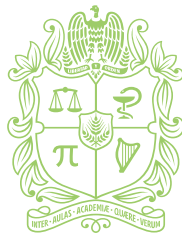
IDEA, Insituto de Estudios Ambientales. n.d. “INFORME DE AFOROS Y CLASIFICACIÓN DE RÍOS.”

IDEAM. 2007. Protocolo para el monitoreo y seguimiento del agua. Bogotá: Imprenta Nacional de Colombia.

OMM. 2011. Guía de prácticas hidrológicas. Vol. I. Sexta. Ginebra: Organización Meteorológica Mundial.

Pérez Preciado, Alfonso. 1969. Métodos Para Elaborar Curvas de Calibración En Cauces Aluviales.

Posada García, Liliana. 1994. Hidráulica Fluvial: Transporte de Sedimentos. Medellín, Colombia: Universidad Nacional de Colombia. Facultad Nacional de Minas. Ingeniería civil.



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Instituto de Estudios Ambientales - IDEA -
Teléfono: 8879300 Ext. 50190
Cra 27 #64-60 / Manizales - Caldas
<http://idea.manizales.unal.edu.co>
idea_man@unal.edu.co

Edición, Diseño y Diagramación: IDEA Sede Manizales

Impresión: Sección de Publicaciones

Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales