



Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial MAVDT  
INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS  
AMBIENTALES  
**IDEAM**

Contrato 214 de 2010

**AJUSTE DEL PROGRAMA NACIONAL DE MONITOREO DEL RECURSO HÍDRICO Y LA  
DETERMINACIÓN DE LA ESTRATEGIA DE SU IMPLEMENTACIÓN  
RESPONDIENDO A LOS INDICADORES AMBIENTALES DE SEGUIMIENTO DEL RECURSO  
HÍDRICO Y UN ESTUDIO DE REINGENIERÍA DE LA RED, EL CUAL DEBE DEFINIR LA RED  
BÁSICA NACIONAL PARA EL MONITOREO DEL RECURSO HÍDRICO Y LAS  
NECESIDADES DE INFRAESTRUCTURA PARA LLEVAR A CABO SU IMPLEMENTACIÓN**

INFORME FINAL  
**PROTOCOLOS Y PROCEDIMIENTOS  
MONITOREO DE SEDIMENTOS**

Presentado por:

**epam** s.a. esp

Bogotá D.C., junio de 2011





## CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
1. OBJETO Y OBJETIVOS	3
1.1. OBJETO DEL MONITOREO	3
1.2. PARA QUE SE MIDE EL CAUDAL SÓLIDO	6
2. ASPECTOS GENERALES DEL MONITOREO DE SEDIMENTOS	9
2.1. SELECCIÓN DEL SITIO: DONDE MEDIR	9
2.2. HIDROTOPOGRAFÍA	9
2.3. FRECUENCIAS DE MONITOREO DE SEDIMENTOS	9
2.4. PARÁMETROS A MEDIR Y UNIDADES DE MEDIDA	10
3. MEDICIÓN DE SEDIMENTOS	12
3.1. INSTRUMENTOS DE MEDIDA	12
3.1.1. Muestreadores integradores puntuales	12
3.1.2. Muestreadores integradores en profundidad	14
3.1.3. Muestreador diario	18
3.1.4. Instrumentos para medición del caudal de arrastre de fondo	19
3.2. INSTALACIONES NECESARIAS PARA EL MUESTREO	21
3.3. MANTENIMIENTO DE INSTALACIONES Y EQUIPOS DE MUESTREO	21
3.4. PROCEDIMIENTOS DE MEDICIÓN DE SEDIMENTOS	21
3.4.1. Procesos del monitoreo de sedimentos	21
3.4.2. Muestreo diario de sedimentos en suspensión	22
3.4.3. Aforos sólidos	26
3.4.4. Preparación y envío de muestras de sedimentos de suspensión al laboratorio	38
3.4.5. Procedimiento para medir arrastre de fondo	39
3.4.6. Procedimientos de laboratorio	42
4. REGISTRO Y PROCESAMIENTO DE DATOS	47
4.1. REGISTRO DE DATOS EN CAMPO	47
4.1.1. Entrada de datos al sistema	47
4.1.2. Cálculos y procesamiento	48
4.1.3. Salidas	54
4.1.4. Estaciones con telemetría y automáticas	55
4.1.5. Procesamiento secundario	55
5. VALIDACIÓN DE DATOS: CONTROL DE CALIDAD	56
5.1. POSIBLES FALLAS Y CAUSAS DE ERRORES EN LOS INSTRUMENTOS DE MUESTREO Y MEDICIÓN	56
5.2. VALIDACIÓN DE DATOS DE SEDIMENTOS	57
5.2.1. Preverificación de los datos en la estación	58
5.2.2. Verificación de los datos en oficina	58
5.2.3. Validación final	62
6. ALMACENAMIENTO	63
7. DIFUSIÓN DE LA INFORMACIÓN	63
ANEXOS	65
ANEXO No. 1. FORMATOS TIPO	67
BIBLIOGRAFÍA	73



**INFORME FINAL**

**epam s.a. esp**

Contrato No. 214 de 2010

**AJUSTAR EL PROGRAMA NACIONAL DE MONITOREO DEL RECURSO HÍDRICO Y LA DETERMINACIÓN DE LA ESTRATEGIA DE SU IMPLEMENTACIÓN**



## PROTOCOLO DE MONITOREO DE SEDIMENTOS

### INTRODUCCIÓN

En el marco del Programa Nacional de Monitoreo del Recurso Hídrico, los sedimentos son una de las seis variables básicas a monitorear, junto con los caudales líquidos, la precipitación, las aguas subterráneas, la evaporación y la calidad del agua.

Para los fines de este documento, se entiende por Protocolo la descripción estructurada, ordenada y secuencial de los pasos necesarios para generar datos consistentes y validados sobre el caudal sólido de un curso de agua, que pueda servir de guía general para entidades o personas que realizan esta actividad en el país. El protocolo se descompone en procedimientos técnicos, los cuales, por su nivel de detalle, son colocados en anexos o se remite al lector a textos o documentos especializados del propio IDEAM u otras fuentes.

El Protocolo ha sido elaborado con base en la actualización, simplificación y, en algunos casos, ampliación de documentos previamente elaborados por el IDEAM, en especial el “Protocolo para el seguimiento y monitoreo del agua (2007)”, la “Guía y protocolos de seguimiento y monitoreo del agua”, de Sánchez F. D. (2006) y la “Estandarización y actualización de protocolos de monitoreo y proceso de información hidrológica”, de Wilches H. (2009), con base en los cuales ha venido trabajando durante los últimos años. Así mismo contiene elementos tomados de las recomendaciones de la Organización Meteorológica Mundial, de manera especial los contenidos en la Guía de Prácticas Hidrológicas (versiones 1994 y 2008)

El Protocolo abarca la generación y procesamiento de la información básica necesaria para estimar la oferta hídrica nacional, regional y local y para atender las necesidades de información del usuario para diferentes escalas temporales (horarias, diarias, mensuales y anuales) de las variables de niveles y caudales de corrientes de agua, así como de las variaciones espaciales. Procedimientos específicos para monitoreos más especializados sobre niveles y caudales y/o para procesamientos especializados de los datos para distintos fines, se salen del alcance de este Protocolo.

El monitoreo y seguimiento del recurso hídrico es una función legal del IDEAM a nivel nacional, de las corporaciones autónomas regionales (CARs) a nivel regional, y de las autoridades ambientales urbanas y organismos de prevención y atención de desastres a nivel local. Estas funciones derivan de las siguientes normas, entre otras:

- El Decreto-Ley 2811 de 1974 o Código de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente, en cuyo artículo 20 ordena organizar y mantener al día un sistema de información ambiental, con los datos físicos, económicos, sociales, legales, y en general, concernientes a los recursos naturales renovables y al medio ambiente; y en el artículo 21, como una de las especies de información a procesar y analizar la información hidrometeorológica, hidrológica, hidrogeológica y climática. De igual modo, este decreto-ley, aún vigente en esta materia, determina la obligación por parte de las entidades oficiales de suministrar la información de que dispongan o que se les solicite, en relación con los datos del sistema de información ambiental, y, por otro lado, la obligación de los



Contrato No. 214 de 2010

**AJUSTAR EL PROGRAMA NACIONAL DE MONITOREO DEL RECURSO HÍDRICO Y LA DETERMINACIÓN DE LA ESTRATEGIA DE SU IMPLEMENTACIÓN**

propietarios, usuarios, concesionarios, arrendatarios y titulares de permiso de uso sobre recursos naturales renovables y elementos ambientales, de recopilar y suministrar, sin costo alguno, con destino al sistema de información ambiental, la información sobre materia ambiental, y especialmente, sobre la cantidad consumida de recursos naturales y elementos ambientales.

- El artículo 277 del Decreto 1541 de 1978, reglamentario del Decreto ley 2811 de 1974, ubica la responsabilidad de la investigación y del inventario de aguas superficiales en el antiguo Instituto de Hidrología, Meteorología y Adecuación de Tierra (HIMAT), y de las aguas subterráneas en el INGEOMINAS. Es importante anotar que, con anterioridad al HIMAT, el Servicio Colombiano de Meteorología e Hidrología (SCMH) había tenido esta misma función, y antes del SCMH, el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), el INCORA y otras entidades. Por su parte, el Decreto 1594 de 1984 establece el control de aprovechamientos y vertimientos en el antiguo INDERENA y las EMAR (hoy Corporaciones Autónomas Regionales CARs).
- La Ley 99 de 1993, crea el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), y le asigna las funciones de analizar, estudiar, procesar y divulgar la información básica sobre hidrología, hidrogeología, geografía básica sobre aspectos biofísicos, geomorfología, suelos y cobertura vegetal para el manejo y aprovechamiento de los recursos biofísicos de la Nación, así como el establecimiento y funcionamiento de infraestructuras meteorológicas e hidrológicas nacionales para proveer informaciones, predicciones, avisos y servicios de asesoramiento a la comunidad. También asigna a este instituto la función del seguimiento de los recursos biofísicos de la nación especialmente en lo referente a su contaminación y degradación, necesarios para la toma de decisiones de las autoridades ambientales. A su vez, esta ley crea las autoridades ambientales de nivel nacional, regional y local, encargadas del control del uso y manejo del agua.
- El Decreto 1323 de 2007 crea el Sistema de Información del Recurso Hídrico (SIRH), como parte del Sistema de Información Ambiental de Colombia (SIAC), a cargo específicamente del manejo de la información sobre disponibilidad y calidad hídrica, estado actual y gestión integral del recurso hídrico, cuyo repositorio central es el IDEAM, con la cooperación de las autoridades ambientales regionales y locales. Adicionalmente, el Decreto 1324 de 2007 crea el Registro de Usuarios del Recurso Hídrico, como parte del SIRH.
- Otras normas relacionadas con el monitoreo del recurso hídrico son la Ley 373 de 1997, sobre ahorro y uso eficiente del agua; la Ley 715 de 2001, sobre vigilancia de los municipios, el Decreto 1276 de 1994, sobre funciones y organización de INVEMAR; el Decreto 1277 de 1994, sobre funciones y organización del IDEAM; el Decreto 1600 de 1994, sobre el Sistema Nacional Ambiental (SINA); y la Resolución 941 de 2009 del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, sobre el Subsistema de Información sobre Uso de Recursos Naturales Renovables (SIUR) y Registro Único Ambiental (RUA), entre otras.
- Finalmente, la Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico, formulada por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (2010), establece los objetivos, estrategias y responsabilidades del monitoreo nacional del recurso hídrico, a nivel nacional, regional y local.



## 1. OBJETO Y OBJETIVOS

### 1.1. OBJETO DEL MONITOREO

El objeto del monitoreo es el sedimento o caudal sólido de los ríos, quebradas, lagos, lagunas o embalses.

De acuerdo con el Glosario Hidrológico Internacional<sup>1</sup>, el sedimento es todo “material transportado por el agua desde su lugar de origen al de depósito. En los cursos de agua, son los materiales aluviales llevados en suspensión o como arrastre de fondo”.

Los sedimentos en los cursos de agua están asociados con el fenómeno de la erosión, principalmente por el potencial erosivo del agua. La erosión producida por el agua puede ser de tres tipos:

- Laminar, que consiste en la remoción de la capa superficial de suelo.
- Zanjas o cárcavas, es un estado en que los cauces van creciendo y profundizándose en el tiempo.
- Fluvial, es el fenómeno por el cual un río socava su propio lecho y erosiona los taludes.
- Movimientos en masa sobre las vertientes, los cuales no siempre se reflejan en un aporte inmediato de sedimentos a los cursos de agua, toda vez que los materiales arrancados se depositan en la parte inferior del deslizamiento. No obstante, si los fenómenos ocurren cerca a los cauces o sobre los mismos, el material no sólo llega en forma más o menos rápida a la corriente sino que la puede taponar, ocasionando represamientos momentáneos que, al reventarse, aumentan la fuerza erosiva de la corriente sobre sus márgenes y, por tanto, su carga sólida.

De acuerdo con la manera como se transportan los sedimentos en el flujo, se clasifican en:

- *De fondo*: compuestos por los materiales depositados por la corriente en el lecho del río.
- *De arrastre de fondo*: son aquellos materiales que se deslizan o ruedan por el lecho de un río por acción de la velocidad de la corriente, formando rizos y dunas.
- *En saltación*: es el material procedente del fondo constituido por las partículas más finas, que en un momento dado adquiere la suficiente energía para abandonar el lecho, mantenerse en suspensión durante algún tiempo y caer más adelante.
- *En suspensión*: conformado por las partículas de menor tamaño que se mantienen suspendidas por efecto de la turbulencia de la corriente y se mueven a velocidad similar a la del flujo.

Los sedimentos se clasifican, según su tamaño, en gruesos (gravas y arenas) y en finos (arenas finas, limos y arcillas). Esta clasificación tiene implicaciones dinámicas relacionadas con la forma como estos materiales son transportados y depositados por el flujo.

<sup>1</sup> UNESCO. Glosario Hidrológico Internacional. Paris. 2011, <http://webworld.unesco.org/water/ihp/db/glossary/glu/HINDES.HTM>.



Contrato No. 214 de 2010  
AJUSTAR EL PROGRAMA NACIONAL DE MONITOREO DEL RECURSO HÍDRICO Y LA DETERMINACIÓN DE LA ESTRATEGIA DE SU IMPLEMENTACIÓN

- Los *sedimentos gruesos* se mueven por arrastre sobre el fondo de las corrientes; la intensidad de su movimiento depende de las condiciones y de la turbulencia del flujo cerca del fondo. Su transporte disminuye rápidamente con cualquier reducción de la intensidad del flujo, causada por un aumento en la profundidad o por la reducción de la pendiente y la velocidad.
- Los *sedimentos finos* cuya velocidad de asentamiento es mucho menor que la magnitud de las fluctuaciones turbulentas de la velocidad en el sentido vertical, viajan en suspensión en el agua y están totalmente sustentados por el flujo, aún en muy bajas velocidades. Por esta razón, no responden inmediatamente a los cambios de velocidad del agua o de intensidad general del flujo. Estas partículas suelen depositarse en forma más uniforme en el canal o en cualquier cuerpo de agua.

La medición de los sedimentos se realiza mediante la determinación de la concentración del material en suspensión en el agua, y mediante la determinación del transporte.

- Se denomina *concentración* a la cantidad de sólidos que se encuentran en una unidad de solución (sólido + líquido). Las concentraciones se expresan en partes por millón (ppm), o en peso de sólido por unidad de volumen líquido, es decir una parte por millón (1 ppm) es igual a 1 miligramo por litro (mg/l) y a 0,001 kg/m<sup>3</sup>.

Teóricamente las mayores concentraciones al interior de un cauce se deben distribuir más en los estratos más bajos que en los más altos dentro de un cauce natural; pero este proceso no se comporta igual cuando existe un intercambio turbulento de las masas de agua, en el cual las que suben transportan más partículas hacia la superficie que las que descienden hacia el fondo.

De esta forma se establece un estado de equilibrio entre el transporte descendente y el ascendente promedio debido al intercambio turbulento. Esto significa que una mayor turbulencia genera una mayor uniformidad en la distribución de los sedimentos, mientras que a mayores velocidades de asentamiento, derivados por un flujo más lento y regulado, resulta una distribución menos uniforme, con altas concentraciones cerca al fondo y bajas concentraciones hacia la superficie de la corriente.

Para determinar la carga sólida en suspensión de una corriente y para establecer tanto el transporte como la distribución de las diferentes partículas del material que la componen, normalmente se toman muestras a lo ancho de la sección de medida. La concentración media en una vertical es el promedio de las concentraciones de todos los puntos de la vertical. El propósito de realizar una campaña de mediciones es establecer un sistema adecuado para la selección de un número limitado de muestras que garanticen la representatividad de las concentraciones obtenidas, o sea, un buen estimativo de la concentración media en la sección de medida.

La concentración media "Cm" (kg/m<sup>3</sup>) en la sección resulta de dividir la carga de sedimentos "T" (kg/s) entre el caudal líquido "Q" (m<sup>3</sup>/s),

$$C_m = T / Q$$



Contrato No. 214 de 2010  
AJUSTAR EL PROGRAMA NACIONAL DE MONITOREO DEL RECURSO HÍDRICO Y LA DETERMINACIÓN DE LA ESTRATEGIA DE SU IMPLEMENTACIÓN

- El *transporte de sedimentos* es la cantidad de sólidos que transporta una corriente en la unidad de tiempo, y se obtiene con base en muestreo de sedimentos. El transporte total comprende tanto el sedimento que se traslada suspendido en la corriente como el que viaja arrastrándose o rodando por el fondo. El transporte de arrastre de fondo se mide directamente con muestreadores especializados para este fin y se expresa generalmente en m<sup>3</sup>/día. El transporte de sedimentos en suspensión se refiere a la cantidad de sólidos o sedimentos suspendidos que pasan por la sección de una corriente en una unidad de tiempo, se expresa generalmente en Ton/día o kg/s.

El transporte de sedimento en suspensión T (kg/s) es igual al producto de la concentración media Cm (kg/m<sup>3</sup>) por el caudal líquido Q (m<sup>3</sup>/s) que pasa por una sección:

$$T = Q \cdot C_m$$

Los procesos involucrados en la determinación de la concentración y el transporte de sedimentos son tres: el aforo sólido, la toma de muestras diarias y de fondo.

- *El aforo sólido* es el proceso por el cual se determina la cantidad de sólidos suspendidos que transporta un curso de agua en una unidad de tiempo y para un nivel de agua dado. Consiste en tomar muestras de agua en diferentes puntos de la sección de aforos, a lo ancho y en profundidad, para determinar la concentración y el transporte de sedimentos, asociados al nivel y al caudal que se presenta en la corriente durante el muestreo.
- *Muestreo y tipos de muestras.* El muestreo es el proceso por el cual se toma una muestra o cantidad de agua representativa de las condiciones de un río, lago o pozo, para ser analizada luego, bien sea en campo o en laboratorio. La calidad de los datos depende, en primer lugar, de que el muestreo se haya hecho correctamente. Los métodos de muestreo a utilizar (equipos y procedimientos) dependen de factores tales como el tipo de agua a muestrear, su calidad y el tipo de muestra.

Se pueden distinguir dos tipos principales de muestras:

Muestras puntuales: Se trata de muestras discretas tomadas en un punto, a una profundidad y en una fecha determinadas, con el fin de caracterizar la carga de sedimentos en suspensión en ese sitio y tiempo, o bajo diferentes volúmenes de muestra. Este tipo de aforo se utiliza en secciones profundas mayores de 5,0 metros. No obstante, es posible hacer aforos puntuales a profundidades menores, siempre y cuando el muestreador lo permita y se garantice el manejo del muestreador. Asimismo, si se emplea el muestreador USP-61 (ver más adelante, sección 3.1, Instrumentos de medida), no se recomienda a profundidades mayores a 15 m. En general, se toman varias muestras en una vertical, a diferentes profundidades previamente establecidas, cuyo número depende de la precisión del muestreo, las cuales posteriormente se mezclan, para constituir una muestra compuesta. El número de verticales a lo ancho de la sección de aforo no debe ser menor de seis. El aforo del caudal líquido debe ser simultáneo o previo a la medición del aforo sólido

Muestras integradas. En este tipo de muestreo, el muestreador recorre la vertical en ambas direcciones (superficie - fondo -superficie), de tal manera que durante el doble

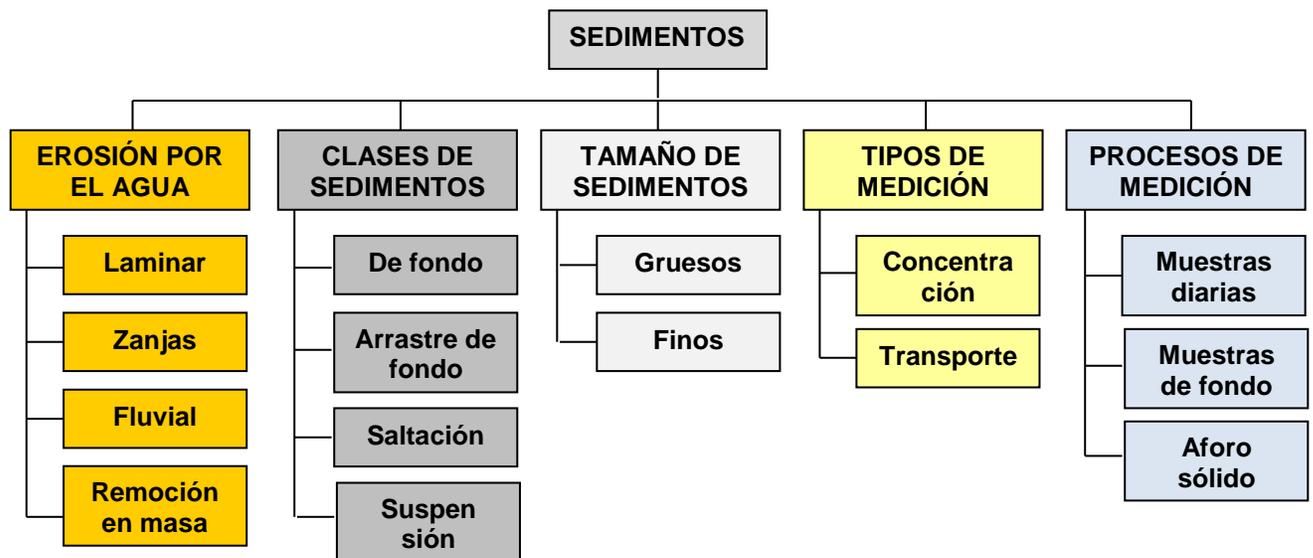
desplazamiento en la vertical se tome una muestra que representa la concentración media en la vertical.

**Muestras de fondo.** Consiste en instalar o construir sistemas que atrapan los sedimentos que se desplazan por el fondo de la corriente (trampas), pesarlos y determinar la cantidad de arrastre por unidad de tiempo.

En la sección de procedimientos de aforo, más adelante, se dan más detalles sobre la forma de componer las muestras puntuales y/o de hacer un muestreo integrado y de fondo. La figura 1 esquematiza los conceptos anteriores sobre origen, clase y tamaño de los sedimentos, tipos y procesos de medición.

En el presente protocolo se describe la forma como se debe medir el caudal sólido, la representatividad del sitio donde se mide, la frecuencia y hora de medición, las unidades en que se mide, la recolección de los datos y su procesamiento, validación, almacenamiento y difusión.

**Figura 1. Los sedimentos y los tipos y procesos de medición**



Fuente: Wilches H, IDEAM, 2011

## 1.2. PARA QUÉ SE MIDE EL CAUDAL SÓLIDO

Cuando se va a iniciar un programa de monitoreo de sedimentos o caudal sólido de los cursos o cuerpos de agua, la primera pregunta que se debe contestar es “para qué se mide”. No vale la pena gastar recursos económicos, técnicos y humanos en algo que no se sabe para qué va a servir. En principio, es importante medir los sedimentos de una corriente de agua con tres propósitos principales:

- Para conocer el transporte de sedimentos de una corriente, en atención a su importancia en la calidad del agua y en los procesos de aprovechamiento del agua y de los cauces para



Contrato No. 214 de 2010  
**AJUSTAR EL PROGRAMA NACIONAL DE MONITOREO DEL RECURSO HÍDRICO Y LA DETERMINACIÓN DE LA ESTRATEGIA DE SU IMPLEMENTACIÓN**

distintos fines.

- Para conocer la influencia que la carga sólida tiene sobre la amenaza que las crecidas de la corriente representan para las instalaciones o actividades humanas existentes o previstas en las proximidades del cauce, toda vez que mientras mayor sea la carga sólida mayor es la energía cinética del agua, aumentando su poder destructor sobre infraestructuras y viviendas, entre otros.
- Para soportar programas de protección de fuentes hídricas frente a amenazas de origen antrópico.

Si no existe la necesidad de conocer el caudal sólido (porque el agua o el cauce no se usa o no se va a usar, por ejemplo) o no existe un riesgo<sup>2</sup> actual o potencial ligado a las crecidas, o el curso o cuerpo de agua no está amenazado por procesos de sedimentación, no se justifica medir su caudal sólido.

Dentro de este marco, el conocimiento de los sedimentos de una corriente o cuerpo de agua se justifica por su uso para los siguientes fines, entre otros:

- Protección de la navegación fluvial, marítima y terrestre
- Diseño de obras civiles (alcantarillados, presas, carreteras, etc.)
- Diseño y operación de embalses.
- Planificación y control de riego y drenaje.
- Pronóstico de avenidas torrenciales e inundaciones, prevención y atención de desastres naturales y estudios de riesgo.
- Control de aprovechamientos hídricos y vertimientos.
- Planeación municipal, departamental y nacional.
- Sector académico, investigación, programas internacionales de intercambio de datos, programas internacionales de investigación, etc.

### Objetivos del monitoreo

De acuerdo con las estrategias para el logro de los objetivos de la política nacional para la gestión integral del recurso hídrico establecidos por el Gobierno Nacional<sup>3</sup>, el objetivo general para el Programa Nacional de Monitoreo del Recurso Hídrico (PNMRH) puede establecerse así:

“Formular y ejecutar un plan integrado de monitoreo del recurso hídrico que permita conocer la cantidad y calidad del mismo a nivel nacional, regional y local, con la participación y responsabilidad de las autoridades ambientales de estos niveles, con protocolos compartidos y bajo la vigilancia de la autoridad nacional, con el fin de garantizar la calidad de la información generada”.

De acuerdo con los componentes de este objetivo general y de las líneas estratégicas definidas por el Gobierno Nacional, los objetivos específicos del PNMRH en materia de sedimentos pueden desglosarse así:

<sup>2</sup>El riesgo resulta de la probabilidad de una amenaza (crecida en este caso) pueda afectar una actividad o instalación humana (vulnerabilidad).

<sup>3</sup> Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, Viceministerio de Ambiente. Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico. Bogotá. 2010.



INFORME FINAL

epam s.a. esp

Contrato No. 214 de 2010  
**AJUSTAR EL PROGRAMA NACIONAL DE MONITOREO DEL RECURSO HÍDRICO Y LA DETERMINACIÓN DE LA ESTRATEGIA DE SU IMPLEMENTACIÓN**

*Objetivos a nivel nacional:*

1. Actualizar, complementar, operar y mantener la red de monitoreo de caudal sólido de corrientes de agua a nivel nacional, tomando como referencia las 41 zonas hidrográficas definidas por el IDEAM.

*Objetivos a nivel regional y local:*

2. Homologar, consolidar y compartir los sistemas de monitoreo, seguimiento y evaluación de caudal sólido de corrientes de agua y su distribución espacio-temporal a nivel de subzona y cuenca hidrográfica, de acuerdo con prioridades fijadas en el Plan Hídrico Nacional, y con la finalidad de apoyar la planeación de proyectos de aprovechamiento y control del recurso hídrico.
3. Integrar en un sistema jerarquizado las redes y programas de monitoreo regional y local de caudal sólido de corrientes de agua, y establecer protocolos comunes de instalación, operación, procesamiento y control de calidad



## 2. ASPECTOS GENERALES DEL MONITOREO DE SEDIMENTOS

### 2.1. SELECCIÓN DEL SITIO: DÓNDE MEDIR

La segunda pregunta que surge en un programa de monitoreo de caudales es “dónde medir”. La selección del sitio o sitios de medición depende del objetivo del monitoreo, el cual puede requerir redes más o menos densas, cuyos criterios de diseño pueden consultarse en el informe del “Programa Nacional de Monitoreo del Recurso Hídrico”, consultable en la web del IDEAM.

Diseñada la red, si no existe, se debe definir el sitio o sitios específicos de medición, los cuales deben cumplir los mismos requerimientos de una estación de aforo líquido, a saber:

- a. La sección debe estar situada a un tramo recto de la corriente. En lo posible, la longitud del tramo tendrá un mínimo equivalente a cinco (5) veces el ancho de la sección.
- b. La sección debe ser profunda y tener márgenes naturales altas, para evitar desbordamientos en aguas máximas, con lo cual se garantiza la calibración de caudales máximos.
- c. La pendiente longitudinal del cauce debe ser uniforme, evitándose tramos con quiebres fuertes de pendiente que desequilibran la velocidad de la corriente. Se deberá evitar áreas de aguas muertas y contracorrientes o remolinos.
- d. El lecho del río debe tener geometría regular, cauce estable y no tener obstáculos (troncos de árboles, grandes rocas, vegetación, etc.). Se debe evitar los lechos fangosos.
- e. La corriente debe mostrar líneas de flujo uniformes y paralelas a las márgenes de la corriente y deben ser normales a la sección transversal de aforos.
- b. La geología del terreno deberá facilitar la construcción de las obras para medición como tarabitas, puentes, pasarelas y otras necesarias para el aforo líquido y sólido.

### 2.2. HIDROTOPOGRAFÍA<sup>4</sup>

Una vez escogido el sitio de la estación, se debe realizar la hidrotopografía del mismo, cuyo objeto es conocer las características topográficas del área y tramo de emplazamiento de la estación, en especial en los siguientes aspectos: georreferenciación, topografía del sector de la estación e hidrotopografía del cauce en el tramo de aforos. Este conocimiento permite, además, reconstruir la estación, en caso de que sus obras sean destruidas por algún evento extremo. Dado que la estación de aforo sólido coincide con una estación de aforo líquido, los procedimientos de hidrotopografía son los mismos indicados en el protocolo de niveles y caudales.

### 2.3. FRECUENCIAS DE MONITOREO DE SEDIMENTOS

#### Frecuencia de muestreo y aforo sólido

La frecuencia del monitoreo de sedimentos debe estar determinada por la variabilidad de la carga sólida del curso de agua y las condiciones de estabilidad de la sección.

<sup>4</sup>Esta sección se elaboró con base en una propuesta de Domínguez C., E., IDEAM, 2000.



La frecuencia de toma de muestras superficiales de sedimentos en suspensión debe ser diaria, con tres muestras por cada muestreo, como se especifica en la sección 3.4.2 de Medición.

La frecuencia de aforo sólido debe ser por lo menos de un aforo mensual, buscando en lo posible aforar en épocas de aguas altas, bajas y medias.

La toma de muestras de fondo debe corresponder con los objetivos del monitoreo, aunque, en lo posible se recomienda que tengan la misma frecuencia del aforo sólido.

### **Frecuencia de inspecciones a las estaciones**

No existen propiamente hablando estaciones de muestreo de sedimentos, constituidas por instalaciones o infraestructuras especiales. Como se dijo arriba, el muestreo se lleva a cabo en los mismos sitios de las estaciones hidrométricas, y aprovecha la infraestructura de éstas. Por tanto, las visitas de inspección a los sitios de muestreo corresponden a las visitas de inspección de las estaciones hidrométricas (ver protocolo de niveles y caudales).

### **Frecuencia de transmisión de los datos de muestreo de campo a oficina**

En un programa regular de muestreo de sedimentos sólo son transmisibles los filtros de las muestras tomadas, debidamente rotulados y empacados, los cuales deben ser enviados al laboratorio una vez finalice el aforo sólido. Por tanto, la frecuencia de envío de los filtros para análisis de laboratorio es la misma frecuencia del aforo sólido. Junto con las muestras o filtros tomados durante el aforo sólido, es necesario diligenciar las casillas del formato de aforo sólido que corresponda llenar con los datos de campo (ver sección 4.1, Registro de datos de campo).

Los filtros de las muestras superficiales diarias deben ser debidamente almacenados y recogidos por la comisión de inspección, con la frecuencia con que ésta se realice.

Previo el envío de los datos y/o filtros al laboratorio de la entidad, los mismos deben ser objeto de un control de calidad por parte del Área Operativa o entidad involucrada, tal como se describe más adelante, en la sección 5.

## **2.4. PARÁMETROS A MEDIR Y UNIDADES DE MEDIDA**

Los principales *parámetros* del monitoreo de sedimentos son:

- Concentración de sedimentos en suspensión: concentración determinada en laboratorio a partir de las muestras tomadas en campo, bien sea diarias o correspondientes a los aforos líquidos.
- Transporte sólido: resultante de aplicar las ecuaciones que relacionan la concentración con el caudal líquido y el caudal líquido con el caudal sólido.

*Unidades de medida.* La concentración se mide generalmente en unidades de peso por unidades de volumen, y generalmente se da en miligramos por litro (mg/l), que se pueden convertir en kilogramos por metro cúbico ( $\text{kg/m}^3$ ) o, en caso necesario, en toneladas por metro cúbico ( $\text{t/m}^3$ ). El transporte o caudal sólido se expresa en unidades de peso por unidades de



INFORME FINAL

epam s.a. esp

Contrato No. 214 de 2010  
**AJUSTAR EL PROGRAMA NACIONAL DE MONITOREO DEL RECURSO HÍDRICO Y LA DETERMINACIÓN DE LA ESTRATEGIA DE SU IMPLEMENTACIÓN**

tiempo, que generalmente se da en kilogramos por segundo (kg/s), aunque se puede convertir en toneladas por día (t/d) o kilotoneladas por año (kt/año).



### 3. MEDICIÓN DE SEDIMENTOS

#### 3.1. INSTRUMENTOS DE MEDIDA

No existe una forma única de efectuar mediciones del transporte de sedimentos en las corrientes hídricas, por lo cual los equipos utilizados son variados. En general, las mediciones de los sedimentos se realizan tomando muestras dentro del flujo en una sección de aforo para un nivel y un caudal determinado. La medición de cada tipo de sedimento depende de la heterogeneidad en el tamaño de los granos, la densidad y la manera como se transporta dentro del flujo de la corriente.

La figura 2 muestra algunos de los equipos de muestreo de sedimentos en suspensión más utilizados, en función de la profundidad del cauce. La tabla 1 muestra las características de algunos instrumentos de medición de concentración y transporte. Conviene destacar de manera especial la precisión para muestreo de limos y arcillas de cada instrumento. Se observa que mientras algunos instrumentos como la botella (frasco) y el USP-61 alcanzan precisiones del 100% para concentración, otros como las bombas de botella y de filtro escasamente alcanzan el 20%. Los instrumentos electrónicos no arrojan tampoco precisiones de más del 50% (según datos del Laboratorio Hidráulico de Delft, Holanda).

En Colombia, los instrumentos históricamente utilizados son:

- Muestreadores tipo USDH - 48, USD - 49, USDH - 59 Y USP - 61
- Muestreadores con bolsa plegable.
- Tomamuestras superficiales con frascos de 470 ml. (500 cm<sup>3</sup> en Colombia)
- Tomamuestras de fondo, tipos, draga y US -BMH.

Los tipos de muestreadores más utilizados en el país son<sup>5</sup>:

- Muestreadores integradores puntuales. (U.S.P - 61)
- Muestreadores integradores en profundidad. (USDH - 48, USD - 49, USDH - 59, bolsa plegable)
- Medidores de acción continua (bombeo)
- Muestreadores instantáneos, (tipo Van Dorn).

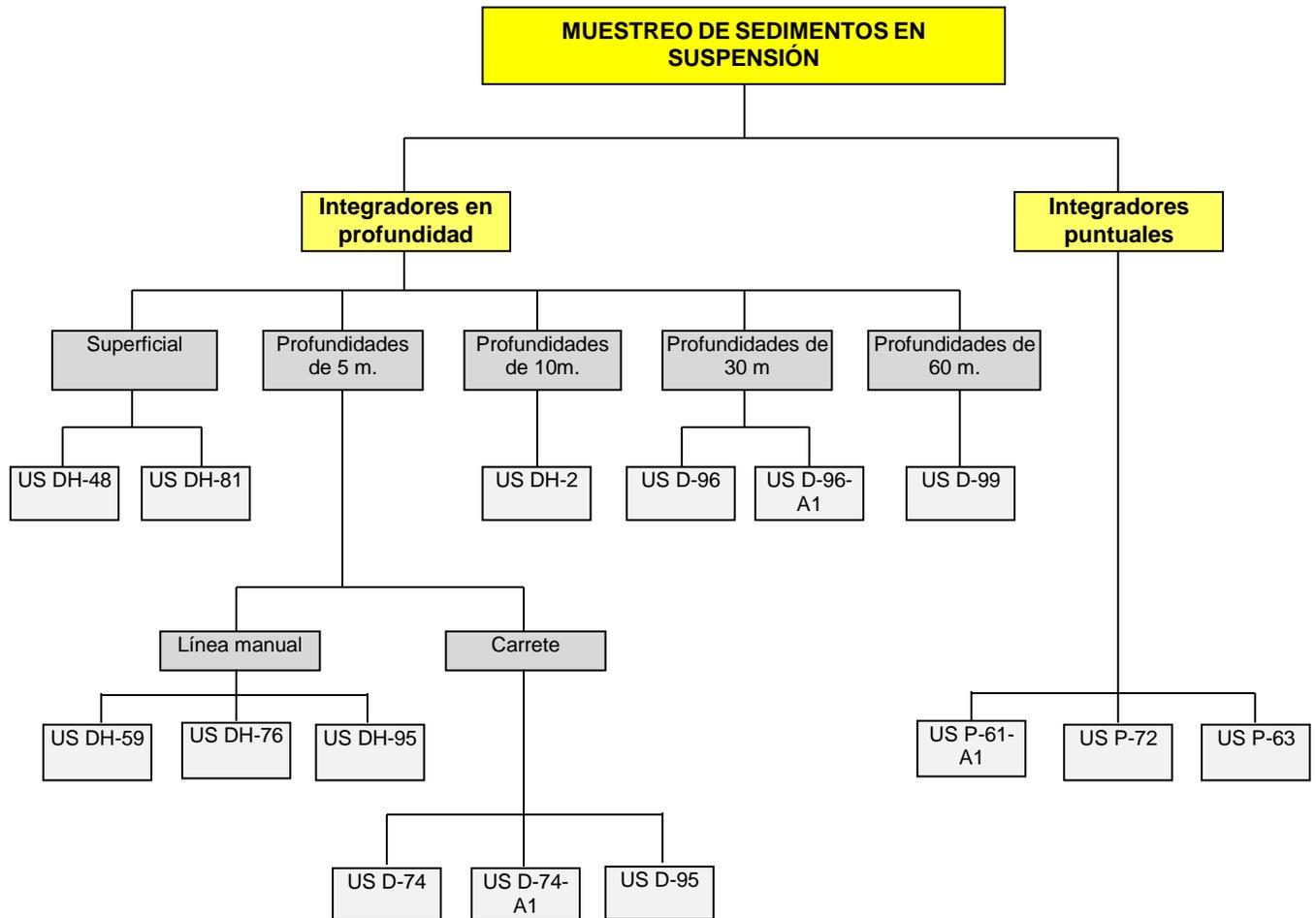
##### 3.1.1. Muestreadores integradores puntuales<sup>6</sup>

Los muestreadores integradores puntuales consisten en un recipiente provisto de una válvula accionada desde la superficie, que permite abrir y cerrar el acceso del agua para tomar muestras en los puntos deseados. Junto con la válvula de acceso funciona un dispositivo de compensación de presiones que facilita la entrada del agua a la misma velocidad del flujo. Este muestreador es utilizado cuando se quiere determinar la distribución de la concentración de sedimentos en la vertical.

<sup>5</sup> Según IDEAM, Protocolo para el monitoreo y seguimiento del agua. Bogotá. 2007.

<sup>6</sup> En general, en esta descripción se ha seguido a: IDEAM, Protocolo para el monitoreo y seguimiento del agua. Bogotá. 2007.

**Figura 2. Equipos y métodos para medición de sedimentos en suspensión**



Fuente: Davis (2005), en Manual Sediment Transport Measurements (2006).

Un modelo perfeccionado de este tipo de muestreadores es el U.S.P. – 61, desarrollado por el Inter - Agency Committee on Water Resources de los Estados Unidos. Este modelo fue construido con características hidrodinámicas y consta de un cuerpo de bronce fundido provisto de aletas y cola direccional (figura 3).

La parte delantera del muestreador es rebatible para permitir el acceso a una cavidad donde se aloja una botella de 500 cc. Al cerrarla, se ajusta un empaque en forma de anillo a la boca de la botella dejándola comunicada con la válvula de acceso y el escape de aire. El muestreador pesa 46 kilogramos (100 libras aprox). Para el acceso del agua al frasco de la muestra se emplean tres tamaños de boquillas (1/4", 3/16" y 1/8"). La recolección del volumen óptimo en una muestra depende de la velocidad del flujo y el diámetro de la boquilla utilizada, tal como se indica en la sección de procedimientos, 3.4.3 (figura 17).

**Tabla 1. Características de instrumentos para medición de concentración y transporte de sedimentos**

Muestreadores de sedimentos en suspensión	Sedimentos en suspensión		Parámetro medido	Rango de medición (mg/l)	Tiempo de respuesta (s)	Período de muestreo (min)	Período mínimo del ciclo (min)	Precisión global		
	Limo (<50µm)	Arena (<50µm)						Limo	Arena	
<b>Instrumentos mecánicos</b>										
Botella	Si	Si	Concentración	>1	-	1	5	100%	100%	
Trampa	Si	Si	Concentración	>1	Instantáneo	Instantáneo	5	100%	100%	
USP-61	Si	Si	Concentración – transporte	>1	-	1	5	100%	100%	
Botella Delft	No	Si	Transporte	>10	-	5-30	10	-	50%	
Bomba de filtro	No	Si	Concentración	>10	-	5-15	10	-	20%	
Bomba de sedimentación	No	Si	Concentración	>50	-	5-15	15	-	20%	
Bomba de botella	Si	Si	Concentración	>1	-	1-5	5	20%	20%	
<b>Instrumentos electrónicos</b>										
OBS – óptico	Si	No	Concentración	10-100.000	<1	Libre	5	50%	-	
LISST – óptico	Si	Si	Concentración – tamaño de partículas	10-500	<1	Libre	5	30%	30%	
OBS de bomba	Si		Concentración	10-100.000	-	Libre	5	50%	-	
ASTM de punto acústico	No	Si	Concentración – transporte	10-10.000	<1	Libre	5	-	50%	
ABS de perfil acústico	No	Si	Concentración	10-10.000	<1	Libre	5	-	50%	

Fuente: Manual Sediment Transport Measurements. 2006.

OBS: Optical backscatter point sensor. LISST: Laser InSitu Scattering and Transmissometry. ASTM: The Acoustic Sand Transport Monitor (o USTM). ABS y ACDP: Acoustic backscatter profiling sensors.

### 3.1.2. Muestreadores integradores en profundidad

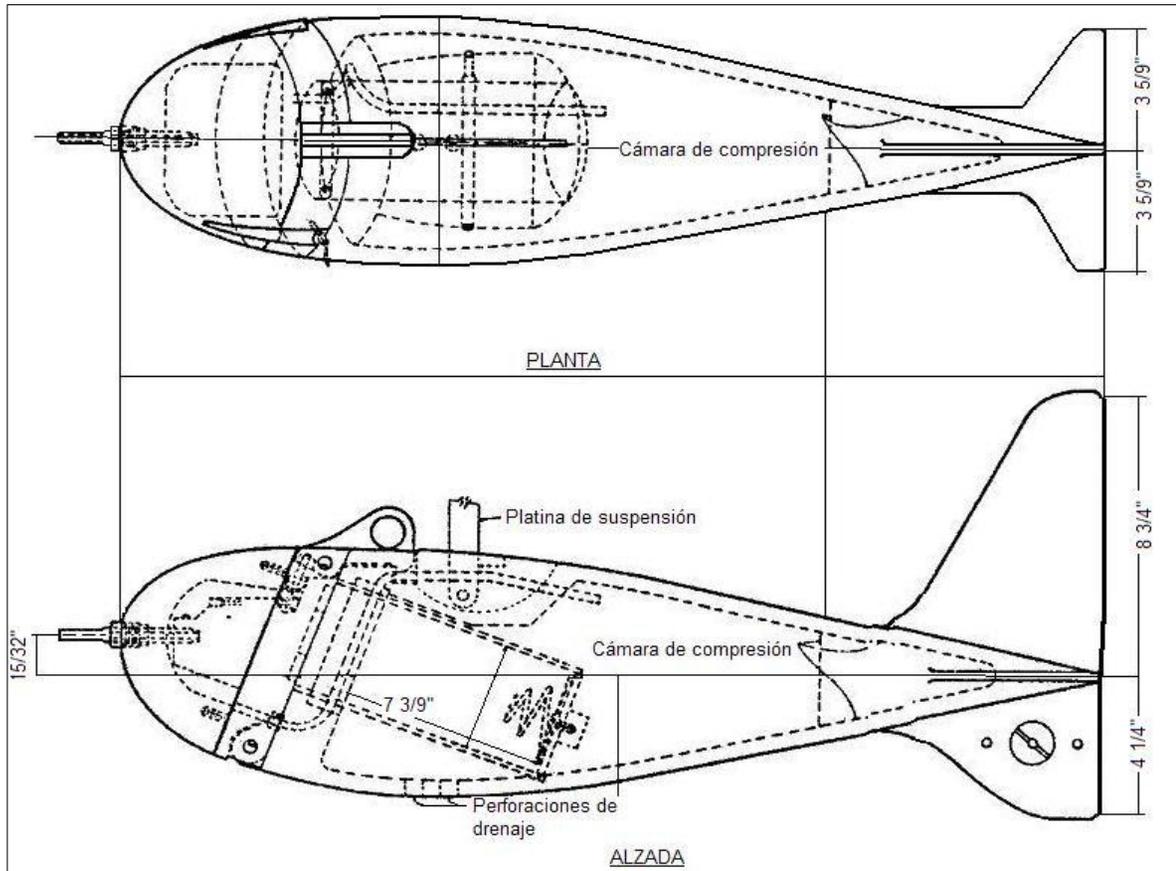
Los muestreadores integradores de profundidad no poseen una válvula que controle el acceso del agua. Se utilizan para obtener muestras representativas de toda una vertical de medición, haciendo descender el instrumento hasta el fondo y de vuelta a la superficie en una vertical de medición, de tal manera que recorra dicha vertical a una velocidad de tránsito constante que está en función de la velocidad de la corriente, de la profundidad y diámetro de la boquilla del muestreador.

Los muestreadores integradores en profundidad más utilizados son los tipos USDH - 48, USD - 49 y USDH - 59. Tienen forma hidrodinámica y su peso varía entre 2,28 y 11 kilogramos. Poseen una válvula reguladora de presión que permite la entrada del agua a la boquilla a la misma velocidad del flujo. Se utilizan boquillas de diámetros de 1/4", 3/16" y 1/8" y botellas plásticas de 500 cm<sup>3</sup> de capacidad.

El muestreador USDH – 48 (figura 4) es el más pequeño de todos y está construido para operarlo manualmente por medio de una varilla en secciones en donde se afore caudal por el sistema de vadeo. En la parte inferior tiene una cavidad donde se aloja la botella, la cual se ajusta mediante un dispositivo que aprisiona la botella por medio de un resorte.

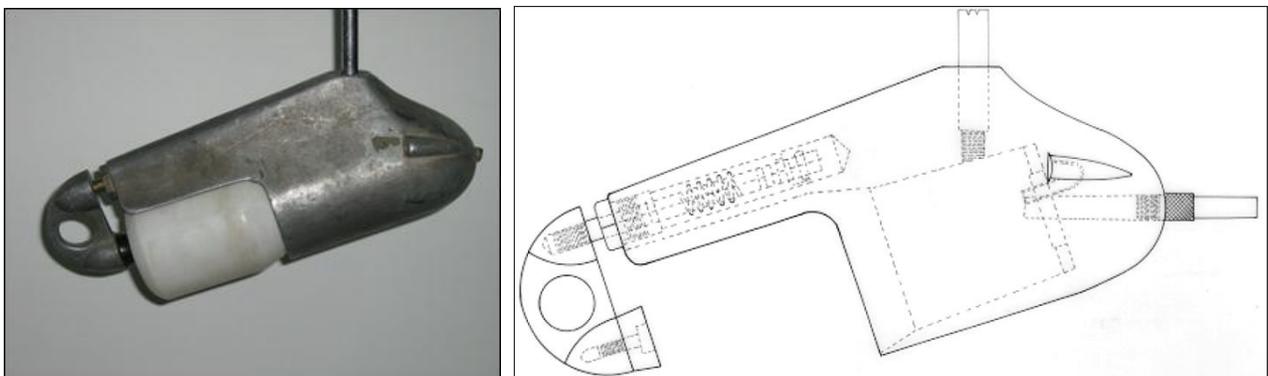
El muestreador tipo USD - 49 (figura 5) se emplea para mediciones en profundidad hasta de 5 metros y velocidades máximas de 2,0 y 1,5 m/s. El muestreador USDH – 59 (figura 6), por su menor peso, debe utilizarse solamente cuando la velocidad de la corriente sea menor a 1 m/s.

**Figura 3. Muestreador tipo U.S.P. – 61**



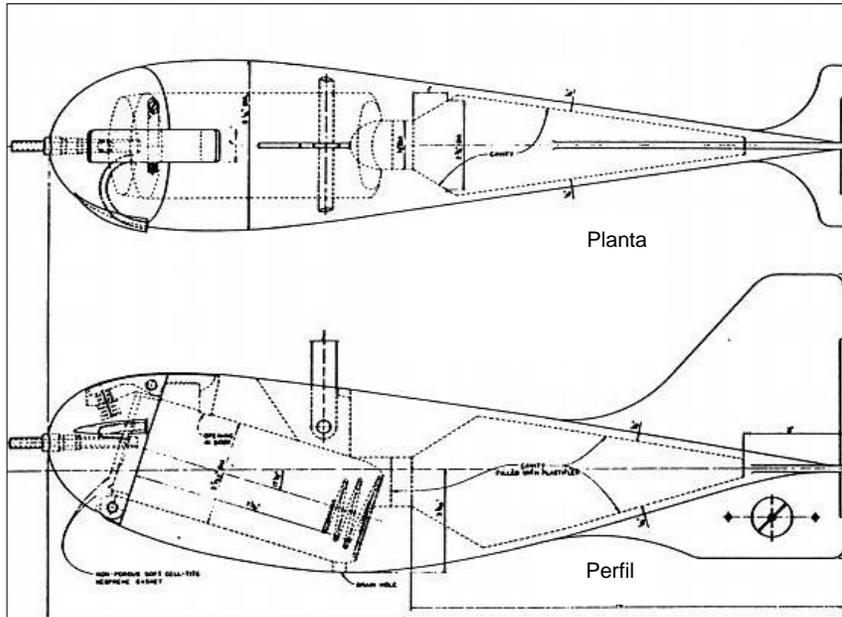
Fuente: Wilches H, 2009 (IDEAM)

**Figura 4. Muestreador para sedimentos en suspensión tipo USDH-48**



Fuente: Wilches H, 2009; e IDEAM, Protocolo para el monitoreo y seguimiento del agua. Bogotá. 2007.

**Figura 5. Muestreador integrado de profundidad tipo U.S.D. – 49**

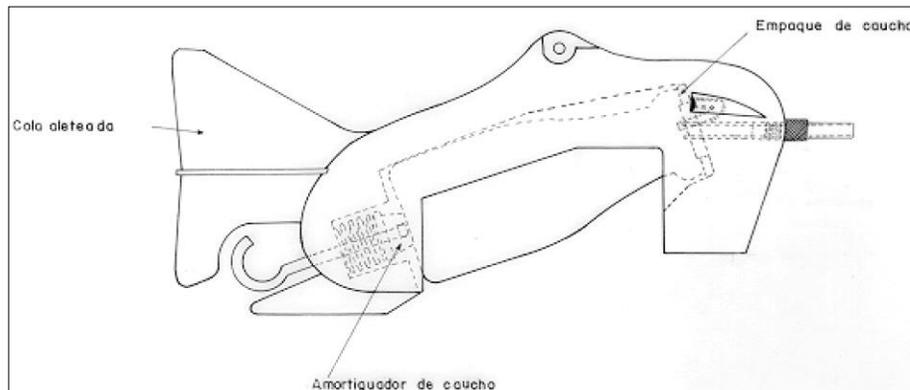


Fuente: Manual Sediment Transport Measurements. 2006.

Debido a la limitada capacidad de los recipientes de los muestreadores, que hace que cuando la muestra presenta baja concentración y las partículas son de variado tamaño, puede resultar en un peso relativamente mayor al real, distorsionando la distribución de los tamaños de diámetros a la carga medida, puede ser necesario tomar varias muestras del mismo punto.

Para el uso de este tipo de muestreadores integradores es necesario calcular la velocidad con que se debe desplazar el instrumento en su recorrido de la superficie al fondo y regreso a la superficie, tal como se indica en la sección de procedimientos 3.4.3 (figura 18).

**Figura 6. Muestreador para sedimento en suspensión tipo USDH-59**



Fuente: IDEAM, Protocolo para el monitoreo y seguimiento del agua. Bogotá. 2007.



### Muestreador para aforo con bolsa plegable

El muestreador para aforo con bolsa plegable, diseñado por el Geological Survey de los Estados Unidos, se utiliza para recoger muestras integradas de sedimentos en suspensión en corrientes con profundidades mayores a 5 m, debido a su capacidad de volumen (2 a 4 L). Según experiencias, alcanza profundidades del orden de 75 m. También se utiliza en forma horizontal, para recoger muestras integradas de una sección, a una misma profundidad (ver figura 7).

La bolsa plegable consta de los siguientes elementos<sup>7</sup>:

- a. Canastilla: fundamentalmente se emplean dos tipos de canastillas, una para contener una botella de 3 ó 4 litros (1 galón), y otra para contener una botella de 7 u 8 litros (2 galones).
- b. Botellas o garrafas plásticas perforadas: se consiguen botellas plásticas de uno o dos galones con el cuello y la boca posicionados lateralmente. Los huecos liberan la presión a la que están sometidas cuando están sumergidas.
- c. Tapa plástica hidrodinámica: es una tapa adaptada a la botella plástica, diseñada para soportar la boquilla. La tapa original se utiliza mientras no se use la tapa con la boquilla, para evitar que se dañe la rosca de la botella.
- d. Boquillas: se usan las mismas boquillas que suelen emplearse en los muestreadores del tipo U.S.P o U.S.D.H y su material puede ser de aleación de bronce o teflón. Las boquillas de teflón se utilizan cuando se requieren muestras no contaminadas por un metal. Los diámetros utilizados son:
  - Boquilla No. 1: 1/8" o 3,18 mm
  - Boquilla No. 2: 3/16" o 4,76 mm
  - Boquilla No. 3: 1/4" o 6,35 mm
  - Boquilla No. 4: 5/16" o 7,94 mm
- e. Bolsas: las bolsas de plástico o polietileno utilizadas tienen un calibre de 45 milésimas de milímetro. Para botellas de un galón se utilizan bolsas de 25 cm x 40 cm y para botellas de dos galones se utilizan bolsas de 35 cm x 50 cm.
- f. Escandallo: dependiendo de la profundidad y la velocidad de la corriente se usan las pesas hidrodinámicas o escandallos convencionales de 50, 75 ó 100 Kg, con sus respectivas platinas para sujetarlos a la canastilla y al molinete.
- g. Lastre: se usa un lastre de 30 a 50 gramos que debe ser colocado dentro de la bolsa plástica con el objeto de mantenerla en el fondo de la botella; también puede emplearse una esfera de vidrio o bola de cristal de 2 cm de diámetro.
- h. Correntómetro: se utiliza cuando se va a medir la velocidad de la corriente paralelamente con la toma de la muestra.

Algunas ventajas de los muestreadores de este tipo son:

- a. Económicos.
- b. Sencillos en su construcción.
- c. Más livianos.

<sup>7</sup> Según IDEAM, Protocolo para el monitoreo y seguimiento del agua. Bogotá. 2007.

- d. Sus partes y elementos se consiguen fácilmente en el mercado nacional o se pueden fabricar, dada su sencillez.
- e. Recogen muestras integradas en una misma vertical.
- f. Recogen muestras integradas de una sección a una misma profundidad.
- g. Recogen muestras de gran volumen.

**Figura 7. Uso del muestreador en aforo de bolsa plegable**



Fuente: Wilches H, 2009 (IDEAM)

Algunas desventajas son:

- a. Las muestras recogidas en la bolsa plegable siempre deben ser depositadas en otro recipiente para enviarlas al laboratorio.
- b. Como los muestreadores van acoplados al escandallo, existe una zona que queda sin muestrear debido a la distancia H entre el escandallo y la botella.
- c. Se deben usar tantos tamices como verticales tenga el aforo, para evitar que se retengan partículas de menor tamaño por la acumulación del sedimento una vez se ha pasado por el mismo tamiz varias muestras (ver sección 3.4.3, figura 21).

### 3.1.3. Muestreador diario

La toma de muestras diarias de sedimentos en suspensión se realiza utilizando una canastilla metálica manipulada con una cuerda desde la tarabita o puente (figura 8). El método está basado en la correlación directa entre la concentración media del material sólido de las

muestras superficiales y la concentración media de la sección transversal de la estación de cada aforo sólido realizado.

**Figura 8. Canastillas de hierro soldado para botellas ½ L**



Fuente: Wilches, 2009 (IDEAM)

#### 3.1.4. Instrumentos para medición del caudal de arrastre de fondo

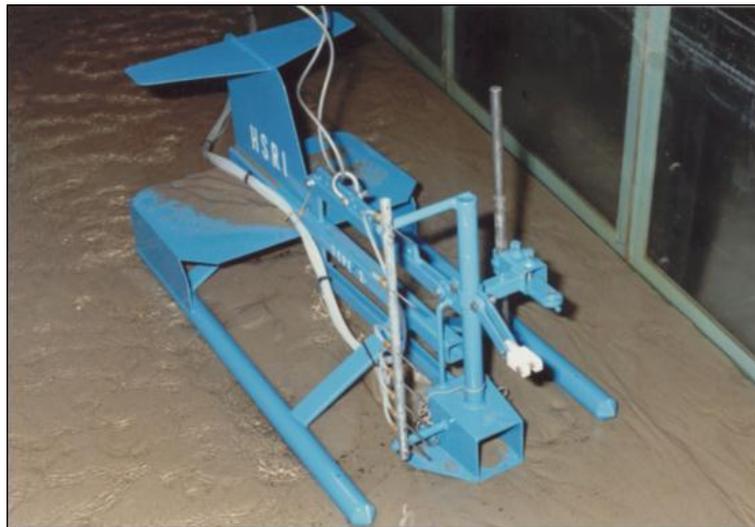
La naturaleza estocástica del movimiento del sedimento de fondo y su producción en forma de ondas de fondo, dunas y barras, hacen muy difícil la medición sobre el terreno del caudal de arrastre de fondo. No hay un equipo completamente adecuado para retener las partículas de diferente tamaño con la misma eficiencia, que pueda permanecer en una posición estable y orientado hacia la corriente sobre el fondo del río, sin perturbar el flujo natural y el movimiento del sedimento.

Los muestreadores disponibles pueden ser clasificados en tres tipos: de cesta, de cazoleta y de diferencia de presión.

- Los muestreadores de cesta están hechos, por lo general, de mallas y tienen una abertura en la parte orientada contra la corriente por la que se desliza la mezcla de agua y sedimento. La malla deja pasar el sedimento en suspensión, pero retiene el sedimento que se desliza a lo largo del lecho.
- El muestreador del Instituto Delft usado en el Nilo (figura 9) consiste de un muestreador de arrastre de fondo y de uno de sedimentos en suspensión, así como también de una cámara de video subacuática.
- Los muestreadores de tipo cazoleta suelen ser de sección longitudinal en forma de cuña y se instalan de modo que la arista de la cuña corte la corriente; la cazoleta contiene deflectores o ranuras para retener los materiales en movimiento (figura 10).
- Los muestreadores basados en el principio de la diferencia de presión están diseñados

para producir en la salida del instrumento un descenso de presión lo suficientemente importante para contrarrestar las pérdidas de energía y asegurar así una velocidad de entrada igual a la de la corriente en condiciones normales. Un diafragma perforado dentro del instrumento obliga a la corriente a hacer caer su sedimento en una cámara de retención y luego salir a través de una salida superior.

**Figura 9. Muestreador del Delta del Nilo para material de fondo**



Fuente: Manual Sediment Transport Measurements. 2006.

**Figura 10. Muestreador de material de fondo usado en IDEAM**



Fuente: Wilches H. 2009 (IDEAM)



Las incertidumbres en la realización del muestreo requieren determinar un coeficiente de eficiencia para cada tipo de muestreador. La calibración se realiza generalmente en un canal de laboratorio, donde el caudal de material de fondo puede ser medido directamente en un pozo en el extremo del canal, aunque las condiciones de transporte uniforme en la anchura y a lo largo del canal son difíciles de mantener. Incluso en condiciones favorables, los factores de eficiencia son difíciles de determinar porque varían según el tamaño de los granos, el grado de llenado del muestreador, etc. En todo caso, una eficiencia del 60 al 70 % puede ser considerada como satisfactoria.

### **3.2. INSTALACIONES NECESARIAS PARA EL MUESTREO**

No es necesario instalar una red específica para muestreo de sedimentos. Éste se puede realizar en las mismas estaciones hidrométricas donde se realizan aforos líquidos. Por tanto, las secciones de aforo sólido deben responder a los mismos requerimientos de las secciones de una estación hidrométrica, tal como se describen en la sección 2.1 de este protocolo.

### **3.3. MANTENIMIENTO DE INSTALACIONES Y EQUIPOS DE MUESTREO**

Para el mantenimiento de las estaciones de aforos se deben seguir los mismos procedimientos indicados para el mantenimiento de las instalaciones y equipos de las estaciones hidrométricas (ver protocolo de niveles y caudales), toda vez que el cálculo de las series diarias de transporte de sedimentos exige la utilización de las series diarias de caudales, y éstas de las series diarias de niveles.

Además, se deben seguir procedimientos adicionales para el mantenimiento de los equipos de muestreo empleados tanto en los aforos sólidos como en el muestreo diario superficial, descritos en la sección 3.1 anterior.

### **3.4. PROCEDIMIENTOS DE MEDICIÓN DE SEDIMENTOS**

#### **3.4.1. Procesos del monitoreo de sedimentos**

Antes de describir los métodos de observación, es necesario tener en cuenta los procesos que intervienen en el monitoreo de sedimentos, tal como se resumen en la figura 11.

- Diariamente se toman muestras superficiales de agua, de las cuales se realizan determinaciones de concentración superficial de sedimentos.
- Periódicamente se realizan aforos sólidos, que permiten determinar la concentración media de sedimentos en suspensión en la sección de aforos, así como la concentración superficial. Con base en los aforos sólidos se determina la relación entre caudal líquido y caudal sólido, y se establece la relación entre concentración superficial y media de los aforos. Con esa relación y la serie de concentraciones superficiales diarias, se genera la serie de concentraciones medias diarias. Con esta serie y con la serie de caudales líquidos se determina el transporte diario de sedimentos en suspensión. La relación caudal líquido vs caudal sólido también permite determinar el transporte diario.
- Para conocer el transporte total de sedimentos de una corriente, es necesario, además del muestreo de sedimentos en suspensión, realizar el muestreo de material de arrastre de

fondo, cuyas muestras también requieren un proceso especial de laboratorio (granulometría).

Para la determinación de las concentraciones, el proceso general incluye una interfase de laboratorio, que involucra los procedimientos indicados en la figura 12.

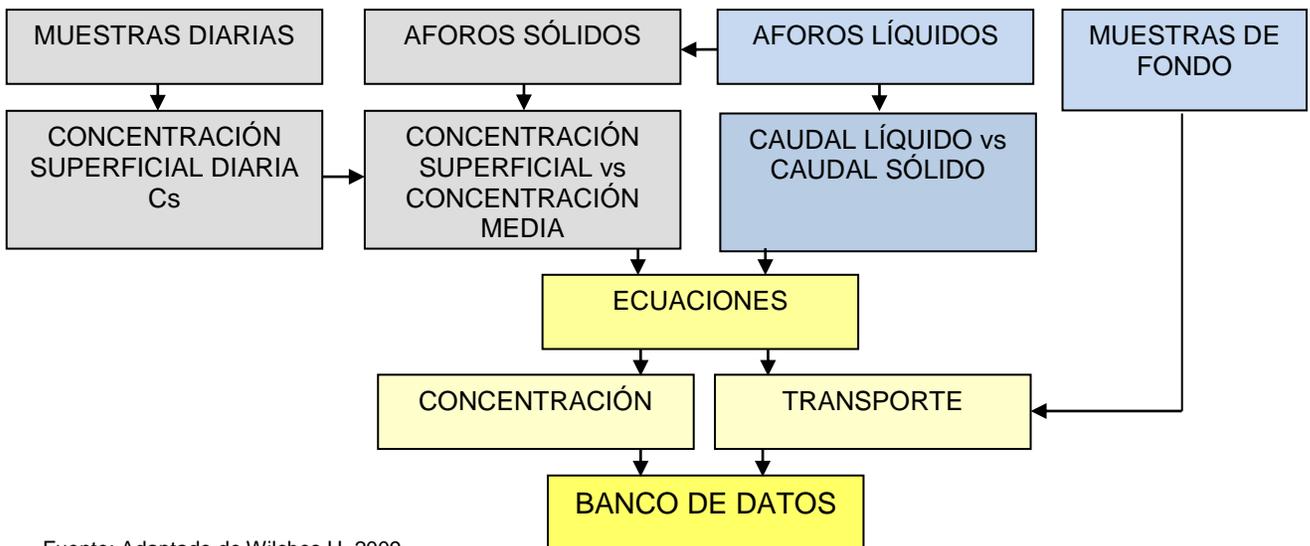
### 3.4.2. Muestreo diario de sedimentos en suspensión

Para la toma de muestras diarias se emplea una botella plástica de 500 cc. El tamaño óptimo debe fluctuar entre el 60 y el 90%, como se muestra en la figura 13.

Las botellas se deben marcar de acuerdo con la localización de la muestra en la sección, y luego se introducen en la canastilla de muestreo. La toma de muestras se realiza desde puentes o estructuras (tarabitas), como se muestra en la figura 14.

En el proceso de toma de la muestra se debe evitar que, si la muestra sale por debajo del óptimo (ver figura 13), se introduzca de nuevo la misma muestra para completarla. En tal caso, se debe desechar la muestra y volverla a tomar.

**Figura 11. Componentes del monitoreo de sedimentos**



Fuente: Adaptado de Wilches H, 2009

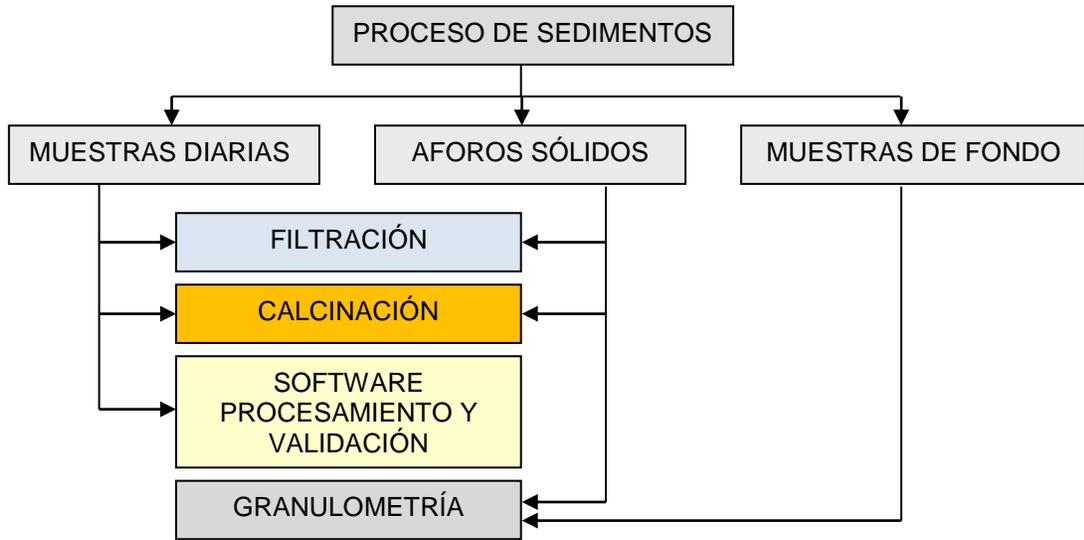
Una vez tomada la muestra, es necesario medir exactamente el volumen muestreado, para lo cual se puede utilizar una pipeta y una tabla de conversión, como se indica en la figura 15.

Los resultados de campo se anotan en el formato de registro de muestras diarias de sedimentos, el cual debe contener como mínimo la siguiente información (ver un formato tipo en Anexo 1):

- Identificación de la estación
- Año y mes de muestreo

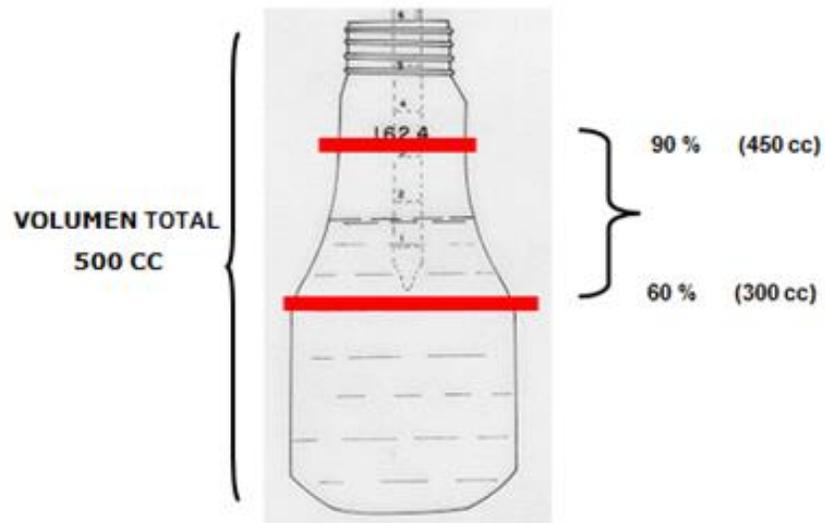
- Día y hora de la muestra

**Figura 12. Componentes del proceso de muestra en laboratorio**



Fuente: Wilches, 2009, IDEAM

**Figura 13. Tamaño óptimo de la muestra diaria**



Fuente: Wilches, 2009 (IDEAM)

Contrato No. 214 de 2010  
**AJUSTAR EL PROGRAMA NACIONAL DE MONITOREO DEL RECURSO HÍDRICO Y LA DETERMINACIÓN DE LA ESTRATEGIA DE SU IMPLEMENTACIÓN**

**Figura 14. Botellas plásticas de 500 cc y proceso de toma de muestras. Obsérvese que cada una está etiquetada de acuerdo con la localización de la muestra (a  $\frac{1}{4}$ ,  $\frac{1}{2}$  y  $\frac{3}{4}$  de la orilla de referencia)**

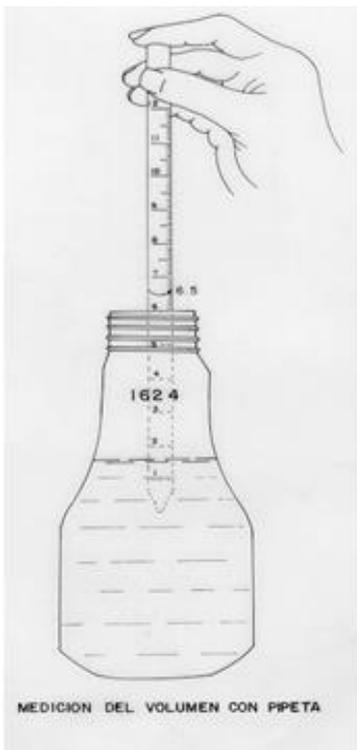


**BOTELLAS DE 500 CC PARA MUESTREO**



Fuente: Wilches, 2009 (IDEAM)

**Figura 15. Medición del volumen muestreado con pipeta**



Fuente: Wilches, 2009 (IDEAM)

**MEDICION DEL VOLUMEN**

→ DIVISIONES DECIMALES

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	119,0	121,5	124,0	129,0	131,5	134,2	139,0	141,5	146,5	149,5
1	151,5	156,5	161,5	164,0	169,0	174,0	176,5	181,5	186,5	189,5
2	193,0	199,0	204,0	209,0	211,1	216,5	221,5	226,5	231,5	239,5
3	241,5	246,5	251,5	259,0	261,5	266,5	271,5	276,5	281,5	289,5
4	294,5	299,0	304,0	309,0	314,0	321,5	326,5	331,5	336,5	341,5
5	346,5	349,0	354,0	356,5	361,5	364,0	369,0	371,5	376,5	379,0
6	381,5	384,0	389,0	391,5	394,5	396,5	399,0	401,5	404,0	406,5
7	409,0	411,5	414,0	416,5	419,0	421,5	424,5	425,2	426,5	429,0
8	432,7	431,5	434,0	436,5	439,0	441,5	442,7	444,0	446,5	449,0

← DIVISIONES ENTEROS

**TABLA DE CONVERSION**



Contrato No. 214 de 2010  
**AJUSTAR EL PROGRAMA NACIONAL DE MONITOREO DEL RECURSO HÍDRICO Y LA DETERMINACIÓN DE LA ESTRATEGIA DE SU IMPLEMENTACIÓN**

Para el filtrado de la muestra en campo se sigue el procedimiento genérico que se describe a continuación:

1. Se dispone de los equipos y materiales necesarios (embudos, filtros secos y limpios, cajas de madera para manipulación de filtros, probeta graduada en mililitros para medir el filtrado, formatos, cinta pegante, bolsas y esfero).
2. Se selecciona el filtro, se humedece y se coloca en el fondo del embudo en forma horizontal.
3. Se agita la botella vigorosamente para que el sedimento que se haya sedimentado quede en el fondo, sin medir, y se vierte el volumen de la muestra en la probeta. Se mide luego el volumen de la muestra, colocando la probeta en tal forma que la superficie del agua dentro de la misma quede a la altura de los ojos (para evitar el paralaje).
4. Se anota el volumen de la muestra a filtrar en el formato de muestras diarias.
5. Se vierte luego el contenido de la probeta correspondiente a la muestra sobre el filtro previamente colocado en el fondo del embudo. Este vertido debe hacerse lentamente, para evitar que el filtro se levante del fondo del embudo, lo cual haría que parte de la muestra pasara sin filtrar. Este proceso se repite para todas las muestras del día (a  $\frac{1}{4}$ ,  $\frac{1}{2}$  y  $\frac{3}{4}$  de la orilla).
6. Los filtros se recogen al día siguiente teniendo cuidado de no perder el sedimento. Para ello se debe evitar tocar los filtros con las manos o dedos húmedos para que el sedimento no se pegue. Tampoco se debe colocar el filtro con la cara superior (la que recibe el sedimento) hacia abajo, para que el sedimento no se caiga.
7. Luego se procede a marcar y doblar el filtro con la muestra hacia adentro, así: primer doblez por la mitad y segundo doblez por el cuarto, dejando ver la identificación de la muestra. Los dobleces siempre se deben hacer con los bordes hacia arriba, para evitar que los sedimentos resbalen y caigan. Se anota el número del filtro en el formulario de registro de muestras diarias.
8. Una vez doblados, los filtros se empaacan cada uno en una bolsita plástica. La bolsa se sella con cinta pegante (1 a 2 cm), para evitar que el sedimento que pueda escapar del filtro en el viaje salga de la bolsa. En este caso, en el laboratorio se debe recoger el sedimento contenido en la bolsa por fuera del filtro, para tenerlo en cuenta en el proceso.
9. Finalmente, una vez sellados, los filtros se empaacan en la bolsa del mes (figura 16).
10. Se debe tener cuidado que los resultados de todo el proceso de muestreo y filtración queden anotados en forma legible en el formato de registro de muestras diarias de sedimentos, el cual debe contener como mínimo la siguiente información (ver un formato tipo en Anexo 1):
  - Identificación de la estación
  - Año y mes de muestreo
  - Día y hora de la muestra
  - Lectura de la mira o limnómetro
  - Distancia de la muestra desde la orilla ( $\frac{1}{4}$ ,  $\frac{1}{2}$  o  $\frac{3}{4}$ )
  - Número de la muestra o del filtro
  - Volumen de la muestra

Las demás casillas se deben dejar para el laboratorio.

**Figura 16. Marcado y empaque de los filtros en una bolsa plástica para su envío o entrega**



Fuente: Wilches, 2009 (IDEAM)

### 3.4.3. Aforos sólidos

El aforo sólido consiste en tomar muestras de agua en diferentes puntos de la sección de aforo, a lo ancho y en profundidad. Con base en el aforo líquido se determinan el número de verticales donde se tomarán tres muestras integradas, además de las tres muestras superficiales a  $\frac{1}{4}$ ,  $\frac{1}{2}$  y  $\frac{3}{4}$  del ancho de la corriente

Dependiendo de la profundidad, se realizan aforos puntuales, destinados a conocer la distribución de la concentración de sedimentos en suspensión a lo largo de una vertical, desde la superficie hasta el fondo, o se realizan aforos integrados, mediante los cuales se toma una sola muestra representativa de toda la vertical.

#### Aforo puntual

Este tipo de aforo se utiliza en secciones profundas mayores de 5,0 metros. Los muestreadores de tipo puntual están diseñados para que la entrada del flujo por la boquilla hacia el recipiente esté controlada por una válvula que se puede abrir o cerrar eléctricamente desde la superficie. El equipo más utilizado para esta clase de mediciones es el USP - 61.

Para la medición de los sedimentos en suspensión en la vertical con el método puntual existen varias formas de selección de puntos de muestreo:

- Una muestra tomada desde la superficie a una distancia igual al 60% de la profundidad.
- Dos muestras, una al 20% y otra al 80% de la profundidad con igual factor de ponderación.
- Tres muestras tomadas al 20%, 60% y 80% de la profundidad desde la superficie con igual factor de ponderación.
- Varias muestras tomadas en diferentes puntos para establecer la distribución de la concentración en la vertical con el grado de precisión requerida. Generalmente se toman muestras cada 10% de la profundidad.

Las mediciones que se realizan por verticales no muestrean la totalidad de los sedimentos debido a que el instrumento no llega hasta el lecho mismo de la corriente. La magnitud de esta distancia, entre el lecho y el instrumento, dependerá de la forma y tamaño del equipo, del método

de operación, de la consistencia o firmeza del fondo y de la presencia de formas del lecho. Como consecuencia, no todos los sedimentos de la vertical tienen la posibilidad de ser captados por el muestreador.

Dadas las variaciones en la distribución de los sedimentos finos y de las arenas a lo largo de una vertical, las concentraciones y volúmenes de transporte calculados por medio de muestras puntuales deberán determinarse tanto para la concentración total como para la concentración de arena.

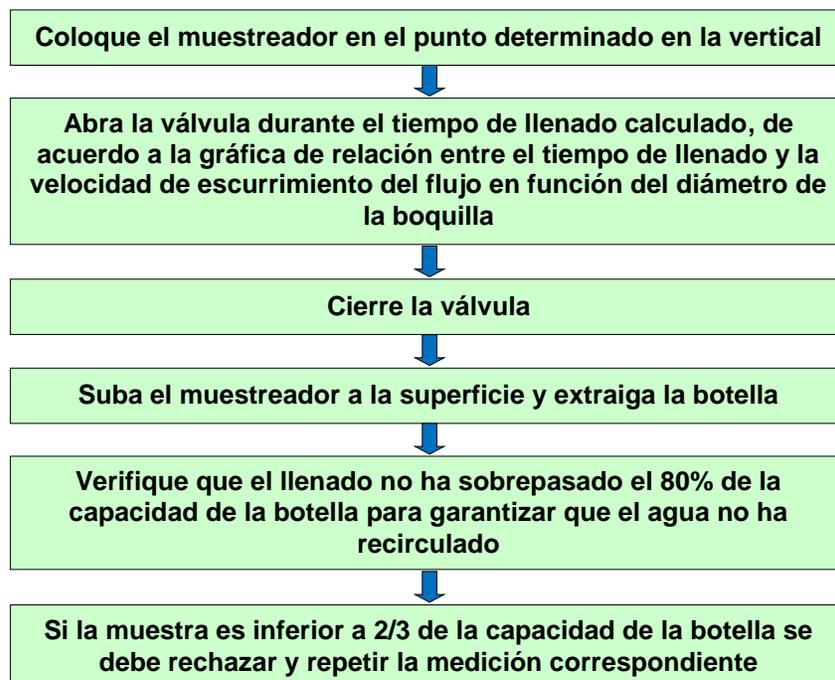
En un aforo puntual es crítica la determinación del tiempo de llenado de la botella, el cual depende de la velocidad de la corriente en el punto de muestreo y del diámetro de la boquilla utilizada. En el Protocolo para el seguimiento y monitoreo del agua (IDEAM, 2007), disponible en la página web del IDEAM, se describe en detalle la forma de calcular el tiempo de llenado.

*Aforo puntual con muestreador U.S.P. – 61*

El muestreador USP – 61 se utiliza para aforo a profundidades no mayores de 15 metros. Para un aforo normal se toma un mínimo de 5 puntos en la vertical (superficial a 0,2, 0,6, 0,8 y fondo) y para un aforo detallado se toman 10 puntos (cada 10%) especialmente para caudales altos. Exige utilizar un malacate de 75 kg de capacidad y boquillas de 1/4", 1/8" y 3/16".

En el aforo puntual se debe tener en cuenta la distribución de la concentración tanto en la vertical como a lo ancho de la sección. La medición del aforo de caudal debe ser simultánea o previa a la medición del aforo sólido. El procedimiento general para el aforo sólido puntual se presenta en el flujograma de la figura 17.

**Figura 17. Procedimiento para realizar el aforo sólido puntual**





## Aforo integrado

En este tipo de aforo el muestreador recorre la vertical en ambas direcciones (superficie - fondo -superficie), de tal manera que durante el doble desplazamiento en la vertical se tome una muestra que representa la concentración media en la vertical. Los equipos utilizados para este tipo de muestreo son los integradores USDH - 49 y USDH - 59, los cuales no deben emplearse en profundidades mayores a 5,0 m por la poca capacidad del recipiente. Para este tipo de aforo es necesario calcular la velocidad de tránsito constante con que el instrumento debe recorrer la vertical y el tiempo de muestreo, en función de la velocidad de la corriente (tomada del aforo líquido), de la profundidad y del diámetro de la boquilla, de tal manera que no vaya a existir posibilidad de recirculación del agua dentro de la botella. En el Protocolo para el seguimiento y monitoreo del agua (IDEAM, 2007), que se puede bajar de la página web del IDEAM, se describe en detalle la forma de calcular la velocidad de tránsito y el tiempo de muestreo.

Para aforos realizados con estos muestreadores se requiere un malacate de mínimo 30 kg de capacidad y suficientes botellas para el muestreo. El número de verticales no debe ser menor de seis y se deben tomar por lo menos tres muestras integradas en cada vertical. La boquilla se selecciona de acuerdo a las velocidades del flujo y se coloca la botella correspondiente en el instrumento. La sección de la boquilla debe ser normal a las líneas de flujo, y la velocidad de acceso en la boquilla del instrumento debe ser igual a la velocidad del flujo en el punto de muestreo. El procedimiento para el aforo sólido integrado se presenta en la figura 18. Detalles específicos del método de muestreo pueden ser consultados en el Protocolo para el seguimiento y monitoreo del agua (IDEAM, 2007) mencionado.

El formato de aforo de sedimentos en suspensión debe contener como mínimo la siguiente información:

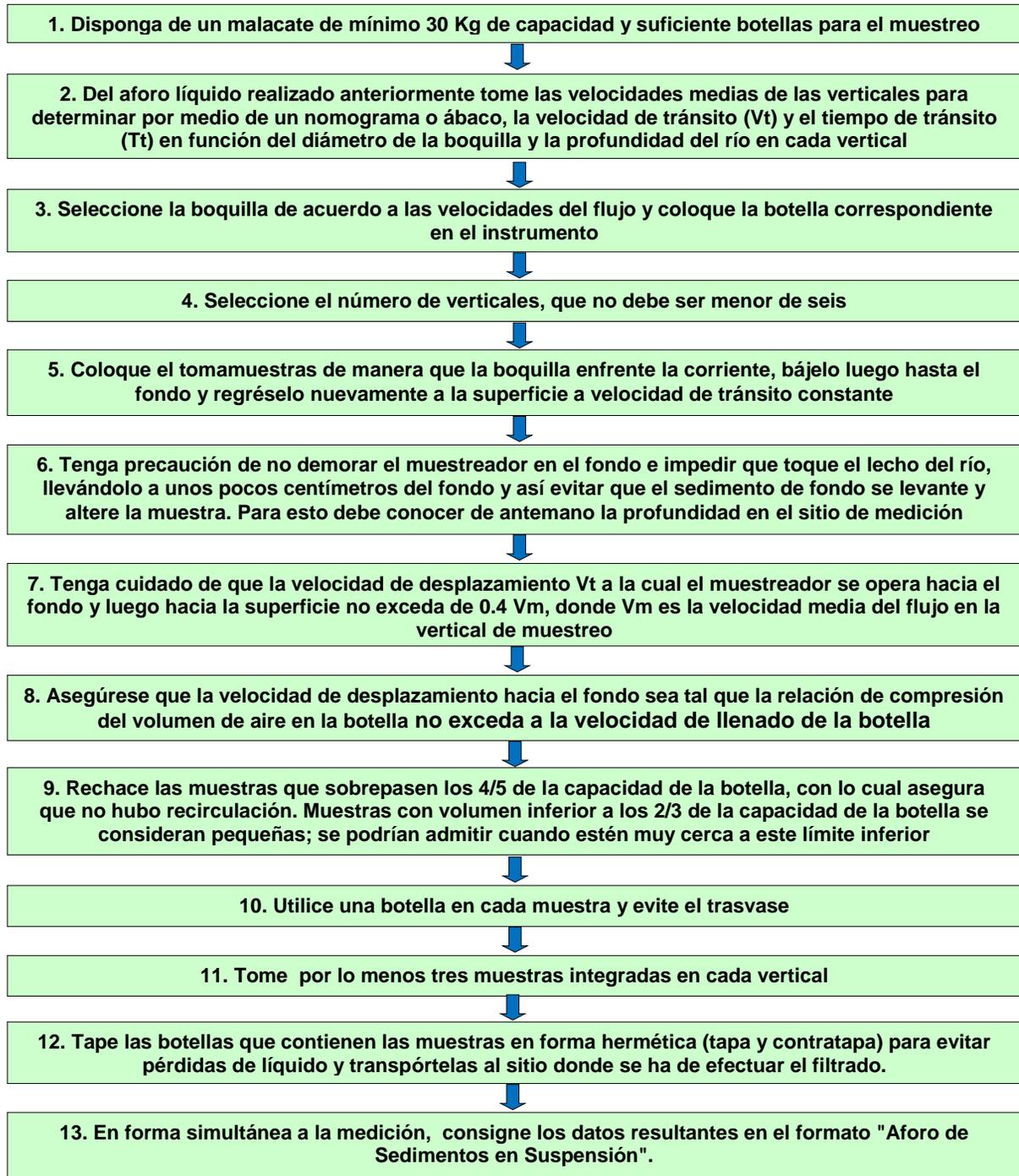
- Identificación y localización de la estación
- Fecha
- Hora inicial y hora final del aforo
- Equipo utilizado
- Tipo de aforo
- Nivel inicial y nivel final
- Caudal
- Distancia al punto de referencia (por muestra)
- Profundidad total y profundidad puntual (por muestra)
- Velocidad (por muestra)
- Número de muestra
- Volumen en  $\text{cm}^3$  (por muestra)
- Datos de laboratorio: fecha, método empleado (calcinación, filtrado, evaporación), y crisol, tara y peso de cada muestra.

### *Aforo integrado con muestreador U.S.D.H – 48*

El muestreador tipo U.S.D.H está construido para operarlo con la mano por medio de una varilla de 1/2" de diámetro colocada en la parte superior del instrumento, la cual es normal al eje

horizontal de la boquilla. El muestreador está calibrado para una boquilla de 1/4"; sin embargo, se puede utilizar con una boquilla de 3/16".

**Figura 18. Procedimiento para realizar el aforo sólido integrado**



Fuente: Wilches, 2009 (IDEAM)

El procedimiento para operar el muestreador se describe en la figura 18. La operación de descenso y ascenso se realiza con la mano a una velocidad de tránsito y a un tiempo determinado para obtener una muestra adecuada (figura 19).

### Figura 19. Aforo sólido con muestreador de sedimentos en suspensión USDH 49



Fuente: Wilches, 2009 (IDEAM)

### Aforo integrado con muestreador U.S.P - 61

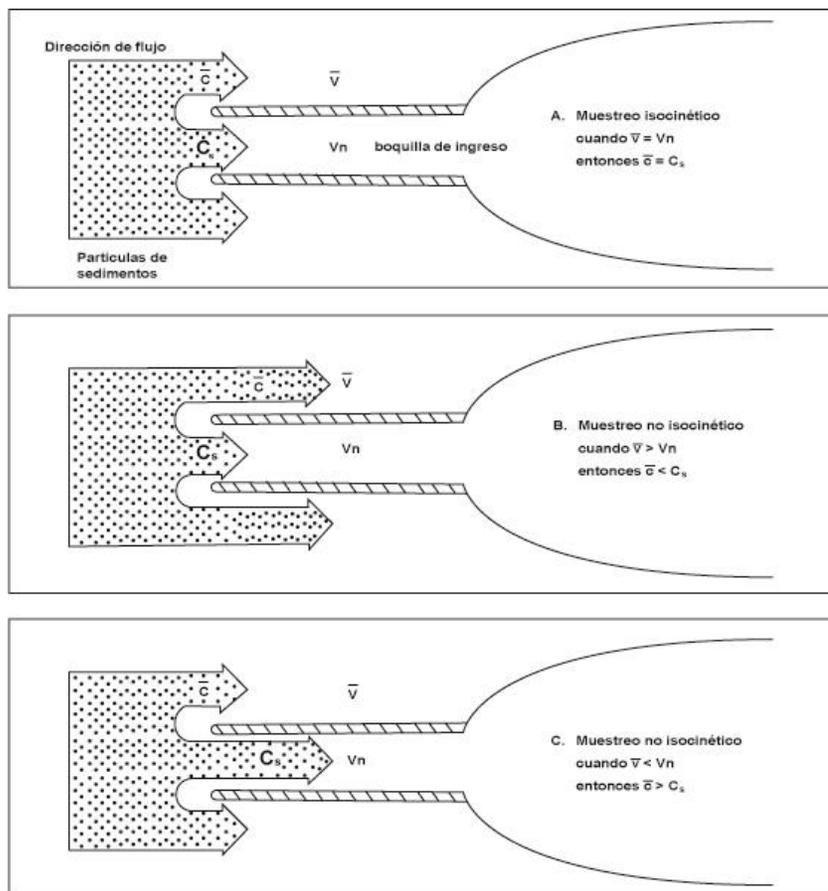
Para profundidades hasta de 5,0 m se puede utilizar el muestreador U.S.P- 61 como integrador, realizando el descenso y el ascenso con la válvula abierta. Para profundidades mayores a 5,0 m y menores a 10,0 m, el muestreador se lleva cerrado hasta el fondo, donde se abre la válvula y se inicia el recorrido hasta la superficie. Para profundidades mayores a 10,0 m se pueden tomar dos muestras integradas, una desde el fondo a la mitad de la vertical y otra desde la mitad hasta la superficie del agua. La muestra integrada sobre toda la vertical será la combinación de ambas muestras.

### Relación entre velocidades de ingreso a través de la boquilla y concentración

Las boquillas se ajustan interna y externamente al muestreador, de tal manera que la velocidad de entrada del agua a la misma esté dentro del 8% de la velocidad de la corriente cuando ésta es mayor que 0,30 m/s. Se ha encontrado que una diferencia entre estas dos velocidades origina un error en la concentración de la muestra, tal como se muestra en la figura 20, en especial para partículas de diámetro mayor a 0,062 mm (arenas). Por ejemplo, para velocidades de entrada de 0,75 la de la corriente, el error en la concentración para partículas de 0,45 mm de diámetro puede ser del orden del 10% (Federal Inter-Agency Sedimentation Project, 1941, p. 3841, en USGS-Edwards y Douglas, 1970-1998). Por estas razones y dado que, en general, cada boquilla es diseñada para una serie particular de muestreadores, no se debe usar una boquilla para una serie diferente (excepto los muestreadores P-61, P-63 y P-72, que pueden usar la misma boquilla, al igual que D-49 y D74, que pueden intercambiar la boquilla), aunque la

boquilla ajuste bien con el muestreador. Estas diferencias entre boquillas se deben a que la longitud de las líneas de flujo son diferentes para agua y aire, lo cual causa diferencias en la resistencia al flujo, y a que el diferencial de presión entre la entrada a la boquilla y el aire del exhosto son diferentes. Por esta razón, cuando cualquier parte de un muestreador se daña, el instrumento debe enviarse a laboratorio para su reparación y recalibración total. Como ya se anotó, existen boquillas de 1/4", 3/16" y 1/8" de diámetro para muestreadores integrados de profundidad, excepto para DH-48, DH-75, D-77 y muestreadores integradores puntuales. El D-77 es el único que usa una boquilla de 5/16". Para evitar confusiones las boquillas vienen en diferentes colores que deben coincidir con una marca de color en la cola del muestreador.

**Figura 20. Relación entre la velocidad de ingreso y la concentración de la muestra para muestreo isocinético y no isocinético de partículas mayores de 0,062 mm. Con  $V$  = velocidad media de la corriente,  $V_n$  = velocidad en la boquilla del muestreador,  $C$  = concentración media de sedimentos en la corriente, y  $C_s$  = concentración de sedimentos en la muestra.**



Fuente: USGS, Edwards y Douglas, 1970-1998

Los tamaños diferentes de las boquillas se deben a que las velocidades y profundidades de la corriente ocasionan un sobrellenado de la botella de muestreo para una tasa de tránsito específica cuando se usan las boquillas más grandes. Así, para muestreadores integradores en profundidad con una botella de pintura, las profundidades teóricas máximas de muestreo para un



recorrido redondo de integración son de cerca de 9 pies para  $\frac{1}{4}$ " y 15 pies para las boquillas de  $\frac{3}{16}$ " y  $\frac{1}{8}$ ". Para reducir la cantidad de muestra que entra a la botella a profundidades mayores de 9 pies, se usa una boquilla de diámetro interior más pequeño en conjunto con una botella de pintura. Para una situación dada, las boquillas más grandes deben ser usadas para reducir la posibilidad de excluir las partículas más grandes de arena que pueden estar en suspensión. Los posibles errores causados por el uso de boquillas demasiado pequeñas son generalmente menores para partículas finas ( $<0,062$  mm), pero tienden a aumentar su importancia con el incremento en el tamaño de las partículas. Las boquillas pequeñas también son más adecuadas que las grandes para muestreo con material orgánico, sedimentos y partículas de hielo. Esto significa que los problemas con las boquillas pueden presentarse aún en corrientes con material fino dominante.

Los muestreadores integradores puntuales son suministrados sólo con una boquilla de  $\frac{3}{16}$ " que hace juego con la abertura a través del mecanismo de válvula.

### Procedimiento para establecer el número de verticales

Cuando la velocidad de una corriente es muy alta (durante las crecidas, por ejemplo) y/o transporta escombros y troncos, que no permiten realizar un muestreo integrado puntual o en profundidad, se puede realizar un muestreo superficial o subsuperficial, que puede ser altamente representativo de la concentración media de sedimentos en suspensión, debido a que en tales condiciones todas las partículas, excepto las más grandes, están completamente mezcladas en el flujo. No obstante, estas concentraciones superficiales deben ser correlacionadas posteriormente con las concentraciones halladas con muestreos regulares integrados puntuales o en profundidad, en los cuales, para fines de comparación y ajustes posteriores, se debe contemplar también una muestra superficial. El muestreo superficial se puede tomar en o cerca de la superficie del agua, con o sin un muestreador estándar.

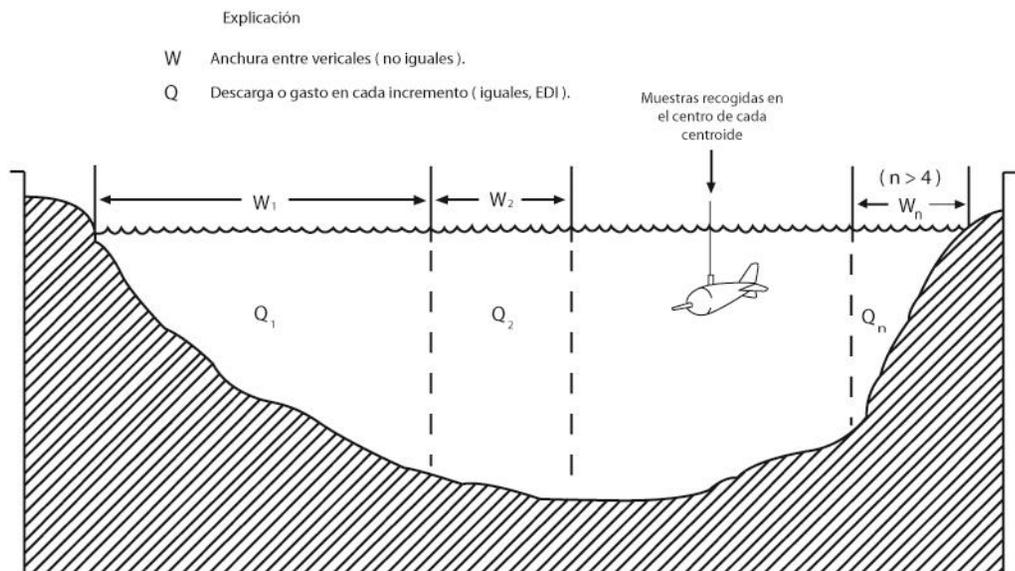
Si bien una muestra integrada en profundidad puede representar la concentración media de sedimentos en suspensión en una vertical para un caudal líquido dado, para conocer la concentración de sedimentos en toda la sección transversal es necesario realizar el muestreo en un número determinado de verticales. Para este efecto, el USGS (ver Edwards y Douglas, 1970-1998) utiliza dos métodos: el primero basado en iguales incrementos del caudal de agua (EDI, por sus siglas en inglés Equal Discharge Increment Method), y el segundo basado en iguales incrementos de anchura de la corriente (EWI, por sus siglas en inglés Equal Width Increment Method).

Con el EDI las muestras se toman en los centroides de igual incremento de caudal (figura 21), asumiendo que las muestras tomadas en estos puntos representan la concentración media de la subsección, y se requiere por tanto conocer previamente la distribución del flujo en la sección transversal, basado en un buen período de aforos. Si este conocimiento existe, este método es el más favorable en tiempo y costos, toda vez que requiere un menor número de verticales (Hubbell y otros, 1956, en USGS, 1998). Cuando no se tiene este conocimiento se mide primero el caudal de la corriente y se determina la distribución del flujo a través de la sección transversal antes del muestreo. El método exige la determinación de los incrementos de igual caudal y los centroides en los que se deben tomar las muestras. Por ejemplo, si el caudal es de  $4,7$  m<sup>3</sup>/s y se ha determinado previamente que el número de verticales debe ser de 5, el incremento igual de caudal es de  $4,7/5 = 0,94$  m<sup>3</sup>/s. La primera vertical (A) se localiza en el centroide del EDI

inicial o en el punto donde el caudal acumulado desde el extremo izquierdo del cauce (LEW) es  $\frac{1}{2}$  del EDI, o sea  $0,94/2 = 0,47 \text{ m}^3/\text{s}$ . Los restantes centroides se localizan agregando el incremento de caudal al caudal del anterior centroide. Por ejemplo, si  $A = 0,47 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $B = A+0,94 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $C = B+0,94 \text{ m}^3/\text{s}$ , etc. Por tanto, las muestras se toman en los puntos donde el caudal acumulado con respecto a LEW es  $0,47 - 1,41 - 2,35 - 3,29$  y  $4,23 \text{ m}^3/\text{s}$ . El número de verticales puede variar entre 4 y 9 con el EDI. Para ubicar los centroides se parte del formato de campo del aforo líquido y, con base en la distribución de los caudales entre las diversas subsecciones, se agrega o genera una columna de caudal acumulado y sobre ésta se interpolan los caudales correspondientes a cada centroide para determinar el punto correspondiente en términos de distancia a partir del punto inicial de referencia del aforo. La localización final de las verticales puede ser del tipo mostrado en la figura 22. Otros detalles pueden consultarse en el documento "Field Methods for Measurement of Fluvial Sediment" Capítulo 2 de 1998 del USGS (se puede consultar por Internet), páginas 43 a 48).

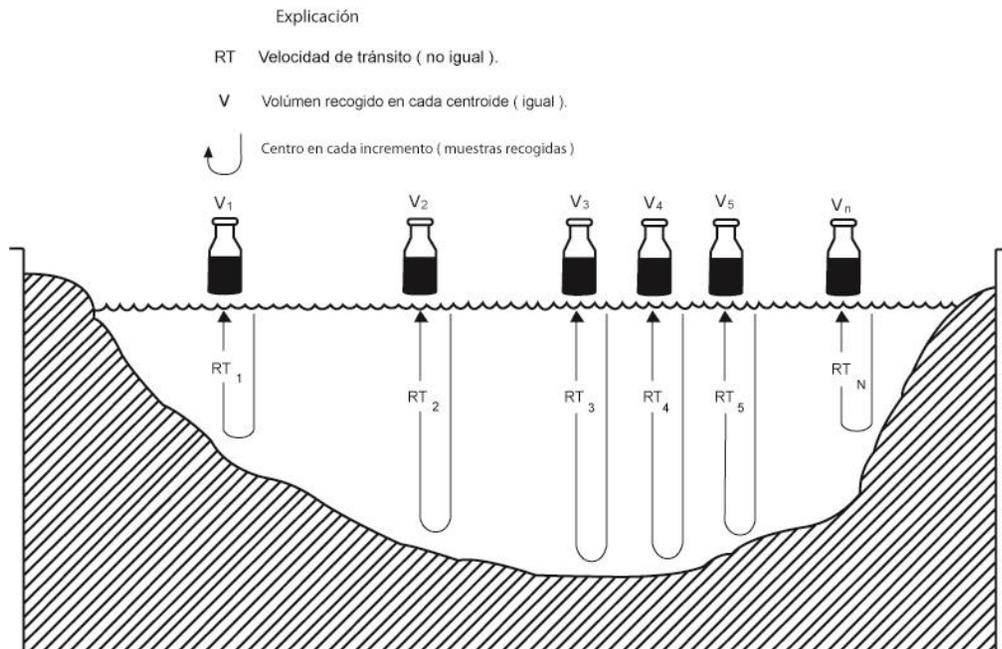
El método EWI requiere un volumen de muestra proporcional al caudal de cada uno de los espacios limitados por verticales equidistantes en la sección transversal. El muestreo a una tasa de tránsito igual en todas las verticales produce un volumen total de muestra proporcional al flujo total de la corriente, conservando una boquilla del mismo diámetro en todos los muestreos. Es un método usado principalmente en cauces pequeños y vadeables y/o con lecho arenoso, en lo que la distribución del caudal en la sección transversal no es estable. También se usa en corrientes donde el flujo de un tributario no está aun suficientemente mezclado con el flujo de la corriente principal. El número de verticales depende de la distribución del caudal y de la concentración a través de la sección en el momento del muestreo, y de la precisión deseada.

**Figura 21. Método de muestreo de iguales incrementos de caudal (EDI): las muestras son tomadas en los centroides del flujo de cada incremento**



Fuente: USGS, Edwards y Douglas, 1970-1998

**Figura 22. Velocidad de tránsito vertical en relación con el volumen muestreado en cada centroide de igual incremento de caudal**

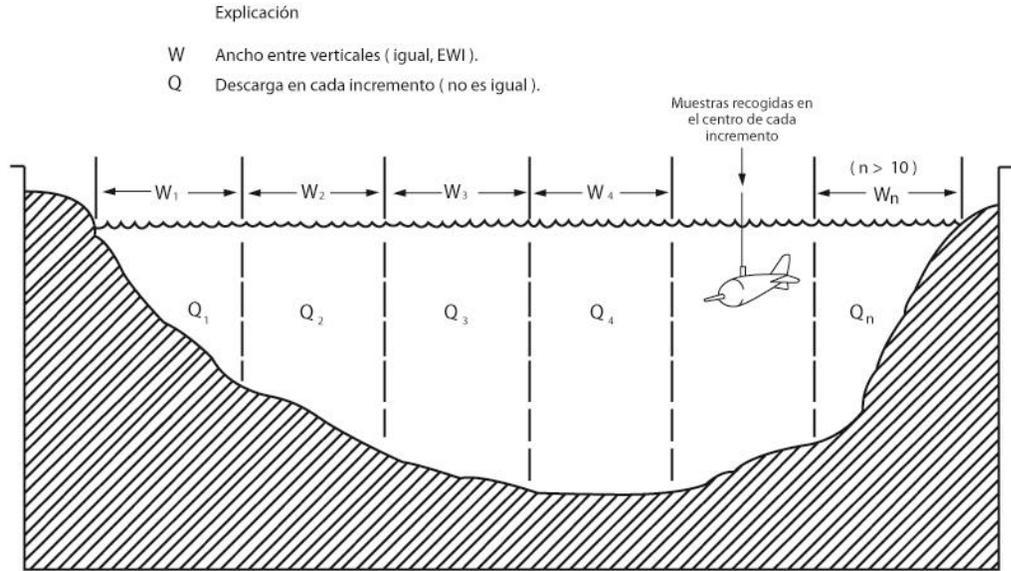


Fuente: USGS, Edwards y Douglas, 1970-1998

Cuando no se conoce bien esta distribución, el número de verticales debe ser tan alto como sea necesario, aunque se recomienda siempre que el número de verticales no sea menor de 10 en corrientes de más de 1,5 metros de ancho. Para corrientes menores, el espaciamiento entre verticales no debiera ser menor de 7,6 cm (3 pulgadas) (USGS, 1998). No obstante, la experiencia y conocimiento del cauce y de cauces similares debe permitir el nivel de precisión deseado, si bien, para todos los propósitos el número de verticales no debiera ser mayor a 20.

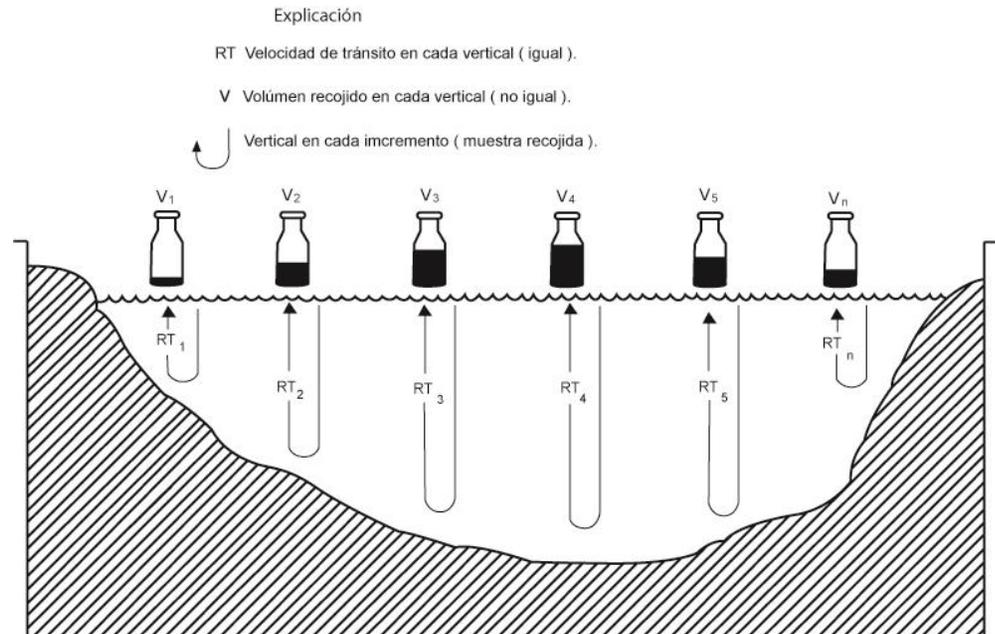
La distancia entre las verticales se obtiene de dividir el ancho total del cauce por el número de verticales necesarias. El sitio de muestra entre dos verticales se ubica a la mitad de la distancia entre las mismas ( $w/2$ ), empezando por el punto medio más próximo a la orilla de inicio en la medición del ancho total. Por ejemplo, si al ancho del cauce es de 40 metros y el número de verticales es de 10, la distancia entre verticales debe ser de 4 m y la localización de los puntos de muestreo sería de 2 – 6 – 10 – 14 – 18 – 22 – 26 – 30 – 34 y 38 metros a partir de la orilla (si el ancho resulta fraccionario, se puede aproximar al número entero más próximo). La tasa de tránsito se debe establecer para la vertical más profunda y rápida de la sección y debe ser la misma para el ascenso y descenso del muestreador en todas las verticales. Usando esta misma tasa con un muestreador integrador puntual o en profundidad en cada vertical, se obtiene un volumen de muestra proporcional al caudal en cada vertical, como se muestra en las figuras 23 y 24.

**Figura 23. Método de igual incremento de anchura (EWI)**



Fuente: USGS, Edwards y Douglas, 1970-1998

**Figura 24. Velocidad vertical de tránsito para el método de igual incremento de anchura (EWI), en relación con el volumen de la muestra, que es proporcional al caudal de agua en cada vertical**



Fuente: USGS, Edwards y Douglas, 1970-1998



Contrato No. 214 de 2010  
**AJUSTAR EL PROGRAMA NACIONAL DE MONITOREO DEL RECURSO HÍDRICO Y LA DETERMINACIÓN DE LA ESTRATEGIA DE SU IMPLEMENTACIÓN**

La máxima rata de tránsito no debe exceder  $0,4 v_m$ , siendo  $v_m$  la velocidad media ambiente en la vertical muestreada, y la mínima debe ser lo suficientemente rápida para evitar el sobrellenado de la botella, por lo cual la tasa de tránsito común está condicionada por la vertical que contiene el mayor caudal por unidad de ancho, para cuya determinación se debe realizar un aforo líquido, aunque se puede aproximar mediante un sondeo para conocer la profundidad y observando la velocidad relativa con un muestreador vacío o una varilla de vadeo. Esta tasa puede probarse llenando una botella hasta el máximo volumen de muestreo en la vertical de máximo caudal en un viaje redondo superficie – fondo. Otros aspectos a tener en cuenta en este tipo de muestreo pueden consultarse en el documento ya mencionado del USGS (1970-1998), páginas 48 y 49.

Como ya se anotó, el número de verticales necesarias para conocer la distribución de los sedimentos a través de la sección transversal de un río depende la precisión deseada y de la variación sistemática de la concentración en diferentes verticales a través de la sección.

Los muestreadores de sedimentos en suspensión están diseñados para acumular una muestra que es directamente proporcional al caudal o velocidad de la corriente. Esta muestra acumulada puede ser a lo largo de una vertical entre la superficie y el fondo de la corriente o a lo largo de un conjunto de verticales distribuidas a lo ancho de la sección transversal. Esta sección puede ser considerada representativa de algunos elementos del flujo a través de la sección, ya sea unos pocos pies cuadrados adyacentes al punto de muestreo, unos pocos pies cuadrados adyacentes a ambos lados de la vertical, o el área de todo el flujo sumado entre todas las líneas verticales. Por tanto, el número de verticales de muestreo debe ser adecuado para representar la sección transversal a muestrear. El número de botellas de muestras a tomar depende del tipo de análisis a realizar en el laboratorio, y la localización de las verticales de muestreo depende de la concentración y de la distribución de tamaños del sedimento que se mueve a través de la sección transversal.

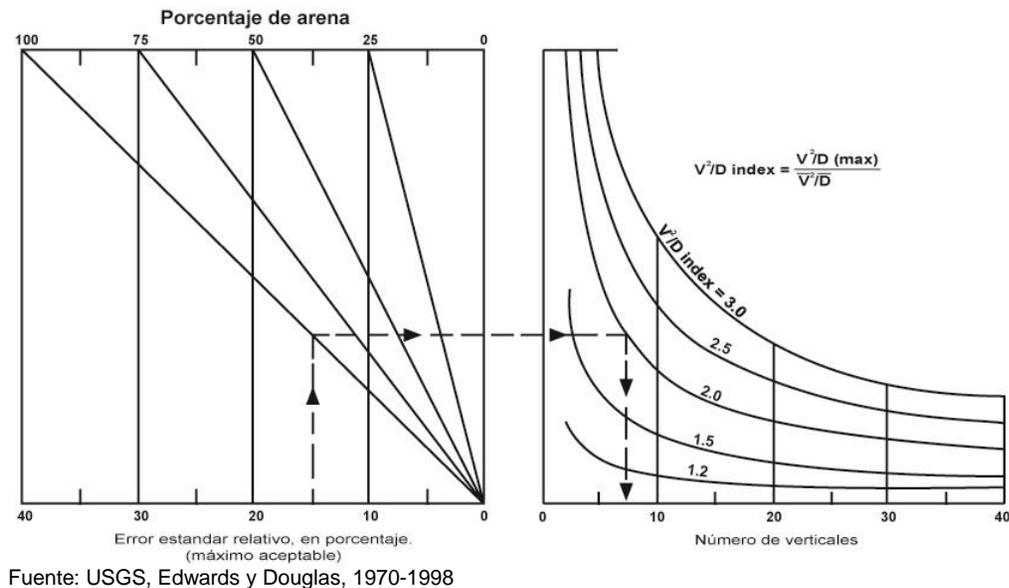
Tanto el método EDI como el EWI se basan en una muestra de caudal ponderado en cada vertical. La suma volumétrica de todas las verticales da un volumen de muestra proporcional al caudal de la corriente. Todas o casi todas las variaciones de concentración en diferentes verticales a través de la sección puede ser el resultado de una distribución no uniforme del material arenoso y los sedimentos más finos son generalmente más uniformemente distribuidos a través de la sección. Si la sección es cercana a un tributario, la mezcla del caudal de la corriente principal y del tributario puede no ser completa. De ahí que la localización de secciones de muestreo aguas debajo de la confluencia de un tributario debe evitarse. Colby (1964, en Edwards y Douglas, 1970) demostró que la descarga de arena es aproximadamente proporcional al cubo de la velocidad media, a temperatura constante y una distribución dada de tamaños de partículas para un rango de velocidades entre 0,6 y 1,5 m/s y dentro de un rango razonable de profundidades. Entonces,  $Q_s = k_1 v^3$ , donde  $Q_s$  es la descarga de arena por unidad de ancho;  $k_1$  es una constante para una profundidad dada, tamaño de partícula y temperatura; y  $v$  es la velocidad media. La descarga de arena puede expresarse como  $Q_s = k_2 c v d$ , donde  $k_2$  es otra constante,  $c$  es la concentración ponderada con el caudal en la vertical muestreada, y  $d$  es la profundidad total muestreada. Resolviendo para  $c$ , se obtiene:  $c = (k_1/k_2)(v^2/d)$ .

De esta manera, la variabilidad de la concentración en diferentes verticales de muestreo puede estar estrechamente relacionada con la variabilidad de  $v^2/d$ . Con el fin de tener un índice  $v^2/d$

útil para comparación entre corrientes, se sugiere utilizar la razón compuesta  $v^2/d(\max) / v^2/d$ , donde  $v^2/d(\max)$  es la razón de la vertical con máximo valor de  $v^2/d$ , y  $v^2/d$  es la razón de la velocidad media al cuadrado y la profundidad media de la sección transversal completa. La velocidad media y la profundidad media son estimadas a partir de los aforos líquidos.

Con base en el concepto del índice de variabilidad  $v^2/d$ , usando datos de Hubbel y otros (1956), P. R. Jordan preparó el nomograma de la figura 25 que muestra el número de verticales de muestreo requeridas para un error relativo estándar máximo aceptable (error de muestreo), basado en el porcentaje de arena y el índice  $v^2/d$ .

**Figura 25. Nomograma para determinar el número de verticales de muestreo requeridas para obtener resultados dentro de un error relativo estándar aceptable.**

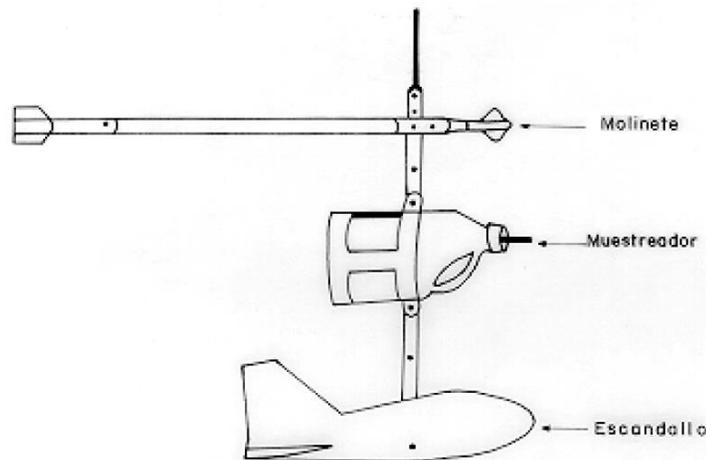


En el ejemplo ilustrado en la figura 25, el error estándar relativo aceptable es 15%, la muestra tiene aprox. 100% de arena, el índice  $v^2/d$  es 2,0 y el número requerido de verticales es 7. Nótese que si el sedimento fuera 50% de arena, se puede obtener el mismo resultado con 3 verticales; o, si se usaran 7 verticales con 50% de arena, el error estándar relativo sería de 8%. Cuando el transporte de partículas de arena es de interés primordial, la línea del 100% puede usarse sin importar la cantidad de finos en la muestra.

### Aforo integrado con bolsa plegable

El montaje y uso de los equipos depende de los muestreos a realizar, es decir, si se requieren tomar muestras integradas se usa el muestreador y el escandallo; si adicionalmente se desea medir la velocidad de la corriente, se adiciona el correntómetro. El orden de colocación de los mismos depende de los medios y facilidades del sitio de trabajo, aunque se recomienda instalar de arriba hacia abajo, el muestreador, el correntómetro y el escandallo o como se facilite siempre y cuando el escandallo esté por debajo (figuras 7 y 26).

**Figura 26. Disposición del muestreador**



Fuente: IDEAM, Protocolo para el monitoreo y seguimiento del agua. Bogotá. 2007.

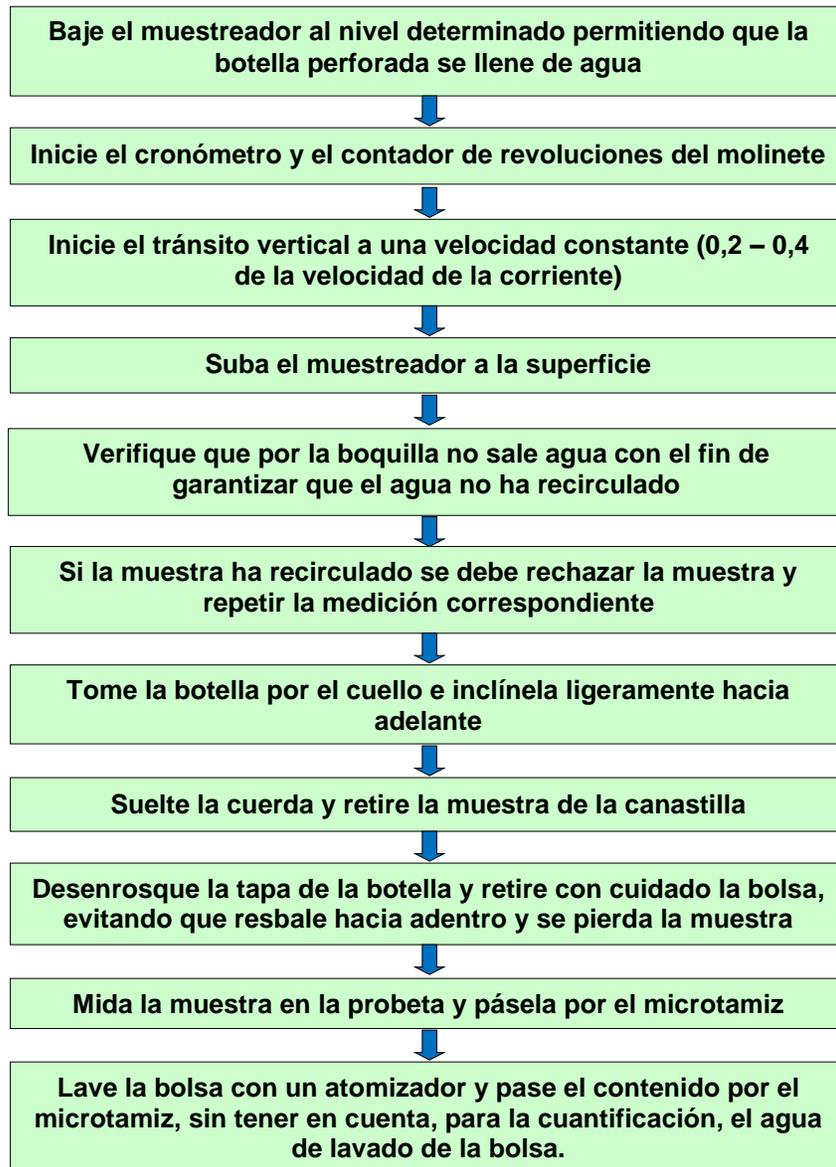
Definido el orden de colocación de los equipos, se introduce la bolsa dentro de la botella dejando 5 cm, los cuales se doblan sobre la boca del recipiente procurando que los pliegues queden uniformemente distribuidos al enroscar la tapa con la boquilla. A continuación se coloca la botella dentro de la canastilla y se asegura con una cuerda, dando una vuelta completa alrededor del cuello. La figura 27 describe el procedimiento para realizar el aforo integrado con bolsa plegable. En aforos con bolsa plegable, es necesario determinar la tasa de tránsito y la calibración en campo. La metodología para el cálculo de estos parámetros, así como para la calibración y la determinación de la eficiencia de muestreo, pueden consultarse en el Protocolo para el seguimiento y monitoreo del agua (IDEAM, 2007), disponible en la página web del IDEAM.

Si la eficiencia hidráulica está por debajo de 0,90, es necesario verificar si la boquilla tiene protuberancias o irregularidades a la entrada, ya que debe ser hidrodinámica y el orificio perfectamente uniforme. La calibración de campo debe mostrar una eficiencia promedio de 0,95 para velocidades entre 1 y 3 m/s.

#### **3.4.4. Preparación y envío de muestras de sedimentos de suspensión al laboratorio**

Para manejar el problema de las numerosas botellas que se deben a llevar a campo y regresarlas al laboratorio, se debe disponer por lo menos de los siguientes elementos: baldes graduados con tapa para mezclar las muestras (2), probetas graduadas de 500 ó 1.000 ml (2), frascos con atomizador (2), embudos de 20 cm de diámetro superior para colocar el tamiz (2), microtamices de 3 pulg. de diámetro con malla de 0,063 mm (63 micras) con base y tapa (12), botellas plásticas de 100 y 500 ml para muestras (figura 28) y rótulos para identificar las muestras. Cada muestra se debe analizar por separado. En campo, se debe realizar el procedimiento descrito en la figura 29, en caso de bolsa plegable.

**Figura 27. Procedimiento para realizar el aforo sólido integrado con bolsa plegable**

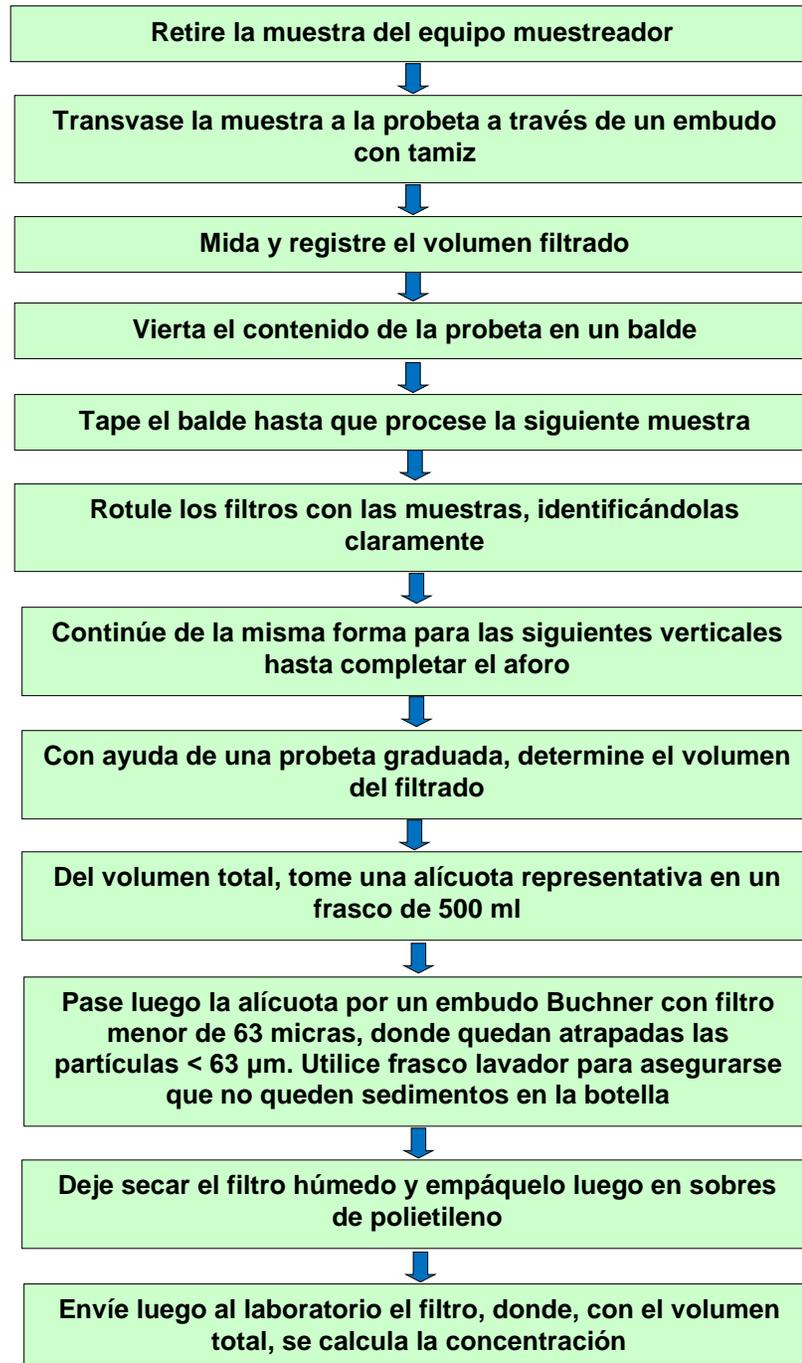


Cabe resaltar que tanto la bolsa plástica como los tamices deben ser lavados muy bien antes de su uso para la siguiente práctica. Las partículas que quedan adheridas deben ser lavadas con agua, mediante un atomizador. El contenido debe filtrarse nuevamente y el líquido obtenido se desecha ya que no hace parte del volumen aforado, mientras que el sedimento sí.

### 3.4.5. Procedimiento para medir arrastre de fondo

El caudal de arrastre de fondo se determina a partir de la cantidad de sedimentos retenidos por unidad de tiempo en un muestreador colocado en uno o varios puntos del fondo del río.

**Figura 29. Procedimiento para procesamiento de muestra de bolsa plegable en el sitio**



**Figura 28. Caja de botellas para el aforo sólido**



Fuente: Wilches, 2009 (IDEAM)

Generalmente, se colocan de tres a diez puntos de medición en una sección transversal. En la determinación de la distribución de los puntos de muestreo se debe señalarlas siguientes incertidumbres:

- Excepto durante las crecidas, el transporte del material de fondo se produce solamente en una parte del río, por lo cual la inclusión de una medición cero en el cálculo del caudal de material de fondo, puede conducir a incertidumbres en el resultado, aun cuando el punto de muestreo pueda estar situado entre dos fajas móviles en el fondo del río. Las incertidumbres se pueden producir también si el transporte medido se extiende a un segmento de la sección transversal donde el sedimento se desplaza poco o nada.
- En ríos con lecho de grava, cuya mayor característica es el movimiento parcial del material del lecho, el uso de diferentes tipos de detectores acústicos puede ayudar a resolver este problema. Dichos detectores, sumergidos en las cercanías del lecho, captan el sonido del golpeteo de la grava en movimiento, indicando el movimiento del material del lecho en ese punto particular; además, se puede relacionar cualitativamente la intensidad del sonido y el transporte del sedimento.
- Los muestreadores se bajan hasta el fondo y se mantienen en posición mediante una varilla o un alambre. La duración del período de muestreo es generalmente de pocos minutos, según las dimensiones del muestreador y la intensidad del transporte de sedimento. Para velocidades bajas de la corriente cerca del fondo, las fuerzas hacia aguas abajo son reducidas y el muestreador tiende a introducirse dentro de la corriente de fondo y excavar el material del fondo que no está siendo transportado. Esto también puede ocurrir durante un ascenso abrupto o no cauteloso del muestreador.

- Las mediciones se deberán realizar en varios caudales del río para obtener una relación entre el caudal del río y el caudal del material del fondo. Debido a que el transporte del sedimento es un mecanismo muy complejo y de naturaleza aleatoria y debido también a los errores al tomar las muestras, una única muestra tomada en un punto de medición puede proporcionar una estimación muy incierta del verdadero transporte del material del fondo.
- Por lo tanto, en cada punto se deben tomar varias muestras. El número de repeticiones depende de las circunstancias locales; sin embargo, análisis estadísticos realizados sobre datos del terreno con más de 100 repeticiones, demuestran que el caudal de arrastre de fondo sólo puede medirse con una exactitud limitada, salvo que se tomen un número impracticable de muestras encada punto.

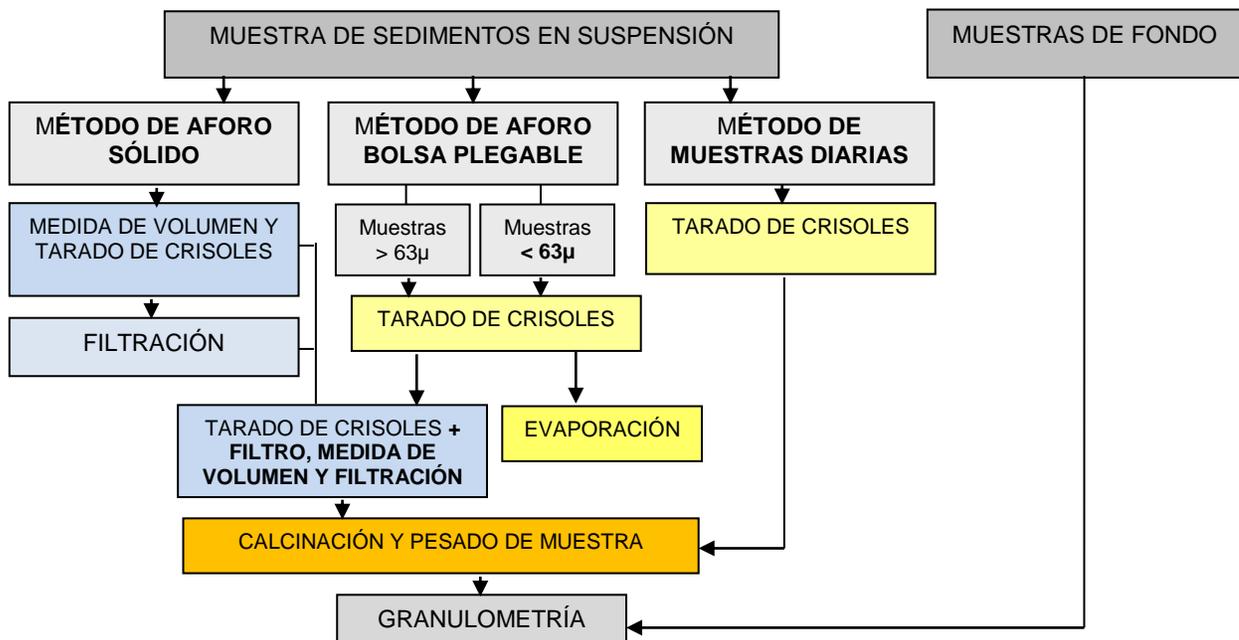
### 3.4.6. Procedimientos de laboratorio

La figura 30 muestra un flujograma general de los procedimientos de laboratorio destinados a determinar la concentración y transporte de sedimentos, teniendo en cuenta los métodos de aforo y/o muestreo empleados, a saber: aforo sólido puntual o integrado, muestreo diario superficial, muestreo en bolsa plegable y muestras de fondo.

En estos procesos es necesario tener en cuenta que la “tara” se refiere al peso del instrumento sin la muestra, mientras el “peso bruto” se refiere al peso del instrumento más la muestra.

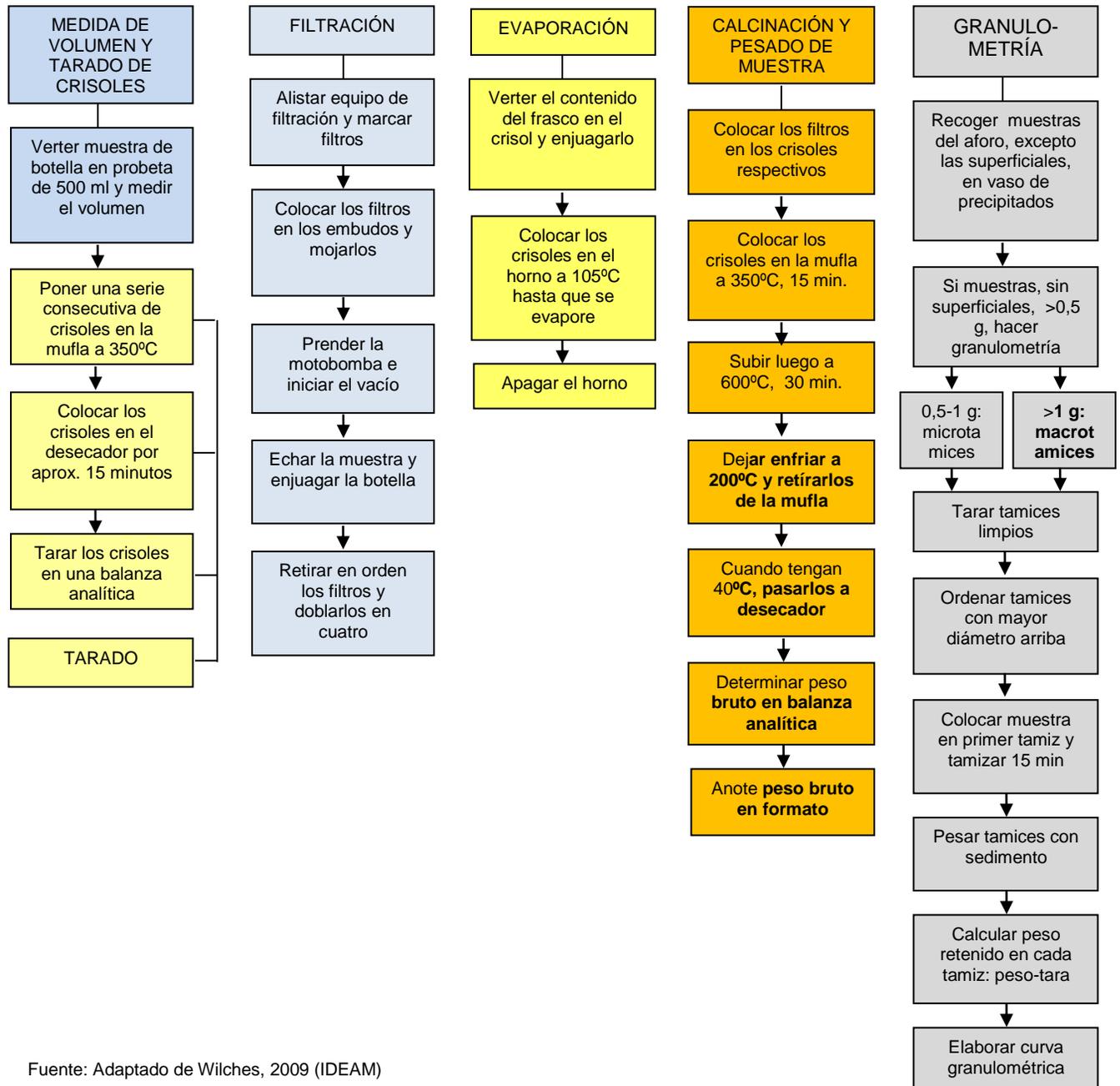
La figura 31 muestra los detalles de laboratorio de los procedimientos de medida del volumen y tarado de crisoles, filtración, evaporación, calcinación y pesado de la muestra y granulometría. Las figuras 32, 33, 34 y 35 muestran algunos detalles de estos procedimientos.

**Figura 30. Proceso general de laboratorio de sedimentos**



Fuente: Adaptado de Wilches, 2009 (IDEAM)

**Figura 31. Detalles de los procesos de medida de volumen y tarado de crisoles, filtración, evaporación, calcinación y pesado de la muestra y granulometría**



Fuente: Adaptado de Wilches, 2009 (IDEAM)

Una vez terminada la calcinación, se toman todas las muestras de los crisoles correspondientes a un aforo, a excepción de las tres muestras superficiales, se recogen en un vaso de precipitados y se pesan. Si el peso es mayor a 0,5 g, se procede a efectuar el análisis granulométrico.



## INFORME FINAL

**epam** s.a. esp

Contrato No. 214 de 2010

### **AJUSTAR EL PROGRAMA NACIONAL DE MONITOREO DEL RECURSO HÍDRICO Y LA DETERMINACIÓN DE LA ESTRATEGIA DE SU IMPLEMENTACIÓN**

Los procedimientos de laboratorio también se encuentran detallados en el protocolo de calidad del agua.

No obstante, de acuerdo con el desarrollo tecnológico y las disponibilidades presupuestales, es posible utilizar nuevos y más eficientes procedimientos, si bien se recomienda, mediante pruebas interlaboratorios (ver protocolo de calidad del agua) comprobar la validez de los mismos. Los equipos e insumos básicos a emplear en un laboratorio de sedimentos son:

- Bomba de vacío
- Embudos de fondo plano
- Matraz
- Probeta y pipeta graduadas
- Horno de madera
- Filtros
- Atomizador
- Sitio para almacenar botellas
- Vaso de precipitados
- Mufla
- Balanza analítica
- Desecador
- Crisoles
- Bandeja para crisoles
- Equipo de seguridad (máscara, guantes, equipo contra incendio, etc).
- Pinzas
- Tamices (juego de micro y macrotamices)
- Tamizadora

**Figura 32. Aspectos del procedimiento de filtración**

**Vertido del contenido de las probetas en los embudos con bomba de vacío prendida**



**Revisión de que no haya quedado sedimento en embudo, botella y probeta**



**Retiro, doblada y almacenamiento de filtros en horno de madera**

Fuente: Wilches, 2009 (IDEAM)

**Figura 33. Aspectos del procedimiento de calcinación**

**Numeración de los crisoles en base y lado con cloruro férrico, ordenación de filtros y crisoles y cargue de filtros en crisoles y bandejas**



**Cargue de crisoles en mufla, hasta 600°C, 30 min, enfriamiento a 200°C, y retiro de crisoles**



**Enfriamiento a temperatura ambiente en desecador, antes del pesaje**



Fuente: Wilches, 2009 (IDEAM)

### Figura 34. Aspectos del procedimiento para la granulometría de material en suspensión

Si el peso de las muestras del aforo es mayor a 0,5 g, se pasan para análisis granulométrico



Colocación de la muestra en el primer tamiz y agitación durante 15 minutos



Fuente: Wilches, 2009 (IDEAM)

### Figura 35. Aspectos del procedimiento para la granulometría de material de fondo

Cuarteo de la muestra seca y toma de dos diagonales para la determinación



Paso de la muestra por los tamices 6.350 y 4.760 micras



Paso a macrotamices y a la tamizadora por 15 minutos



Fuente: Wilches, 2009 (IDEAM)



## 4. REGISTRO Y PROCESAMIENTO DE DATOS

### 4.1. REGISTRO DE DATOS EN CAMPO

La captura o registro de los datos en campo se debe hacer en los formatos de campo normalizados por la entidad. En principio, es necesario disponer de formatos para el registro de los siguientes datos:

- Muestras diarias de sedimentos. En campo se debe anotar los siguientes datos generales: identificación y localización de la estación, corriente, mes y año. Además, para cada muestra se debe anotar: día, hora, lectura de mira, distancia desde punto de referencia PR, número de muestra o filtro y volumen filtrado.
- Aforo de sedimentos en suspensión. En campo se debe anotar como mínimo los siguientes datos generales: identificación y localización de la estación, corriente, mes y año, método de aforo, muestreador empleado, nivel inicial, nivel final, nivel promedio, caudal líquido (según aforo líquido). Además, para cada muestra: distancia al punto de referencia, profundidad total, profundidad puntual (en caso aforos puntuales), velocidad del agua, número de muestra o filtro, volumen de la muestra (o del filtrado, si éste se hace en campo).

En Anexo 1 se muestran un ejemplo de formatos tipo. No obstante, cada entidad podrá adoptar el diseño que mejor le convenga, siempre y cuando considere las casillas para los datos básicos. Otros datos que aparecen en estos formatos corresponde llenarlos en laboratorio.

#### 4.1.1. Entrada de datos al sistema

Para la captura y procesamiento de la información de sedimentos, se debe adoptar un programa o software especializado, que permita grabar interactivamente por pantalla:

- Los datos de identificación de la estación, mes y año a procesar.
- La información de muestras diarias de sedimentos previamente depurada en los formatos de campo normalizados.
- La información de los aforos sólidos: consiste en el registro en un archivo de computador de la cartera de campo de los aforos sólidos realizados en las estaciones hidrométricas. Los datos deben quedar almacenados en un directorio, identificados por el código de la estación y la fecha del aforo. La validación de los datos debe conllevar como mínimo para cada aforo que el código sea de una estación hidrológica, que la estación se encuentre en el catálogo y que la fecha del aforo sea la correcta. El programa debe estar en capacidad de generar un listado de mensajes de error que llevan a corregir o invalidar el aforo.
- La información del laboratorio: concentraciones de sedimentos en suspensión, por punto y/o vertical, según el método de aforo.
- El sistema debe permitir la captura inicial de las curvas de sedimentos para cada estación y para una vigencia. Éstas se pueden ingresar y almacenar de dos maneras:
  - En forma tabulada: de los puntos de la curva de sedimentos  $Q_s$  vs.  $Q_l$  (ver definiciones en sección 4.1.2) se extraen los puntos de la curva en forma de tabla, en forma tal que se



puedan interpolar los puntos intermedios, lineal o exponencialmente, para la estimación de caudal sólido sin errores importantes.

- En forma funcional, es decir: a) como ecuación teórica (o modificada) para una estructura de aforo; b) como función ajustada por computador a los puntos aforados, en vez del proceso manual de ajuste de curvas; y c) como función ajustada a los puntos de una tabla.
- Posibilidad de corregir los datos grabados, utilizando para el efecto un editor de texto

Los datos se deben grabar en las casillas respectivas con sus características y sus correspondientes símbolos, de acuerdo con las instrucciones de los formatos.

#### 4.1.2. Cálculos y procesamiento

El flujograma de la figura 36 muestra el procedimiento general del procesamiento de datos. El programa debe estar en capacidad de realizar los siguientes cálculos, para determinar la concentración y el transporte o caudal sólido del curso de agua.

##### 4.1.2.1. Cálculos del aforo sólido

Para determinar la concentración de sedimentos, se toman muestras superficiales como se indicó en la sección de procedimientos de muestreo, en botellas plásticas especiales de 500 ml, para luego tomar los volúmenes de muestra y registrarlos en formatos adecuados en el sitio de muestreo. Los procedimientos en laboratorio son los indicados en las figuras 30 y 31.

De otro lado, el sistema debe estar en capacidad de efectuar el procesamiento de las carteras de campo grabadas, y de mostrar por pantalla todos los archivos disponibles para procesamiento. Al terminar el proceso, el programa automáticamente debe estar en capacidad de actualizar el archivo de resúmenes de aforos sólidos y crear un archivo de resultados en un directorio con el mismo nombre del archivo de cartera.

El sistema debe permitir la actualización interactiva de los resúmenes de aforos que no son generados por los procesos en línea. Como resultado, el programa debe arrojar un listado de errores que permiten corregir el aforo o invalidarlo.

Los procesos y cálculos de aforo de sedimentos en suspensión se realizan de la forma indicada en el formato tipo 3 del Anexo 1. Los detalles del cálculo pueden consultarse en el Protocolo para el seguimiento y monitoreo del agua (IDEAM, 2007), disponible en la página web del IDEAM.

##### 4.1.2.2. Curvas de calibración

Cuando se ha realizado suficientes aforos sólidos para representar la gama de variación de los caudales líquidos y/o niveles de una corriente, es posible definir la curva de calibración de sedimentos de una estación. La curva de calibración de sedimentos o caudales sólidos en una estación hidrométrica es la expresión gráfica de la relación existente entre los caudales líquidos ( $Q_l$ ) y los caudales sólidos aforados ( $Q_s$ ), generalmente en régimen permanente. La vigencia de la curva de calibración  $Q_s$  vs.  $Q_l$  estará condicionada por el tiempo en se mantengan uniformes las condiciones geométricas de la sección.



Contrato No. 214 de 2010  
**AJUSTAR EL PROGRAMA NACIONAL DE MONITOREO DEL RECURSO HÍDRICO Y LA DETERMINACIÓN DE LA ESTRATEGIA DE SU IMPLEMENTACIÓN**

La curva es aproximadamente parabólica, cuando su representación está en coordenadas lineales y con tendencia a recta cuando las coordenadas son logarítmicas. Los aforos sólidos que se utilizan para elaborar las curvas de calibración deben tener previamente un control de calidad descrito en la sección 5.

Si los caudales líquidos medidos no cubren toda la gama de variación de niveles, se hace necesaria la extrapolación de la curva de calibración nivel-caudal y de la curva de calibración de sedimentos. El procedimiento para construir la curva de calibración de caudales líquidos y los métodos para la extrapolación de la curva se presenta en el protocolo de niveles y caudales.

En las estaciones donde se hagan muestreos diarios superficiales (tres muestras diarias), se puede elaborar también la curva de calibración de concentraciones medias (resultantes de los aforos sólidos) vs concentraciones superficiales, a partir de la cual se calcula la concentración media diaria que permita la estimación de los caudales sólidos medios diarios.

El sistema debe permitir la actualización de las curvas de gastos para cada estación y para una vigencia, mediante la carga de los nuevos aforos y/o nuevos datos de concentraciones superficiales.

Para obtener los datos de transporte y concentración de los sedimentos en suspensión se procede de la siguiente manera:

- a. Primero se realiza el aforo o medición de caudal sólido, como quedó explicado anteriormente
- b. En segundo lugar, se envían las muestras al laboratorio y se determinan las concentraciones de sedimentos en suspensión, como quedó dicho anteriormente (sección 3.4.6), de acuerdo con las frecuencias especificadas en la sección 2.3. Los datos resultantes se organizan en el formato de resumen de aforos sólidos (ver formato tipo 4 del Anexo 1).
- c. En tercer lugar, se debe disponer de la estadística de caudales líquidos medios diarios, de acuerdo con lo establecido en el protocolo de niveles y caudales.
- d. En cuarto lugar, se elabora(n) la(s) curva(s) de calibración de sedimentos o ecuaciones que establecen la relación entre caudal sólido ( $Q_s$ ) y caudal líquido ( $Q_l$ ), y de la concentración media ( $C_m$ ) en función de la concentración superficial ( $C_s$ ), para los casos en que el observador tome diariamente muestras superficiales.
- e. Si la estación ya cuenta con estas curvas, el procedimiento se limita a plotear los resultados de los aforos sólidos sobre dichas curvas y analizar la dispersión o consistencia de los datos.

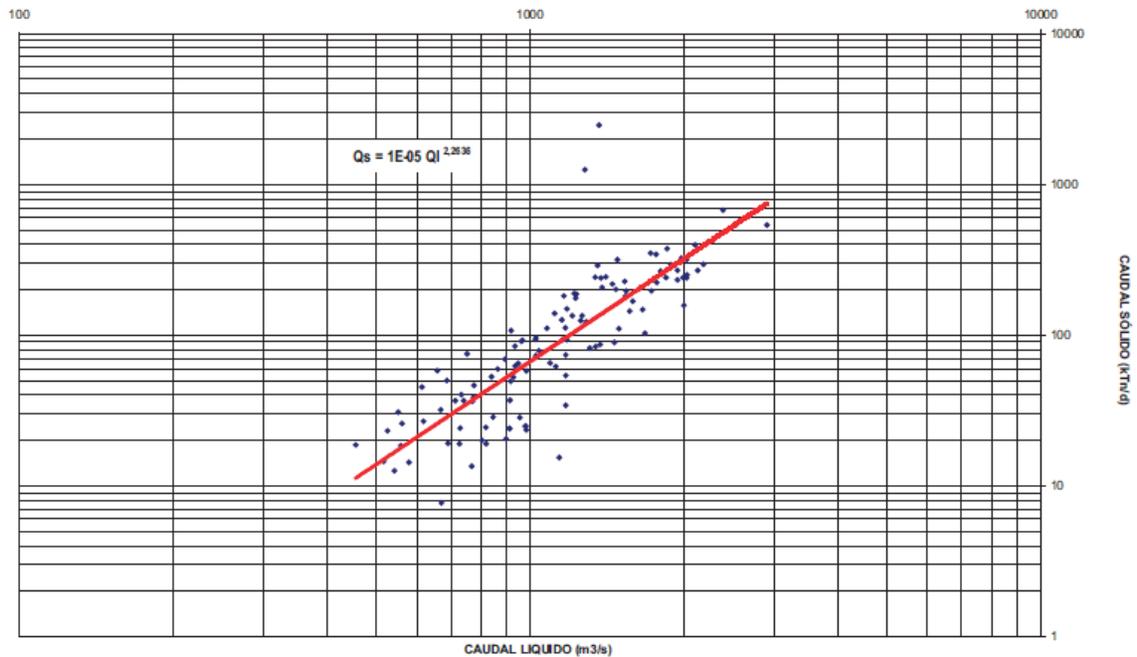
Los pasos para elaborar las curvas de calibración son los siguientes:

- a. A partir del resumen de muestras diarias de sedimentos, se calcula la concentración media superficial diaria como el promedio de las 3 muestras, en caso de que se tomen 3

muestras. En esta etapa el sistema puede tener un control de calidad que consiste en no permitir el ingreso de datos de muestras en donde el valor de la tara (peso del crisol) sea mayor que el peso total (peso del crisol + peso del sedimento) (ver sección 3.4.6 y formato tipo 3 del Anexo 1).

- b. Se toman los datos de caudal líquido y caudal sólido del resumen de aforos y se plotean en papel doble logarítmico, eliminando puntos muy dispersos de la tendencia central. Se debe tomar nota que los aforos sólidos y líquidos cubran estados altos, medios y mínimos de la corriente. Las ecuaciones de las curvas resultantes de  $Q_s$  vs.  $Q_l$  y  $C_m$  vs.  $C_s$  se pueden ajustar mediante mínimos cuadrados u otros métodos similares (ver ejemplo de curvas en figuras 36 y 37).

**Figura 36. Ejemplo de curva de caudal sólido vs caudal líquido**



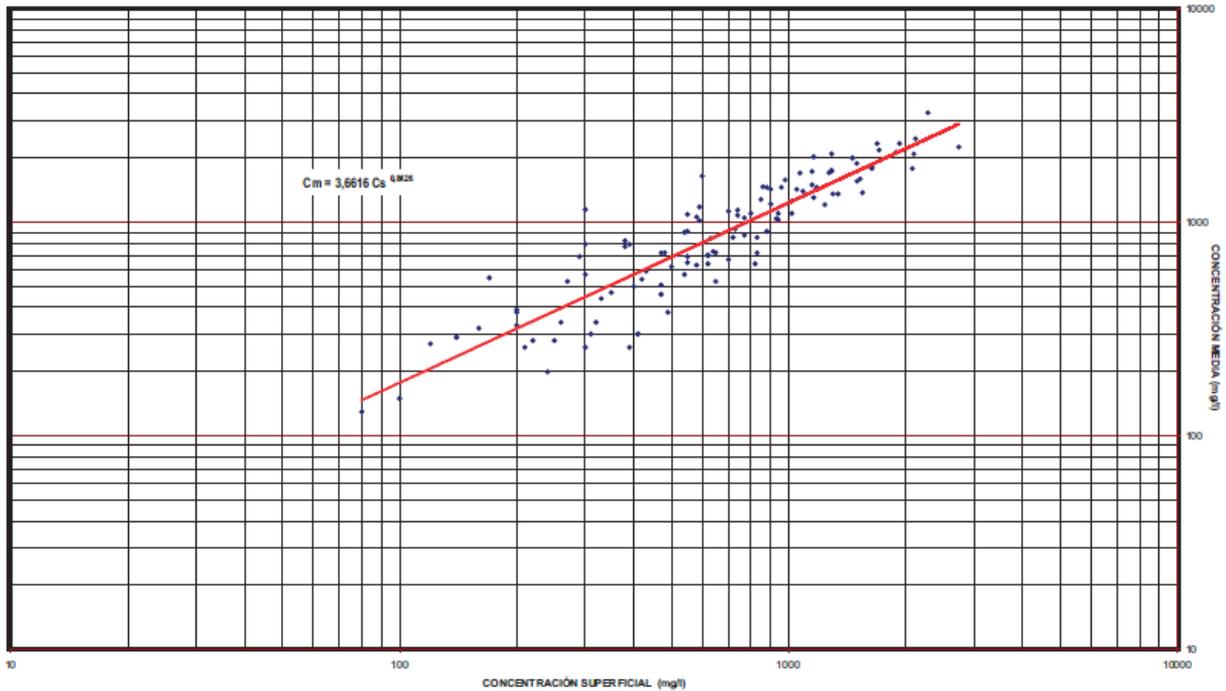
Fuente: IDEAM, Protocolo para el monitoreo y seguimiento del agua. Bogotá. 2007.

#### 4.1.2.3. Caudales sólidos

Para el cálculo de los caudales sólidos deben estar disponibles, en la base de datos, los siguientes datos e información (figura 38):

1. Los caudales líquidos diarios definitivos, es decir verificados en cuanto a calidad y homogeneidad.
2. Las tablas o ecuaciones de las curvas de sedimentos, con los rangos de extrapolación que cubran suficientemente toda la variación de caudales líquidos presentados durante la vigencia de la curva.

**Figura 37. Ejemplo de relación entre concentración media y concentración superficial**



Fuente: IDEAM, Protocolo para el monitoreo y seguimiento del agua. Bogotá. 2007.

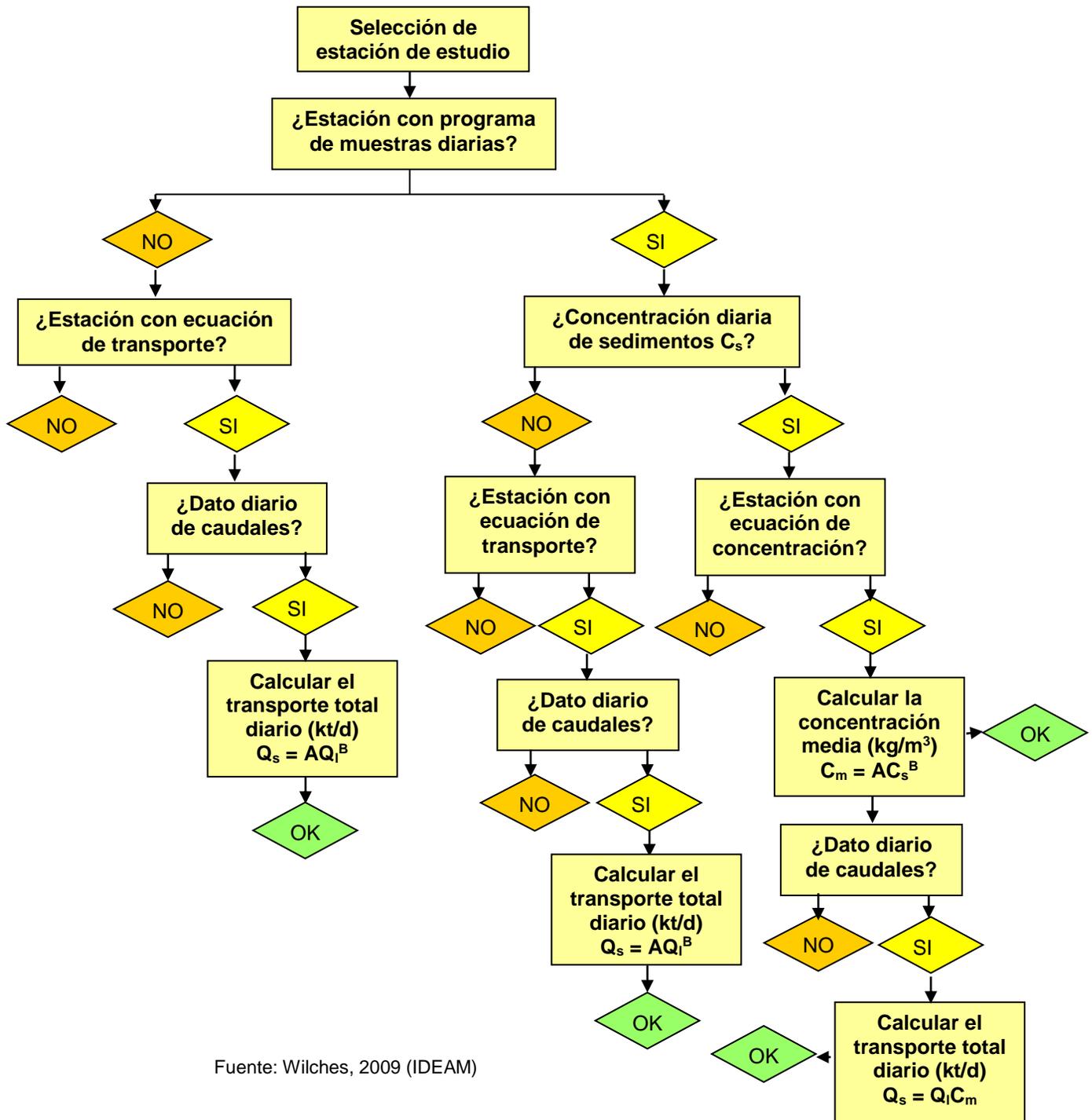
Los caudales líquidos se ingresan a la base de datos mediante digitalización o cálculo interno a partir de los niveles y de la curva de gastos y/o mediante transmisión de estaciones digitales y/o carga a partir de otros medios digitales.

La curva de calibración de sedimentos puede indexarse a la base de datos de dos formas, como ya se dijo: en forma tabulada, o en forma funcional (ecuación).

Una vez el sistema cuente con los datos requeridos, el mismo sistema debe identificar y aplicar la tabla o ecuación automáticamente de la curva de sedimentos a los caudales diarios, para obtener los valores de caudal sólido correspondientes. Para conseguir los promedios de caudal sólido, en la unidad de tiempo estándar requerida (día, mes, año), se deben compilar las series cronológicas horarias o diarias de caudal líquido, generadas como se describe en el protocolo de niveles y caudales.

Cuando se tienen curvas de sedimentos múltiples dentro del período que se está procesando, se debe aplicar, para cada espacio de tiempo, la curva definida para el período correspondiente, lo cual se debe prever con anterioridad al analizar e identificar los cambios bruscos, especialmente después de las temporadas húmedas. En el caso de faltar datos de caudales líquidos, generalmente no más de un 10% del total, ellos se pueden deducir indirectamente, a través de correlaciones con otras estaciones situadas en la misma corriente, cuenca o en sus cercanías, pero en condiciones de régimen hidrológico similar.

Figura 38. Flujograma para el cálculo del transporte total diario de sedimentos en suspensión



Fuente: Wilches, 2009 (IDEAM)



- a. Cuando se dispone de aforos sólidos y de muestras diarias de sedimentos, se calcula la concentración media diaria de sedimentos en suspensión  $C_m$ , mediante la siguiente ecuación (ver figuras 37 y 38), y luego se calcula el transporte total diario de sedimentos en suspensión:

$$C_m = a \cdot C_s^b$$

Donde:

$Q_l$  = Caudal ( $m^3/s$ )

$Q_s$  = Caudal sólido ( $kg/s$ )

$C_s$  = Concentración superficial ( $kg/m^3$ )

$C_m$  = Concentración media ( $mg/l$ )

a y b = Constantes.

Para el cálculo del caudal sólido:

$$Q_s = C_m \cdot Q_l$$

- b. Cuando no se dispone de muestras diarias todos los días o no se tomen muestras diarias, el valor de la carga o transporte total diario de sedimentos en suspensión ( $Q_s$ ) se calcula a partir de la ecuación de la curva de calibración de caudal sólido vs caudal líquido (figuras 36 y 38), leyendo directamente de la base de datos los caudales líquidos diarios ( $Q_l$ ).

$$Q_s = a \cdot Q_l^b$$

Donde:

$Q_l$  = Caudal ( $m^3/s$ )

$Q_s$  = Caudal sólido ( $kg/s$ )

a y b = Constantes.

Es importante anotar el papel crucial que juegan, en la veracidad de estas ecuaciones, los márgenes de error de las mediciones de estas variables y de las estimaciones hidrológicas, aspecto en el cual se debe trabajar en el futuro cercano.

Este mismo procedimiento (b) se aplica para el cálculo de los caudales sólidos de arrastre fondo ( $Q_f$ ), en caso de que se tengan los aforos y curva de calibración correspondiente.

El caudal o transporte sólido total resulta de la sumatoria de los caudales transportados en suspensión y por arrastre de fondo:

$$Q_t = Q_s + Q_f$$

#### 4.1.2.4. Transporte de fondo y transporte total

El procedimiento para calcular el caudal de arrastre de fondo es el siguiente:

- Secar y pesar el sedimento recogido con el muestreador de arrastre de fondo.



Contrato No. 214 de 2010  
**AJUSTAR EL PROGRAMA NACIONAL DE MONITOREO DEL RECURSO HÍDRICO Y LA DETERMINACIÓN DE LA ESTRATEGIA DE SU IMPLEMENTACIÓN**

- El peso seco, dividido por el tiempo empleado para la medición y por la anchura del muestreador, da el caudal del arrastre de fondo por unidad de anchura del río en el punto de medida  $qb$  por unidad de tiempo.
- Con base en los datos obtenidos de los puntos donde se realizaron las muestras, se construye una curva que muestre la distribución de  $qb$  a lo ancho del río. La superficie comprendida entre dicha curva y la línea de la superficie del agua representa el caudal total diario del material de fondo para toda la sección transversal  $Qb$ . El valor de  $Qb$  se puede también calcular a partir de los datos de los  $qb$  medidos de la siguiente manera:
- El valor de  $Qb$  es en toneladas/día,  $qb$  en  $kg/s \cdot x$ , con la distancia en metros. La variable  $x$  representa la distancia entre los puntos en los cuales se extrae la muestra o entre un punto extremo o el borde de la superficie del agua, o el de la parte móvil del fondo del río. La existencia de presas que retienen la mayor parte de los sedimentos transportados por los tramos aguas arriba del río ofrece una posibilidad de estimar el caudal de sedimentos, anual o estacional, mediante la sucesiva inspección de perfiles convenientemente seleccionados del embalse y calcular el volumen ocupado por el sedimento retenido. Este método, combinado con tomas de muestras periódicas de  $Qb$ , y los sedimentos en suspensión aguas arriba y aguas abajo de la presa, puede proporcionar una estimación adecuada del caudal de arrastre.

Con base en el aforo del arrastre de fondo y en el caudal líquido diario, se puede estimar un registro continuo del caudal de arrastre de fondo, mediante una calibración entre caudal de arrastre y caudal líquido. Se puede admitir que esta relación es aproximadamente lineal para los caudales líquidos superiores al valor límite correspondiente al comienzo del movimiento del sedimento de fondo, debido a que la fuerza de tracción de la corriente aumenta en relación directa con el incremento del caudal del río. El transporte de material de fondo es de gran interés en todas las investigaciones concernientes a las variaciones del lecho del río.

El transporte total está conformado por la sumatoria del transporte en suspensión más el transporte de fondo (en  $kg/s$ ).

Dadas las dificultades para tener datos confiables de carga de fondo, existen metodologías sintéticas para estimar tanto la carga de fondo como la carga total, que pueden ser empleadas en ausencia de datos de muestreos suficientes. Estas metodologías pueden ser consultadas en textos de hidrología especializados.

#### 4.1.3. Salidas

El formato de salida debe estar en capacidad de mostrar la siguiente información.

- El sistema debe permitir la edición de los resúmenes de aforo sólido, con varias opciones, que incluyan: regional, corriente y período requerido, y luego generar un archivo conforme a lo solicitado, en especial sobre:
  - Concentraciones diarias superficiales de sedimentos en suspensión en  $kg/m^3$ .
  - Concentraciones medias diarias de sedimentos en suspensión en  $kg/m^3$
  - Transporte diario de sedimentos en suspensión en  $kg/s$
  - Caudal líquido medio diario en  $m^3/s$
  - Relación caudal sólido vs caudal líquido.
  - Relación concentración superficial vs concentración media.

- Con los datos de transporte medio diario se calcula el transporte medio mensual y el promedio, máximo y mínimos de los valores diarios de cada mes.
- A partir de los totales mensuales se construye el resumen anual para cada estación, y con base en él se calculan igualmente el caudal sólido medio anual para cada año, el caudal medio mensual multianual, el caudal medio anual multianual y el caudal máximo y mínimo mensual y anual multianuales.

En casos de estaciones de propiedad de autoridades ambientales regionales u otros organismos, éstas podrán adoptar los formularios de salida que se acomoden a su software, a condición que reúnan los mismos datos como mínimo.

La actualización de los aforos sólidos debe permitir la actualización interactiva de los resúmenes de aforos sólidos que no fueron generados por los procesos en línea.

#### 4.1.4. Estaciones con telemetría y automáticas

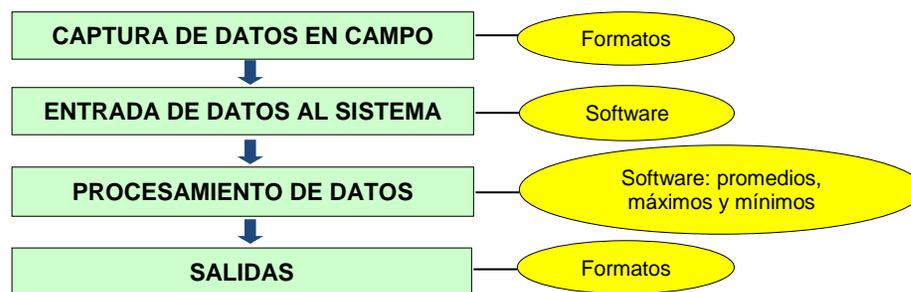
Se refiere a la posibilidad de utilizar datos de niveles generados por este tipo de estaciones, para la generación ulterior de estadísticas de caudales líquidos, que, a su vez, permitan establecer relaciones con los caudales sólidos resultantes de los aforos sólidos (ver protocolo de niveles y caudales).

#### 4.1.5. Procesamiento secundario

Los datos de resúmenes diarios, mensuales, anuales y multianuales de caudal sólido son los datos básicos para el usuario general, que deben estar disponibles en el Banco de Datos.

Desde el punto de vista de la determinación de la oferta hídrica a nivel de zona hidrográfica, el principal producto a generar mediante el procesamiento secundario de la información es el mapa de caudales sólidos, que a su vez permite estimar el caudal sólido medio de la cuenca en cualquier punto de la misma (o el volumen total anual de sedimentos en suspensión generados). Este mapa equivale al mapa de caudales líquidos del Protocolo de niveles y caudales. El procesamiento secundario se puede completar mediante la elaboración de histogramas de caudales medios mensuales multianuales, indicadores del régimen de escorrentía superficial, los cuales deben actualizarse cada año (figura 39).

**Figura 39. Flujograma general de captura y procesamiento básico de la información**





INFORME FINAL

epam s.a. esp

Contrato No. 214 de 2010  
**AJUSTAR EL PROGRAMA NACIONAL DE MONITOREO DEL RECURSO HÍDRICO Y LA DETERMINACIÓN DE LA ESTRATEGIA DE SU IMPLEMENTACIÓN**

De igual manera, para caracterizar el régimen de caudal sólido se pueden calcular los siguientes índices para los valores mensuales y anuales de la serie, una vez validados los datos: desviación estándar, coeficiente de variación e índice de irregularidad interanual (IRA), cuyas fórmulas y procedimientos de cálculo pueden encontrarse en textos de estadística e hidrología.



## 5. VALIDACIÓN DE DATOS: CONTROL DE CALIDAD

### 5.1. POSIBLES FALLAS Y CAUSAS DE ERRORES EN LOS INSTRUMENTOS DE MUESTREO Y MEDICIÓN

La tabla 2 muestra una relación de las fallas y/o errores más frecuentes en la medición de caudal sólido, de acuerdo con la experiencia del IDEAM. Es evidente que el control de calidad en la medición de sedimentos debe empezar con evitar la comisión de estos errores.

**Tabla 2. Errores en la operación de instrumentos de muestreo de sedimentos**

Error	Descripción
<b>Errores selección estación de aforo</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sección de aforos inestable, que hace que las curvas de gastos cambien constantemente.</li> <li>• Difícil acceso.</li> <li>• Déficit de observadores.</li> <li>• La estación no es representativa de la corriente.</li> <li>• Soportes sin firmeza</li> </ul>
<b>Errores del muestreo diario</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Botellas sucias.</li> <li>• Llenado incompleto de botellas</li> <li>• Verter y agregar agua a la botella para completar el volumen de muestreo</li> <li>• No agitar la botella antes de verter su contenido a la probeta</li> <li>• Error de paralaje al leer la probeta</li> <li>• Colocar mal el filtro en el embudo, o verter muy rápido el contenido de la probeta en el embudo Buchner, haciendo que el filtro se levante y se pierda parte del filtrado.</li> <li>• Retirar el filtro con las manos húmedas</li> <li>• Poner el filtro con la cara del filtrado hacia abajo, lo que hace que parte del filtrado se caiga</li> <li>• Marcar en forma ilegible el filtro</li> <li>• Anotaciones ilegibles o dudosas en el formato de muestras diarias.</li> <li>• Falta de papelería (libretas).</li> <li>• Libreta sin identificar (nombre y código estación, fechas)</li> </ul>
<b>Errores del aforo sólido</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Calibración inadecuada del muestreador.</i> La velocidad de acceso en la boquilla del instrumento debe ser igual a la velocidad del flujo en el punto de muestreo. Los errores de medición que se producen cuando la velocidad del agua en la boquilla es diferente de la velocidad de la corriente, son inapreciables para partículas menores de 0,06 mm. Para partículas mayores de 0,06 mm, el error es mayor mientras mayor sea el tamaño de partícula y la diferencia entre la velocidad de entrada y la de la corriente en el punto de muestreo. Cuando la velocidad en la boquilla es menor que la de la corriente, las muestras contienen un exceso de sedimentos; y cuando la velocidad de la boquilla es mayor las concentraciones son menores que las de la corriente. La magnitud de los errores en la concentración para diferentes relaciones de velocidad de toma varía entre 0,25, 0,50 y hasta 3,0 veces la velocidad de flujo, para diferentes tamaños de partícula de suspensión. A medida que dichas partículas son de inferior diámetro, la magnitud del error decrece. Usualmente, los fabricantes de estos equipos advierten que las boquillas están calibradas para cada instrumento individualmente.</li> <li>• <i>Orientación incorrecta del equipo.</i> La orientación inadecuada del muestreador con respecto a la dirección del flujo reduce la concentración de la muestra. En ensayos de laboratorios de hidráulica, se ha encontrado que el error es inapreciable para desviaciones menores de 20 grados, mientras que una desviación de 30 grados resulta en un error de - 7%. Por tanto, la sección de la boquilla debe ser normal a las líneas de flujo.</li> <li>• <i>Influencia del lecho.</i> La extrema aproximación del muestreador al lecho con la consecuente captación de partículas de arrastre o saltación altera el contenido de sólidos suspendidos de la muestra.</li> <li>• <i>Tiempos de llenado inadecuados.</i> La pérdida de representatividad de la muestra se da por rebosamiento y recirculación del contenido de la botella. Se recomienda que el llenado de la botella se realice de acuerdo a las instrucciones de muestreo en cuanto a tiempos de llenado con relación a la velocidad del flujo, de tal forma que se garantice un volumen no superior al 75% de la capacidad de la botella.</li> <li>• <i>Tamaño óptimo de la muestra.</i> La limitada capacidad de los recipientes de los muestreadores, especialmente de la serie "US", puede conducir a que cuando la muestra presenta baja concentración y las partículas son de variado tamaño, el peso sea relativamente mayor que el real, lo cual distorsiona la distribución de los tamaños de diámetros a la carga medida y hace necesaria la toma de varias muestras del mismo punto. Para obviar este problema se ha implementado el muestreador de la bolsa plegable, descrito anteriormente, el cual toma</li> </ul>



Contrato No. 214 de 2010  
**AJUSTAR EL PROGRAMA NACIONAL DE MONITOREO DEL RECURSO HÍDRICO Y LA DETERMINACIÓN DE LA ESTRATEGIA DE SU IMPLEMENTACIÓN**

Error	Descripción
	<p>una muestra mucho más grande.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Profundidad y eficiencia.</i> Las mediciones que se realizan por verticales no muestrean la totalidad de los sedimentos debido a que el instrumento no llega hasta el lecho mismo de la corriente. La magnitud de la distancia entre el lecho y el instrumento depende de la forma y tamaño del equipo, del método de operación, de la consistencia o firmeza del fondo y de la presencia de formas del lecho. Como consecuencia, no todos los sedimentos de la vertical tienen la posibilidad de ser captados por el muestreador. Para analizar en forma teórica la cantidad de sedimentos no medida, Chien (1952, en IDEAM, 2004, 2007) definió el concepto de eficiencia de una medición integrada en profundidad como la relación entre la cantidad de sedimentos representada en la muestra y la cantidad total de sedimentos en suspensión y de arrastre presentes en la vertical, para un cierto tamaño de partículas del material del lecho. Se deduce que cuanto menor es la profundidad, menor es la eficiencia del muestreo, dado que en la zona no medida es proporcionalmente mayor.</li> <li>• <i>Otros.</i> Datos de nivel mal leídos, curva de gastos desactualizada, instrumentos de nivel desnivelados (mitra o limnógrafo) y demás errores propios de las estaciones hidrométricas (ver protocolo de niveles y caudales)</li> </ul>
<p><b>Fallas de laboratorio</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Error de paralaje al leer la probeta</li> <li>• Colocar mal el filtro en el embudo, o verter muy rápido el contenido de la probeta en el embudo Buchner, haciendo que el filtro se levante y se pierda parte del filtrado.</li> <li>• Dejar sedimento en el fondo de la probeta o del filtro Buchner</li> <li>• Retirar el filtro con las manos húmedas</li> <li>• Poner el filtro con la cara del filtrado hacia abajo, lo que hace que parte del filtrado se caiga</li> <li>• Marcar en forma ilegible el filtro</li> <li>• Mufla descalibrada</li> <li>• Balanza descalibrada y/o desnivelada</li> <li>• Anotación incorrecta de los datos de volumen, tara y peso en el formato de aforo de sedimentos en suspensión y de control de filtración y calcinación.</li> <li>• Marcado incorrecto o confusión de los filtros entre sí y/o de los crisoles.</li> <li>• Tamices sucios</li> <li>• Tamizador descalibrado</li> </ul>

## 5.2. VALIDACIÓN DE DATOS DE SEDIMENTOS<sup>8</sup>

Las series de caudales sólidos se derivan de las series de caudales líquidos, con las cuales están relacionadas mediante la curva de calibración  $Q_s$  vs  $Q_l$ . Además, los caudales sólidos dependen del muestreo realizado durante el aforo sólido y de la determinación de las concentraciones de sedimentos en suspensión en esas muestras. Por tanto, los posibles errores en las series de caudales sólidos se pueden deber a errores en las series de caudales líquidos, a errores del muestreo de sedimentos y a errores en las curvas de calibración de caudales y concentraciones (ver sección 4.1.2).

El sistema de control de calidad de sedimentos contempla tres etapas como mínimo: preverificación en la estación, verificación en oficina sobre libretas y validación final post-proceso, en el sistema, los cuales se describen a continuación (figura 43):

### 5.2.1. Preverificación de los datos en la estación.

Esta preverificación se lleva a cabo fundamentalmente sobre las muestras diarias de sedimentos superficiales en suspensión, que, como se dijo anteriormente, son tomadas y filtradas y sus filtros almacenados por el Observador.

<sup>8</sup>Wilches H. Aplicativo verificación procesos muestras diarias de sedimentos SEDINCO. IDEAM. Bogotá. 2008.



Contrato No. 214 de 2010  
**AJUSTAR EL PROGRAMA NACIONAL DE MONITOREO DEL RECURSO HÍDRICO Y LA DETERMINACIÓN DE LA ESTRATEGIA DE SU IMPLEMENTACIÓN**

La preverificación en la estación se realiza durante las visitas de inspección que realizan a cada estación el Inspector y su Ayudante, con una frecuencia que depende del tipo de estación y de la estabilidad de la sección (ver sección 2.3).

Dado que uno de los componentes del muestreo diario es el registro del nivel, del cual depende el caudal líquido diario, se aplica en este caso la inspección a la estación hidrométrica (limnimétrica, limnigráfica o automática), cuyos objetivos y procedimientos se pueden consultar en el protocolo de niveles y caudales.

Específicamente, los puntos más importantes para el muestreo diario de sedimentos, a verificar durante las visitas de inspección, son los siguientes:

- Revisar las copias u originales de las libretas de muestreo diario de meses anteriores y comprobar:
  - Que las libretas estén al día, sin adelantos ni retrasos. Si se hallan adelantadas, se revisan los días hacia atrás hasta encontrar desde cuándo se presentó la anomalía.
  - Que la última anotación corresponda al día de la visita.
  - Que los datos que identifican a la estación (código, nombre) y las fechas (día, mes, año) estén correctos.
  - Que el número de días de cada mes sea el correcto (28, 29, 30 o 31).
  - Que las copias de la libreta de muestras diarias sean legibles, y que los números de las lecturas anotadas sean legibles y estén colocados en las casillas que corresponda.
  - Que se haya anotado en el formato el día, la hora, la lectura de mira, la distancia desde el punto de referencia, el número del filtro y el volumen del filtrado, para cada muestra tomada.
  - Que se aclaren las lecturas ilegibles con el observador.
  - Que los embudos, filtros, caja de filtros, probeta y pipeta estén en buen estado.
  - Que la canastilla de muestreo y las botellas estén en buen estado
  - Que los filtros estén convenientemente empacados, sellados y almacenados, en tal forma que no se pierda sedimento.

Como resultado, se analizan con el observador los errores encontrados y se le reinstruye en caso necesario (ver tabla 2 sobre posibles fallas o errores).

## **5.2.2. Verificación de los datos en oficina**

### **5.2.2.1. Verificación de los datos de concentraciones diarias**

Para la verificación de los datos de concentración de sedimentos en suspensión se parte de la curva de concentración superficial vs concentración media y de la ecuación correspondiente. Es posible encontrar dos tipos de distribución: homogénea y heterogénea (ver figuras 40 y 41). Para cada curva se estima el coeficiente de correlación (R). Por lo general, una sección estable presenta una distribución homogénea de sus puntos a lo largo de la recta de tendencia central trazada en papel doble logarítmico y un coeficiente de correlación alto, mientras que una sección inestable presenta una alta dispersión y un coeficiente de correlación bajo, si bien pueden darse otros factores (incluso de muestreo y aforos líquidos) que influyen en la dispersión. El coeficiente de correlación permite determinar el rango de variación aceptable de los datos de concentración.



Contrato No. 214 de 2010  
**AJUSTAR EL PROGRAMA NACIONAL DE MONITOREO DEL RECURSO HÍDRICO Y LA DETERMINACIÓN DE LA ESTRATEGIA DE SU IMPLEMENTACIÓN**

Para los datos de concentraciones diarias, el procedimiento de verificación de la validez de la muestra es el siguiente (ver tabla 3):

- Se calcula la concentración de cada muestra dividiendo la diferencia del peso bruto y la tara por el volumen y convirtiendo a mg/l.
- Con las tres concentraciones superficiales diarias (C1, C2 y C3), se calcula el promedio diario (Cm).
- Se calcula luego el porcentaje de variación de cada muestra con respecto al promedio, así:

$$\% V = \frac{(C1 - Cm) * 100}{Cm}$$

- El porcentaje de variación calculado para cada muestra se confronta con la máxima desviación permitida, representada por el complemento a 1 del coeficiente de correlación.
- Las muestras que presenten un porcentaje de variación, superiores al máximo permitido pasan a revisión antes de eliminarse (en rojo en la tabla 3), para determinar la causa de la variación.

**Tabla 3. Ejemplo de aplicación del método de verificación de las concentraciones**

Mes	Día	Ancho a 1/4			Ancho a 1/2			Ancho a 3/4			Concentración (mg/l)				% variación concentración			Cumplimiento			% variación máximo *
		Volumen ml	Tara mg	Peso mg	Volumen ml	Tara mg	Peso mg	Volumen ml	Tara mg	Peso mg	C1 (1/4)	C2 (1/2)	C3 (3/4)	Cm	C1 (1/4)	C2 (1/2)	C3 (3/4)	C1 (1/4)	C2 (1/2)	C3 (3/4)	
1	1	380	14,1604	14,6445	360	14,1138	14,4349	370	15,3975	15,6994	1,2739	0,8919	0,8159	0,9939	28,2	10,3	17,9	28,2	Cumple	Cumple	25
	2	330	16,8748	17,1017	310	16,5404	17,1263	350	14,2528	15,5621	0,6876	1,8900	3,7409	2,1061	67,4	10,3	77,6	67,4	Cumple	77,6	
	3	350	15,3573	15,3967	290	15,975	16,0058	240	16,3078	16,3529	0,1126	0,1062	0,1879	0,1356	17,0	21,7	38,6	Cumple	Cumple	38,6	

\* % variación = (1-R)\*100 = (1-0,75)\*100 = 25%

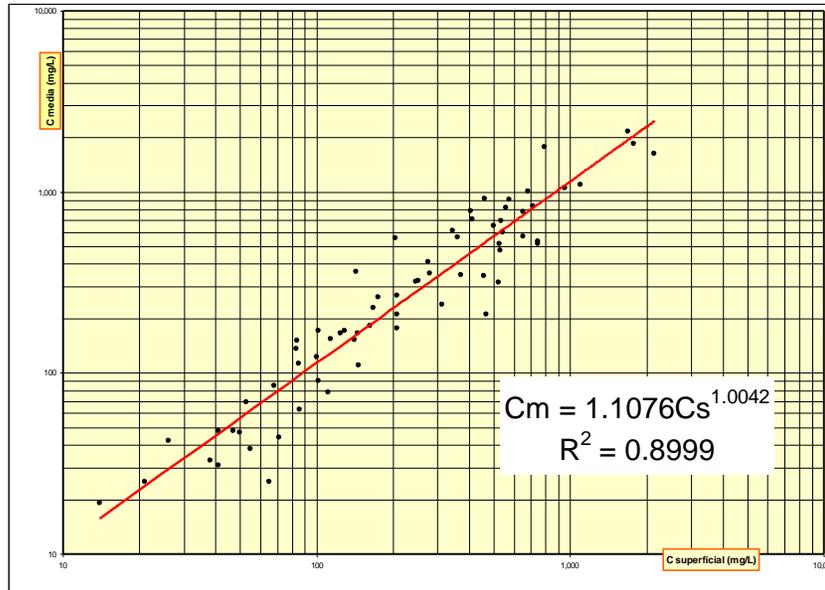
Fuente: Con base en datos de Wilches, 2009

- Las causas de la variación por fuera del límite determinado con base en el coeficiente de correlación de la curva de calibración de concentraciones pueden ser múltiples. La figura 42 muestra el proceso general de la verificación, junto con las causas posibles de la variación. Entre ellas se destacan:
  - Coeficiente de correlación de la relación caudal sólido vs caudal líquido (transporte).
  - Coeficiente de correlación de la relación concentración superficial vs concentración media.
  - Ancho variable de la sección
  - Inestabilidad de la sección
  - Cambios en la velocidad media
  - Errores del observador en la toma de muestras y/o en la anotación del volumen
  - Errores de transcripción de datos
  - Otros

La experiencia muestra que el 80% de las altas variaciones detectadas en las concentraciones (tabla 3) se deben a errores de transcripción de datos, cuando el proceso es manual; al automatizar el proceso estos errores deben desaparecer.

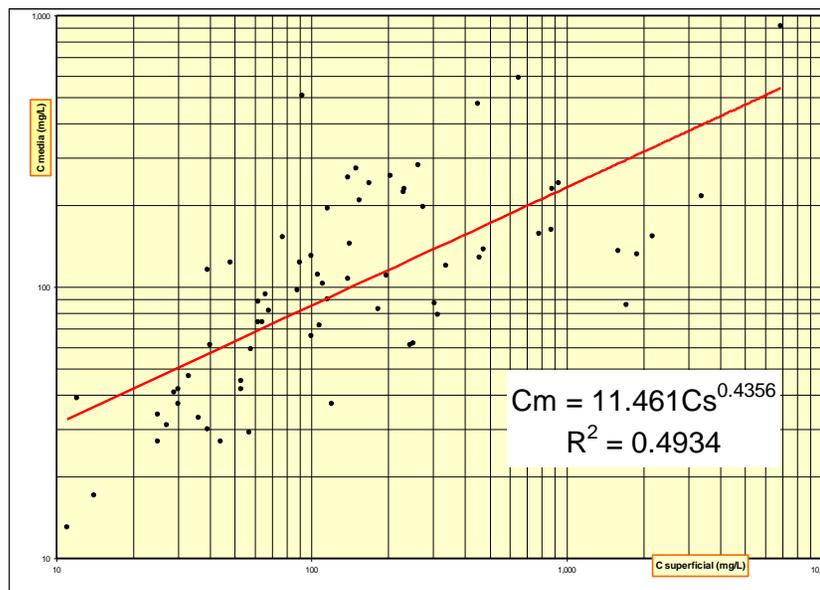
- Una vez que se detecte la causa de la variación se procede a corregirla, de ser el caso, y a reintegrarla a la base de datos, o a eliminarla definitivamente, si no se detecta una causa corregible.

**Figura 40. Distribución homogénea de concentración de sedimentos**



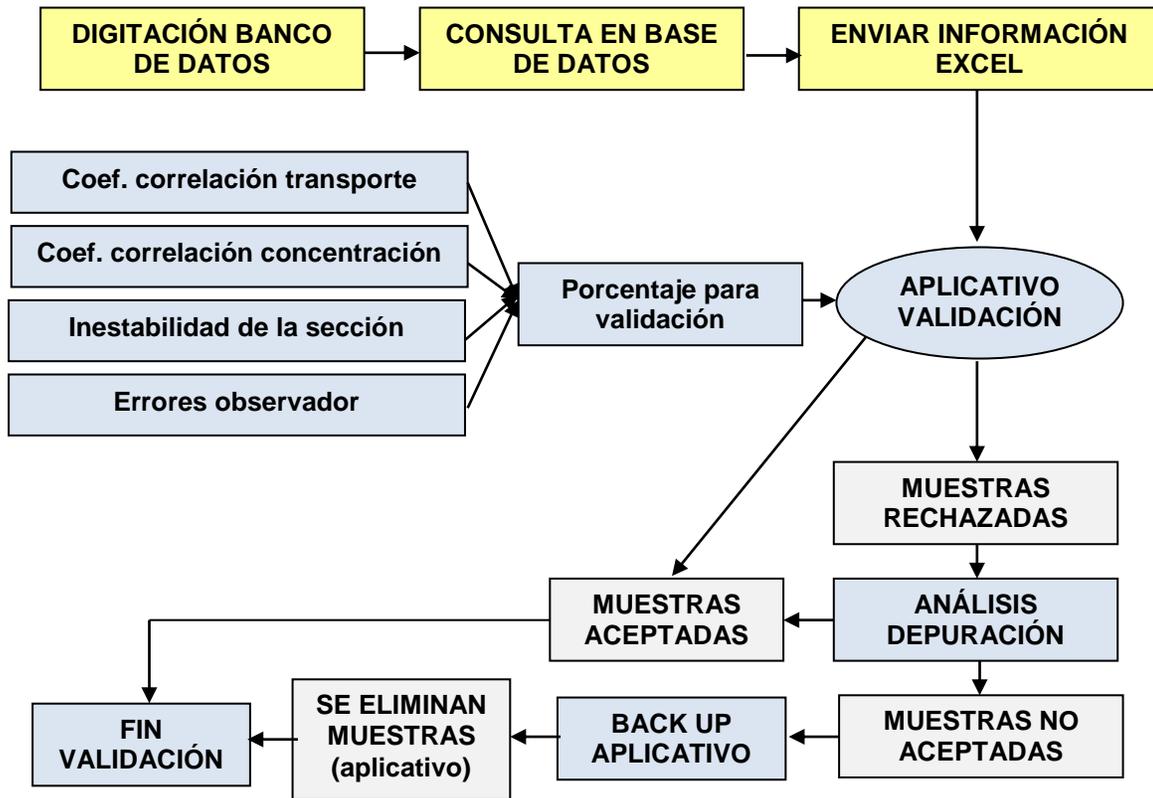
Fuente: Wilches, 2008 (IDEAM)

**Figura 41. Distribución heterogénea de concentración de sedimentos**



Fuente: Wilches, 2008 (IDEAM)

Figura 42. Proceso general de verificación de concentraciones



Fuente: Wilches, ideam, 2009

### 5.2.2.2. Verificación de los datos de aforo sólido

La verificación del aforo sólido se lleva a cabo por el propio inspector a cargo, mediante la comprobación de que no han ocurrido los errores descritos en la tabla 2 del presente protocolo, a saber:

- Calibración inadecuada del muestreador.
- Orientación incorrecta del equipo.
- Influencia del lecho.
- Tiempos de llenado inadecuados.
- Tamaño óptimo de la muestra.
- Profundidad y eficiencia.
- Otros ligados a la operación de la estación hidrométrica.

### 5.2.2.3. Verificación de los datos de laboratorio

La verificación del análisis de laboratorio sobre las muestras del aforo sólido se lleva a cabo por

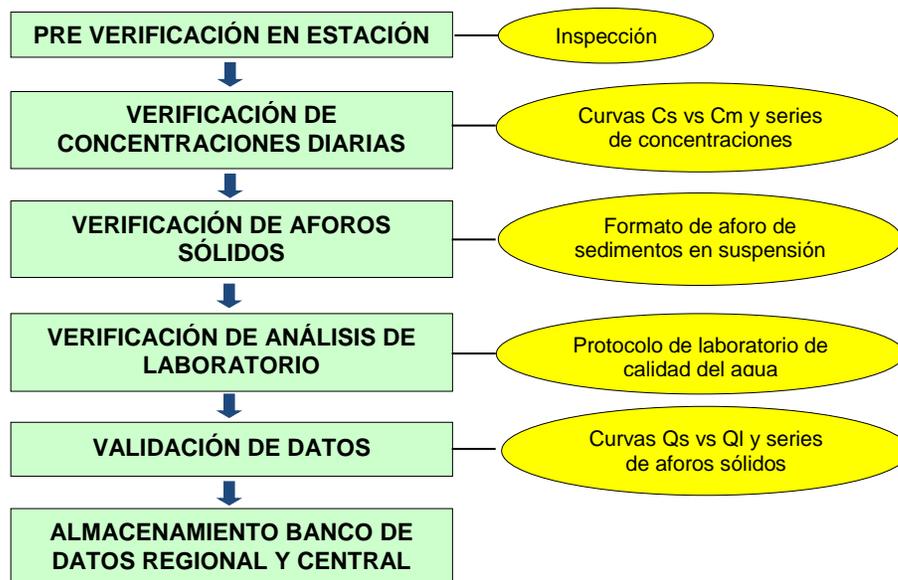
el revisor de laboratorio, mediante la comprobación de que no han ocurrido los errores descritos en la tabla 2 del presente protocolo, relativos tanto a errores de proceso de la filtración, la calcinación y la granulometría, como al estado, calibración y/o nivelación de los instrumentos.

### 5.2.3. Validación final

Se lleva a cabo en el procesamiento, mediante la validación de los datos muy alejados de la línea de tendencia central de la curva de calibración  $Q_s$  vs  $Q_l$  existente.

Para este efecto, los aforos de caudal sólido se transcriben sobre la gráfica de la curva de calibración existente, y se rechazan aquellos que queden muy alejados de la curva. Como en el caso de las concentraciones (figura 42), estos aforos se revisan en forma detallada para identificar las posibles causas de la desviación encontrada, en especial: errores de cálculo (ver procesamiento en sección 4.1.2 del presente protocolo), errores de transcripción, inestabilidad de la sección u otros. Con base en esta depuración, el ingeniero a cargo debe decidir si acepta o elimina en forma definitiva el aforo. En caso de encontrarse una desviación sistemática de los aforos nuevos con respecto a la curva, se deberá analizar la necesidad de cambiar la curva, ya que, en tal caso, la desviación podría deberse a cambios en las características de la sección.

**Figura 43. Flujograma general de la validación de la información**



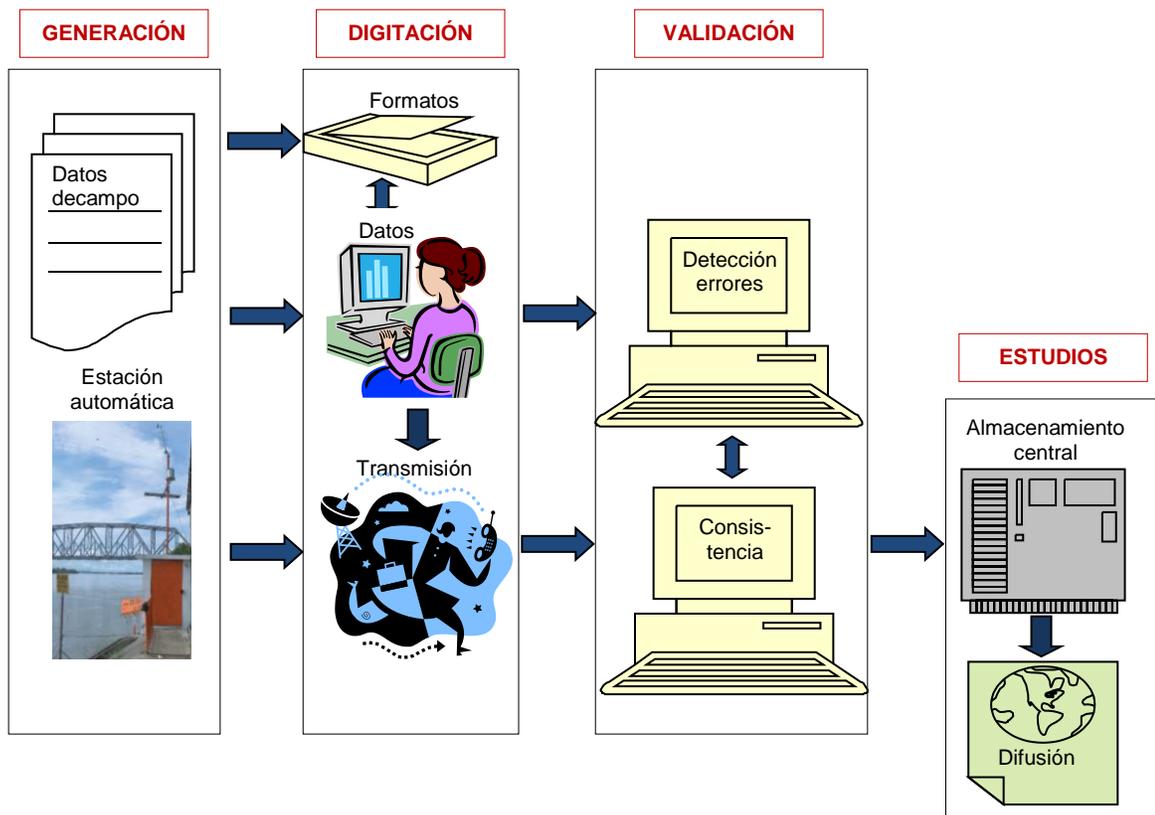
De otro lado, dado que los errores de las curvas de calibración niveles vs caudales líquidos, se reflejan en errores en las series de caudales líquidos, y los errores de las curvas de calibración e caudales sólidos vs caudales líquidos se reflejan en errores en las series estimadas de caudales sólidos, para controlar los errores de construcción de las series de caudales sólidos, se recomienda no utilizar sino series de caudales diarios depuradas y homogeneizadas para la generación de caudales sólidos diarios. Los métodos para el control de calidad de las series diarias, mensuales y anuales de niveles y caudales líquidos se presentan en el protocolo de niveles y caudales.

## 6. ALMACENAMIENTO<sup>9</sup>

Con el almacenamiento de datos se ubica toda la información procesada, validada y consistente en el banco de datos, en donde podrá ser utilizada por los diferentes usuarios. En la práctica, se siguen procedimientos similares a la captura y, frecuentemente, estas dos labores no se diferencian. El sistema debe tener la capacidad para mostrar por pantalla todos los archivos disponibles para procesamiento, así como para bajarlos a CD, imprimirlos, consultarlos vía web o enviarlos vía correo electrónico.

Como se anotó en la sección 4.1.1, el ingreso de los datos al sistema de almacenamiento se hace por primera vez, en las oficinas de las áreas operativas y esta operación está a cargo de los mismos inspectores de campo, los cuales recogen la información en terreno. La digitación de la información al disco duro del sistema de almacenamiento y operativo consiste en la grabación de los datos contenidos en los formatos o carteras diligenciadas en terreno y laboratorio, y en ella se cumple el primer control de calidad, como ya se anotó (ver sección 5). El ingreso de datos al sistema puede variar en función del programa de que se disponga para el efecto, adoptado por la Oficina de Sistemas del IDEAM o de cada entidad operativa. La figura 44 muestra el flujograma general del almacenamiento.

**Figura 44. Flujograma general del almacenamiento de la información**



<sup>9</sup> Con base en Pedraza C. E. y Franco J. C., Procedimiento para la actualización del Banco de datos central con la información de las áreas operativas. IDEAM. Bogotá. 2005.



## 7. DIFUSIÓN DE LA INFORMACIÓN

La difusión de los datos de sedimentos se realizará conforme a las políticas de gestión de información que defina el Consejo Directivo de cada entidad, definiendo la disponibilidad de los diferentes tipos de datos asociados al monitoreo de sedimentos, las estrategias de entrega de información a usuarios particulares, la disponibilidad para usuarios internos y la divulgación de información en el portal web institucional de cada entidad, de información consolidada de acuerdo con la condición misional de la información.

El Decreto 1277 de 1994 indica que le corresponde al IDEAM dirigir y coordinar el Sistema de Información Ambiental y operarlo en colaboración con las Entidades Científicas vinculadas al Ministerio del Medio Ambiente, con las Corporaciones autoridades ambientales y demás entidades del Sistema Nacional Ambiental - SINA. En este sentido las entidades mencionadas anteriormente, deberán coordinar con el IDEAM la estrategia de transmisión de la información o consolidados del monitoreo del recurso hídrico en Colombia para su divulgación en el Sistema de Información Ambiental de Colombia, particularmente en el subsistema de información del recurso hídrico SIRH.

Como referente se cita la resolución 2367 de 2009 sobre Gestión de Datos e Información del IDEAM y donde se adopta el proceso genérico de Gestión de Datos e Información Misional del IDEAM.

La información a divulgar por cada entidad tendrá como prerequisite el cumplimiento del protocolo de monitoreo, que garanticen que la información cumpla con los requisitos de gestión de información en los aspectos de calidad de la información en su carácter de información misional, oportunidad, restricciones de ley, observación de estándares, y documentación.



**INFORME FINAL**

**epam s.a. esp**

Contrato No. 214 de 2010

**AJUSTAR EL PROGRAMA NACIONAL DE MONITOREO DEL RECURSO HÍDRICO Y LA DETERMINACIÓN DE LA ESTRATEGIA DE SU IMPLEMENTACIÓN**



**INFORME FINAL**

**epam s.a. esp**

Contrato No. 214 de 2010  
**AJUSTAR EL PROGRAMA NACIONAL DE MONITOREO DEL RECURSO HÍDRICO Y LA DETERMINACIÓN DE LA ESTRATEGIA DE SU IMPLEMENTACIÓN**

**ANEXOS**



**INFORME FINAL**

**epam s.a. esp**

Contrato No. 214 de 2010  
**AJUSTAR EL PROGRAMA NACIONAL DE MONITOREO DEL RECURSO HÍDRICO Y LA DETERMINACIÓN DE LA ESTRATEGIA DE SU IMPLEMENTACIÓN**



INFORME FINAL

epam s.a. esp

Contrato No. 214 de 2010
AJUSTAR EL PROGRAMA NACIONAL DE MONITOREO DEL RECURSO HÍDRICO Y LA DETERMINACIÓN DE LA ESTRATEGIA DE SU IMPLEMENTACIÓN

ANEXO 1. FORMATOS TIPO

Formato 1. Formato de captura de muestras diarias de sedimentos

Formulario for sediment sample collection with sections for station identification, date, method, and a detailed data table with columns for day, hour, distance, sample number, volume, and weight.



INFORME FINAL

epam s.a. esp

Contrato No. 214 de 2010
AJUSTAR EL PROGRAMA NACIONAL DE MONITOREO DEL RECURSO HÍDRICO Y LA DETERMINACIÓN DE LA ESTRATEGIA DE SU IMPLEMENTACIÓN

Formato 2. Formato de aforo de sedimentos en suspensión

Formulario for sediment suspension measurement. Includes fields for IDEAM, station name, inspector, station, date, time, and a large data table with columns for distance, depth, velocity, sample, volume, crucible, tare, and weight.



INFORME FINAL

epam s.a. esp

Contrato No. 214 de 2010
AJUSTAR EL PROGRAMA NACIONAL DE MONITOREO DEL RECURSO HÍDRICO Y LA DETERMINACIÓN DELA ESTRATEGIA DE SU IMPLEMENTACIÓN

Formato 3. Formato de medición detallada de sedimentos en suspensión

Formulario for sediment measurement in suspension, including fields for station details, measurement parameters, and a data table with columns for depth, velocity, and various sediment measurement units.





INFORME FINAL

epam s.a. esp

Contrato No. 214 de 2010  
AJUSTAR EL PROGRAMA NACIONAL DE MONITOREO DEL RECURSO HÍDRICO Y LA DETERMINACIÓN DE LA ESTRATEGIA DE SU IMPLEMENTACIÓN

Formato 5. Formato de aforo de sedimentos en suspensión por el método de la bolsa plegable

 Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales  
Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial – República de Colombia  
SUBDIRECCIÓN DE HIDROLOGÍA - GRUPO LABORATORIO DE CALIDAD AMBIENTAL

**A FORO DE SEDIMENTOS EN SUSPENSION**  
**Bolsa Plegable**

Código : \_\_\_\_\_ Fecha de Muestreo : \_\_\_\_\_  
 Estación : \_\_\_\_\_ Hora Inicial (HH:MM): \_\_\_\_\_ Hora Final (HH:MM) : \_\_\_\_\_  
 Corriente : \_\_\_\_\_ Nivel Inicial (cm) : \_\_\_\_\_ Nivel Final (cm) : \_\_\_\_\_  
 Inspector(es) : \_\_\_\_\_ Peso Total (g) : \_\_\_\_\_ Volumen Total (ml) : \_\_\_\_\_  
 Caudal (m3/s) : \_\_\_\_\_

Sedimento Menor de 63 Micras

DISTANCIA PUNTO REF. (m)	VOLUMEN MUESTRA (ml)	CRISOL Nº	TARA (g)	PESO BRUTO (g)	PESO NETO 600 °C	C (g/l)	CAUDAL (m <sup>3</sup> /s)	Q <sub>s</sub> (K tn/d)
INTEGRADO	510	36	21.2267	21.4650	0.2383	0.4673	6812.4190	275.0230

Sedimento Retenido en el Microtamiz de 63 Micras

INTEGRADO	37560	20	19.0873	23.4494	4.3621	0.1161	6812.4190	68.3573
CONCENTRACION TOTAL						0.5834		
CAUDAL							6812.4190	
TRANSPORTE TOTAL							kg/s	3974.3090
							K·tn/d	343.3803

Convenciones: C: Concentración  
Qs: Transporte

OBSERVACIONES

SHID/091106





## BIBLIOGRAFÍA

ARDILA H., G. A. Guía de construcciones hidrometeorológicas. IDEAM. Bogotá. 1997.

BERNAL G., G. Manual sobre análisis, detección de errores y guías para la verificación y cálculo en los registros de brillo solar. 72 p. HIMAT. Bogotá. 1984.

DOMÍNGUEZ E, VERDUGO N. Y NIÑO R. Optimización de la red hidrológica nacional de referencia. IDEAM. Bogotá, 2002.

EPAM-CPT, Plan de ordenación y manejo de la microcuenca de la quebrada Santa Elena (Medellín). Bogotá-Medellín. 2008.

IDEAM. Estudio Nacional del Agua. Bogotá. 2010 (en prensa).

IDEAM – APCYTEL. Manual para la operación, inspección y mantenimiento de estaciones meteorológicas. Bogotá. 2008.

IDEAM. Protocolo para el seguimiento y monitoreo del agua. Bogotá. 2007.

IDEAM. Manual del observador meteorológico. Medellín. 2001.

LOPEZ J., V. Manual sobre manejo, codificación, análisis y verificación de la información meteorológica. HIMAT. 106 p. Bogotá. 1988.

MAYORGA M, R. Determinación de umbrales de lluvia detonante de deslizamientos en Colombia. U. N. de Colombia. Tesis título de Magister en Meteorología. Bogotá. 2003.

MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL, Viceministerio de Ambiente. Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico. Bogotá. 2010.

NARVÁEZ, G., & G. LEÓN. Caracterización y zonificación climática de la región Andina. Meteorología Colombiana. 4:1-8. ISSN 0124-6984. Bogotá. 2001

ORGANIZACIÓN METEOROLÓGICA MUNDIAL OMM. Guía de prácticas hidrológicas: Adquisición y proceso de datos, análisis, predicción y otras aplicaciones, OMM No. 168, Quinta edición. Ginebra. 1994.

ORGANIZACIÓN METEOROLÓGICA MUNDIAL. Adquisición y proceso de datos, análisis, predicción y otras aplicaciones. *Guía de prácticas hidrológicas*. (5), 210-213, 217-220, 223. Ginebra. 1994.

NIÑO, R. Reingeniería de la red hidrológica operada por el IDEAM-CAR para la cuenca piloto de la parte alta del río Ubaté. Contrato de prestación de servicios No. No.208/2009. Convenio específico de cooperación IDEAM-CAR No 005/2009. Bogotá. 2009.

PÉREZ PRECIADO, A., Gran atlas y geografía de Colombia. Círculo de Lectores. Bogotá. 2004.



Contrato No. 214 de 2010  
**AJUSTAR EL PROGRAMA NACIONAL DE MONITOREO DEL RECURSO HÍDRICO Y LA DETERMINACIÓN DE LA ESTRATEGIA DE SU IMPLEMENTACIÓN**

RANGEL M., E. y TORRES G., A. Protocolo para el control de calidad de la información meteorológica en las etapas de obtención, evaluación, verificación, cálculo y procesamiento. Subdirección de Meteorología Área Operativa No 1 (Medellín). IDEAM. Bogotá. 2005

REMENIERAS G. Tratado de hidrología aplicada. Ed. Técnicos Asociados SA. Barcelona, España. 1971.

SÁNCHEZ F. D. Guía y protocolos del monitoreo y seguimiento del agua. Contrato de servicios de consultoría No. C – 0427 – 05. Bogotá. 2006.

UNESCO, WHO. Water Quality Surveys. Studies and reports in Hidrology. Paris. 1978.

USGS. Field Methods for Measurement of Fluvial Sediment. By Thomas K. Edwards and G. Douglas Glysson. Techniques of Water-Resources Investigations of the U.S. Geological Survey. Book 3, Applications of Hydraulics. Chapter C2. Washington. U.S. 1970-1998.

VALLEJO T. O. Sistema de Información Hidrometeorológica. Subsistema de Meteorología. Manual del usuario. 57 p. IDEAM. Bogotá. 1995.

VARGAS O. Protocolo del agua: Monitoreo de aguas subterráneas. IDEAM. Bogotá, 2010.

VEN TE CHOW, MAIDMENT R. DAVID, MAYS LARRY, Hidrología Aplicada. Ed. Mac Graw Hill. 2001

WILCHES H. Aplicativo verificación procesos muestras diarias de sedimentos SEDINCO. IDEAM. Bogotá. 2008.

WILCHES H. Sedimentos. Taller teórico – práctico “Estandarización y actualización de protocolos de monitoreo y proceso de información hidrológica”. IDEAM. Girardot 2009.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION WMO - WORKING GROUP OF THE COMMISSION FOR HYDROMETEOROLOGY. Machine Processing Of Hydrometeorological Data, Technical Note No. 115. Geneva - Switzerland: WMO No. 275. 1971

<http://web.usal.es/javisan/hidro>

<http://www.unesco.org.uy/phi/libros/libroPIEB/3-2.html>

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION WMO. Guide to Hydrological Practices. Vol I, Vol II. WMO No 168. Sixth Edition. Geneva (Switzerland). 2008.