



PROTOCOLO DE MONITOREO DEL AGUA



JUAN MANUEL SANTOS CALDERÓN

Presidente de la República de Colombia

LUIS GILBERTO MURILLO

Ministro de Ambiente y Desarrollo Sostenible

CARLOS ALBERTO BOTERO LÓPEZ

Viceministro de Ambiente

OMAR FRANCO TORRES

Director General

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM

NELSON OMAR VARGAS MARTÍNEZ

Subdirector de Hidrología

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM

EDICIÓN CARTOGRÁFICA

Grupo de Redes IDEAM

Claudia Nicol Tetaty Botia

Ana Maria Vesga Güiza

PRODUCCIÓN EDITORIAL

Nelson Omar Vargas Martínez

Claudia Nicol Tetaty Botia

Ana Maria Vesga Güiza

DISEÑO DE LA CARÁTULA

Claudia Nicol Tetaty Botía

Ana Maria Vesga Güiza

Luis Carlos Delgado Gualteros

DISEÑO Y DIAGRAMACIÓN

Luis Carlos Delgado Gualteros

Oficina de Comunicaciones IDEAM

Claudia Nicol Tetaty Botía

Ana Maria Vesga Güiza

CÍTESE COMO

IDEAM, INVEMAR xxxxxxxxxxxx – año 2017. Bogotá, D. C., 2017. xxx páginas.

ISBN: XXXXXX

Publicación aprobada por el IDEAM XXX de 2018, Bogotá D.C., Colombia -
Distribución Gratuita.

2018, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM. Todos
los derechos reservados. Los textos pueden ser usados parcial o totalmente citando
la fuente. Su reproducción total o parcial debe ser autorizada por el IDEAM.

**Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible Instituto de Hidrología,
Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM**

**OMAR FRANCO TORRES
Director General - IDEAM**

**ADRIANA PORTILLO TRUJILLO
Secretaria General – IDEAM**

CONSEJO DIRECTIVO

**LUIS GILBERTO MURILLO
Ministro de Ambiente y Desarrollo Sostenible**

**GERMÁN CARDONA GUTIÉRREZ
Ministro de Transporte**

**LUIS FERNANDO MEJÍA
Director, Departamento Nacional de Planeación- DNP**

**MAURICIO PERFFETI DEL CORRAL
Director, Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas-DANE**

**JUAN PABLO RUIZ SOTO
Delegado, Presidencia de la República**

**RAMÓN LEAL LEÁL
Director Ejecutivo, Asociación de Corporaciones Autónomas Regionales y de
Desarrollo Sostenible – Asocars**

**CESAR OCAMPO RODRÍGUEZ
Director General, Departamento Administrativo de Ciencia Tecnología e
Innovación - Colciencias**

**ADRIANA PORTILLO TRUJILLO
Secretaria Técnica del Consejo**

DIRECTIVAS IDEAM

DIANA MARCELA VARGAS GALVIS
Subdirector de Estudios Ambientales

MARIA TERESA BECERRA RAMIREZ
Subdirectora de Ecosistemas e Información Ambiental

NELSON OMAR VARGAS MARTÍNEZ
Subdirector de Hidrología

JOSE FRANKLYN RUIZ MURCIA
Subdirector de Meteorología

CHRISTIAN EUSCÁTEGUI COLLAZOS
Jefe Oficina Pronósticos y Alertas

JUAN CARLOS ARTURO LOBO TORRES
Jefe Oficina Asesora de Planeación

IVONNE MARITZA VARGAS PADILLA
Coordinador Grupo de Comunicaciones

LEONARDO CÁRDENAS CHITIVA
Jefe Oficina de Informática

GILBERTO ANTONIO RAMOS SUAREZ
Jefe Oficina Asesora Jurídica

MARÍA EUGENIA PATIÑO JURADO
Jefe Oficina Control Interno

DIANA QUIMBAY VALENCIA
Jefe Oficina Cooperación Internacional

DIRECTIVAS INVEMAR

FRANCISCO ARMANDO ARIAS ISAZA

Director General

JESÚS ANTONIO GARAY TINOCO

Subdirector, Coordinación Científica

SANDRA RINCÓN CABAL

Subdirectora Administrativa

DAVID ALONSO CARVAJAL

Coordinador Programa Biodiversidad y Ecosistemas Marinos

MARIO RUEDA HERNÁNDEZ

Coordinador Programa Valoración y Aprovechamiento de Recursos Marinos y Costeros

LUISA FERNANDA ESPINOSA

Coordinadora Programa Calidad Ambiental Marina

PAULA CRISTINA SIERRA CORREA

Coordinadora de Investigación e Información para Gestión Marina y Costera

CONSTANZA RICAURTE VILLOTA

Coordinadora Programa de Geociencias Marinas y Costeras

JULIÁN MAURICIO BETANCOURT PORTELA

Coordinador de Servicios Científicos

COLABORADORES

Nelson Mauricio Anillo

David Roman Chaverra

Jairton Diez Diaz

Adriana Jiménez Patiño

Claudia Liliana Buitrago Aguirre

Oscar Darío Tosse Luna

Juan Diego González Parra

Dirección de Gestión Integral del Recurso Hídrico - MADS

Diana Marcela Moreno

Martha Eddy Arteaga Díaz

Ana Arriaga

Dirección de Asuntos Marinos, Costeros y Recursos Acuáticos- MADS

Fabio Bernal Quiroga

María Constanza Rosero

Iraidys Sierra Garzón

Henry Romero

Claudia Contreras

Hernando Wilches

German Sopo

Subdirección de Hidrología-IDEAM

Carlos Martin Velásquez

Nury Alejandra Mesa Buitrago

Jhonatan Danilo Uasapud García

Darío González Navarro

Laboratorio de Calidad Ambiental IDEAM

Jorge Luis Ceballos

Iván Ricardo Cuellar Coronado

Francisco Eduardo Rojas Heredia

**Subdirección de Ecosistemas e Información Ambiental IDEAM- Grupo de
Suelos y Tierras**

Martha Cecilia Cadena

Juan Antonio Gómez Blanco

Subdirección de Meteorología

Fabio Andrés Torres Cabrera

Jair Martínez Acensio

José Pardo

Área Operativa 11 Cundinamarca IDEAM

Jairo Andrés Garzón Hernández

Grupo de Automatización IDEAM

Diego Alejandro Chalarca R.

Juan Camilo Munera

Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia - CTA

Aura Esther Suárez

Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca – CAR

Diana Yaneth Vargas Rodríguez

**Corporación Autónoma Regional del Río grande de la Magdalena –
CORMAGDALENA**

Marcela Núñez Avellaneda

Instituto SINCHI

Diana Carolina Carrillo Ramírez

Gerardo Arenas Salazar

Empresa de Acueducto de Bogotá

Ángela María Jaramillo L.

Duvan Javier Mesa Fernández

Universidad Santo Tomás. Sede Bogotá

Luz Ángela Cuellar

Universidad Santo Tomás. Sede Tunja

Marco Layton Suarez

Universidad Nacional-Bogotá

Jeymmy Walteros

Universidad Tecnológica de Pereira

Silvia Villabona

Universidad Católica de Oriente

Gladys Reinoso Flórez

Universidad del Tolima

César Tamariz Turizo

Universidad del Magdalena

Yimmy Montoya M

Universidad de Antioquía

Jorge Alberto Díaz Martínez

Universidad Distrital Francisco José de Caldas y Universidad Santo Tomás.

Sede Bogotá

Gabriel Alfonso Roldán Pérez

Academia Colombiana de Ciencias

Edna Luz Pedraza Garzón

Sandra Patricia Jaime Murcia

Hidroforest

Martha García

Claudia Lorena Garzón

Luz Consuelo Orjuela

Cesar Jiménez

Consultores Independientes

AGRADECIMIENTOS

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible - MADS

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM

Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras-INVEMAR

Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia – CTA

Dirección de Asuntos Marinos, Costeros y Recursos Acuáticos – DAMCRA

Corporación Autónoma Regional de la Guajira- Corpoguajira

Corporación para el Desarrollo Sostenible del Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina- CORALINA

Corporación Autónoma Regional de La Guajira- CORPOGUAJIRA

Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca – CVC

Área Operativa 7 Pasto IDEAM

Área Operativa 11 Cundinamarca IDEAM

Área Operativa 9 Cali IDEAM

AUTORES

Nelson Omar Vargas Martínez

Claudia Nicol Tetay Botia

Ana Maria Vesga Güiza

Doris Yolanda Sanabria

Jorge Luis Ceballos Liévano

Ana Karina Campillo

Luisa del Pilar Galindo Garzón

Subdirección de Hidrología, Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM

César Augusto Bernal

Mónica Rocío Bayona Arenas

Ostin Garcés Ordóñez

Diana Isabel Gómez

Paola Sofía Obando Madera

Luisa Fernanda Espinosa

Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras-INVEMAR

Jorge Augusto Acosta Rivera

Dirección de Asuntos Marinos, Costeros y Recursos Acuáticos, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible MADS

Ángela María Zapata Anzola

Carlos A. Rivera Rondón

Mario Fernando Mora Goyes

Pontificia Universidad Javeriana

Yasmín Plata Díaz

Universidad Industrial de Santander

Liliana Salazar López

Universidad Santo Tomás. Sede Bogotá

Luisa Fernanda Lagos Martínez

Consultora Secretaria Distrital de Ambiente

Hernando Ovalle Serrano

Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca

Myriam Liliana Martínez

Carolina Sarmiento

Jardín Botánico de Bogotá José Celestino Mutis

Laura García Rivas

Agua y Suelo Como Fuente de Desarrollo (AİGOS)

Jorge Julián Vélez Upegui

Adela Londoño Carvajal

Fernando Mejía Fernández

Juan David Cañas Duque

Freddy Leonardo Franco Idarraga

Jeannette Del Carmen Zambrano Najera

Luisa Fernanda Calderón Castaño

David Felipe Rincón Castañeda

Mayra Castro

Marínela Del Carmen Valencia Giraldo

Patricia Esther Jiménez Pérez

Yesid Camilo Cabezas Suarez

Universidad Nacional de Colombia- Sede Manizales

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	44
1. OBJETIVOS	47
1.1. Objetivo General.....	47
1.2. Objetivos Específicos.....	47
2. ALCANCE	49
3. MARCO DE REFERENCIA	52
3.1. Marco Normativo.....	52
3.2. Marco Institucional.....	60
4. MARCO CONCEPTUAL	63
4.1. Ciclo del Agua.....	63
4.2. Monitoreo del Agua.....	65
5. ANTECEDENTES	71
5.1. Redes de Monitoreo.....	71
5.2. Protocolos y Guías de Monitoreo.....	85
6. PROCEDIMIENTO GENERAL PARA EL MONITOREO DEL AGUA	88
7. TÉCNICAS Y PROCEDIMIENTOS	97
7.1. Monitoreo de Agua Meteórica.....	97
7.1.1. Precipitación.....	97
7.1.2. Evaporación, Transpiración y Evapotranspiración.....	117
7.1.3. Isótopos estables y radiactivos.....	135
7.2. Monitoreo de Agua Superficial.....	151
7.2.1. Monitoreo de Cantidad.....	151
7.2.1.1. Niveles.....	153
7.2.1.2. Caudales.....	175

7.2.1.3.	Observaciones en cuerpos de hielo y nieve	240
7.2.2.	Monitoreo de Sedimentos	258
7.2.3.	Monitoreo de Calidad.....	302
7.2.3.1.	Físico-químico.....	302
7.2.3.2.	Hidrobiológico	324
7.2.4.	Monitoreo Isotópico	410
7.3.	Monitoreo de Aguas Subterráneas.....	426
7.3.1.	Cantidad	434
7.3.2.	Calidad	463
7.3.3.	Isótopos estables y radiactivos	502
7.4.	Monitoreo Marino-Costero	514
7.4.1.	Calidad de aguas.....	514
7.4.2.	Calidad de Sedimentos.....	525
7.4.5.	Hidrobiológicos marinos (corales, pastos marinos, mangle, fitoplancton, zooplancton, ictioplancton)	531
8.	GESTIÓN DE DATOS E INFORMACIÓN	534
8.1.	Características del dato	536
8.2.	Calidad de datos	536
8.3.	Oficialización del dato	545
8.3.1.	Registro de Usuarios del Recurso Hídrico	546
8.3.2.	Formulario Único de Inventario de Aguas Subterráneas (FUNIAS).	546
8.3.3.	Guía para la gestión Integrada del Recurso Hídrico	547
8.4.	Acceso abierto	548
8.5.	Análisis de información	549

8.5.1. Procesos de análisis de información para realizar Evaluaciones Regionales del Agua	551
8.5.2. Difusión de datos es información	551
8.6. Información como insumo a toma de decisiones.....	552
BIBLIOGRAFÍA	559
ANEXOS.....	587

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Principales instrumentos normativos, que fundamentan el marco legal para el desarrollo de los procesos de monitoreo del recurso hídrico en el país. 59

Figura 2. Esquema de institucionalidad que por norma tiene directa relación con el monitoreo del agua continental y marino costera, en el ámbito nacional y regional. 61

Figura 3. El ciclo hidrológico visto desde el monitoreo. Tomado y editado de: (Enciclopedia Características, 2017) y (UIT, 2017). 63

Figura 4. Tipos de redes de monitoreo según la cobertura y competencia institucional (Vargas N. O., 2001). 66

Figura 5. Participación estaciones Red Hidrometeorológica Nacional. Fuente (IDEAM, 2017) 72

Figura 6. Mapa de estaciones hidrometeorológicas del IDEAM. 72

Figura 7. Mapa de estaciones hidrometeorológicas del IDEAM que se encuentra en proceso de ampliación y modernización. Fuente: IDEAM, 2017. 73

Figura 8. Arriba: Detalle de estaciones hidrometeorológicas automáticas que el IDEAM se encuentra instalando. Fuente IDEAM, 2017. Debajo: Plataforma que permite visualizar los datos de estaciones convencionales o automáticas, imágenes de satélite, radares, entre otros. 74

Figura 9. Red nacional de monitoreo de sedimentos. Fuente: Catálogo IDEAM (2015) 75

Figura 10. Red Calidad del Agua IDEAM 77

Figura 11. Localización de los puntos que integran la Red Básica Nacional de Monitoreo de Aguas Subterráneas. 79

Figura 12. Localización de las treinta (32) estaciones de isotopía definidas en la fase de diseño de la Red Nacional de Isotopía 81

Figura 13. Entidades que Participan en la REDCAM. Fuente. INVEMAR. 2017...	83
Figura 14. Ubicaciones de las estaciones de muestreo de la REDCAM en las zonas costeras del Caribe y Pacífico Colombianos, Fuente. INVEMAR, 2017.	84
Figura 15. Flujograma que describe el procedimiento para el monitoreo del agua.	89
Figura 16. Aspectos a tener en cuenta para la planificación de una adecuada recolección de datos en la etapa de campo.	92
Figura 17. Ubicación del pluviómetro. Tomado de (OMM, 2008).....	100
Figura 18. Pluviómetros de plástico. Fuente: (Raig Instrumentos Metereología-Optica-Precisión, 2017).....	104
Figura 19. Elementos de un pluviómetro: A y B: Embudo colector, B: Cilindro interior o deposito receptor, D: Cilindro exterior.	104
Figura 20. Pluviómetro Estación Edificio IDEAM- Bogotá.....	105
Figura 21. Pluviómetro de balancín. Fuente: (López-Rey, 2017).....	106
Figura 22. Pluviómetro de balancín utilizado en algunas estaciones del IDEAM. Fuente: Área Operativa 11-IDEAM 2017.....	107
Figura 23. Pluviómetro de peso ubicado en la Sierra Nevada del Cocuy. Fuente: Fotos de campañas de monitoreo de glaciares colombianos, 2006. Archivo Grupo de Suelos y Tierras- Subdirección de Ecosistemas e Información Ambiental- IDEAM.	107
Figura 24. Pluviómetro totalizador de nieve del IDEAM ubicado en el Nevado del Cocuy- Ritacuba Blanco. Fuente: Fotos de campañas de monitoreo de glaciares colombianos, 2015. Archivo Grupo de Suelos y Tierras- Subdirección de Ecosistemas e Información Ambiental- IDEAM.	108
Figura 25. Procedimiento de vertimiento de la solución anticongelante dentro del pluviómetro totalizador de nieve del IDEAM ubicado en el Nevado del Cocuy. Fuente: Fotos de campañas de monitoreo de glaciares colombianos, 2012. Archivo	

Grupo de Suelos y Tierras- Subdirección de Ecosistemas e Información Ambiental- IDEAM.	108
Figura 26. Detalle de un pluviómetro digital. Fuente: (Direct Industry, 2017).....	109
Figura 27. Pluviómetros digitales instalados en algunas estaciones meteorológicas del IDEAM. Izquierda: Pluviómetro Marca McVan Instrument- Derecha: Pluviómetro Marca MPS Systems. Fuente: Grupo de Automatización, 2017.	110
Figura 28. Pluviómetro EMMA instalado en el Parque Nacional Natural Los Nevados. Fuente: Fotos de campañas de monitoreo de glaciares colombianos, 2015. Archivo Grupo de Suelos y Tierras- Subdirección de Ecosistemas e Información Ambiental- IDEAM.	110
Figura 29. Pluviómetro convencional y pluviómetro digital ubicado en la Estación Meteorológica del Bata. Fuente: Campañas de mantenimiento estaciones Área Operativa 11. IDEAM 2017.	111
Figura 30. Pluviógrafo Estacion CO Granja San Jorge (21205720. Fuente: Campañas de mantenimiento estaciones Área Operativa 11. IDEAM 2016.	112
Figura 31. Izquierda: Tambor donde se inscribe la altura de la lámina del agua. Derecha: Grafico de registro continuo de las precipitaciones caídas. Fuente: Campañas de mantenimiento estaciones Área Operativa 11. IDEAM 2017.	112
Figura 32. Lectura del pluviómetro con la probeta. Tomado de (IDEAM, 2001) .	114
Figura 33. Lectura de pluviómetro con reglilla. Tomado de (IDEAM, 2001)	114
Figura 34. Medición con flexómetro de precipitación en un pluviómetro totalizador ubicado en el Cocuy. Fuente: Fotos de campañas de monitoreo de glaciares colombianos, 2005. Archivo Grupo de Suelos y Tierras- Subdirección de Ecosistemas e Información Ambiental- IDEAM.	116
Figura 35. Tanque Evaporimetro clase "A" con Gancho graduado y tanque tranquilizador. Fuente: (Agromatic S.A., 2016).....	123

Figura 36. Detalles del tanque de evaporación. Se observa un termómetro flotante y un anemómetro situado cerca al tanque. Fuente: (Hong Kong Observatory, 2003) 124

Figura 37. Izquierda: Tanque de evaporación automático y gabinete donde se ubica el datalogger utilizado por el IDEAM en sus estaciones meteorológicas. Fuente: Área Operativa 11-IDEAM. Fuente: Grupo de Automatización, 2017. 125

Figura 38. Tanque de evaporación automático. Fuente: (Agromatic S.A., 2016). 126

Figura 39. Izquierda: Detalle del evaporímetro Piché. Fuente: (Ruiz Romera & Martínez Santos, 2015). Derecha: Evaporímetro tipo Piche, donde se observa el disco poroso de papel sujeto al evaporímetro mediante una arandela metálica. Fuente: (Pelayo Arce, 2011) 127

Figura 40. Izquierda: Esquema de evaporímetro tipo Wild. Tomado de (Ruiz Romera & Martínez Santos, 2015). Derecha: Evaporímetro tipo Wild. Tomado de: (Martínez, 2012)..... 127

Figura 41. Evaporímetro de esfera porosa tipo Livingstone (Ruiz Romera & Martínez Santos, 2015)..... 128

Figura 42. Tanque de evaporación utilizado en las estaciones meteorológicas del IDEAM, dotado de un tornillo micrométrico o gancho graduado, y un cilindro de reposo. Fuente: Campañas de mantenimiento estaciones Área Operativa 11. IDEAM 2017..... 132

Figura 43. Ubicación del colector minimizando la influencia de estructuras cercanas. Fuente: (OIEA/GNIP, 2014). 136

Figura 44. Pluviómetro convencional utilizado para muestreo a base de eventos o con transferencia diaria). A la izquierda esquema del pluviómetro (OIEA/GNIP, 2014), a la derecha ejemplo de un pluviómetro utilizado en la Estación Isotópica de Ibagué- Tolima, que hace parte de la Red Nacional de Isotopía del IDEAM. 138

Figura 45. Totalizador simple. A la izquierda, pelota de tenis de mesa dentro del embudo, a la derecha, malla de acero inoxidable dentro del embudo. Tomado de (OIEA/GNIP, 2014).	139
Figura 46. Totalizador con tubo sumergido con uso de una capa delgada de aceite de parafina para evitar la evaporación del agua lluvia. Fuente: (OIEA/GNIP, 2014).	140
Figura 47. Totalizador con tubo sumergido y equilibrio de presión. Tomado de (OIEA/GNIP, 2014).	141
Figura 48. Totalizador simple con tubo sumergido. Tomado de (Gröning, y otros, 2012).	142
Figura 49. Totalizador comercial con tubo sumergido. Izquierda Rain Sampler RS1, derecha: Fuente Rain Sampler RS1. Fuente: Información enviada en el 2017 por Palmex d.o.o, para los dos totalizadores que producen.	143
Figura 50. Totalizador enterrado. Tomado de (OIEA/GNIP, 2014)	144
Figura 51. Frascos de muestreo isotópico de ^2H , ^{18}O y ^3H : frascos de 500 mL de polietileno de alta densidad y frascos de vidrio color ámbar de 30 mL, suministrados por la OIEA.	148
Figura 52. Escala Limnimétrica. Fuente. (OMM, 2011)	158
Figura 53. Tipos de miras hidrométricas. Tomado de (Pérez, 2005)	159
Figura 54. Mira de lignímetro Estación La Laja.	159
Figura 55. Fijación de las miras. Derecha: Estación Puente reyes, río Guavio, Fuente: Área Operativa 11- IDEAM 2017.	161
Figura 56. Máxímetro. Estación Puente Venado, río Venado. Fuente. Área Operativa 7- IDEAM 2017.	162
Figura 57. Izquierda: Sonda luminosa cuya operación es de manivela. Derecha: Sonda con sensor de presión. (OTT Hydromet, 2017)	164

Figura 58. Montaje de un punto de medición de nivel de agua provista de una sonda manométrica (OTT Hydromet, 2017).....	165
Figura 59. Limnógrafo (Ochoa, 2013)	166
Figura 60. Limnógrafo Izquierda. Estación Agroyaco, área operativa 7, Derecha. Estación las animas, río Chochal área operativa 11. Fuente. IDEAM 2017.....	167
Figura 61. Izquierda. Estación satelital Pilispi, Derecha. Estación Automática San Juan. Área Operativa 7 IDEAM. Fuente IDEAM 2017.	171
Figura 62. Vista de una sección transversal de una corriente, en la que figura la posición de los puntos de observación. (OMM, 2011)	180
Figura 63. Aforo con Flotadores. Fuente. (IDEAM, 2006).....	182
Figura 64. Medición de caudal en el equipo ADCP. A. río Amazonas, B. río San Juan, C. Transmisión del ADCP al computador, con información de: perfil transversal, caudal parcial, profundidad, distancia, velocidad del agua, velocidad de la barca. Estación Rumichaca, río Guáitara. Fuente. Áreas operativas 11 y 7 IDEAM, 2017.....	183
Figura 65. Configuración típica de una medición con un instrumento de efecto Doppler. Fuente. (OMM, 2011).	183
Figura 66. Aforo Volumétrico. Fuente (IDEAM, 2006)	184
Figura 67. Ensayo con trazadores en el río Cravo Sur en el sector de La Cabaña, Yopal, Casanare. Fuente: Archivo Empresa Fluvia, 2014	185
Figura 68. Canaleta Parshall, Parque Natural Nacional los Nevados. Fuente. Subdirección de Ecosistemas. IDEAM 2017.	190
Figura 69. Tarabita, Estación Carlosama. Río Blanco, Área Operativa 7. Fuente. IDEAM. 2017.....	197
Figura 70. Relación entre la profundidad correcta d y la profundidad observada, dob. Fuente (OMM, 2011).....	199
Figura 71. Método de un punto (60%). Fuente. (IDEAM, 2006).....	201

Figura 72. Método de dos puntos (20% - 80%). Fuente. (IDEAM, 2006).....	202
Figura 73. Método de tres puntos (20% - 60% - 80%). Fuente. (IDEAM, 2006)..	203
Figura 74. Método de cinco puntos (superficie - 20% - 60% - 80% - fondo). Fuente. (IDEAM, 2006)	204
Figura 75. Método puntual. Fuente. (IDEAM, 2006).	205
Figura 76. Aforo con lancha en movimiento. Fuente: (IDEAM, 2006)	207
Figura 77. Variación de la curva de respuesta a lo largo del canal. Fuente. (Galecio Valdes, 2007).....	216
Figura 78. Conductividad según inyección constante. Fuente (IDEAM, 2006). ..	216
Figura 79. Conductividad según inyección constante. Fuente (IDEAM, 2006). ...	217
Figura 80. Trazadores Automatizados. Fuente. (IDEAM, 2006).	223
Figura 81. Vertedero con dos contracciones laterales. Fuente. (IDEAM, 2006) .	225
Figura 82. Vertedero trapecial. (IDEAM, 2006).....	226
Figura 83. Vertedero Triangular. (IDEAM, 2006)	227
Figura 84. Canaleta Tipo Balloffet. (IDEAM, 2006).....	229
Figura 85. Medidor sin cuello (cutthroat). Fuente. (IDEAM, 2006)	233
Figura 86. Aforador Parshall (IDEAM, 2006)	237
Figura 87. Esquema de medición de retroceso. Fuente: (IDEAM, 2012)	244
Figura 88. Ubicación de un punto fijo, utilizando un talud de roca para mediciones de retroceso. Fuente: Fotos de campañas de monitoreo de glaciares colombianos, IDEAM, 2004.....	245
Figura 89. Evolución glaciar de la sierra nevada de El Cocuy 2003 - 2009. Sector “Pasó de Bellavista”. Izquierda. Imagen satelital Landsat 2003. Derecha. Imagen satelital ALOS 2009. Fuente: (Ceballos Liévano, 2015).	245
Figura 90. Izquierda: Baliza dispuesta sobre la superficie del glaciar y su medida entre dos periodos de tiempo. Fuente: IDEAM. Derecha: Baliza Ritacuba Blanco 3,	

Sierra nevada El Cocuy ó Güicán. Fuente: Fotos de campañas de monitoreo de glaciares colombianos, IDEAM, 2008..... 248

Figura 91. Distribución de la red de balizas. Fuente: (IDEAM, Glaciares de Colombia, más que montañas con hielo, 2012). 249

Figura 92. Captura de valores de espesor de nieve con el uso de una sonda para nieve. Fuente: Fotos de campañas de monitoreo de glaciares colombianos, IDEAM, 2012..... 249

Figura 93. Esquema ilustrativo del sistema de radar de impulso upara determinar espesores de hielo. Tomado de (Ceballos Liévano, 2015)..... 250

Figura 94. Transmisor utilizado para determinar el espesor del hielo, este envía una señal la cual será reciba por un receptor. Fotos de campañas de monitoreo de glaciares colombianos, IDEAM, 2014..... 251

Figura 95. Izquierda: Detalle de perforadora Heucke. Derecha: Perforación de hielo empleando la perforadora Heucke. Fotos de campañas de monitoreo de glaciares colombianos, Sierra Nevada El Cocuy. IDEAM, 2008 y 2016..... 252

Figura 96. Levantamiento topográfico utilizando un equipo GNSS diferencial. Fotos de campañas de monitoreo de glaciares colombianos, IDEAM, 2017. 252

Figura 97. Puntos de retroceso longitudinal monitoreados a 2015 en el volcán nevado Santa Isabel por el IDEAM. (Imagen Spot 2006.). Fuente: Izquierda (Ceballos Liévano, 2015); Derecha: Fotos de campañas de monitoreo de glaciares colombianos, IDEAM, 2005..... 254

Figura 98. Medición de balizas. Fotos de campañas de monitoreo de glaciares colombianos, Parque Nacional Natural Los Nevados, IDEAM, 2006..... 255

Figura 99. Captura de medición del espesor de la capa de nieve con el uso de una sonda. Fotos de campañas de monitoreo de glaciares colombianos, Sierra Nevada El Cocuy. IDEAM, 2012. 256

Figura 100. Consideraciones generales para las mediciones en pozos de acumulación. Fotos de campañas de monitoreo de glaciares colombianos, Sierra Nevada del Cocuy. IDEAM, 2011 y 2012.	257
Figura 101. Medición directa del arrastre de fondo. Fuente. FAO.1997	267
Figura 102. Muestreador tipo U.S.P. – 61. Fuente. Wilches H, IDEAM. 2009	281
Figura 103. Integrador en Profundidad de Sedimento en Suspensión USD – 49. Izquierda. muestreador se sumerge en la corriente. Derecha. Muestreador es retirado para extraer la muestra. Fuente. Subdirección de hidrología. IDEAM.2017.	282
Figura 104. Muestreador para Sedimento en Suspensión USDH – 59. Fuente. Subdirección de Hidrología. IDEAM	283
Figura 105. Muestreador para sedimentos en suspensión tipo USDH-48. Izquierda. Toma de muestra, estación Palo Gordo, corriente, río de Oro. Fuente. Subdirección de Hidrología. IDEAM. 2015.....	283
Figura 106. Uso del muestreador en aforo de bolsa plegable. Fuente: Contreras. C. (IDEAM, 2016).	284
Figura 107. Muestreador de material de fondo usado en IDEAM. Fuente: Wilches H. IDEAM 2009.....	287
Figura 108. Muestreador Helley-Smith. Fuente. (IMTA, 2015)	287
Figura 109. Material para toma de muestras diarias de sedimentos en suspensión. Izquierda. Canastillas de hierro soldado. Derecha. botella ½ L. Fuente: Wilches. IDEAM.2007.....	289
Figura 110. Procedimiento para realizar el aforo sólido puntual. Fuente. (EPAM, 2011).....	290
Figura 111. Procedimiento para realizar el aforo sólido integrado Fuente: Wilches, 2009 IDEAM.....	291

Figura 112. Procedimiento para realizar el aforo sólido integrado con bolsa plegable. Fuente, (EPAM S.A ESP, 2011).....	292
Figura 113. Procedimiento para procesamiento de muestra de bolsa plegable en el sitio	293
Figura 114. Cálculo del transporte de fondo en la sección vertical.	294
Figura 115.Colocación de Muestreador. Fuente. (IDEAM, 2006)	296
Figura 116. Posibles sitios de monitoreo. Modificado "Guía para el monitoreo de vertimientos, aguas superficiales y subterráneas. Fuente. (IDEAM, 2002)	303
Figura 117. Equipo multiparámetro, utilizado campaña binacional 2017, Estación Carlosama. Fuente, IDEAM 2017.....	308
Figura 118. Equipos de monitoreo calidad de agua. Fuente (OMM, 2011).....	309
Figura 119. Verificación de equipos, toma de muestra y registro del parámetro in-situ, estación hidrológica San Juan. Fuente IDEAM 2017	314
Figura 120. Preservación de muestras con Ácido en Estación Pipiguay. Fuente. IDEAM 2017.....	319
Figura 121. Recomendaciones para el filtrado y conservación de las muestras. Fuente, modificado (OMM, 2011).....	319
Figura 122. Mantenimiento de la refrigeración de las muestras con hielo en Estación Hidrológica San Juan	323
Figura 123. Botella muestreadora tipo Van Dorn horizontal para toma de muestras en profundidad. Fuente: Ángela Zapata (2017)	329
Figura 124. Pértiga telescópica modificada para toma de muestras sin disturbar los sedimentos en la zona litoral. Fuente: Angela Zapata (2017).....	330
Figura 125. Cámaras de sedimentación Utermöhl. Fuente: Angela Zapata (2017)	332
Figura 126 . Esquema del fondo de la cámara de sedimentación y las posibilidades de conteo de células. A. Campos al azar, cada punto representa un campo óptico.	

B. Transectos, también pueden ser horizontales. C. Dirección del conteo de todo el fondo de la cámara. Fuente: Angela Zapata (2017)	337
Figura 127. Concentración de muestra con botella Van Dorn y red de plancton. Fuente: Ángela.....	342
Figura 128. Elementos para la construcción de un perifitómetro. Fuente: Angela Zapata (2017)	350
Figura 129. Celda de conteo Sedgewick – Rafter.Fuente: Ángela Zapata (2017)	352
Figura 130. Celda de conteo Palmer Maloney. Fuente: Yasmin Plata (2017).....	353
Figura 131. Elementos utilizados para el muestreo de algas perifíticas sobre sustratos duros. Fuente: Ángela Zapata (2017)	355
Figura 132 Elemento para muestrear las algas perifíticas de sustratos blandos. Fuente: Ángela Zapata (2017)	355
Figura 133. Estrujamiento o Squeezing de plantas acuáticas para el muestreo de algas perifíticas. Fuente: Ángela Zapata (2017)	357
Figura 134. Quebrada Calostros. Se observan las características que se buscan para el muestreo de diatomeas en una corriente vadeable: buena iluminación, zona corriente del río, sustratos abundantes. Fotos por: Luisa Lagos, 2015.....	364
Figura 135. Cepillado de la superficie superior del sustrato. El volumen resultante es de color pardo, se recoge en una vasija y se le adiciona la solución fijadora Fotos por: Luisa Lagos, 2015.....	366
Figura 136. Sustratos muestreados y estimación del área total muestreada. Fotos por: Luisa Lagos, 2015.....	367
Figura 137. Muestra antes y después de digestión de materia orgánica. En A se observa una muestra antes de realizar la digestión de materia orgánica. En B se observa una muestra luego de la digestión de materia orgánica, con lo que se logra observar en los frústulos el detalle necesario para la determinación taxonómica. Fotos por: Luisa Lagos, 2015.....	370

Figura 138. Sobre una lámina cubreobjetos se dispensa una gota de muestra (A). Sobre una placa de calefacción se coloca la lámina portaobjetos con una gota del medio de montaje. Cuando se observa la formación de burbujas en el medio de montaje (B), se coloca la (A). 371

Figura 139. Red tipo Surber. Foto. Laboratorio de Calidad Ambiental IDEAM, 2017. 378

Figura 140. Draga Peterson. Foto. Laboratorio de Calidad Ambiental IDEAM, 2017. 379

Figura 141. Acorazonador. Foto. Laboratorio de Calidad Ambiental IDEAM, 2017. 379

Figura 142. Red Rectangular. Foto. J. Alba-Tercedor. Tomada de Metodología para el establecimiento del Estado Ecológico según la Directiva Marco del Agua. Protocolos de muestreo y análisis para Invertebrados Bentónicos. 2005 380

Figura 143. Toma de muestra de macroinvertebrados acuáticos con Red Surber – río Bogotá, antes de Villapinzón. Foto: Laboratorio Ambiental CAR 2017 393

Figura 144. Toma de muestra de macroinvertebrados acuáticos con Red Rectangular. Foto: J. Alba Tercedor. Tomada de Metodología para el establecimiento del Estado Ecológico según la Directiva Marco del Agua. Protocolos de muestreo y análisis para Invertebrados Bentónicos. 2005..... 393

Figura 145. Cuadrante para cobertura de macrófitas. Foto: C. Moreno. 2013... 401

Figura 146. Guía de Macrófitas Acuáticas y Palustres de Colombia. Fuente: Mora-Goyes, Mario Fernando. 2013. Inédito. 402

Figura 147. Toma de muestra de macrófitas con cuadrante para cobertura. Foto: C. Moreno. 2013..... 405

Figura 148. Esquema que describe los componentes del balance hidrológico e isotópico de un sistema lacustre. Los flujos de agua están representados con letras mayúsculas, mientras que su composición isotópica se describe mediante los valores δ correspondientes. Fuente. (Rozanski, Froehlich, & Mook, 2014) 416

Figura 149. Izquierda: Muestreo de agua en drenaje de páramo Derecha: Muestreo de agua en drenaje de superpáramo	419
Figura 150. Componentes de un modelo hidrogeológico conceptual. Fuente: (IDEAM, 2002)	428
Figura 151. Toma de niveles en pozos profundos. Fuente: Izquierda: Coralina; derecha: Corpocesar.....	430
Figura 152. Determinaciones de parámetros in situ. Izquierda: muestreo de manantiales. Fuente: s.f. Derecha: Muestreo de aljibes. Fuente: Coralina	430
Figura 153. Consideraciones técnicas para la construcción de piezómetros Norma ICONTEC NTC-3948. Fuente: (ICONTEC, 1996a).	431
Figura 154. Pozo de monitoreo convencional. Fuente: CVC, 2004, en (EPAM S.A ESP, MAVDT, IDEAM, 2011b).	432
Figura 155. Factores para determinar la frecuencia de monitoreo de niveles de agua subterránea (Taylor y Alley, 2001). Tomado y modificado de (ACWI, 2009).....	438
Figura 156. Tipos de pruebas de bombeo.....	444
Figura 157. Diagrama esquemático de un ensayo de bombeo típico en el que aparecen indicadas las diversas mediciones. (Tomado de Heath, 1983 en (OMM, Guía de prácticas hidrológicas, 2011).	445
Figura 158. Izquierda: sonda eléctrica con señal acústica y luminosa ara medición de profundidad del agua. Derecha: Sonda multiparamétrica que mide niveles y parámetros como pH, redox, conductividad, temperatura, entre otros. Fuente: (Maser, Productos de agua subterránea, 2015)	448
Figura 159. Tipo de sondas con sensor de fondo. Fuente: (HYDROTECHNIK, s.f)	449
Figura 160. Izquierda: Limnógrafo vertical Fuente: (Ramas Ayala, 2003). Derecha: Mecanismo de funcionamiento para un limnografo. Fuente: (OMM, Guía de prácticas hidrológicas, 2011).....	450

Figura 161. Dataloggers para medición de niveles de agua subterránea. Fuente: (Solinst, 2017b) 452

Figura 162. Sensores automáticos para medición de niveles- Diver. Fuente: (Maser, Productos de agua subterránea, 2015); (Schlumberger Water Services, 2014). 453

Figura 163. Bomba sumergible utilizada en pruebas de bombeo. Fuente: (Valencia Cuesta, s.f) 454

Figura 164. Izquierda: medición de niveles en prueba de prueba de bombeo. Fuente: (Valencia Cuesta, s.f). Derecha: formato para la recolección de información en prueba de bombeo. (CARDIQUE, 2012). 455

Figura 165. Izquierda: medición de caudales por métodos volumétricos de afloro y medidor de corriente Fuente: (Valencia Cuesta, s.f). Derecha: aforo de caudales pequeños. Fuente: <https://www.youtube.com/watch?v=KqMdrmMu6Yo> 457

Figura 166. Izquierda: Monitoreo de niveles realizado en el Municipio de Puerto Gaitán. Fuente: (Cormacarena; SIAM S.A, 2016). Derecha: Esquema que ilustra la medición de niveles con el uso de una sonda manual (HYDROTECHNIK, s.f). . 458

Figura 167. Medición de nivel piezométrico. Izquierda: Tolú, sucre. (Fotografía cedida por Carsucre, 2012); Derecha: Finca Las Delicias, Riohacha (Fotografía cedida por Corpoguajira, de campañas de monitoreo de enero de 2017) 458

Figura 168. Medición de los niveles de agua subterránea utilizando un Diver. Izquierda, Fuente: (Schlumberger Water Services, 2014) ; Derecha, Fuente: (IDEAM, 2015). 460

Figura 169. Prueba de Bombeo a Caudal Constante Pozo SGC Riohacha 2 (N: 1 765 265,..... 461

Figura 170. Arriba: Interpretación método Cooper-Jacob fase de bombeo pozo SGC Carraipía. Abajo: Interpretación método Theis fase de recuperación pozo SGC Carraipía. Fuente: (SGC, 2016). 462

Figura 171. Ubicación de pozos de monitoreo para fuentes de abastecimiento de agua subterránea. Fuente: (Foster S. , Hirata, Gomes, D’Elia, & Paris, 2002). .. 465

Figura 172. Ubicación de pozos de monitoreo para fuentes de contaminación puntuales. Fuente: (Foster S. , Hirata, Gomes, D’Elia, & Paris, 2002)..... 466

Figura 173. Ubicación de pozos de monitoreo para fuentes de contaminación puntuales. Fuente: (Foster S. , Hirata, Gomes, D’Elia, & Paris, 2002)..... 467

Figura 174. Izquierda: Medidor multiparámetros de bolsillo de pH, conductividad, TDS, salinidad y temperatura. Fuente: (Maser, Productos de agua subterránea, 2015). Derecha: Medidor multiparamétrico de pH, conductividad, oxígeno disuelto y temperatura. (Hanna Instruments, 2017)..... 474

Figura 175. Bomba peristáltica Fuente: (Instrumentosdelsur S.A, 2017), (Solinst, 2017c)..... 475

Figura 176. Ejemplo de uso de una bomba peristáltica Fuente: (Solinst, 2017c) 476

Figura 177. Bomba eléctrica sumergible. Fuente: (Geotech, 2015)..... 477

Figura 178. Bomba eléctrica sumergible de plástico. Fuente: (Envirotecnics Global Service, 2012b)..... 477

Figura 179. Bomba de muestreo de vejiga-baldder. Fuente: (Envirotecnics Global Service, 2012a)..... 478

Figura 180. Funcionamiento de la bomba vejiga Fuente: (Solinst, 2017b) 478

Figura 181. Izquierda: Bomba inercial, Derecha: Mecanismo de operación de la bomba inercial..... 479

Figura 182. Tipos de bailes para muestreo de agua subterránea. Izquierda: Bailers en acero inoxidable. Fuente: (Solinst, 2017d). Derecha: Bailers en plástico. Fuente: (Yacutec, 2017)..... 480

Figura 183. Muestreo en pozos profundos utilizando un baiiler. Información cedida por Corpoguajira de muestreo del pozo profundo Internado Aremasain- Riohacha, en campañas de muestreo de enero de 2017. 481

Figura 184. Tipos de muestreadores discretos de agua subterránea. (Solinst, 2017e) 481

Figura 185. Copas de Succión para Muestreo de Agua del Suelo – Lisímetros. Izquierda: Copas de Succión (lisímetros) para el muestreo de agua del suelo para análisis químicos. Derecha: Muestreador de agua del suelo con almacenamiento del agua en el vástago. Fuente: (Instrumentosdelsur S.A, 2017)..... 482

Figura 186. Sistemas de Vacío para Muestreo de Agua del Suelo – Lisímetros. Fuente: (Instrumentosdelsur S.A, 2017)..... 483

Figura 187. Muestreadores multinivel que permite el monitoreo de varias zonas en un sistema. Fuente: (Solinst, 2017b)..... 483

Figura 188. Tipos de piezómetros para hincar. Procedimiento de hincado de los piezómetros y toma de muestras. Fuente: (Solinst, 2017b)..... 484

Figura 189. Medición in situ con un medidor multiparámetro en un pozo profundo de extracción. Fuente: (CORMACARENA & A, 2016). 490

Figura 190. Ejemplo de un muestreo portable. Fuente: (Geotech Environmental Equipment, 2015)..... 491

Figura 191. Muestreo en pozos profundos utilizando un baiiler. Información cedida por Coralina de campañas de muestreo realizadas en el 2016. 492

Figura 192. Muestreo de calidad para control de acuífero, Proyecto CVC en áreas de aplicación de vinazas- Valle del Cauca. Fuente: (IDEAM, 2015). 500

Figura 193. Funcionamiento de bomba eléctrica sumergible. Fuente: (Waterra Pumps Limited, 2016) 506

Figura 194. Muestreo de aguas subterráneas. Tomado de (CVC, 2009)..... 507

Figura 195. Colección de agua subterránea para análisis de carbono -14. 509

Figura 196. Botellas oceanográficas, Niskin (a) y Nansen (b) Kemmerer (c) usadas para la extracción de muestras de agua, operadas desde una embarcación menor. 517

Figura 197. Dispositivo para muestreo de compuestos orgánicos (hidrocarburos y plaguicidas) (A) y botella Ruttner (B).....	517
Figura 198. Alistamiento de recipientes para el muestreo. Fotos: Archivo INVEMAR	518
Figura 199. Toma de datos in situ en el departamento de Córdoba. Fotos: Archivo INVEMAR.	519
Figura 200. Verificación de equipos en campo. Foto: Archivo INVEMAR.	520
Figura 201. Toma de muestra superficial en el departamento de Nariño. Foto Archivo INVEMAR.	521
Figura 202. Preservación de muestras de agua en campo. Foto. Archivo INVEMAR.	523
Figura 203. Tipo de palas. a) Pala manual b): Pala tipo draga Ekman y c)Van Veen..	527
Figura 204. Box Corer. Fotos: Archivo INVEMAR	528
Figura 205. Multimuestreador de gravedad (Multicore Imagen tomada de UWITEC, 2017).....	529
Figura 206. Gestión de Datos en Información. fuente IDEAM, 2017	535
Figura 207. Pasos para mejorar la calidad de los datos. Fuente. (IDEAM, 2014)	538
Figura 208. Errores identificados mediante comparación por grupos de balances. Fuente, IDEAM 2017.....	539
Figura 209. Requerimientos información geográfica ERAs. Fuente. (IDEAM, 2013)	542
Figura 210. Flujo de datos dentro de un sistema de información del recurso hídrico. Fuente. (IDEAM, 2014)	544
Figura 211. Información asociada al inventario de puntos de agua Subterránea. Fuente. (IDEAM, Implementación del Sistema de Información del Recurso Hídrico SIRH en Colombia, 2014; IDEAM, 2014).	547

Figura 212. Sistema de Indicadores Hídricos. Modificado de las Evaluaciones Regionales del Agua. Fuente. (IDEAM, 2013)..... 550

Figura 213. Sistema de Información Ambiental de Colombia, Fuente IDEAM 2015. 552

Figura 214. Posibles salidas de información geográficas para el agua. Fuente, <http://visor.ideam.gov.co:8530/geovisor/#!/profiles/3>. IDEAM 2017 557

Figura 215. Índice de Uso del Agua por Subzona Hidrográfica. Fuente <http://visor.ideam.gov.co:8530/geovisor/#!/profiles/3>. IDEAM..... 558

Figura 216. Calidad de las Fuentes Hídricas. Fuente. <http://visor.ideam.gov.co:8530/geovisor/#!/profiles/4>. IDEAM 2017..... 558

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Volúmenes de agua recogidas (mL) en función del diámetro del embudo y de la cantidad de precipitación (dando ejemplos de pluviómetros bien establecidos: A – pluviómetros de 5”, p.ej. UK Mk2/Mk3 o Nipher; B – Diseño estandarizado OMM, p.ej. Hellmann o Tretyakov; C – NOAA 8”; D – NOAA 12”).	145
Tabla 2. Condiciones de uso de los métodos de aforo.	190
Tabla 3. Equipos en general para medición de caudal a partir de aforos.	191
Tabla 4. Equipos para los tipos de aforo por Molinete hidrométrico	192
Tabla 5. Equipos para los tipos de aforo por Flotadores	194
Tabla 6. Equipos para los tipos de aforo ADCP	194
Tabla 7. Equipos para los tipos de aforo por volumétrico	194
Tabla 8. Equipos necesarios para aforo por dilución con trazadores.	195
Tabla 9. Factor de corrección k para valores ϕ dados.	199
Tabla 10. Factor de ajuste F de la velocidad de un flotador en función del coeficiente R entre la profundidad del flotador sumergido y la profundidad del agua	209
Tabla 11. Aforo Inyección Constante	219
Tabla 12. Aforo Inyección Instantánea.	220
Tabla 13. Clasificación de las Aguas Según Salinidad	221
Tabla 14. valores de k_s y n_s .	235
Tabla 15. Valores para diferentes tamaños del aforador.	238
Tabla 16. Valores de m y n para el Cálculo de la Descarga Aforador Parshall.	239
Tabla 17. Características de las tecnologías seleccionadas para el monitoreo de carga de fondo. Fuente. (Gray, Laronne, & Marr, 2010)	270
Tabla 18. Tipos de muestras de sedimentos de acuerdo a los objetivos.	277
Tabla 19. Equipos y métodos para medición de sedimentos en suspensión.	279

Tabla 20. Descripción de los sitios de Monitoreo	303
Tabla 21. Parámetros básicos recomendados para el monitoreo de calidad del agua.	306
Tabla 22. Materiales y equipos monitoreo calidad del agua	307
Tabla 23. Recomendaciones para el almacenamiento y preservación manejo de muestras.	310
Tabla 24. Tipos de comunidades a estudiar en los dos principales tipos de ecosistemas acuáticos.	325
Tabla 25. Evaluación visual y por medio de una escala de cinco niveles	405
Tabla 26. Abundancia natural de los isótopos estables que se usan en los estudios de los ríos.	413
Tabla 27. Abundancia natural de los isótopos estables que se usan en los estudios de los ríos.	414
Tabla 28. Trazadores isotópicos y químicos que se utilizan en el estudio de la dinámica de los lagos.....	417
Tabla 29. Ejemplo de frecuencia de monitoreo de niveles de agua subterránea teniendo en cuenta factores ambientales.	439
Tabla 30. Longitud típica de recolección de datos de nivel de agua en función del uso previsto.....	440
Tabla 31. Frecuencias para el monitoreo de calidad del agua subterránea cuando se esté desarrollando monitoreo primario o de vigilancia. Fuente: (ACWI, 2009)	468
Tabla 32. Lista de parámetros sugeridos requerido para una red de monitoreo de calidad del agua subterránea. Fuente: (Uil, Geer, Gehrels, & Kloosterman, 1999).	472
Tabla 33. Condiciones de calibración y uso de equipos portátiles. Fuente: (DINAMA, 2004).....	485

Tabla 34. Criterios usuales para definir el final de la purga por el método de estabilización de parámetros. Fuente: Karklins, 1996, tomado de (DINAMA, 2004).
..... 488

Tabla 35. Procedimientos de muestreo para muestreo de parámetros de calidad del agua subterránea. Tomado de Tomado de (Tuinhof, Foster, & Kemper, 2006). 493

Tabla 36. Volumen requerido, recipientes, técnicas de conservación recomendadas y tiempo máximo hasta el análisis para muestras de agua subterránea colectada. Tomada y adaptada de (Vargas & Bobadilla, s.f). 498

Tabla 37. Equipos utilizados para el muestreo de aguas 516

SIGLAS

ANLA	Agencia Nacional de Licencias Ambientales
CAM	Corporación Autónoma Regional del Alto Magdalena
CAR	Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca
CARDER	Corporación Autónoma Regional de Risaralda
CARDIQUE	Corporación Autónoma Regional del Canal del Dique
CARSUCRE	Corporación Autónoma Regional de Sucre
CDA	Corporación para el Desarrollo Sostenible del Norte y el Oriente Amazónico
CIEM	Centro de Incubación y Especies Menores
C I O H	Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas
CIRMAG	Centro de Investigación del Río Magdalena Alfonso Palacio
CODECHOCÓ	Corporación Autónoma Regional para el Desarrollo Sostenible del Chocó.
CORALINA	Corporación para el Desarrollo Sostenible del Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina
CORMACARENA	Corporación para el Desarrollo Sostenible del Área de Manejo Especial de la Macarena
CORMAGDALENA	Corporación Autónoma Regional del Río Grande de la Magdalena
CORNARE	Corporación Autónoma Regional de las cuencas de los ríos Negro y Nare

CORPAMAG	Corporación Autónoma Regional del Magdalena
CORPOAMAZONIA	Corporación para el Desarrollo Sostenible del Sur de la Amazonia
CORPOBOYACÁ	Corporación Autónoma Regional de Boyacá
CORPOCALDAS	Corporación Autónoma Regional de Caldas
CORPOCESAR	Corporación Autónoma Regional del César
CORPOGUAJIRA	Corporación Autónoma Regional de La Guajira
CORPOGUAVIO	Corporación Autónoma Regional del Guavio
CORPOMOJANA	Corporación para el Desarrollo Sostenible de La Mojana y el San Jorge
CORPONARIÑO	Corporación Autónoma Regional de Nariño
CORPONOR	Corporación Autónoma Regional de la Frontera Nororiental
CORPORINOQUIA	Corporación Autónoma Regional de la Orinoquia
CORPOURABÁ	Corporación para el Desarrollo Sostenible del Urabá
CORTOLIMA	Corporación Autónoma Regional del Tolima
CRA	Corporación Autónoma Regional del Atlántico
CRQ	Corporación Autónoma Regional del Quindío
CSB	Corporación Autónoma Regional del Sur de Bolívar
CVC	Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca
CVS	Corporación Autónoma Regional de los Valles del Sinú y del San Jorge

DAGMA	Departamento Administrativo de Gestión del Medio Ambiente (Cali)
DAMAB	Departamento Técnico Administrativo del Medio Ambiente Barranquilla
DANE	Departamento Administrativo Nacional de Estadística
DDS	Departamento de Desarrollo Sostenible de la UNESCO
DIMAR	Dirección General Marítima Institutos de investigación
DNP	Departamento Nacional de Planeación
ECOPETROL S. A.	Empresa Colombiana de Petróleos S. A.
ENA	Estudio Nacional del Agua
EPA	Environmental Protection Agency (EE. UU.)
EPA CARTAGENA	Establecimiento Público Ambiental de Cartagena
IIAP	Instituto de Investigaciones Ambientales del Pacífico “John Von Neumann” -
IAVH	Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt
ICA	Instituto Colombiano Agropecuario
ICP	Instituto Colombiana del Petróleo
IDEAM	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales
IGAC	Instituto Geográfico Agustín Codazzi
INGEOMINAS	Instituto Colombiano de Geología y Minería

INS	Instituto Nacional de Salud
INVEMAR	Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras
ISARM	Gestión de los Recursos Acuíferos Transfronterizos
GRDC	Global Runnoff Data Center
MADR	Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural
MADS	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible
MAVDT	Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial
MHC	Modelo Hidrogeológico Conceptual
MINAE	Ministerio de Ambiente y Energía
MVCT	Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio
OEA	Organización de Estados Americanos
OIEA	Organismo Internacional de Energía Atómica
OMM	Organización Meteorológica Mundial
OMS	Organización Mundial de la Salud
PM	Provincias hidrogeológicas montañas e intramontañas
PNN	Parque Nacional Natural
PNUMA	Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente
POMCAS	Plan de Ordenamiento y Manejo de Cuencas
RUA	Registro Único Ambiental
SDA	Secretaría Distrital de Ambiente

SGC	Servicio Geológico Colombiano
SIAC	Sistema de Información Ambiental para Colombia
SIMCO	Sistema de Información Minero Colombiano
SINA	Sistema Nacional Ambiental
SINCHI	Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas
SIRH	Sistema de Información del Recurso Hídrico
SNCyT	Sistema Nacional de Ciencia y Tecnología
SZH	Subzona Hidrográfica
UNESCO	Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura
VMM	Vigilancia Meteorológica Mundial
WWAP	World Water Assessment Programme
WWDR	The World Water Development Report
WWF	Fondo Mundial para la Naturaleza

INTRODUCCIÓN

Este documento técnico actualiza anteriores protocolos que se han producido para suplir necesidades de orientación para la realización de prácticas hidrológicas de monitoreo. En esta oportunidad se presentan nuevos procedimientos conservando una visión integral del ciclo hidrológico en sus ámbitos continental y marino-costero.

La aplicación de prácticas estandarizadas y soportadas en preceptos científicos para realizar el monitoreo del agua permite fortalecer el conocimiento de los sistemas hídricos y mejorar la comprensión de las funcionalidades, presiones y afectaciones con fines de gestión y planificación desde campos de actuación nacional, regional y local. Cabe destacarse que más allá de las tecnologías y prácticas de campo es pertinente además garantizar el fortalecimiento del talento humano para el monitoreo en las instituciones, la base de laboratorios acreditados, la asequibilidad de las acciones y estrategias de monitoreo y la gestión de la información. Este último componente facilita la disposición de información pertinente, de alta calidad, oportuna, precisa, completa, relevante, accesible y ante todo útil a los diferentes usuarios.

Desde el punto de vista institucional, el protocolo se alinea con los principios, objetivos y componentes tanto operativos como estratégicos de la Política Nacional para la Gestión de Recursos Hídricos- PNGIRH, que fue promulgada por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS) en 2010 e implementada desde su Dirección de Gestión Integral del Recurso Hídrico. A su vez, contribuye con la garantía de información confiable como insumo para programas formulados de esta política pública del agua (de manera particular el Programa Nacional de Aguas Subterráneas y Programa Nacional de Monitoreo del Recurso Hídrico) y los instrumentos de planificación para la ordenación ambiental del territorio y del recurso hídrico.

El protocolo está dirigido a las entidades que tienen responsabilidades directas de monitoreo para la evaluación y seguimiento del recurso hídrico, sus presiones, afectaciones y singularidades tanto en el nivel nacional (IDEAM e INVEMAR) y

regional (autoridades ambientales). Sin embargo, y dada la universalidad de las prácticas hidrológicas, su uso extensivo a otras instituciones, que por sus intereses, funciones o competencias requieren realizar monitoreo del agua con diferentes propósitos de planificación, control, seguimiento, evaluación o investigación.

El texto consta de cuatro partes, un marco referencial normativo e institucional, un marco conceptual del monitoreo del agua y los recursos hídricos, una cronología comentada de antecedentes, un capítulo de técnicas y procedimientos de monitoreo para aguas meteóricas, aguas superficiales, marino costeras y subterráneas en cantidad y calidad y finalmente un aparte sobre la gestión de datos e información.

El documento, liderado por el IDEAM, se construyó con la participación de expertos de la Universidad Nacional de Colombia (sede Manizales), la Dirección de Asuntos Marinos, Costeros y Recursos Acuáticos (*DAMCRA*) del MADS y el Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras -José Benito Vives de Andrés- (*Invemar*). De igual manera, es oportuno agradecer los aportes de expertos del MADS, autoridades ambientales, investigadores de prestigiosas universidades y expertos nacionales independientes.

Se espera de esta manera dejar en la documentación oficial del país un producto actualizable de fácil acceso y consulta para su uso extensivo por parte de técnicos, profesionales, investigadores e innovadores en los temas de monitoreo del agua y los recursos hídricos.



OBJETIVOS

1. OBJETIVOS

1.1. Objetivo General

Proveer una guía de procedimientos para un monitoreo representativo de recurso hídrico, a las instituciones y usuarios, considerando los ciclos y procesos del agua en la naturaleza, sus manifestaciones y relaciones.

1.2. Objetivos Específicos

- Reconocer las responsabilidades y roles institucionales para el monitoreo del Recurso Hídrico en Colombia, con base en la normativa vigente.
- Establecer técnicas y procedimientos para el monitoreo del agua y del Recurso Hídrico, basados en las practicas hidrológicas estandarizadas a nivel internacional.
- Orientar la gestión de datos e información, proveniente del monitoreo del agua, para garantizar su calidad, oportunidad, replicabilidad, interoperabilidad y disponibilidad, para actores sociales, gremiales e institucionales que lo requieran.



ALCANCE

2. ALCANCE

Alcance Temático

El protocolo abarca el monitoreo del agua en la integralidad del dominio del ciclo hidrológico, proporcionando las herramientas conceptuales y metodológicas para evaluar el estado y la dinámica del agua, en cantidad y calidad.

Refiere las variables determinadas por los procesos del ciclo hidrológico, como la Precipitación, Evapotranspiración, Escorrentía (niveles y caudales), Aguas Subterráneas (niveles piezométricos, variables hidráulicas), Sedimentos, así como también variables relacionadas con el estado y la dinámica de la calidad del agua, en sus manifestaciones fisicoquímicas e hidrobiológicas.

El protocolo no incluye el seguimiento a variables asociadas con agua potable y saneamiento básico.

Alcance Institucional

El protocolo está dirigido a las instituciones con responsabilidad directa en el monitoreo del agua y del recurso hídrico, a nivel nacional, regional y local.

De la misma manera, puede ser utilizado por otros actores institucionales, gremiales o sociales que requieran realizar monitoreos para cumplir propósitos de evaluación, gestión, seguimiento o investigación.

En este orden de ideas, el protocolo contribuye con la generación de información estandarizada, validada y sistematizada, útil para la toma de decisiones en los escenarios de planificación y gestión ambiental y territorial.

Alcance Normativo

El protocolo está concebido como una herramienta útil para estandarizar y homologar prácticas de monitoreo hidrológico, a la vez que propugna por la

validación, sistematización y difusión oportuna, a través de los sistemas interoperables de información.

En este sentido, el documento se alinea con los principios, objetivos y líneas estratégicas y operativas de la Política Nacional de Gestión Integral del Recurso Hídrico- PNGIRH y sus programas derivados tales como el Programa Nacional de Monitoreo del Recurso Hídrico- PNMRH, y el Programa Nacional de Aguas Subterráneas- PNASUB.

En términos generales, el protocolo suple los requerimientos y mandatos de la normatividad vigente y fija las reglas técnicas para aquellas instituciones o actores que requieren realizar monitoreo del recurso hídrico con cualquier propósito.

Alcance Geográfico

El protocolo es aplicable en todo el territorio nacional, tanto en cuerpos lénticos como lóticos, con fines de evaluación local, regional o nacional.

Fuente. Corporación para el Desarrollo Sostenible del Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina - CORALINA



MARCO DE REFERENCIA

3. MARCO DE REFERENCIA

3.1. Marco Normativo

La pertinencia de **disponer de información sobre el recurso hídrico**, la responsabilidad de adquirirla y el enfoque integral de dicha información, como soporte de decisiones en la gestión ambiental en el país, tiene su fundamento legal con la expedición del Código Nacional de los Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente (**Decreto - Ley 2811 de 1974**), el cual estableció en su artículo 20 que:

“Se organizará y mantendrá 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” (subrayado fuera del texto). Condición que denota la necesidad de disponer de información representativa en la dimensión temporal.

En el marco del mencionado Sistema de Información, el Código de Recursos Naturales Renovables estableció que mediante el sistema de información ambiental, se procesarán y analizarán, entre otras especies de información relacionadas con el recurso hídrico, las referidas a: “(...); b) *Hidrometeorológica, hidrológica, hidrogeológica y climática*; (...) h) *La información legal a que se refiere el Título VI, Capítulo I, Parte I del Libro II*; i) *Los niveles de contaminación por regiones*; j) *El inventario de fuentes de emisión y de contaminación”* (Decreto Ley 2811 de 1974; Artículo 21. Subrayado fuera del texto).

Con la expedición de la **Ley 99 de 1993**, mediante la cual se crea el Ministerio de Ambiente como organismo rector de la gestión del medio ambiente y de los recursos naturales renovables y se establecen lineamientos para fortalecer el Sistema Nacional Ambiental (SINA); se establecen las principales funciones relacionadas con la información ambiental (que, como se señaló anteriormente incluye el agua en todas sus formas) de la siguiente manera:

- Al Ministerio del Medio Ambiente (hoy Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible): “Coordinar, promover y orientar las acciones de investigación sobre el medio ambiente y los recursos naturales renovables, establecer el Sistema de Información Ambiental, y organizar el inventario de la biodiversidad y de los recursos genéticos nacionales; promover la investigación de modelos alternativos de desarrollo sostenible; ejercer la Secretaría Técnica y Administrativa del Consejo del Programa Nacional de Ciencias y del Medio Ambiente y el Hábitat” (Ley 99 de 1993, Artículo 4, numeral 20; subrayado fuera del texto);
- Al Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM): “El IDEAM deberá obtener, 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 y tendrá a su cargo el establecimiento y funcionamiento de infraestructuras meteorológicas e hidrológicas nacionales para proveer informaciones, predicciones, avisos y servicios de asesoramiento a la comunidad (...)” (Ley 99 de 1993, Artículo 17, inciso 2; subrayado fuera del texto);
- Al Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras "José Benito Vives de Andreis": “(...) El INVEMAR tendrá como encargo principal la investigación ambiental básica y aplicada de los recursos naturales renovables y el medio ambiente y los ecosistemas costeros y oceánicos de los mares adyacentes al territorio nacional. El INVEMAR emitirá conceptos técnicos sobre la conservación y aprovechamiento sostenible de los recursos marinos, y prestará asesoría y apoyo científico y técnico al Ministerio, a las entidades territoriales y a las Corporaciones Autónomas Regionales (...)” (Ley 99 de 1993, Artículo 18; subrayado fuera del texto);
- A las Corporaciones Autónomas Regionales: “Implantar y operar el Sistema de Información Ambiental en el área de su jurisdicción, de acuerdo con las

directrices trazadas por el Ministerio del Medio Ambiente; (...) (Ley 99 de 1993, Artículo 31, numeral 22; subrayado fuera del texto).

En éste marco es oportuno mencionar que el **monitoreo del agua** soporta varias funciones de administración, control y seguimiento de las autoridades ambientales, entre las que destacan:

- ✓ *“Ejercer las funciones de evaluación, control y seguimiento ambiental de las actividades de exploración, explotación, beneficio, transporte, uso y depósito de los recursos naturales no renovables, incluida la actividad portuaria con exclusión de las competencias atribuidas al Ministerio del Medio Ambiente, así como de otras actividades, proyectos o factores que generen o puedan generar deterioro ambiental. Esta función comprende la expedición de la respectiva licencia ambiental (...)* (Ley 99 de 1993, Artículo 31, numeral 11; subrayado fuera del texto).
- ✓ *“Ejercer las funciones de evaluación, control y seguimiento ambiental de los usos del agua, el suelo, el aire y los demás recursos naturales renovables, lo cual comprenderá el vertimiento, emisión o incorporación de sustancias o residuos líquidos, sólidos y gaseosos, a las aguas en cualquiera de sus formas, al aire o a los suelos, así como los vertimientos o emisiones que puedan causar daño o poner en peligro el normal desarrollo sostenible de los recursos naturales renovables o impedir u obstaculizar su empleo para otros usos, estas funciones comprenden expedición de las respectivas licencias ambientales, permisos concesiones, autorizaciones y salvoconductos”* (Ley 99 de 1993, Artículo 31, numeral 12; subrayado fuera del texto).

En relación con las disposiciones de la Ley 99 de 1993, el **Decreto 1277 de 1994**, organiza y establece el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales –IDEAM, refiriendo en su Artículo 2, Capítulo 1, su objeto de: suministrar los conocimientos, los datos y la información ambiental que requieren el Ministerio del

Medio Ambiente y demás entidades del Sistema Nacional Ambiental –SINA y establecer las bases técnicas para clasificar y zonificar el uso del territorio nacional para los fines de la planificación y el ordenamiento ambiental del territorio. Con respecto al apoyo que tiene que brindar el Instituto a las Corporaciones para el “*desarrollo de sus funciones relativas al ordenamiento, manejo y uso de los recursos naturales renovables en la respectiva región*”, el IDEAM deberá:

- “*Asesorar a las Corporaciones en la implementación y operación del Sistema de Información Ambiental, de acuerdo con las directrices trazadas por el Ministerio del Medio Ambiente*” (Decreto 1277 de 1994, Artículo 7, literal a, Capítulo 1).
- “*Suministrar a las Corporaciones información para el establecimiento de estándares y normas de calidad ambiental*” (Decreto 1277 de 1994, Artículo 7, literal f, Capítulo 1; subrayado fuera del texto).

Como integrante del Sistema Nacional Ambiental, el IDEAM también le corresponde prestar su asesoría, junto con las Corporaciones, a las entidades territoriales y a los centros poblados en materia de investigación, toma de datos y manejo de información (Artículo 8, literal b, Capítulo 1).

Por otro lado, el **Decreto 1276 de 1994** que organiza y reestructura el Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras “José Benito Vives de Andreis –INVEMAR, define su objeto como el encargado de emitir conceptos técnicos sobre la conservación y el aprovechamiento sostenible de los recursos marinos (Artículo 2, literal c, Capítulo 1; subrayado fuera del texto) y el de cumplir con los objetivos que se establezcan para el Sistema de Investigación Ambiental en el área de su competencia (Artículo 2, literal e, Capítulo 1). Entre sus funciones, se consideran:

- “*Desarrollar actividades de coordinación con los demás institutos científicos vinculados al Ministerio del Medio Ambiente y apoyar al IDEAM en el manejo de la información necesaria para el establecimiento de políticas, planes, programas y proyectos, así como de indicadores y modelos predictivos sobre*

el comportamiento de la naturaleza y sus procesos” (Decreto 1276 de 1994, Artículo 3, literal 5, Capítulo 1; subrayado fuera del texto).

- *“Colaborar con el Ministerio del Medio Ambiente, las Corporaciones y los grandes centros urbanos, en la definición de las variables que deban ser contempladas en los estudios de impacto ambiental de los proyectos, obras o actividades que afecten el mar, las costas y sus recursos”* (Decreto 1276 de 1994, Artículo 3, literal 11, Capítulo 1; subrayado fuera del texto).

Con respecto a la articulación con el Sistema de Información Ambiental, según el Artículo 11, Capítulo 2, el INVEMAR deberá colaborar con el IDEAM en la proposición de variables que deben contemplar los estudios de impacto ambiental, de tal forma que se normalice la colecta de información, cuando ésta se requiera y se facilite el análisis, evaluación y procesamiento de la misma.

En relación al control y seguimiento del recurso hídrico, la **Ley 1450 de 2011** precisó las competencias de las Corporaciones Autónomas Regionales y de Desarrollo Sostenible, de los Grandes centros urbanos y de los Establecimientos públicos, en el marco de la Gestión Integral del Recurso Hídrico:

- *“La Gestión Integral del Recurso Hídrico - GIRH en relación con las Corporaciones Autónomas Regionales y de Desarrollo Sostenible, los grandes centros urbanos y los Establecimientos Públicos Ambientales implica en su área de jurisdicción:*

(...)

d) La evaluación, control y seguimiento ambiental de la calidad del recurso hídrico, de los usos del agua y de los vertimientos; (...)” (Ley 1450 de 2011, Artículo 215, numeral d)

Particularmente, en el ámbito marino costero, la Ley 1450 de 2011 establece la autoridad marina de las Corporaciones: *“Las Corporaciones Autónomas Regionales y las de Desarrollo Sostenibles de los departamentos costeros, ejercerán sus*

funciones de autoridad ambiental en las zonas marinas hasta el límite de las líneas de base recta establecidas en el Decreto 1436 de 1984, salvo las competencias que de manera privativa corresponden al Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial y a la Corporación para el Desarrollo Sostenible del Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina –CORALINA– (...)” (Ley 1450 de 2011, Artículo 208; subrayado fuera del texto).

Con la publicación de **Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico**, en el año 2010, se busca garantizar la sostenibilidad del recurso hídrico, mediante una gestión y un uso eficiente y eficaz, articulados al ordenamiento y uso del territorio y a la conservación de los ecosistemas que regulan la oferta hídrica, considerando el agua como factor de desarrollo económico y de bienestar social, e implementando procesos de participación equitativa e incluyente.

En este sentido, su planteamiento y desarrollo considera el Sistema de Información de Recurso Hídrico- SIRH y las normas, guías técnicas e instrumentos para la planificación, ordenación y manejo de cuencas y acuíferos, los cuales son abordados de la siguiente manera:

- Según el artículo 8 del **Decreto 1323 de 2007** “*las Corporaciones Autónomas Regionales, las Corporaciones para el Desarrollo Sostenible, las Autoridades Ambientales de los Grandes Centros Urbanos, las creadas por el artículo 13 de la Ley 768 del 2002 y la Unidad Administrativa Especial del Sistema de Parques Nacionales Naturales del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, deberán realizar el monitoreo y seguimiento del recurso hídrico en el área de su jurisdicción, para lo cual deberán aplicar los protocolos y estándares establecidos en el SIRH*”.

De acuerdo con el artículo 2 de este Decreto, el SIRH se define como “... *el conjunto que integra y estandariza el acopio, registro, manejo y consulta de datos, bases de datos, estadísticas, sistemas, modelos, información documental y bibliográfica, reglamentos y protocolos que facilita la gestión integral del recurso hídrico*”.

En el mismo sentido, el artículo 9 del Decreto 1323 de 2007 (Comp. En el Decreto 1076 de 2015) establece que *“En los términos del artículo 23 del Decreto-ley 2811 de 1974, los titulares de licencias, permisos o concesiones que autorizan el uso del recurso hídrico, están obligados a recopilar y a suministrar sin costo alguno la información sobre la utilización del mismo a las Autoridades Ambientales Competentes”*

- El artículo 16 del **Decreto 1640 de 2012** (Comp. En el Decreto 1076 de 2015) establece que *“El Programa Nacional de Monitoreo del Recurso Hídrico se adelantará a nivel de las Zonas Hidrográficas definidas en el mapa de zonificación ambiental del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, IDEAM, las cuales serán el espacio para monitorear el estado del recurso hídrico y el impacto que sobre este tienen las acciones desarrolladas en el marco de la Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico”. También que “El programa será implementado por el IDEAM y el -INVEMAR en coordinación con las autoridades ambientales competentes, de conformidad con las funciones establecidas en el capítulo 5 del Título 3, Parte 2, libro 2 (...)”.*
- La implementación del Registro de Usuarios del Recurso Hídrico, de conformidad con el artículo 2.2.3.4.1.8 del Decreto 1076 de 2015.

Adicionalmente, en el ámbito marino-costero, se contempla la **Política Nacional Ambiental para el Desarrollo Sostenible de los Espacios Oceánicos de las Zonas Costeras e Insulares de Colombia –PNAOCI** (Ministerio de Medio Ambiente, 2000), que busca entre otros objetivos proporcionar un ambiente marino y costero sano para contribuir al mejoramiento de la calidad de vida de la población costera.

También se establece el **Programa Nacional de Investigación, Evaluación, Prevención, Reducción y Control de Fuentes Terrestres y Marinas de Contaminación al Mar – PNICM 2004** (Garay, J et al, 2004), el cual busca promover y fortalecer acciones tendientes a prevenir, evaluar, conservar, rehabilitar, restaurar

y manejar el deterioro de los ambientes, ecosistemas y recursos marinos y costeros causados por la contaminación. Dentro de las estrategias de este programa se encuentra la caracterización de la contaminación y el monitoreo ambiental, en donde se aborda el Programa Nacional de la Calidad Ambiental como un compromiso permanente del Ministerio de Ambiente, el INVEMAR y las CAR costeras.

En la *Figura 1* se representa la relación de los principales instrumentos normativos, que fundamentan el marco legal para el desarrollo de los procesos de monitoreo del recurso hídrico en el país.

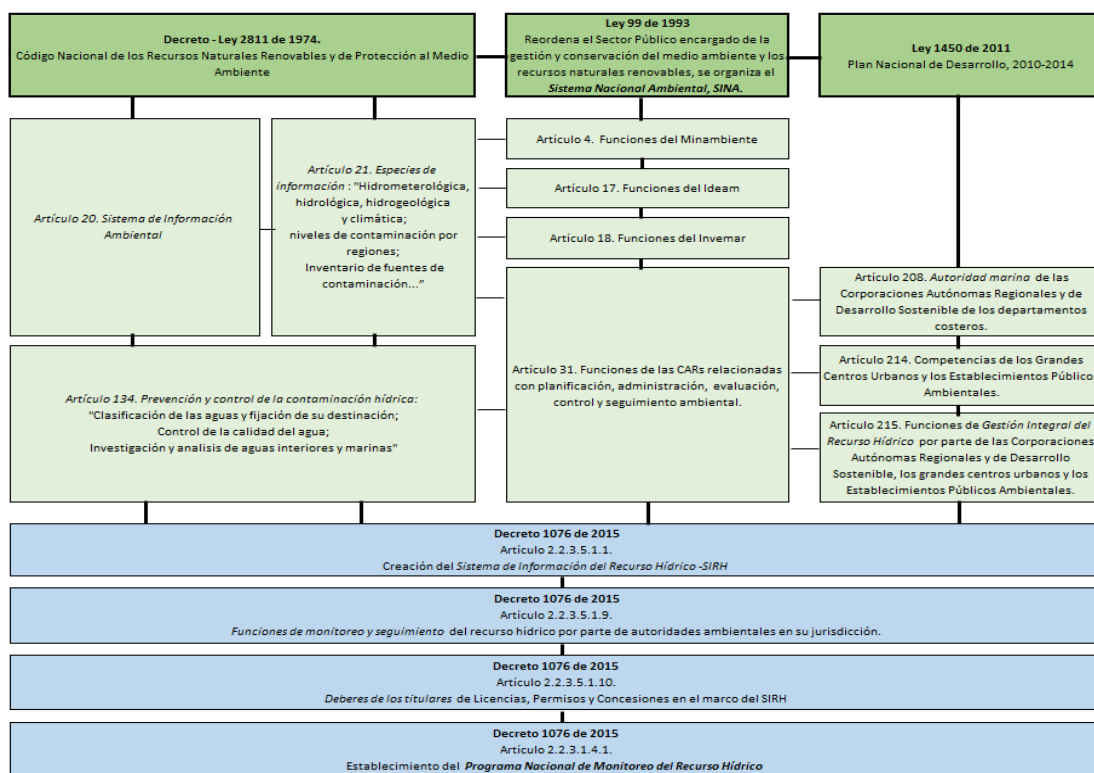


Figura 1. Principales instrumentos normativos, que fundamentan el marco legal para el desarrollo de los procesos de monitoreo del recurso hídrico en el país.

3.2. Marco Institucional

La Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico (PNGIRH) estableció que se requiere hacer seguimiento al estado del recurso bajo los nuevos lineamientos, enfoques y prioridades; en el mismo sentido, la Política Nacional Ambiental para el Desarrollo Sostenible de los Espacios Oceánicos y las Zonas Costeras e Insulares de Colombia (PNAOCI), requiere herramientas de monitoreo del agua para el seguimiento de la calidad ambiental marina.

De acuerdo con lo expuesto en el capítulo correspondiente con el marco normativo, el monitoreo del agua se entiende como un proceso orientado en virtud de la gestión del recurso hídrico en el marco del Sistema Nacional Ambiental (SINA), lo cual convoca la acción de los actores involucrados en la planificación, administración, evaluación, investigación control y seguimiento del recurso hídrico a nivel local, regional y nacional.

El Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible-MADS, como rector de la gestión del ambiente y de los recursos naturales renovables, encargado de orientar y regular el ordenamiento ambiental del territorio y de definir las políticas y regulaciones a las que se sujetarán la recuperación, conservación, protección, ordenamiento, manejo, uso y aprovechamiento sostenible de los recursos naturales renovables y del ambiente de la nación, le corresponde dirigir el SINA¹.

En este contexto, el *monitoreo del agua* en el marco del ciclo hidrológico *constituye herramienta técnica para soportar los instrumentos para la planificación, ordenación y manejo de las cuencas hidrográficas y acuíferos, así como la ordenación y manejo de las unidades ambientales costeras*; enfoques que vienen siendo consideradas en el marco normativo reglamentario, y por tanto, orienta la responsabilidad de las entidades y usuarios del SINA en el quehacer del monitoreo.

¹ Decreto 3570, Art 1 Objetivos del MADS. Disponible en <http://www.minambiente.gov.co/index.php/ministerio/objetivos-y-funciones>

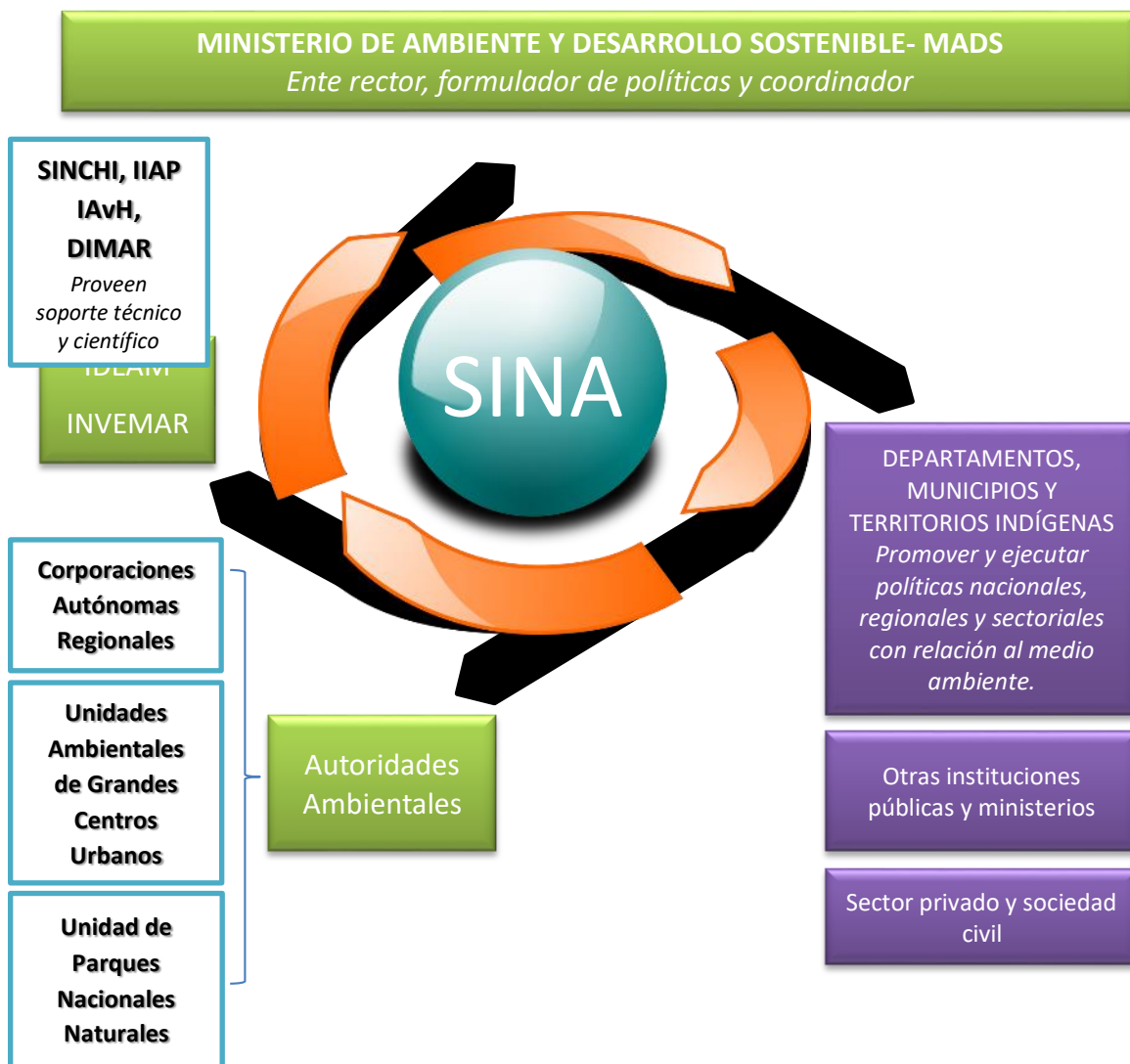


Figura 2. Esquema de institucionalidad que por norma tiene directa relación con el monitoreo del agua continental y marino costera, en el ámbito nacional y regional.

A escala nacional el monitoreo de los recursos hídricos está a cargo del IDEAM en la parte continental, y del INVEMAR en la franja marino costera, con aportes de los institutos de investigación SINCHI, IIAP, DIMAR y Humboldt en las jurisdicciones y áreas específicas de su competencia. En el ámbito regional la competencia es atribuida a las autoridades ambientales: Corporaciones Autónomas Regionales y de Desarrollo Sostenible y Unidades Ambientales Urbanas.



MARCO CONCEPTUAL

4. MARCO CONCEPTUAL

El marco conceptual se consolida a partir de aspectos conceptuales básicos que soportan el monitoreo del agua. Se parte del ciclo hidrológico para conocer el comportamiento del agua como elemento presente en la naturaleza y se relacionan las prácticas de monitoreo para explicar las relaciones que tiene el agua con su entorno.

4.1. Ciclo del Agua

El ciclo hidrológico es un mecanismo continuo y permanente por el cual el agua circula en el planeta a través de cambios en estado físico dinamizados con la radiación solar y la gravedad terrestre. Dentro de los procesos más importantes en el ciclo del agua se nombran la evaporación, transpiración, condensación, precipitación, escorrentía, infiltración y acumulación (Figura 3).

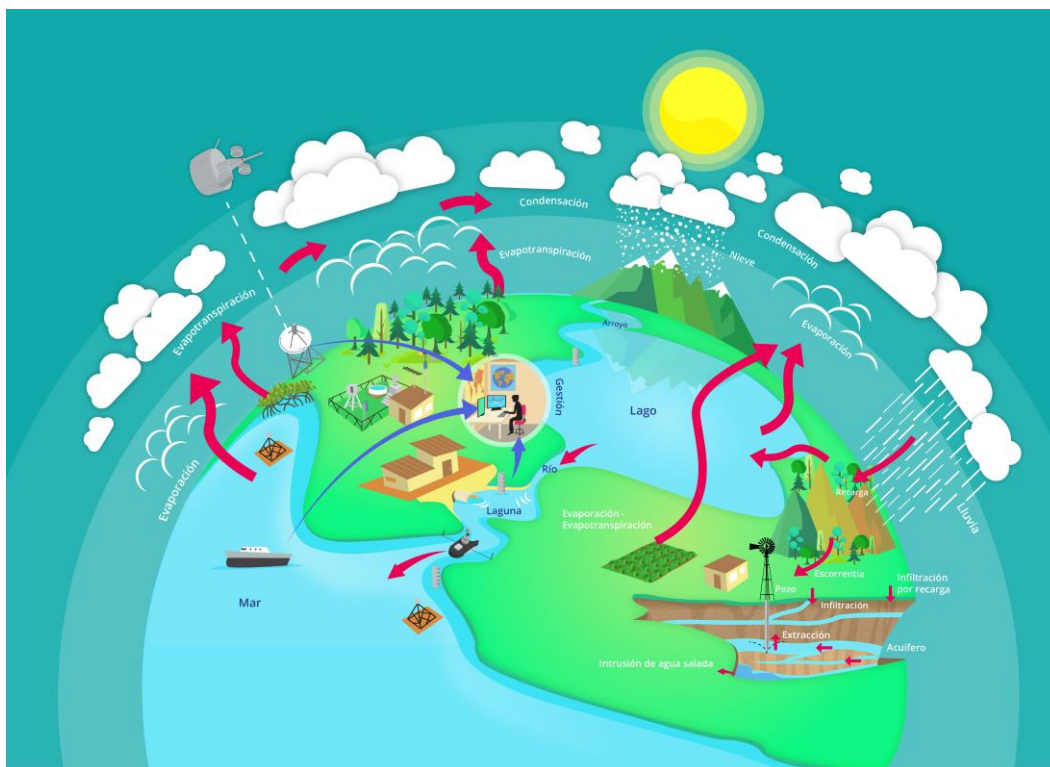


Figura 3. El ciclo hidrológico visto desde el monitoreo. Tomado y editado de: (Enciclopedia Características, 2017) y (UIT, 2017).

La evaporación corresponde al proceso mediante el cual el agua se incorpora a la atmósfera por acción combinada de las condiciones de presión de vapor y temperatura. Se presenta con mayor intensidad en los océanos, siendo la principal fuente de agua que ingresa a la atmósfera, proveendo alrededor del 90% de la humedad (USGS, 2017).

La transpiración, a su vez, comprende el agua en fase líquida que incorporan las plantas en sus procesos metabólicos para luego disponerla en la atmósfera en forma gaseosa a través de las estomas. El total del agua que se reincorpora a la atmósfera por estos dos procesos anteriores, se reconoce de manera indistinta como evapotranspiración.

Una vez en la atmósfera, el agua se moviliza alrededor del globo terráqueo y se presenta en forma de nubes, la expresión física de la condensación del vapor de agua en forma de gotas microscópicas.

Estas gotas ya en estado líquido, alcanzan su punto de saturación, se aglutinan, ganan peso hasta producir la precipitación, por acción de la gravedad. Este proceso se da con mayor frecuencia en la tierra que en los océanos, donde es mayor la evaporación (USGS, 2017).

El agua dulce que cae de forma líquida o sólida (nieve, granizo o en forma de condensación, como neblina y rocío) puede escurrir a través de la superficie, por canales de quebradas y ríos (escorrentía superficial) hasta llegar al mar, o infiltrarse en el subsuelo hasta alimentar unidades, roca, sedimento, que constituyen acuíferos o sistemas acuíferos en los cuales el agua fluye en respuesta al gradiente hidráulico en la zona saturada.

Finalmente, el agua dulce se puede acumular en estado sólido en los glaciares, los cuales están distribuidos a nivel mundial en un 90% en la Antártida y 10% en Groenlandia y en los nevados de alta montaña; en estado líquido en arroyos, estanques, lagos naturales y de origen antrópico, humedales y acuíferos subterráneos. El agua que llega a los mares es incorporada a los océanos, donde

se acumula cerca del 96,5% del agua disponible en el planeta. (USGS, 2017); (Pabón, y otros, 2001).

El ciclo hidrológico entonces abarca tanto el dominio continental como el dominio marino y sus zonas de intercambio o transición marino- costero.

4.2. Monitoreo del Agua

Los procesos naturales e interacciones que hacen parte del ciclo del agua son muy complejos y es imposible cubrirlos en su integridad teniendo en cuenta su variación continua en el tiempo y en el espacio. Es por esto que contar con un monitoreo y seguimiento permanente, integral, oportuno, asequible, sistematizado y soportado en principios y métodos científicos se vuelve parte esencial para conocer los procesos e interacciones del agua.

Se define el *monitoreo del agua*, como el proceso diseñado científicamente, para observar, medir, muestrear y analizar mediante métodos técnicos normalizados, variables físicas, químicas y biológicas, para luego realizar un seguimiento del progreso de un programa o hecho en particular en pos de la consecución de sus objetivos, y para guiar las decisiones de gestión.

El monitoreo se puede realizar por métodos directos de observación ya sea en puntos estratégicos, estaciones y redes físicas definidas en un programa de monitoreo, o por estaciones espaciales o por métodos indirectos mediante sensores remotos.

En Colombia se han implementado redes que permiten coleccionar información sobre los recursos hídricos, convirtiéndose en la principal herramienta utilizada para una adecuada gestión del agua. Este tipo de redes obedecen a tres niveles jerárquicos: redes nacionales, redes regionales y las redes locales y/o específicas, las cuales se organizan dependiendo de sus ámbitos de intervención, las competencias

institucionales, objetivos, densidades de puntos de observación, frecuencia de observación y otras especificidades propias de cada nivel (Figura 4).

Esta integración hace que una red nacional pueda utilizar algunas estaciones de las redes regionales y locales. Asimismo, que el diseño de cada una, dependa de la localización de una jerárquicamente superior.

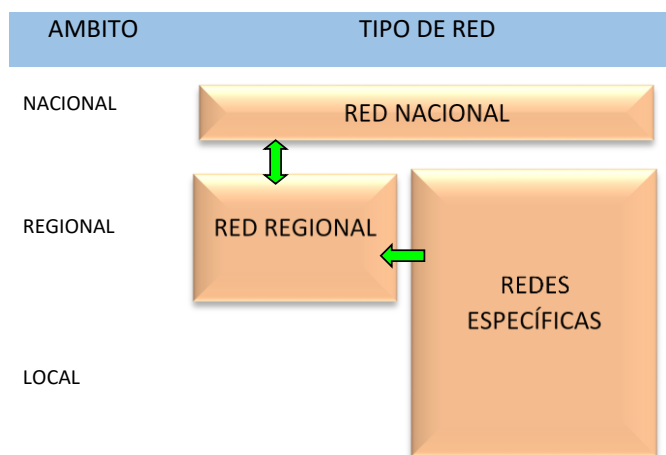


Figura 4. Tipos de redes de monitoreo según la cobertura y competencia institucional (Vargas N. O., 2001).

Las **redes nacionales** son aquellas cuyo objetivo es adquirir los datos representativos sobre las tendencias de largo plazo y de las variaciones de las características cuantitativas (aguas lluvia, niveles, caudales, sedimentos), y cualitativas (calidad, isotópicas) en todo el país, que permitan la definición de políticas y planes de gestión integral del recurso hídrico, de aplicación en todo el territorio nacional. Este nivel está en cabeza del Ministerio de Ambiente, y Desarrollo Sostenible (MADS), con el concurso de sus institutos nacionales adscritos, en especial IDEAM e INVEMAR en lo que tiene que ver con monitoreo del recurso hídrico.

Actualmente el IDEAM orienta la implementación y operación de las redes de *Hidrológica, Meteorológica, Monitoreo de Calidad de agua, Red Nacional de Aguas Subterráneas* y de *Isotopía*, distribuidas geográficamente por todo el país

En el ámbito marino costero se encuentran: la *Red de Mareógrafos*, la *Red de Boyas* para medición de oleaje administrada por la DIMAR y la *Red de Calidad de Aguas y Sedimentos – REDCAM*, administrada por el INVEMAR.

Las **redes regionales**, son aquellas redes operadas por las Autoridades Ambientales, con cobertura en sus áreas de jurisdicción, las cuales cuantifican y administran el recurso hídrico, monitorean su calidad y gestionan su uso eficiente. Este tipo de redes obtiene datos precisos y detallados que pueden ser complemento de los datos básicos de la red nacional. Se consideran redes hidrológicas, meteorológicas, además de redes de monitoreo de aguas subterráneas y redes de monitoreo de calidad e agua tanto fisicoquímico e hidrobiológico, así como el de los ecosistemas especiales del área de jurisdicción.

Las **redes locales**, son las que se encuentran ubicadas en zonas de influencia de proyectos específicos y obedecen estudios sobre zonas particulares con necesidades de monitoreo puntuales, por lo tanto, son operadas por empresas que manejan proyectos hidroeléctricos, extracción minera o de hidrocarburos, sistemas de abastecimiento, entidades estatales, consultoras, entre otras. Su propósito es evaluar los impactos o desarrollar estudios e investigaciones a nivel local, y brindar un apoyo a la ejecución de programas nacionales e internacionales como: i) Componente Nacional del Sistema de Vigilancia Meteorológica Mundial, VMM, ii) Componente Nacional del Sistema Mundial de Observación del nivel del mar, GLOS, iii) Componente Nacional del Sistema Mundial de Observaciones Climáticas, SMOC y Variabilidad Climática, CLIVAR, iv). Componente Nacional del Programa del Estudio Regional del Fenómeno del Niño, ERFEN, v) Red de alertas de eventos hidrometeorológicos (IDEAM, Implementación del Sistema de Información del Recurso Hídrico SIRH en Colombia, 2014).

Hay que considerar del mismo modo las **redes internacionales**, útiles para realizar un seguimiento global o regional. Es el caso de redes globales como la *Red Global de Isótopos en la Precipitación (GNIP)*, establecida por el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) y la Organización Meteorológica Mundial (OMM), que

en cooperación con los servicios meteorológicos nacionales y autoridades nacionales, contiene datos de isótopos estables (^2H , ^{18}O y ^3H), obtenidas a partir de muestras compuestas mensuales de agua lluvia.

A través de la *Red Interamericana de Recursos Hídricos- RIRH*, se busca un manejo integrado y sostenible de los recursos hídricos de las Américas a partir de fortalecimiento de alianzas, educación, intercambio de información y experiencia técnica. Esta red incorpora varios portales regionales del agua que promueven el intercambio de información entre profesionales, actores del proceso de gestión y tomadores de decisión en los recursos hídricos, en las Américas (RIRH, 2017).

También se considera la iniciativa *ISARM- Gestión de los Recursos Acuíferos Transfronterizos del Programa Hidrológico Internacional (PHI)* de la UNESCO y el Departamento de Desarrollo Sostenible (DDS) de la Organización de Estados Americanos (OEA), que monitorea los sistemas acuíferos transfronterizos, brindando así un apoyo a los países del continente americano en su uso sostenible y su protección (OAS, 2017).

Se destaca, el *Banco Mundial de Datos Hidrológicos (Global Runoff Data Center - GRDC)*, el cual permite analizar las tendencias climáticas globales ya evaluar los impactos y riesgos ambientales, a través de un intercambio ente proveedores y usuarios de datos. A este banco se remiten los datos hidrológicos de los principales ríos del mundo, entre ellos los datos de los ríos Magdalena y Cauca (GRDC, 2017).

Además de la *Red de Vigilancia Meteorológica Mundial (VMM)*, que suministra a nivel mundial información meteorológica de última hora a través de los sistemas de observación y enlaces de telecomunicación a cargo de diferentes miembros que hacen parte de centro meteorológicos mundiales, regionales y nacionales. Esta red consta de un Sistema Mundial de Observación, un Sistema Mundial de Proceso de Datos, un Sistema Mundial de Telecomunicación, Gestión de Datos y Actividad de Apoyo a los Sistemas, que proporcionan cotidianamente análisis, pronósticos y predicciones, y particularmente para advertir a los Servicios Meteorológicos e

Hidrológicos Nacionales de todo el mundo (Ministerios de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nacion de Argentina, 2017).

A person wearing a blue protective suit, a blue hat, and blue gloves is wading in a river. They are leaning forward, reaching into the water with their right hand. The river is surrounded by lush green vegetation and rocks. The water is a murky yellowish-brown color.

ANTECEDENTES

5. ANTECEDENTES

La implementación, creación y fortalecimiento de las redes de monitoreo de agua Superficial, Subterránea y Marino Costero en Colombia, ha venido evolucionando a través de los años, permitiendo fortalecer la evaluación del recurso hídrico y generando mejor y mayor información. El IDEAM, ha venido elaborando Guías y Protocolos de monitoreo para el seguimiento del agua, con el fin de fortalecer y unificar las metodologías, procesos y procedimientos, para mejorar la obtención del dato y así el sistema de información del recurso hídrico.

5.1. Redes de Monitoreo

Red Hidrométrica

En Colombia antes del año de 1969, han funcionado redes hidrométricas en algunas regiones del país. Debido a su ubicación, esta red brindaba información solo con fines específicos, la interpretación y los datos no eran homogéneos y la medición en las estaciones era muy limitada.

En el año 1969, el Gobierno decidió crear el Servicio Colombiano de Meteorología e Hidrología SCMh, con el objetivo de organizar y desarrollar actividades de hidrología y meteorología a escala nacional. Para cumplir dicho objetivo, de acuerdo a las recomendaciones de la OMM y el análisis de varios factores nacionales, se estableció inicialmente que en Colombia se requería una red óptima de aproximadamente 1700 estaciones hidrométricas. (SCMH, 1971).

En el 2017, el IDEAM de acuerdo con su misión cuenta con una red básica nacional de 2639 estaciones hidrometeorológicas activas, compuesta por 711 estaciones hidrológicas 1287 pluviométricas y 641 climatológicas, (Figura 5, Figura 6)

Actualmente estas estaciones cuentan con registros convencionales (cerca del 90% son estaciones convencionales), sin embargo, en los últimos años esta red ha venido adquiriendo equipos automáticos que permiten registros de mayor calidad y en tiempo real.

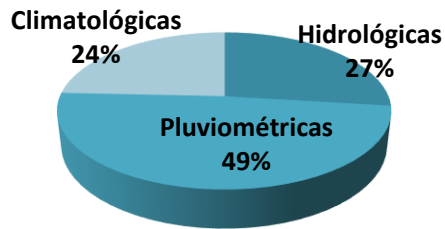


Figura 5. Participación estaciones Red Hidrometeorológica Nacional. Fuente (IDEAM, 2017)

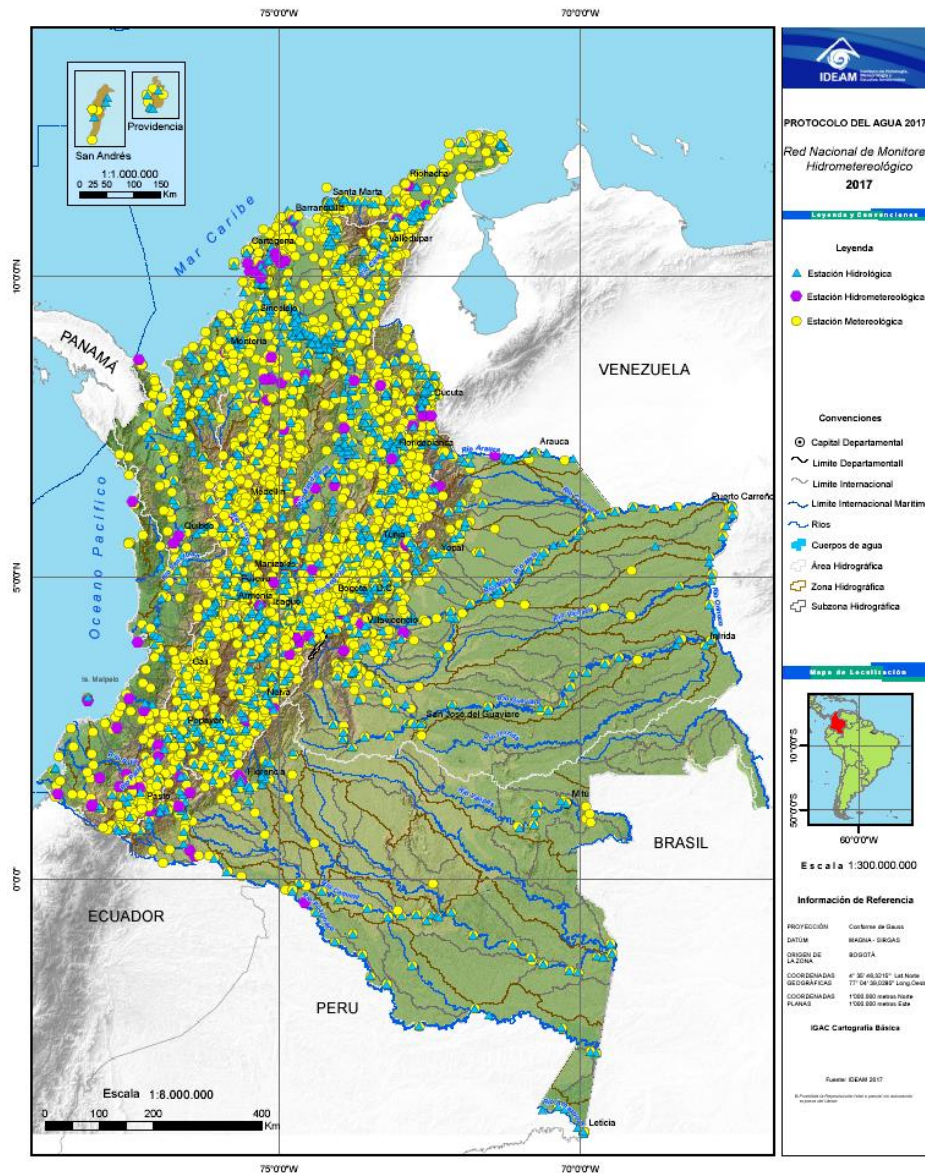


Figura 6. Mapa de estaciones hidrometeorológicas del IDEAM.

El IDEAM, está implementando una plataforma que permita la integración de software, la recepción, procesamiento y visualización de datos procedente de diferentes fuentes tales como estaciones convencionales o automáticas, imágenes de satélite, radares, etc. La ampliación y modernización de la red básica nacional está prevista con la instalación tres (3) radares meteorológicos, instalación de 200 estaciones automáticas, repotenciación de 270 estaciones y la automatización de 665 a 2022.

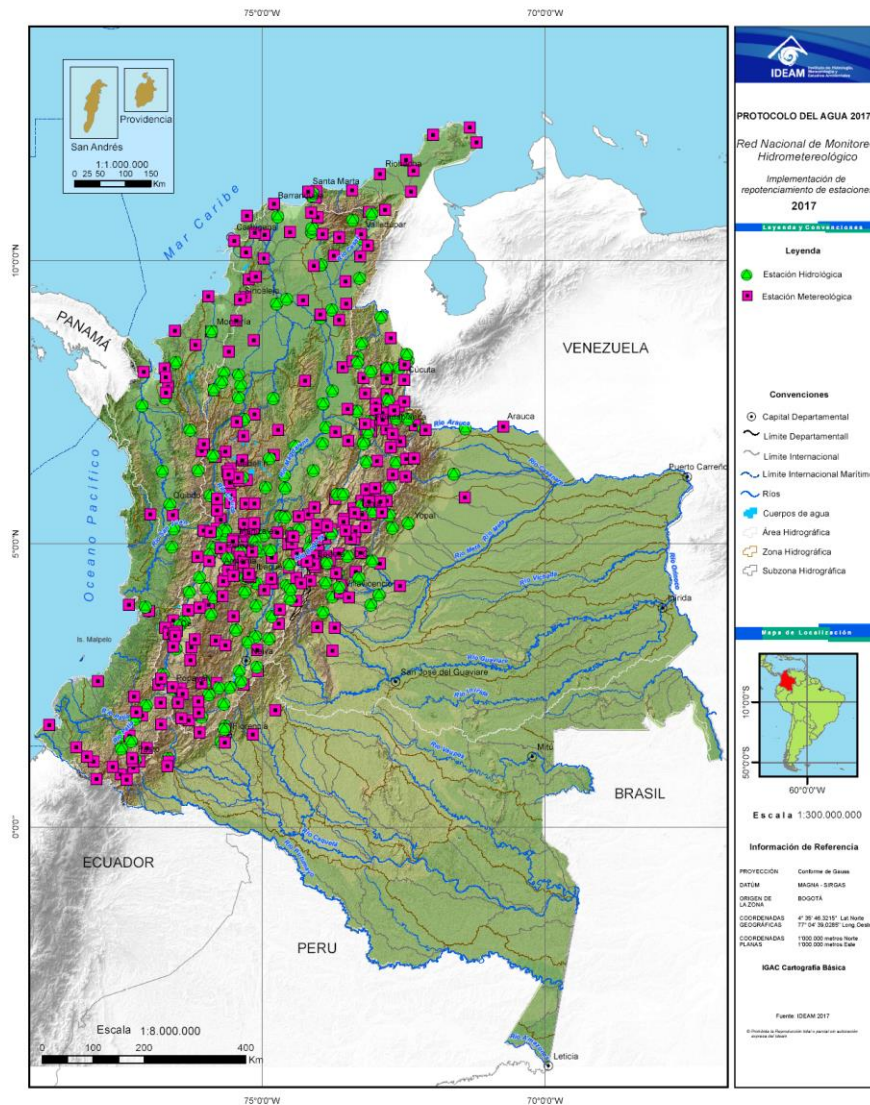


Figura 7. Mapa de estaciones hidrometeorológicas del IDEAM que se encuentra en proceso de ampliación y modernización. Fuente: IDEAM, 2017.

de sedimentos en puntos de interés de diversas cuencas y las características geomorfológicas de las mismas para, de esta manera, obtener una cuantificación del potencial de producción de sedimentos en suspensión y el rendimiento de producción a nivel zonal.

En la Figura 9, se observa la distribución geográfica de la red de monitoreo de sedimentos.

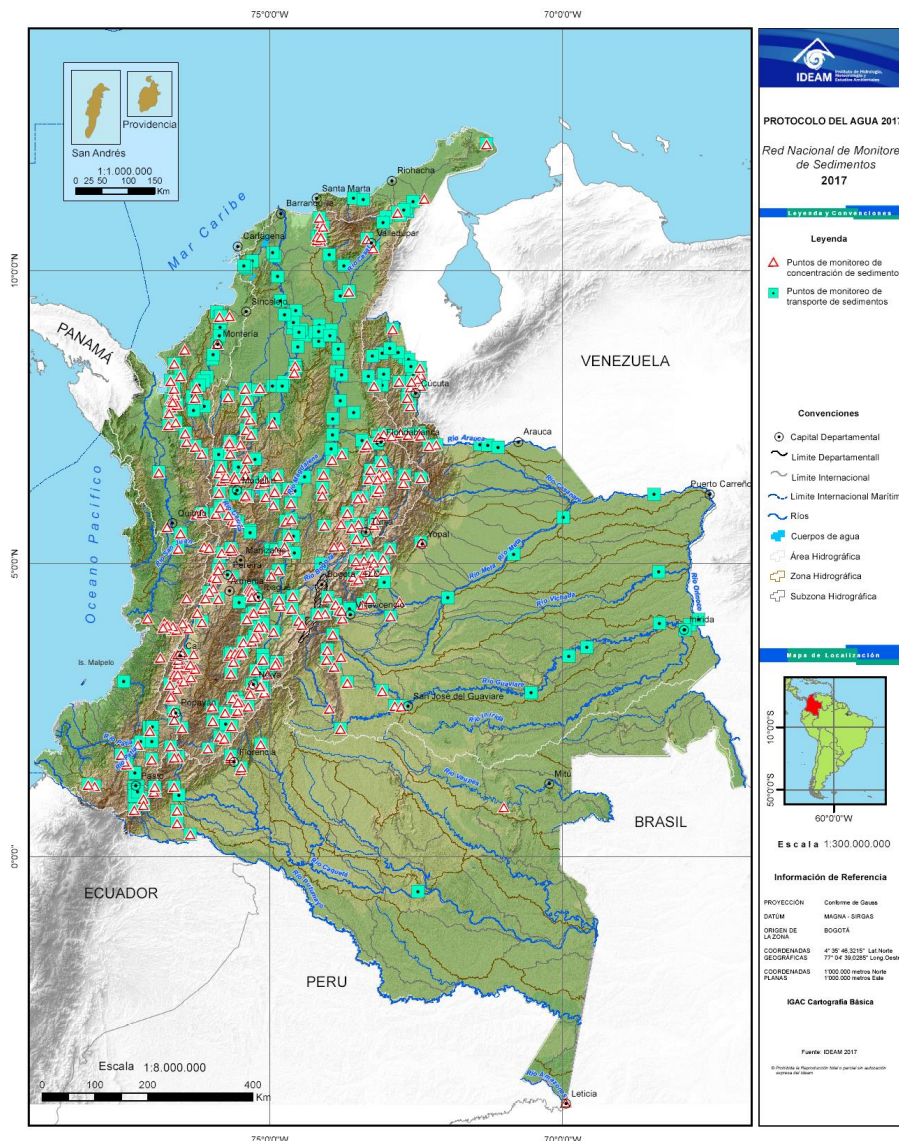


Figura 9. Red nacional de monitoreo de sedimentos. Fuente: Catálogo IDEAM (2015)

Red de Calidad del Agua

La red de monitoreo de calidad de agua superficial inició desde 1976 en el marco de la misión del HIMAT como Servicio Hidrológico Nacional y sus funciones específicas en el campo de adecuación de tierras, orientada principalmente a evaluar su aptitud para riego, en estaciones hidrométricas ubicadas en los Distritos de Riego, razón por la cual el monitoreo se realizaba en un número considerable de quebradas y arroyos como fuentes de abastecimiento de estos distritos.² Esta red contaba con cerca de 250 puntos con mediciones de calidad e hidrométricas en 70% de ellos. (IDEAM, 2006).

En el 2017, la red de calidad del agua del IDEAM, es operada por las 11 áreas operativas y cuenta actualmente con 148 estaciones como se observa en la Figura 10. La mayoría de los puntos de monitoreo se encuentran en el área hidrográfica Magdalena-Cauca, donde existe mayor presión antrópica, los cuales se encuentran ubicados principalmente en estaciones hidrométricas, con el propósito de hacer uso y aprovechamiento de la infraestructura instalada y de los datos de caudal para el cálculo de las cargas contaminantes.

Las muestras tomadas se envían al laboratorio en la ciudad de Bogotá para su análisis y caracterización. Actualmente La red de calidad del agua mide los siguientes parámetros: (Temperatura, pH, Conductividad Eléctrica, Oxígeno Disuelto, Demanda Química de Oxígeno, Demanda Bioquímica de Oxígeno, Nitratos, Nitritos, Nitrógeno Amoniacal, Nitrógeno total K, Turbiedad, Sólidos Suspendidos Totales, Sulfatos, Fosforo total, Fosfatos, Mercurio en sedimentos, Mercurio en agua, Metales pesados en agua (Cd, Cu, Ni, Pb, Zn, Cr, Mn, Al, Fe), Metales pesados en sedimentos (Cd, Cu, Ni, Pb, Zn, Cr, Mn, Al, Fe), Macroinvertebrados).

² IDEAM, Documento Interno, Justificación de estaciones de la red de calidad de agua del IDEAM, 2005.

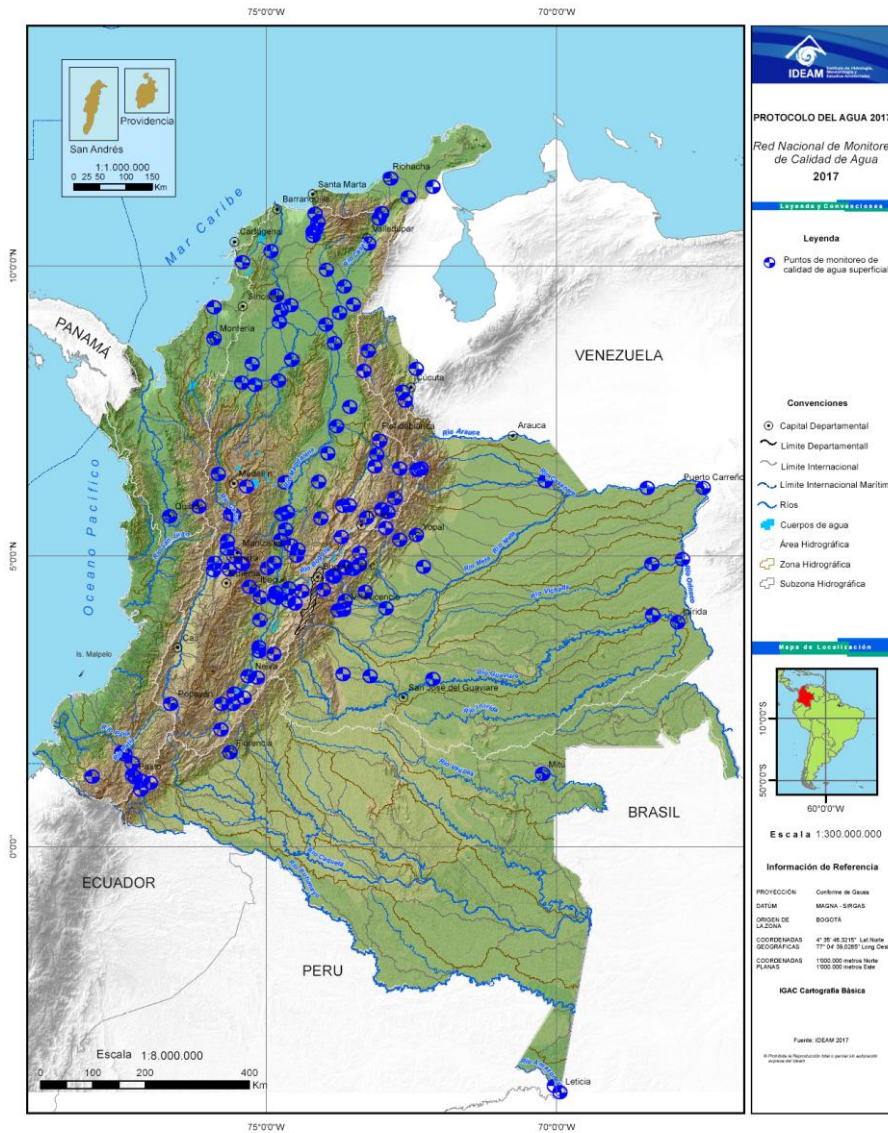


Figura 10. Red Calidad del Agua IDEAM

Red Básica Nacional de Aguas Subterráneas

Es una red concebida como parte del Programa Nacional de Monitoreo de Aguas Subterráneas que busca evaluar el estado y la dinámica del recurso hídrico subterráneo para planificar su manejo, reconocer los factores que inciden en su agotamiento y deterioro, y establecer relaciones con otros componentes del ecosistema natural para garantizar su sostenibilidad ambiental.

Su exploración inicia en Colombia a partir del año 1950, en los años 90, se realizan evaluaciones hidrogeológicas en el Valle del Patía, la Sabana de Bogotá, el Urabá antioqueño, los departamentos del Huila, Cesar, Tolima, Magdalena, Sucre, Córdoba y la Isla de San Andrés. Con la ley 99 de 1993, el IDEAM queda como responsable de la información hidrogeológica del país, continuando la exploración el INGEOMINAS. En el año 2000 el IDEAM, realiza la identificación de 16 provincias hidrogeológicas, y en el 2015 diseña la red nacional de monitoreo de aguas subterráneas.

Actualmente, la información de Aguas subterráneas, se obtiene a partir de un enlace con las Corporaciones Autónomas Regionales-CAR's, que dentro de las actividades de planificación y manejo de las aguas subterráneas han desarrollado sus propias redes de monitoreo y cuentan con los recursos que soportan la red nacional. Este enlace se logra a partir de un trabajo interdisciplinario en donde se adelantan acciones permanentes de monitoreo, seguimiento, fortalecimiento, cooperación y apoyo mutuo que permiten la transferencia de información hidrogeológica a la Red Básica Nacional de Aguas Subterráneas, en áreas priorizadas seleccionadas con base en criterios de uso y aprovechamiento del recurso subterráneo³.

En la Figura 11, se presenta la localización de los 114 puntos que inicialmente integran la Red Básica Nacional de Aguas Subterráneas, con la participación de nueve corporaciones como Corpoguaajira, Coralina, Carder, Cormacarena, Carsucre, Corpocesar, Corpourabá, CVC y la AMVA.

³ Para una revisión más amplia referirse al Documento Red Básica Nacional de Aguas Subterráneas y Red Básica Nacional de Isotopía. Publicación IDEAM página web.

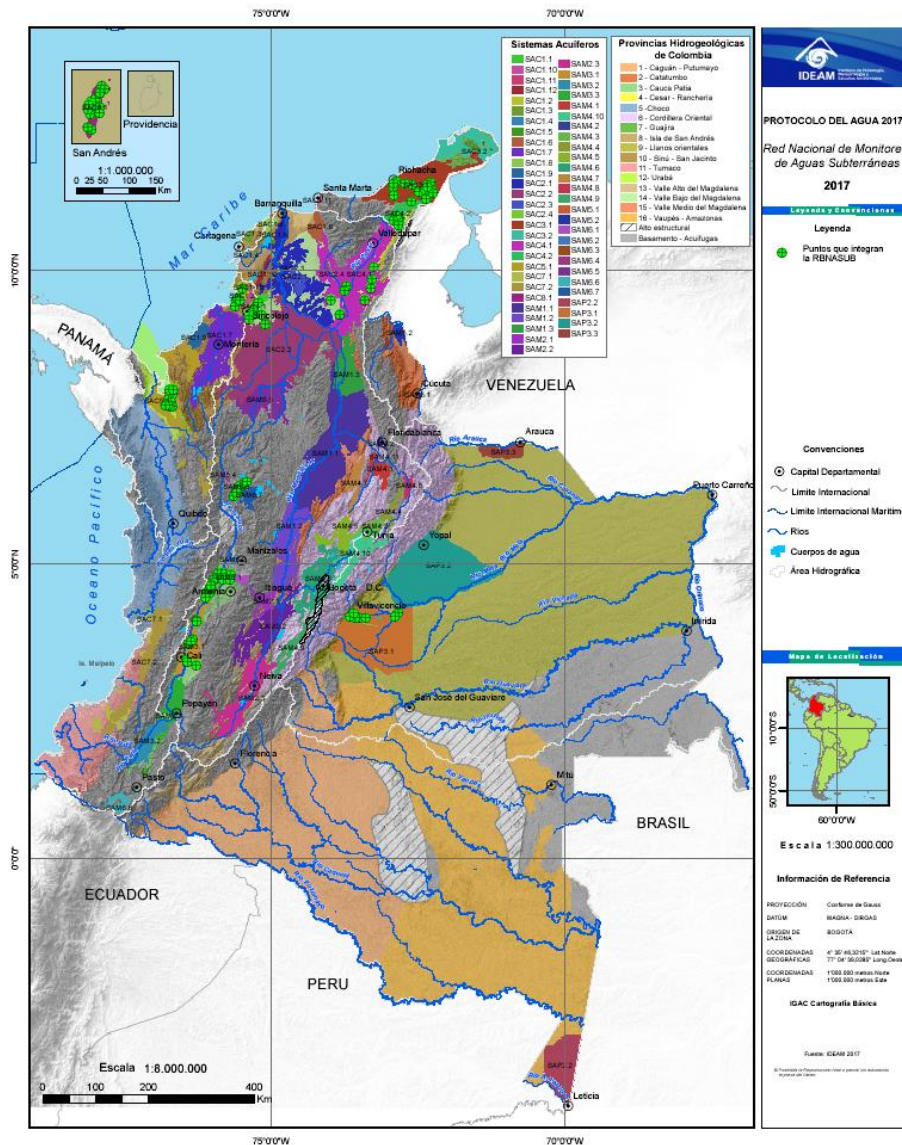


Figura 11. Localización de los puntos que integran la Red Básica Nacional de Monitoreo de Aguas Subterráneas.

Red Básica Nacional de Isotopía

Diseñada para determinar las variaciones temporales y espaciales de los isotopos estables del agua en la precipitación y, en las principales fuentes hídricas superficiales y subterráneas del territorio colombiano.

Esta red como una iniciativa piloto adelantada desde el año 2014 por el IDEAM, busca ser una base para desarrollar en el país investigaciones en hidrología e hidrogeología, con la aplicación de técnicas isotópicas que permitan estudiar la influencia del relieve topográfico, la dirección del viento y la climatología en la composición isotópica de la precipitación y en el ciclo hidrológico, además de la modelación climática, variabilidad y cambio climático a escala nacional. También estudios que permitan determinar zonas de recarga, conexión de aguas superficiales-aguas subterráneas, contaminación de acuíferos entre otras.

Con un diseño de 32 estaciones ubicadas en sitios estratégicos del país (Figura 12), en donde se consideró la diversidad en relieve topográfico, la dirección mensual de los vientos y las tres fuentes de evaporación de Colombia como son el Océano Atlántico, Océano Pacífico y la Amazonía, cada estación cuenta con un totalizador de agua mensual que minimiza cualquier tipo de evaporación y permite una fácil operación o con un pluviómetro, instalados en las estaciones meteorológicas del IDEAM y en sitios con jurisdicción de algunas Autoridades Ambientales, que en este caso actúan como actores estratégicos en el cuidado y la toma correcta de las muestras mensuales⁴.

⁴ Para una revisión más amplia referirse al Documento Red Básica Nacional de Aguas Subterráneas y Red Básica Nacional de Isotopía. Publicación IDEAM página web.

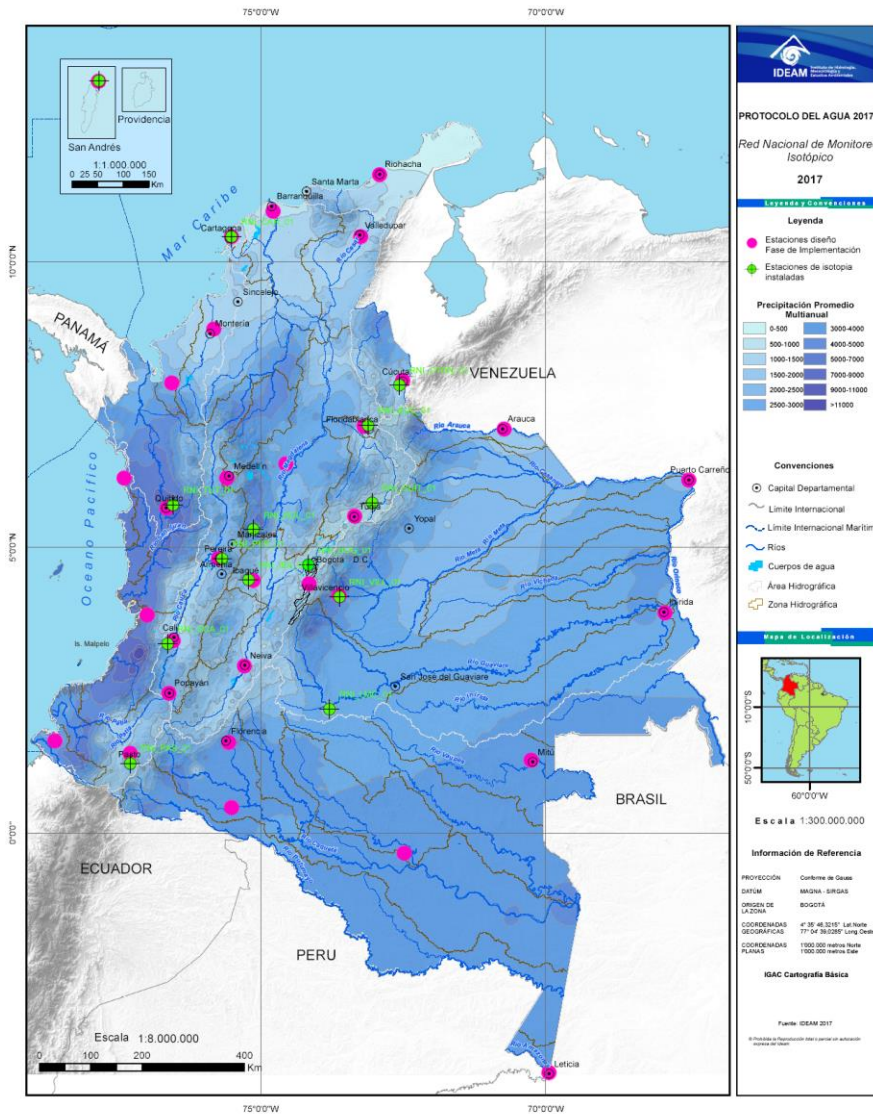


Figura 12. Localización de las treinta (32) estaciones de isotopía definidas en la fase de diseño de la Red Nacional de Isotopía

Del mismo modo, esta red nacional se articula a la Red Global de Isótopos en la Precipitación (Global Network for Isotopes in Precipitation, GNIP), manejada por la OIEA- Organismo Internacional de Energía Atómica y la OMM- Organización Meteorológica Mundial, con la recolección mensual por parte del IDEAM, de muestras de agua lluvia de dos estaciones isotópicas ubicadas en Bogotá en la Estación Meteorológica del Laboratorio Ambiental y una segunda en la ciudad e Barraquilla, ubicada en el Aeropuerto Ernesto Cortizoss.

Red de Vigilancia para la Conservación y Protección de las Aguas Marinas y Costeras

El monitoreo de la calidad de las aguas marinas superficiales inició en el año 2000 con el proyecto “Diagnostico y evaluación de la calidad ambiental marina del Caribe y Pacífico colombiano” formulado por el INVEMAR y financiado por el Banco Interamericano de desarrollo (BID), y en el que participaron el Ministerio del Medio Ambiente (actual MADS), las Corporaciones autónomas Regionales y de Desarrollo Sostenible (CAR) de los 12 departamentos costeros, algunos Institutos de Investigaciones (CIOH, IIAP). Este proyecto tenía como objetivo establecer un sistema para la vigilancia permanente de la calidad ambiental marina de la franja marino-costera colombiana, para contribuir con las bases científicas para la formulación de planes y programas de ordenamiento de los ecosistemas, de manera que posibilitara el manejo integrado y el aprovechamiento sostenible de las aguas y sus recursos naturales asociados.

La ejecución del proyecto culminó con el establecimiento de la Red de Vigilancia para la Conservación y Protección de las Aguas Marinas y Costeras de Colombia (REDCAM), que para el 2001 contó con 289 estaciones distribuidas en sitios de importancia económica y ambiental, como golfos, bahías, lagunas costeras, ciénagas, playas, los frentes y cuenca baja de los principales ríos que drenan al mar Caribe y al océano Pacífico. Actualmente la REDCAM se ha fortalecido técnicamente y ha funcionado de manera articulada y por medio de acuerdos interinstitucionales entre el INVEMAR como ente coordinador y las CAR costeras como lo son CORPOGUAJIRA, CORPAMAG, CRA, CARDIQUE, CARSUCRE, CVS, CORPOURABA, CORALINA, CODECHOCÓ, CVC, CRC y CORPONARIÑO, con el patrocinio del MADS (Figura 13).

También han participado entidades del orden local como EPA – Cartagena y Buenaventura, Departamentos Administrativos del Medio Ambiente de Santa Marta y Barranquilla, entre otras (Figura 13), (INVEMAR, 2017).

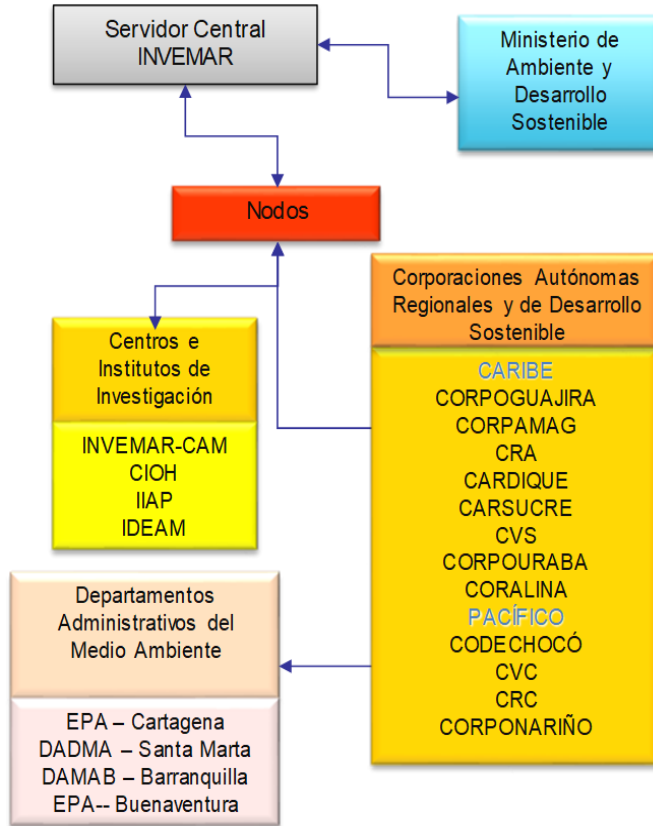


Figura 13. Entidades que Participan en la REDCAM. Fuente. INVEMAR. 2017.

La REDCAM, se encarga de monitorear dos veces al año parámetros fisicoquímicos, microbiológicos, contaminantes orgánicos e inorgánicos en cerca de 350 estaciones (Figura 14) (INVEMAR, 2017). Adicionalmente, a partir del 2014, la REDCAM inició el monitoreo de contaminantes orgánicos e inorgánicos en sedimentos (45 estaciones de sedimentos en el 2016) y organismos marinos (dos estaciones en Cauca) como complementos para el diagnóstico de la calidad ambiental marina.

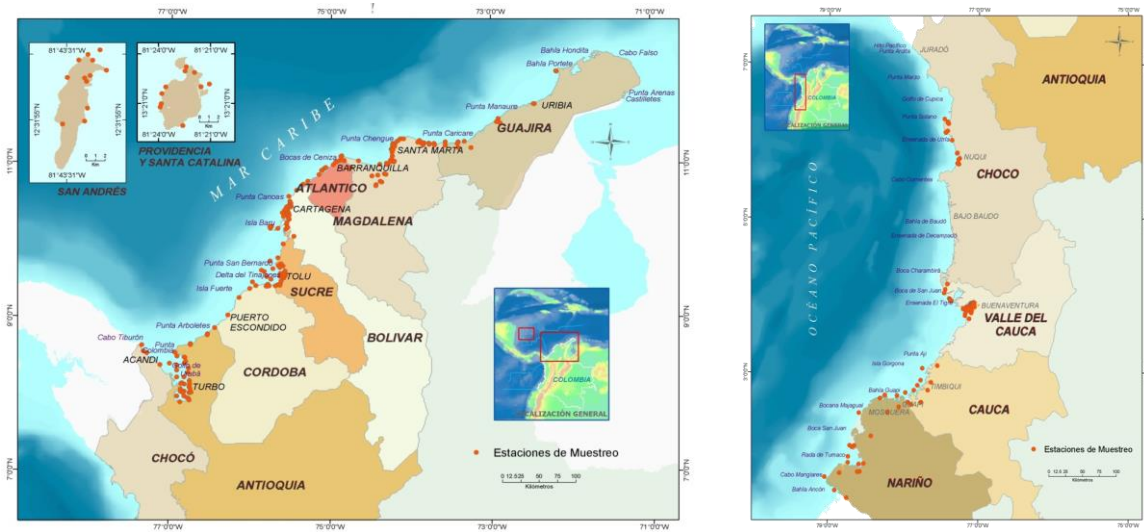


Figura 14. Ubicaciones de las estaciones de muestreo de la REDCAM en las zonas costeras del Caribe y Pacífico Colombianas, Fuente. INVEMAR, 2017.

Tanto INVEMAR como DIMAR (con el Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas – CIOH), generan plataformas de acceso a productos de información. DIMAR principalmente ofrece servicios de pronóstico para el quehacer marítimo del país (INVEMAR, 2013).

Redes Regionales

La red básica regional se establece para proveer información hidrológica necesaria para conocer, proteger, administrar, hacer seguimiento y controlar el uso y aprovechamiento del agua a nivel de zonas y subzonas hidrográficas. La red regional, complementaria de la red básica de referencia nacional, debe suministrar un nivel de información hidrológica suficiente en cualquier lugar dentro de su región de aplicabilidad, para evitar cualquier error grave en la toma de decisiones relativa a la planificación, administración y uso del agua. (IDEAM, 2006).

A nivel regional, existen redes hidrometeorológicas en las siguientes Autoridades Ambientales Regionales: CAR, CVC, CORPOCHIVOR, CARDER, CORNARE, CORPOCALDAS, y CORANTIOQUIA.

En trabajo conjunto del MADS, el IDEAM, y las CAR, se diseñó la Red Hidrometeorológica complementaria en Jurisdicción de las Corporaciones Autónomas Regionales de Colombia - Fase 2 (IDEAM, 2016), lo cual ha permitido desde el año 2012, cumplir con objetivos como:

- Describir las características básicas de la red hidrometeorológica emplazada en el área de la correspondiente jurisdicción.
- Realizar el levantamiento de los requerimientos de información de monitoreo hidrometeorológico.
- Identificar objetivos de monitoreo complementarios en el contexto de la operación de la red básica nacional.
- Elaborar una propuesta concertada con cada corporación para el diseño de una red hidrometeorológica complementaria.

5.2. Protocolos y Guías de Monitoreo

El IDEAM en años anteriores, ha construido Protocolos y Guías de monitoreo, proporcionando metodologías de obtención de información hidrológica en virtud de los decretos 1277 de 1994, 291 de 2004 y 1076 de 2015 teniendo en cuenta, que al instituto le corresponde el seguimiento del estado y de la dinámica de los recursos hídricos en cantidad y calidad. Dicho seguimiento a llevado a la utilización de una serie de herramientas e instrumentos como los protocolos, de monitoreo.

En este sentido, el IDEAM, ha desarrollado diferentes Guías o Protocolos, para facilitar a las autoridades ambientales y demás entidades del orden nacional, regional y local, el muestreo y la recopilación de información en el marco de la observación, monitoreo, medición y vigilancia de variables hidrológicas de cantidad y calidad, la cuales han sido:

- Protocolo para el Monitoreo de los Vertimientos, Aguas superficiales y Subterráneas (IDEAM, 2002)
- Guía para el Monitoreo y Seguimiento del Agua. (IDEAM, 2004)
- Protocolo para monitoreo y seguimiento del agua. (IDEAM, 2007)



**PROCEDIMIENTO
GENERAL PARA
EL MONITOREO
DEL AGUA**

6. PROCEDIMIENTO GENERAL PARA EL MONITOREO DEL AGUA

El protocolo del monitoreo del agua es un documento guía que orienta a Autoridades Ambientales, otras entidades sectoriales y a cualquier usuario, al cómo realizar un monitoreo, teniendo en cuenta su programa de monitoreo, el cual deberá contener donde, para qué, por qué, cuándo y quien lo llevará cabo, sin dejar atrás cuestiones de posibles riesgos que se pueden presentar. Es por esto que debe ser vital que la planificación sea preparada con los involucrados, técnicos de campo y el laboratorio. (Livni, Avisar, & Mamane, 2015).

Se presenta el procedimiento general que debe seguir cualquier programa de monitoreo, indicando cuales deben ser las etapas generales desde la planificación de la campaña, hasta la entrega de la información como producto de la misma. Las metodologías de muestreo para cada uno de los monitoreos de acuerdo a los objetivos de cada campaña, serán descritas más adelante.

Su estructura consta de cuatro partes que siguen las fases del procedimiento general, las cuales son desplegadas a través de un flujograma (**Figura 15**) que muestra de forma detallada el proceso.

- Sistemas de monitoreo
- Recolección de datos
- Administración de datos
- Uso de la información

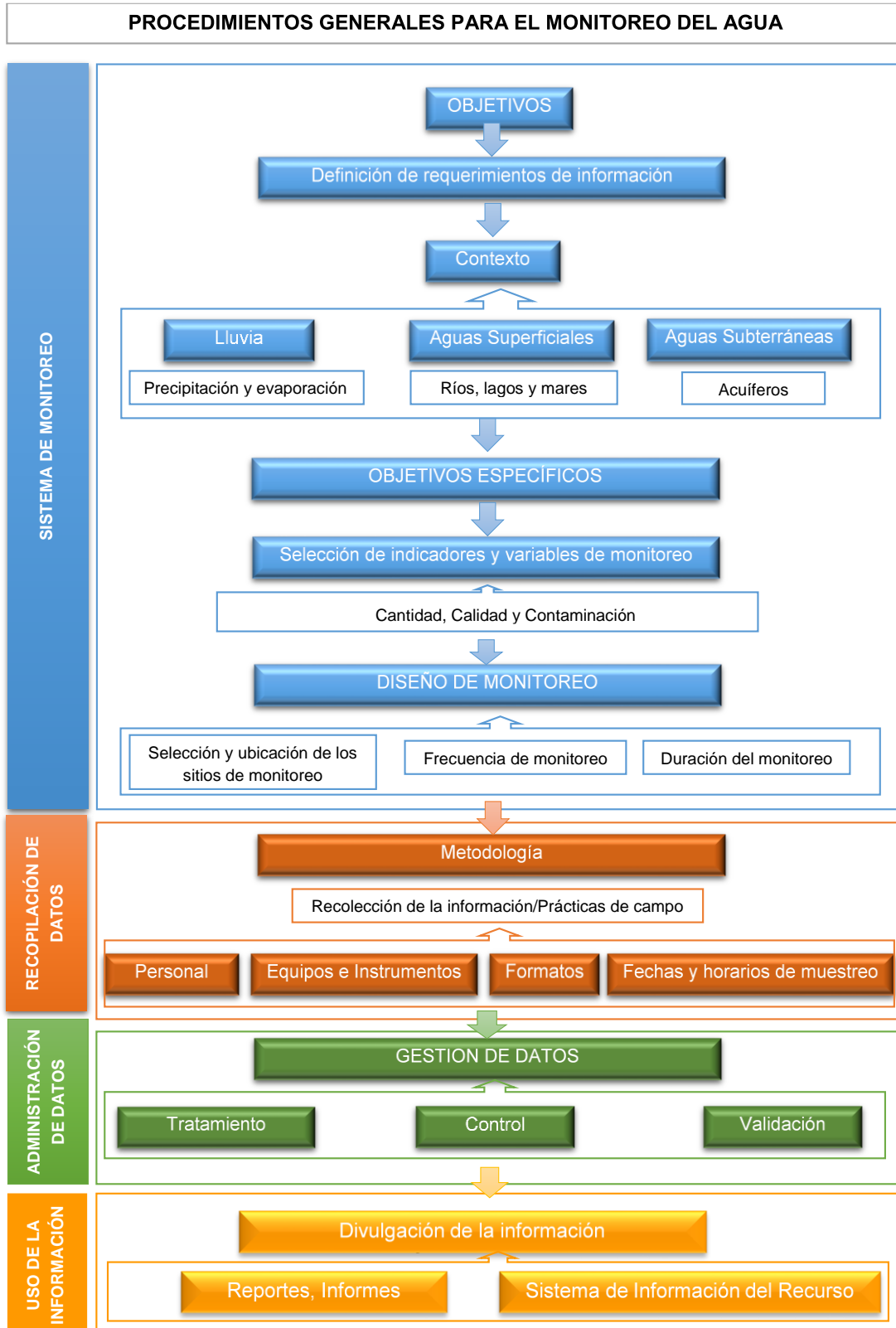


Figura 15. Flujoograma que describe el procedimiento para el monitoreo del agua.

Sistema de monitoreo

En el programa de monitoreo se establece el objetivo general de la campaña de monitoreo, considerando las prioridades, intereses y las necesidades de los usuarios, en cualquier contexto de seguimiento del agua que se adelante ya sea en cantidad (niveles, caudales, sedimentos) y calidad (sedimentos y variables físico químicas y biológicas) de aguas superficiales, aguas subterráneas y aguas marino-costeras.

Una vez definido el objetivo, es necesario identificar los resultados esperados en la campaña de monitoreo, lo que permitirá conocer las deficiencias y las necesidades de la información para el programa del monitoreo. Esto determinará los parámetros que necesitan ser analizados (indicadores y variables), métodos y localización de muestreo, frecuencias, involucrados, administración y registro de los datos, recursos financieros, entre otros.

Establecer los objetivos, es uno de los factores principales para determinar la precisión de los sitios de monitoreo, la frecuencia, la duración, los procedimientos, tratamiento de las muestras (en caso de hacer muestreo de calidad o isotópico), y los requerimientos analíticos. De la misma manera el grado de detalle y la precisión de recolección de información y la el cómo presentar los resultados.

La definición de los objetivos específicos determina los indicadores a considerar del monitoreo, los cuales se pueden componer una o más variables. Para su selección se debe tener en cuenta la relación existente entre la cantidad y la calidad del agua, empleando metodologías entre las que se incluyen: comparación de variables con la normatividad vigente, indicadores de calidad de agua donde a partir de un grupo de variables medidas se genera un valor que califica y cualifica la fuente y metodologías más elaboradas como modelación (Samboní, 2009, citado por Valdes-Basto, Samboní-Ruiz, & Calvajal-Escobar, 2011).

En el momento de realizar la planificación de una campaña de monitoreo, es importante conocer las redes que se encuentran disponibles tanto a nivel nacional como regional, pues estas hacen parte de la información existente y pueden ser de

gran utilidad como fuentes de información para cualquier campaña de monitoreo. En el caso de no existir una red asociada a la zona donde se espera realizar el monitoreo, se debe explorar la alternativa de realizar el montaje de una red en función de los objetivos propuestos en el programa de monitoreo y adicionalmente pensar en incluir los puntos monitoreados en una red regional a partir de acuerdos con la entidad propietaria.

El diseño de una red debe estar basado en el aprovechamiento máximo de los recursos tanto técnicos como económicos al momento de seleccionar, ubicar y determinar la densidad de los puntos a monitorear, la frecuencia y la duración del programa de monitoreo, y la exactitud con que deben ser recogidas las observaciones. Para el caso de la densidad de la red, la cantidad de puntos depende del objetivo, del nivel de red que se está tratando (ya sea nacional, regional, local o específica) y la localización topográfica.

La selección de sitios de monitoreo se debe hacer de tal modo que proporcionen datos representativos: para el caso de calidad, de preferencia en donde haya probabilidad de que ocurran cambios marcados de calidad o donde hayan importantes usos de ríos, en zonas de mezcla o en zonas que no estén afectadas por una descarga, también confluencias, descargas importantes o separaciones. En lo posible se deben seleccionar sitios en donde se disponga de datos relacionados con el flujo.

La frecuencia de observación depende de las necesidades técnicas y de aprovechamiento, sin embargo, se puede aplicar cálculos estadísticos para la definición de una frecuencia de monitoreo. Por ejemplo, si una red tiene como finalidad el control de vertimientos al interior de una cuenca o a lo largo de un cauce en una zona industrial, la frecuencia de muestreo tiene que ser mucho más alta que si se trata de una red que busca determinar el comportamiento estacional de un parámetro de contaminación. Se puede consultar la norma NTC-ISO 5667-1 para detalles de la aplicación de técnicas estadísticas para la definición de frecuencia de monitoreo.

El conocimiento de la zona es indispensable para una buena planificación de la campaña de monitoreo; se recomienda obtener información preliminar del área de influencia a partir de una etapa previa llevada a cabo antes de adelantar el monitoreo (Figura 16).

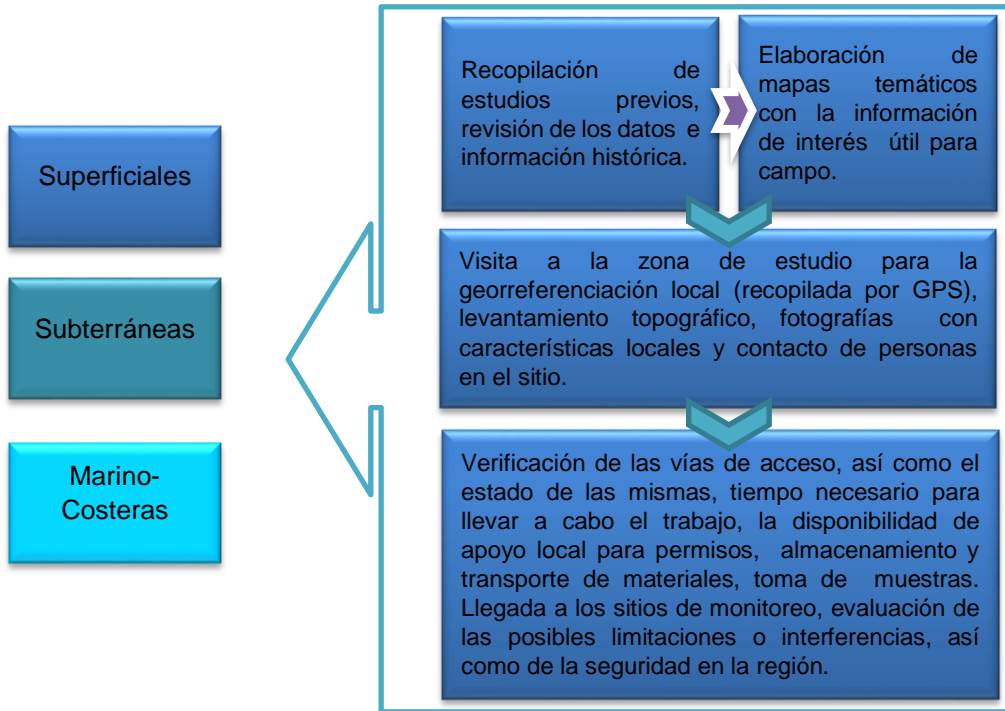


Figura 16. Aspectos a tener en cuenta para la planificación de una adecuada recolección de datos en la etapa de campo.

Con esta visita se podrán definir los procedimientos preliminares para el programa de monitoreo.

Recolección de datos

La recolección de los datos inicia en la ejecución de la campaña de monitoreo, la planificación, el uso de las técnicas apropiadas, procedimientos, la utilización correcta de materiales y equipos.

Teniendo en cuenta lo anterior, se debe contar con los equipos e instrumentos, formatos de captura de información y personal capacitado. Adicionalmente se debe considerar tiempos y horarios, acceso a los puntos de monitoreo y la duración de cada muestreo.

El personal debe tener una idea clara del objetivo y el papel que cada uno juega en el monitoreo, para así lograr un trabajo efectivo. De igual manera, debe encontrarse familiarizado con el manejo de los equipos, por lo que es necesario realizar capacitaciones y formación continua. En campo, el personal encargado del monitoreo, debe disponer de todos los elementos de seguridad necesarios para este tipo de campañas, por ejemplo, línea de vida en la corriente cuando se realiza por vadeo, certificado de manejo de alturas cuando se realiza aforo en suspensión y los elementos de seguridad como cascos, guantes, tapabocas y chaleco salvavidas.

Para campañas de monitoreo con propósitos de modelación y, en algunos casos, para la evaluación y seguimiento del recurso hídrico es necesario establecer programas de tiempo de viaje, con el fin de asegurar la representatividad de las muestras a tomar. Adicionalmente, la previsión con el laboratorio para definir los tiempos de entrega de muestras.

Una vez se lleve a cabo el trabajo de campo, el personal debe realizar una revisión de la información recolectada en los formatos y enviar los muestreos al laboratorio, si es necesario.

Hay que tener en cuenta que, al momento de realizar cualquier medición, éstas deben efectuarse con el debido cuidado para evitar mínimos errores en comparación con la incertidumbre que siempre van a presentar los instrumentos.

Administración de los datos

De manera general para permitir el paso de la adquisición de los datos y su utilización efectiva, se considera un tratamiento, control y validación, difusión y publicación de los datos. Este procesamiento de datos incluye el paso de datos

manuales, a archivos digitales, comprobaciones de coherencia con exclusión de todo el procesamiento estadístico. Antes de que pueda utilizar los datos y a pesar de que están en un formato adecuado, es importante comprobar la fiabilidad y exactitud de éstos. El control permite validar los datos antes de su organización en una base de datos para que estén disponibles para fines operacionales.

Los datos en bruto –tanto en forma de formularios de campo como de gráficas o informes– deberán estar disponibles después del tratamiento. Algunos errores de transcripción y tratamiento podrían no ser evidentes hasta que los examinen los usuarios. También podría ser necesario comprobar las transcripciones de datos originales, o reevaluar la interpretación de una procedencia dudosa efectuada por el operario (OMM, Guía de prácticas hidrológicas, 2011).

La incertidumbre vinculada a la exposición de cualquier instrumento, genera los llamados errores sistemáticos. Estos errores se pueden corregir dependiendo de las aplicaciones de la información. Antes de hacer cualquier corrección es conveniente archivar los datos originales y tratar los datos con mención de medidos o corregidos según sea el caso. Dependiendo del contexto, las correcciones que se efectúen dependerán, por lo general, de las relaciones entre los componentes de error y los factores externos.

Uso de la información

La compilación de datos hidrológicos, ya sean éstos mediciones de precipitación, registros de nivel de agua, mediciones de caudal, datos de observación de aguas subterráneas o de muestreo de la calidad del agua, culmina en una serie de datos de utilidad para la adopción de decisiones. Las decisiones se pueden adoptar directamente a partir de mediciones de datos en bruto, estadísticas derivadas de éstos o resultados de distintas etapas de modelización de datos elaborados, pero los datos obtenidos serán el fundamento de todas las decisiones (OMM, Guía de prácticas hidrológicas, 2011).

Por tanto, finalmente la publicación de la información ya sea en sistemas de

información hidrológica, boletines, (diarios, mensuales, anuales), estudios, informes, investigaciones, entre otros, es la manera de transmitir la información para la toma de decisiones.



TÉCNICAS Y PROCEDIMIENTOS

7. TÉCNICAS Y PROCEDIMIENTOS

A continuación, se describirán las técnicas a utilizar en el plan de monitoreo, se orientará acerca de los parámetros básicos a monitorear, los materiales y equipos a utilizar y los procedimientos para llevar a cabo los diferentes muestreos, en una campaña de monitoreo, para aguas **meteóricas** (precipitación, evaporación, evapotranspiración), **superficiales** (cantidad, sedimentos, calidad), **subterráneas** (cantidad, calidad, isotopía), **marino costeras**.

7.1. Monitoreo de Agua Meteórica

Desde el punto de vista del ciclo del agua, la precipitación y la evapotranspiración constituyen un componente principal en el mismo. Mientras que la precipitación es responsable de depositar la mayor parte del agua dulce en el planeta, la evapotranspiración se encarga de devolverla a la atmósfera para que, por medio de la condensación en las nubes, vuelva a la superficie en forma de precipitación líquida o sólida.

No es posible entender plenamente estas variables sin datos veraces observados en el terreno. Es por esto que realizar mediciones de la precipitación y la evapotranspiración, constituye un proceso de vital importancia en cualquier estudio hidrológico, proveyendo datos precisos y en tipo real que pueden ser trabajadas para calibración de modelos numéricos de predicción, evaluación de amenazas y apoyo en alertas, estudios agrícolas, por ejemplo en lo que respecta al diseño y a la explotación de los embalses y las redes de riego y de drenaje, y en corrección de sesgos en la estimación de información dada por radares y satélites.

7.1.1. Precipitación

Se denomina precipitación a la cantidad de agua, líquida o sólida, que llega a la superficie terrestre procedente de las nubes, como una consecuencia del ciclo

hidrológico, de los procesos termodinámicos del aire y la circulación general de la atmósfera. Dicho término comprende la lluvia, el granizo, la nieve, el rocío, la escarcha y la precipitación de la niebla, y se mide en profundidad lineal, normalmente en milímetros (volumen/área) o en kg.m^{-2} (masa/área) para la precipitación líquida, mientras que para las mediciones de nieve se realizan en unidades de centímetros y decenas.

El ciclo se inicia con la evaporación del agua en los océanos y la transpiración de las plantas. El vapor de agua contenido en la atmósfera se condensa por procesos de enfriamiento y expansión adiabática del aire caliente ascendente; en el trópico se conoce como procesos convectivos, que originan la formación de las nubes. Estas a su vez se trasladan al continente por la rotación de la tierra y precipitan su contenido de agua, cuando las gotitas de han adquirido su tamaño y peso adecuado, para que por efecto de la gravedad caigan a la superficie del suelo. De allí, a través de la escorrentía y la infiltración llegan nuevamente al océano cerrando el ciclo (Sanchez Lancheros, 2006).

En Colombia, el régimen de lluvias puede ser bimodal o monomodal, la cual está determinada por las variaciones espacio- temporales de la Zona de Confluencia Intertropical-ZIC, por la influencia de los sistemas de circulación general de la atmosfera de la zona tropical y subtropical y por la interacción de estos factores con las características fisiográficas del país (IDEAM, 2013).

Cuando la (ZIC) se localiza al sur del país, sobre el Trapecio Amazónico (diciembre - marzo), se presenta allí la temporada lluviosa, mientras tanto en el norte o región Caribe se presenta la temporada seca. Por el contrario, cuando la (ZIC) se localiza al norte del país (junio - agosto), la región Caribe presenta la temporada lluviosa y al sur del país la temporada seca. Para el caso de la región central o Andina, sus características predominantes de precipitación durante todo el año es bimodal, dos temporadas húmedas y dos temporadas secas al año (Sanchez Lancheros, 2006).

Selección de Puntos de Monitoreo

Es importante escoger cuidadosamente el emplazamiento, la forma y la exposición del equipo de medición de la precipitación, ya sea el pluviómetro o el pluviógrafo. Además, deben tomarse medidas para impedir las pérdidas por evaporación, los efectos del viento y las salpicaduras (OMM, Guía de prácticas hidrológicas, 2011)

Los efectos del viento son un factor a considerar para la selección del emplazamiento, ya que estos pueden incidir sobre el propio instrumento reduciendo la cantidad del agua recogida, o estos pueden verse afectados en su trayectoria por el emplazamiento del instrumento, que pueden generar valores en exceso o déficit de la precipitación medida.

Para evitar cualquier perturbación creada por la ubicación del equipo de medición, se debe considerar la relación entre sus dimensiones lineales y la velocidad de caída de la precipitación, el cual se logra seleccionado un punto donde la velocidad del viento al nivel de la embocadura del instrumento sea lo más pequeña posible, sin que exista un obstáculo que pueda retener la lluvia, y/o modificando los alrededores del pluviómetro de modo que la corriente de aire en el orificio sea horizontal (OMM, 2011). El instrumento debe estar ubicado en un terreno plano, horizontal, rodeado de espacios abiertos, con una pendiente inferior a $1/3$ (19°) (OMM, 2008) (Figura 17).

Se puede considerar que el instrumento esté protegido en todas las direcciones de barreras como árboles o arbustos, con una altura uniforme, la cual debe ser de por lo menos la mitad de la distancia entre el instrumento, sin ser excedida por la distancia del instrumento y aquellos (OMM, 2011). Según *la Guía de Instrumentos y Métodos de Observación Meteorológicos* de la OMM, del 2008, la altura de los obstáculos debe tener un ángulo de 14° y 26° y deben tener una distancia equivalente entre 2 y 4 veces su altura (Figura 17).

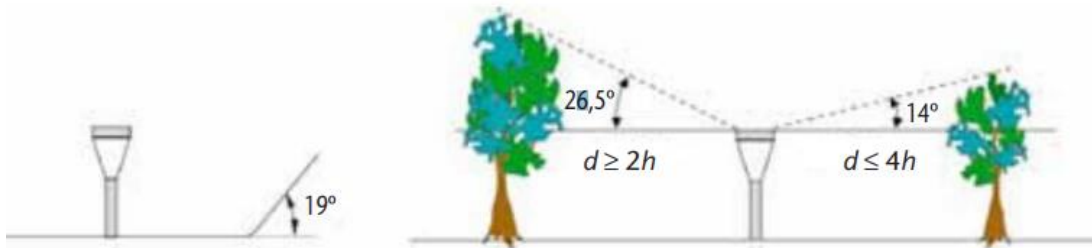


Figura 17. Ubicación del pluviómetro. Tomado de (OMM, 2008).

Otra posibilidad de ubicación es seleccionar un lugar donde se proteja al instrumento del viento, o también suprimir todos los obstáculos situados una distancia igual a cuatro veces sus respectivas alturas (OMM, 2011).

Cuando se defina una protección adecuada contra los efectos del viento, el emplazamiento final de los instrumentos debe considerar que el terreno circundante este cubierto de césped, grava o ripio, para evitar cualquier tipo de salpicaduras. No se recomienda una ubicación sobre superficies como cemento ya que se pueden presentar salpicaduras.

Según la OMM, (2011), el orificio del pluviómetro debería hallarse lo más bajo posible con relación al suelo, dado que la velocidad del viento aumenta con la altura, pero lo suficientemente elevado para evitar que el agua que cae al suelo salpique el pluviómetro.

En zonas inundables, se debe considerar un punto de referencia con una suave elevación y a una distancia prudente de las zonas cubiertas por las crecidas de los ríos.

Si el objetivo es medir la acumulación de agua solida precipitada en forma de nieve o escarcha, el número de puntos de medición en la zona de acumulación está relacionada entre la variabilidad de la acumulación observada en el espacio vertical/horizontal y la accesibilidad de la zona de acumulación (Francou & Pouyaud, 2004). El colector debe ir situado a una altura superior a la altura máxima de la capa

de nieve permisible. Se puede considerar que éste esté instalado en una torre o montado en un tubo de acero.

Como consideraciones adicionales:

- El punto debe ser accesible, con rutas para que el observador realice las mediciones en los tiempos estipulados.
- El observador debe estar disponible y cercano al punto de medición. El observador debe ser alfabeto.
- Debe haber la disponibilidad de potencial de electricidad, para el caso de que se utilicen equipos automáticos.

Frecuencia de Monitoreo

Según la OMM, 2008, los períodos comunes de observación son cada hora, cada tres horas y a diario, para fines sinópticos, climatológicos e hidrológicos. Si se requiere mediciones de intensidades de lluvia muy elevadas en periodos cortos, las mediciones pueden hacerse en intervalos mayores, o si se aplica el uso de pluviómetros totalizadores, las mediciones pueden hacerse en intervalos de semanas o hasta meses.

Se recomienda que la lectura del pluviómetro sea diaria, con horas establecidas como las 07:00 Hora Local Colombiana (HLC); el día pluviométrico se cuenta desde la 07:00 de un día hasta las 07:00 del día siguiente (Sanchez Lancheros, 2006).

Para el caso de pluviógrafos, las gráficas donde se registra el pluviograma, deben ser cambiadas diariamente, a las 7:00 horas de la mañana. Sin embargo, una gráfica puede usarse para varios días, siempre que se hayan presentado lluvias. También hay pluviógrafos semanales y mensuales con operación similar al diario.

Para el caso de nuestros automáticos, se registra la cantidad de lluvia diaria acumulada tomando como parámetro de corte las 7:00 am., esto para coincidir con las mediciones manuales.

Tipos de Medición y/o Métodos de recolección

Existen métodos de medición directa como lo son los pluviómetros y los pluviógrafos, los cuales son los instrumentos más frecuentes utilizados para medir la precipitación. Su uso en mediciones de la precipitación en determinado punto, solo es representativo en una zona limitada, cuyo tamaño depende de la extensión del periodo de acumulación, de la homogeneidad fisiográfica de la región, de la topografía local y de los procesos que intervienen en la producción de precipitación, si es lluvia, llovizna, chubasco, tormenta o nieve (OMM, 2008).

En la práctica, es común el uso de pluviómetros o pluviógrafos en donde se requiera de un observador que realice las mediciones o manipulen los equipos con cierta frecuencia, sin embargo, actualmente las mediciones automáticas están adquiriendo fuerza, ya que las mediciones son más exactas y rápidas en comparación con las lecturas manuales.

Otros métodos de medición pueden consistir en la utilización de radares y satélites meteorológicos, los cuales funcionan integrales con los medidores automáticos, proporcionando estimaciones zonales más precisas de la precipitación, a nivel operativo para una amplia gama de usuarios (OMM, 2008).

Los satélites meteorológicos existentes son de tipo polar-orbital o geoestacionario. Los primeros pasan por los polos normalmente dos veces por día a alturas del orden de 1000 km. Los segundos tienen una órbita más alta de alrededor de 36.000 km, tal que su traslación es sincrónica con la rotación de la Tierra alrededor de su eje (son estacionarios respecto de un punto fijo en la superficie). Esto permite la producción frecuente de imágenes (comúnmente cada media hora o menos aún, hasta cada 5 minutos), lo que es ideal para observar, por ejemplo, rápidos

desarrollos de patrones de tormenta (Diez, 2012). Se encuentran el sistema GOES (Geostationary Operational Environmental Satellite) de EEUU (West, East e Indian Ocean), GMS de Japón y Meteosat de la CEE, que proveen una visión casi continua del tiempo meteorológico global.

Equipos

Para la medición de la lluvia se utilizan instrumentos diseñados como lo son el pluviógrafo y el pluviómetro.

Pluviómetro

Un pluviómetro mide la cantidad de precipitaciones, tanto de lluvia como de nieve, que han caído en un determinado lugar y durante un período específico de tiempo y se expresa por la altura de la lámina de agua en milímetros. Los milímetros (mm) son equivalentes a los litros por metros cuadrados.

Existen varios pluviómetros que emplean una variedad de tecnologías, aunque los tipos más comunes son el pluviómetro estándar, pluviómetro totalizador, pluviómetro con tubo de descarga o el pluviómetro de bascula, o pluviómetros automatizados. La escogencia de algún tipo en específico depende de las necesidades del estudio y del presupuesto, sin embargo es esencial que los métodos de recolección de información permitan obtener datos precisos, confiables y oportunos como sea posible.

El **pluviómetro estándar** es el más común y de construcción más simple. Se encuentran varios tipos en el mercado, lo único que los diferencia es la capacidad de recolección, diseño y material de fabricación. Este tipo de instrumentos, están conformados de un recipiente cilíndrico de varias capacidades cuyo extremo superior tiene una superficie de diferentes áreas.

Los pluviómetros más sencillos están contruidos en plástico, con formato cónico, y tienen capacidades entre los 40 y 70 mm. Normalmente se ubican clavados en el suelo, en una estaca o en un tiesto. Son de uso doméstico.



Figura 18. Pluviómetros de plástico. Fuente: (Raig Instrumentos Metereología- Optica-Precisión, 2017)

Los pluviómetros de mayor capacidad, son aquellos que tiene una forma cilíndrica, y constan de una parte superior recolectora, un embudo y una parte inferior o depósito con una capacidad de 100 y 220 mm. Están contruidos en metal, bien sea acero inoxidable, aluminio y zinc. En este tipo de instrumentos, el agua ingresa a través de un embudo hacia un colector que recolecta el agua. Si las precipitaciones superan la capacidad del colector, el agua se derrama y cae en el cilindro que rodea al tubo de medición (Figura 19) (Raig Instrumentos Metereología- Optica-Precisión, 2017).

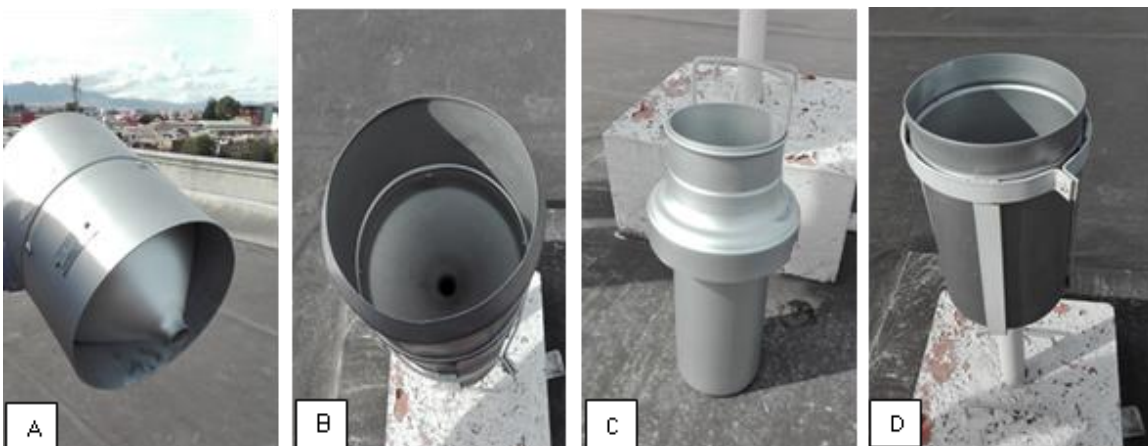


Figura 19. Elementos de un pluviómetro: A y B: Embudo colector, B: Cilindro interior o depósito receptor, D: Cilindro exterior.

Según la OMM, (2011), los pluviómetros deben contar con:

- Un borde en forma de arista para el colector, el cual debe descender verticalmente hacia la parte interior y debe estar biselado en el exterior.
- Un área de abertura, la cual deberá conocerse con una precisión del 0,5 por ciento y la cual deberá permanecer fija.
- Un diseño que impida las salpicaduras desde dentro y fuera. Para ello, la pared vertical debería ser suficientemente profunda y la inclinación del embudo suficientemente pronunciada (como mínimo, 45°).
- Un cuello del recipiente estrecho y protegido contra la radiación solar para minimizar las pérdidas de agua por evaporación. Se puede utilizar una capa fina de aceite (8 mm de espesor) dentro del pluviómetro para evitar la evaporación. Se recomienda utilizar aceites de baja viscosidad y no aceites de silicona. En el caso de utilizar aceites, se debe tener en cuenta la cantidad de solución colocada en el receptor.

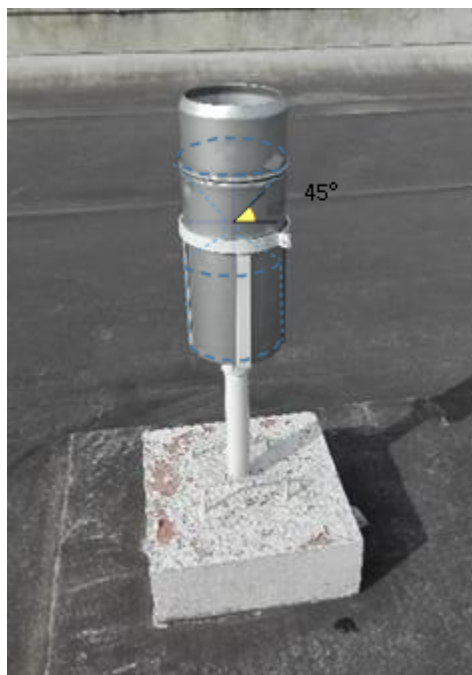


Figura 20. Pluviómetro Estación Edificio IDEAM- Bogotá

Otros comúnmente utilizados son los **pluviómetros electrónicos** de peso o de balancín. El *pluviómetro de balancín* consta de un embudo con las mismas características y medidas de un pluviómetro convencional, pero cuyo embudo conduce el agua a un pequeño columpio cuyos platos son cubetas triangulares de plástico o de metal (Figura 21). Cuando llueve y se colma una de ellas, cae su mitad por efecto del peso, el agua se derrama y se cierra un circuito eléctrico quedando listo el plato opuesto para repetir el mismo proceso. Esta alternancia es registrada mediante un contador y cada balanceo se produce con 0,2 mm de precipitación (Figura 22).

Este tipo de pluviómetro va acompañado de un circuito eléctrico que se dispara cuando la temperatura del aire es inferior a los 4°C; en caso de caer nieve, ésta se transforma rápidamente en lluvia y el dispositivo realiza satisfactoriamente su función. Sin embargo, este modelo no es muy recomendado para precipitaciones torrenciales, ya que cuando la cantidad de lluvia es muy grande, el pluviómetro no puede gestionar correctamente y da lecturas erróneas.



Figura 21. Pluviómetro de balancín. Fuente: (López-Rey, 2017)



Figura 22. Pluviómetro de balancín utilizado en algunas estaciones del IDEAM. Fuente: Área Operativa 11-IDEAM 2017.

El *pluviógrafo de pesada*, registra de manera continua la precipitación acumulada, mediante un mecanismo de resorte o un sistema de pesas que mide el peso del recipiente (Figura 23).



Figura 23. Pluviómetro de peso ubicado en la Sierra Nevada del Cocuy. Fuente: Fotos de campañas de monitoreo de glaciares colombianos, 2006. Archivo Grupo de Suelos y Tierras- Subdirección de Ecosistemas e Información Ambiental- IDEAM. .

El **pluviómetro totalizador**, se utiliza para medir la precipitación estacional total en áreas apartadas o escasamente habitadas. Consisten en un colector situado encima de un embudo, que desemboca en un recipiente bastante amplio para captar las lluvias estacionales (OMM, Guía de prácticas hidrológicas, 2011). Es muy común aplicar una fina capa de aceite (8 mm) para evitar la evaporación del agua.

Para *mediciones de nieve*, se utiliza un pluviómetro totalizador que acumula la precipitación generalmente en un periodo de tiempo de un año. Se recomienda que

este tenga una altura compatible con el máximo de precipitación del año hidrológico, sin embargo, lo más común es que sea un tanque de 1.50 m, con una superficie de captación de 2000 cm³ (Ceballos Liévano, 2015) (Figura 24).



Figura 24. Pluviómetro totalizador de nieve del IDEAM ubicado en el Nevado del Cocuy- Ritacuba Blanco. Fuente: Fotos de campañas de monitoreo de glaciares colombianos, 2015. Archivo Grupo de Suelos y Tierras- Subdirección de Ecosistemas e Información Ambiental- IDEAM.

Se recomienda verter en el recipiente colector, una solución anticongelante-aislante oleaginoso para que derrita la nieve que cae en el instrumento, la cual puede ser una mezcla al 37,5 por ciento de cloruro de calcio comercial (78 por ciento de pureza) y 62,5 por ciento de agua por unidad de peso, o también una solución de etilenglicol. Su volumen no debe ser superior a un tercio de la capacidad total del colector (OMM, Guía de prácticas hidrológicas, 2011) (Figura 25).



Figura 25. Procedimiento de vertimiento de la solución anticongelante dentro del pluviómetro totalizador de nieve del IDEAM ubicado en el Nevado del Cocuy. Fuente: Fotos de campañas de monitoreo de glaciares colombianos, 2012. Archivo Grupo de Suelos y Tierras- Subdirección de Ecosistemas e Información Ambiental- IDEAM. .

También se puede contar con **pluviómetros digitales** que miden al mismo tiempo la precipitación total y la intensidad de la presión. Estos instrumentos efectúan, almacenan y transmiten las observaciones, ya sea a una pantalla o a un dispositivo externo o de forma inalámbrica a una central receptora.

Su funcionamiento se basa en un sistema interno de balancines, que se activan cuando el agua entra a través de un embudo (del mismo modo que los convencionales), generando un volcamiento de los balancines, el cual equivale a un registro de precipitación, normalmente de 0.2 mm. El volcado se transmite eléctricamente como señal y queda registrado en el sistema de almacenamiento central. La frecuencia de volcados es la que da la intensidad de precipitación, expresada en mm/h. Estos instrumentos se vacían automáticamente por la parte inferior, haciendo que la lluvia no se acumule (Raig Instrumentos Meteorología-Optica-Precisión, 2017). El pluviómetro está fabricado en plástico de alto impacto con protección UV para proporcionar fiabilidad.



Figura 26. Detalle de un pluviómetro digital. Fuente: (Direct Industry, 2017)

El IDEAM cuenta con algunos de estos instrumentos instalados en algunas estaciones meteorológicas, las cuales transmiten la información a un datalogger. Pueden medir todos los tipos de precipitación: líquida, sólida o mixto.



*Figura 27. Pluviómetros digitales instalados en algunas estaciones meteorológicas del IDEAM.
Izquierda: Pluviómetro Marca McVan Instrument- Derecha: Pluviómetro Marca MPS Systems.
Fuente: Grupo de Automatización, 2017.*

Otros pluviómetros utilizados son los que transmiten información vía satélite (Goes), al sistema Hydras desde el cual es posible acceder a los datos de cada sensor en tiempo real en la sede central del IDEAM en Bogotá (Figura 28).



Figura 28. Pluviómetro EMMA instalado en el Parque Nacional Natural Los Nevados. Fuente: Fotos de campañas de monitoreo de glaciares colombianos, 2015. Archivo Grupo de Suelos y Tierras- Subdirección de Ecosistemas e Información Ambiental- IDEAM. .

En el caso de que la *precipitación caiga en forma de nieve*, una gran variedad de estos pluviómetros incorporan calefacción en el sistema, así la nieve se funde al mismo momento que cae y ya se convierte en agua, que luego cae a los balancines.

Es de importancia que este tipo de equipos reciban un mantenimiento para evitar que se deterioren o descalibre. Se recomienda tener un pluviómetro analógico que siempre acompañe el pluviómetro automáticos, para verificar los datos recogidos (Figura 29).



Figura 29. Pluviómetro convencional y pluviómetro digital ubicado en la Estación Meteorológica del Bata. Fuente: Campañas de mantenimiento estaciones Área Operativa 11. IDEAM 2017.

Pluviógrafo

El pluviógrafo tiene el mismo principio del pluviómetro, pero con la diferencia que el pluviógrafo permite obtener un registro continuo de las precipitaciones caídas de forma temporal. Permite conocer la cantidad precipitada, la duración (horas de inicios y terminación) y su intensidad (cantidad/hora, minutos) en determinados períodos de tiempo, siendo su unidad de medida es el milímetro (Figura 30).



Figura 30. Pluviógrafo Estacion CO Granja San Jorge (21205720). Fuente: Campañas de mantenimiento estaciones Área Operativa 11. IDEAM 2016.

Consiste en un embudo de cuello alto de las mismas dimensiones que el pluviómetro convencional conectado con un mango hasta un sifón. El agua de lluvia cae dentro de él, y al tiempo que se llena, asciende un embolo sostenido por un material flotante muy ligero. Ese émbolo está conectado con una plumilla que deja una marca sobre un papel graduado que está enrollado sobre un tambor que da una vuelta cada 24 horas o bien cada semana (López-Rey, 2017).

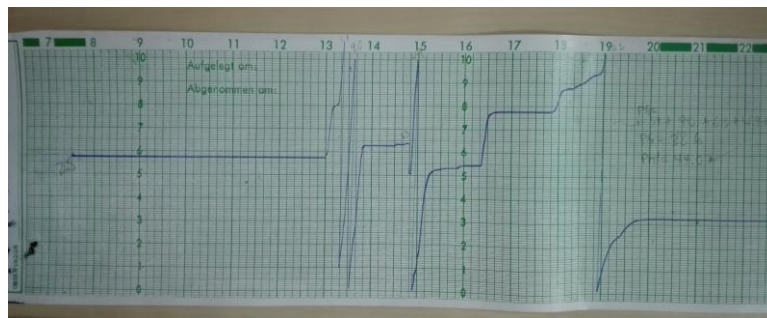


Figura 31. Izquierda: Tambor donde se inscribe la altura de la lámina del agua. Derecha: Grafico de registro continuo de las precipitaciones caídas. Fuente: Campañas de mantenimiento estaciones Área Operativa 11. IDEAM 2017.

El instrumento dispone de un medio automático (sifón) para desocupar rápidamente el recipiente cada vez que éste se llene, de tal manera que la pluma pueda invertir su tendencia de ascenso y se coloque en la parte inferior de la gráfica y así repetir cuantas veces sea necesario hasta registrar la lluvia o aguacero del caso (Sanchez Lancheros, 2006).

Para evitar cualquier pérdida por evaporación, es posible utilizar una cantidad suficiente de aceite, que genere una delgada película sobre la superficie del agua.

Procedimientos para la toma de datos/ Análisis de datos

Para mediciones del agua recogida de un **pluviómetro**, estas se pueden realizar utilizando ya sea una probeta o una rejilla que miden la cantidad de la precipitación en milímetros (mm). A continuación se describe el procedimiento para la correcta toma de datos utilizando cualquiera de estos dos métodos (Sanchez Lancheros, 2006):

- **Probeta:** Es un cilindro de vidrio o plástico transparente graduado en milímetros y décimas de milímetro, dentro del cual se vierte el contenido de agua recogido en el depósito receptor del pluviómetro. Allí se observa, a la altura del ojo, la cantidad de milímetros que ha alcanzado una determinada precipitación, este valor se anota en el Diario de Observaciones.

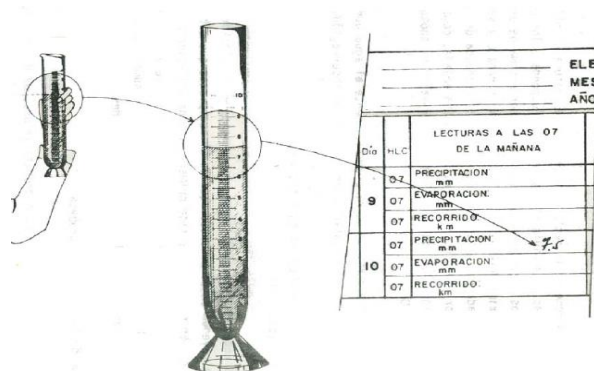


Figura 32. Lectura del pluviómetro con la probeta. Tomado de (IDEAM, 2001)

- Rejilla: Es un trozo de madera similar a una regla para dibujo, pero con graduaciones en milímetros y décimas de milímetros. La medición se hace directamente en el depósito receptor y se siguen las siguientes instrucciones:
 - Se destapa el pluviómetro, quitando el embudo receptor.
 - Se introduce la reglilla verticalmente (sin inclinarla hacia ningún lado) dentro del colector hasta que toque fondo.
 - Se saca la reglilla y se lee hasta donde se note que esta mojada la regla en milímetros y décimas. La división más larga corresponde a los milímetros enteros. Los decimales se cuentan por encima de esa división, aproximando a la línea más cercana por debajo y sobre la marca dejada por el agua en la superficie graduada de la reglilla. Por ejemplo, si la reglilla estaba mojada, como muestra la Figura 33 se leen 12 mm. y este valor se anota en el Diario de Observaciones.

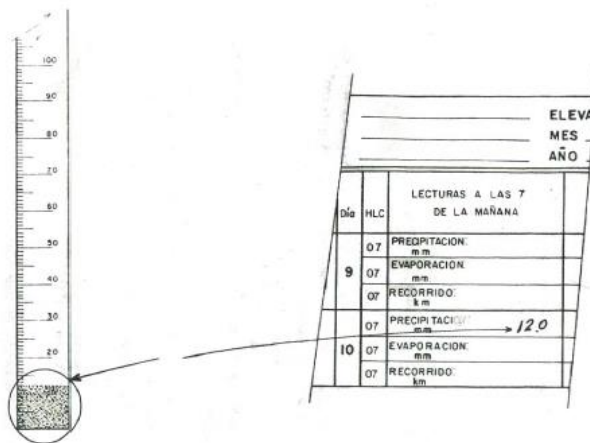


Figura 33. Lectura de pluviómetro con reglilla. Tomado de (IDEAM, 2001)

- Se extrae el colector y se derrama completamente el agua que contenga, con el fin de ponerlo a punto para la siguiente observación.
- Se coloca el colector nuevamente en su sitio y se tapa el pluviómetro con el embudo receptor.
- En el caso de haber utilizado aceite dentro del colector, deben utilizarse varillas de metal u otro material fácil de limpiar.

En ocasiones la lluvia es muy intensa y supera la capacidad del colector, depositándose, parte de la lluvia, en el recipiente que cubre y protege el colector. En este caso se mide inicialmente el agua del colector, se bota luego su contenido y se procede a verter el agua depositada en el protector en la probeta y de inmediato se mide. Se suman las dos lecturas y éste será el resultado final de la precipitación, el cual debe ser anotado en un diario de observaciones.

También es posible medir el volumen del contenido captado, el cual se realiza pesando el recipiente con su contenido, sustrayendo posteriormente el peso del recipiente vacío (OMM, Guía de prácticas hidrológicas, 2011).

Las observaciones de precipitación se realizan diariamente a las 7 de la mañana. La cantidad de lluvia caída en un día (total diario) se cuenta desde las 7 de la mañana de ese día hasta las 7 de la mañana del día siguiente (IDEAM, 2001).

Para el caso de mediciones de un pluviómetro totalizador, se recomienda utilizar un flexómetro, ya que mediante este instrumento se evita variar el nivel del agua acumulada (Figura 34). Si se utiliza una capa de aceite para evitar la evaporación o se utiliza en anticongelante, se deben restar su volumen (Ceballos Liévano, 2015).



Figura 34. Medición con flexómetro de precipitación en un pluviómetro totalizador ubicado en el Cocuy. Fuente: Fotos de campañas de monitoreo de glaciares colombianos, 2005. Archivo Grupo de Suelos y Tierras- Subdirección de Ecosistemas e Información Ambiental- IDEAM. .

Para minimizar errores en lectura y tener una mayor exactitud, las lecturas diarias se redondearán a los 0,2 mm más próximos y, de ser posible, a la décima de milímetro más próxima. Las lecturas semanales o mensuales podrán redondearse al milímetro más próximo (OMM, Guía de prácticas hidrológicas, 2011). Para las mediciones de nevadas se debe considerar una resolución de 0,2 cm (OMM, 2008).

Para reducir los errores sistemáticos vinculados a la exposición del instrumento, como lo son el viento, las mojaduras, la evaporación, las ventiscas de nieve y/o las salpicaduras, la OMM, en el documento *Guía de prácticas hidrológicas OMM-N° 168, Sexta Edición, 2011*, presenta la forma de ajustar los datos considerando los errores y los factores meteorológicos e instrumentales que se puedan presentar.

Debe anotarse cuando no ha llovido, es decir cuando la reglilla se encuentra completamente seca; para este caso se debe hacer una raya horizontal en la casilla correspondiente de la libreta. En el caso que la precipitación no alcance ni un milímetro, se considera muy poca y por tanto se debe reportar que no ha llovido, anotando cero en la casilla correspondiente (Sanchez Lancheros, 2006).

Para el caso de **pluviógrafos**, se aconseja visitar la estación a las 7:00 horas y realizar inicialmente una lectura del pluviómetro y luego, con éste dato, verificar el funcionamiento del reloj del pluviógrafo. Si este presenta anomalías en tiempo o en registro de nivel se debe de inmediato realizar los chequeos de calibración y poner a punto nuevamente el instrumento. Generalmente esta verificación la debe realizar los técnicos especializados en este tipo de instrumentos.

Es importante que los datos recolectados cuenten con un análisis y manejo estadístico, aplicable a este tipo de datos experimentales. En el Anexo A-1, se presentan algunos métodos para análisis de datos de precipitación.

7.1.2. Evaporación, Transpiración y Evapotranspiración

Variables como la evaporación y la transpiración no cuentan con procesos de medición suficientemente representativos que reflejen las condiciones medias en una región determinada. Actualmente algunos instrumentos pueden medir dichas variables, sin embargo, la mejor forma de evaluarlas es a través del concepto de la evapotranspiración.

Se presentan en este apartado, algunos métodos de medición directa, además de algunas fórmulas empíricas comúnmente utilizadas para calcular la evapotranspiración. Se tratarán por separado tanto la evaporación como la transpiración para así poder englobar el concepto de evapotranspiración.

Evaporación

Es la cantidad de agua que pasa del estado líquido o sólido al estado gaseoso, retornando directamente a la atmósfera en forma de vapor. Se expresa como la altura del agua líquida que vuelve a la atmosfera por unidad de tiempo (OMM, Guía de prácticas hidrológicas, 2011).

Este proceso es controlado por parámetros climatológicos como lo son la temperatura, la velocidad del viento, la presión atmosférica, la humedad, la calidad

del agua, la profundidad del agua, del tipo y naturaleza del suelo, y de la forma de la superficie. También factores como la superficie evaporante del suelo, el grado de cobertura y la cantidad de agua disponible en la superficie evaporante, son considerados en el proceso de la evaporación (FAO, 2006).

Se puede expresar como *evaporación potencial*, a la cantidad de vapor de agua que puede ser emitida desde una superficie libre a agua (Hurtado Moreno, 2000).

Transpiración

Es el proceso físico-biológico por el cual el agua de la vegetación pasa a la atmósfera en forma de vapor. El agua almacenada en el suelo en forma de humedad es captada por las raíces de la planta, recorre su estructura y se evapora a través de unas células foliares denominadas estomas (OMM, 2011). Solo una pequeña fracción se convierte en parte de los tejidos vegetales (FAO, 2006).

Al igual que la evaporación directa, en la determinación de la transpiración se deben considerar factores como el gradiente de presión de vapor, la temperatura, la radiación solar, y el viento (OMM, Guía de prácticas hidrológicas, 2011). El contenido del agua del suelo, la capacidad del suelo en conducir el agua a las raíces, la salinidad del suelo y el agua de riego, también determinan la tasa de transpiración (FAO, 2006).

Según la FAO, 2006, factores como las clases de plantas, características del cultivo, prácticas de cultivo, estado de desarrollo del cultivo y el medio donde se produce y su manejo, también deben ser considerados al momento de estimar las variables.

Evapotranspiración

Se denomina evapotranspiración a la cantidad de agua evaporada del suelo y de las plantas cuando el terreno se encuentra con su contenido natural de humedad (OMM/UNESCO, 1992; OMM, 1992, en OMM, 2008). Es la combinación de los

fenómenos de evaporación desde la superficie del suelo y la transpiración de la vegetación.

Se puede definir tanto la evapotranspiración potencial como la evapotranspiración real. Según Moreno Hurtado, (2000), la *evapotranspiración potencial (ETP)* es la cantidad máxima de agua capaz de ser perdida por una capa continua de vegetación que cubra todo el terreno cuando es ilimitada la cantidad de agua suministrada por el suelo; la *evapotranspiración real (ETr)* es la cantidad de agua perdida por el complejo planta-suelo en las condiciones meteorológicas, edafológicas y biológicas existentes, incluyendo el tipo de cultivo, y su fase de crecimiento y desarrollo.

También se puede considerar el término *evapotranspiración de referencia (ETo)* que se define como la ETP de un cultivo de referencia (normalmente gramíneas o alfalfa, de 8 a 15 cm de altura uniforme, de crecimiento activo, que cubre totalmente el suelo y que no se ve sometido a déficit hídrico). Este concepto se ha establecido para reducir las ambigüedades de interpretación a que da lugar el amplio concepto de evapotranspiración y para relacionarla de forma más directa con los requerimientos hídricos de los cultivos (Gómez Blanco, 2017).

La evapotranspiración se expresa normalmente en milímetros (mm) por unidad de tiempo. Esta unidad expresa la cantidad de agua perdida de una superficie cultivada en unidades de altura de agua. La unidad de tiempo puede ser una hora, día, 10 días, mes o incluso un completo período de cultivo o un año (FAO, 2006).

El clima, las características del cultivo, el manejo y el medio de desarrollo son factores que afectan la evapotranspiración. Según la FAO, 2006, los parámetros climáticos que afectan el proceso son la radiación (considerando intensidad y duración), la temperatura del aire, la humedad atmosférica y la velocidad del viento. Con respecto a las características del cultivo, es importante considerar el tipo de cultivo, la variedad y la etapa de desarrollo. Las diferencias en resistencia a la transpiración, la altura del cultivo, la rugosidad del cultivo, el reflejo, la cobertura del suelo y las características radiculares del cultivo dan lugar a diferentes niveles de

evapotranspiración en diversos tipos de cultivos, aunque se encuentren bajo condiciones ambientales idénticas.

Selección de Puntos de Monitoreo

Mediciones de la evaporación

Para la ubicación de un equipo medidor de la evaporación, se debe considerar un sitio que este despejado, sin obstáculos (edificios, torres, arboles, etc.) que proyecten sombras sobre el instrumento a una distancia menor de 20 veces su propia altura.

Para evitar afectaciones producidas por el viento, no deben existir obstáculos mínimos a una distancia equivalente a 10 veces la altura de los mismos. Se debe ubicar en terrenos donde no exista un nivel freático superficial y este debe estar nivelado para facilitar la infiltración y la escorrentía natural, con una ligera pendiente de hasta 0,5%, para evitar encharcamientos. En zonas inundables, el instrumento se instalará de preferencia en una suave elevación y a una prudente distancia de las zonas cubiertas por las crecidas.

Fuera de los requisitos anteriores, debe tenerse en cuenta los siguientes:

- La instalación no debe hacerse en la proximidad de estanques o pantanos son de carácter temporal y en áreas de irrigación o inundación.
- Para la instalación en las cercanías de embalses, se escogen aquellos lugares por donde vienen los vientos predominantes y especialmente los fuertes.
- Además, el sitio debe estar a una distancia tal que no permita la caída, en el tanque de evaporación de agua procedente de los vertederos o transportadas desde lagunas, embalse o cuerpo de agua por los vientos

Como consideraciones adicionales:

- El punto debe ser accesible, con rutas para que el observador realice las mediciones en los tiempos estipulados.
- El observador debe estar disponible y cercano al punto de medición. El observador debe ser alfabeto.
- Debe existir un suministro de agua, para el caso de usar un tanque de evaporación.

Mediciones de la evapotranspiración

Según la OMM (2011), las condiciones generales para seleccionar el emplazamiento de las estaciones evaporimétricas son las siguientes:

- a) el sitio seleccionado debe ser representativo de la zona circundante en lo referente al riego, características del suelo (estructuras y composición), pendiente y cubierta vegetal;
- b) la estación evaporimétrica debe situarse más allá de la zona de influencia de edificios y árboles aislados. No debe ubicarse a menos de 100 ó 150 m de los límites del terreno considerado ni a más de tres o cuatro kilómetros de la estación meteorológica. El lugar elegido para extraer bloques de tierra para la inclusión de evaporímetros y lisímetros debe encontrarse dentro de un radio de 50 m de la parcela de evaporación, y la tierra y cubierta vegetal del bloque debe corresponder a la tierra y cubierta vegetal de la parcela.

Frecuencia de Monitoreo

Cuando se hacen mediciones de la evaporación manuales estas deben hacerse una vez una vez cada 24 horas y siempre a la misma hora del día.

En el caso de muestreo automático de evaporación, se registra tomando como parámetro de corte las 7:00 am, o a una hora que coincida con las mediciones manuales.

Métodos de medida/Métodos de estimación

Existen métodos de *medición directa* que permiten obtener datos exactos de la evaporación y la evapotranspiración para pequeñas masas de agua y de suelo como son los tanques de evaporación, evaporímetros y lisímetros. El uso de evaporímetros y lisímetros permite una medida directa de la evapotranspiración de superficies de terreno diferentes y la evaporación del suelo situado entre espacios cultivados. Estos instrumentos han demostrado ser suficientemente sencillos y exactos siempre que se satisfagan todos los requisitos concernientes a su instalación y a las técnicas observación. La transpiración de la vegetación se estima como la diferencia entre los valores de evapotranspiración y de evaporación del terreno medidos al mismo tiempo (OMM, Guía de prácticas hidrológicas, 2011).

A pesar de sus ventajas en cuanto a precisión, estos métodos no son realmente exactos debido a las fuentes de error y a las limitaciones propias de cada método, por tanto, también pueden considerarse estimaciones a través de los *métodos indirectos*. También, si el propósito son cálculos en grandes extensiones de territorio, es necesario realizar estimaciones a partir de métodos indirectos que arrojan resultados aceptables.

Estos métodos se tratan por lo general de simplificaciones de algunos de los métodos directos ya señalados, que a través de correlaciones entre medidas obtenidas por aquéllos y medidas de una o más variables climáticas o meteorológicas han permitido derivar fórmulas empíricas para estimar la capacidad evaporativa de un ambiente determinado (Sanchez Martínez, 2001). Incluyen el balance hídrico y energético, métodos de tipo aerodinámico, o combinaciones de ambos, los cuales incorporan elementos meteorológicos como lo son la radiación

solar y de onda larga, la temperatura superficial del aire y de la superficie del agua, la humedad atmosférica o la presión de vapor, y el viento.

Entre los métodos directos, se encuentran:

Tanque de evaporación

Mide la cantidad de agua, convertida en vapor, que una masa líquida al aire libre pierde a través de su superficie, durante cierto periodo de tiempo.

Consiste en un recipiente circular (tamaño estandarizado de diámetro=1.20m, altura=0.25 m), construido de hierro galvanizado, fibra de vidrio, zinc o cobre, colocado sobre una tarima de madera que tenga aberturas para una buena ventilación (Figura 35). Puede estar instalados por encima o insertados en el terreno, o también pueden estar en plataformas flotantes ancladas, en la superficie de lagos u otras masas de agua. Cuenta con un tornillo micrométrico o gancho graduado, y un cilindro de reposo (vaso tranquilizador) para la medición del agua en el tanque.



Figura 35. Tanque Evaporimetro clase "A" con Gancho graduado y tanque tranquilizador. Fuente: (Agromatic S.A., 2016)

Se recomienda que el tanque cuente con un anemómetro o anemógrafo integrado y un pluviómetro no registrador, los cuales deben ser instalados cerca al mismo (situado a uno o dos metros por encima del tanque), además de un termómetro que

proporcione las temperaturas máxima, mínima y media del agua en el tanque (Figura 36), considerando que tanto el viento, la temperatura, la humedad, entre otros, incluyen en la evaporación (OMM, Guía de prácticas hidrológicas, 2011).



Figura 36. Detalles del tanque de evaporación. Se observa un termómetro flotante y un anemómetro situado cerca del tanque. Fuente: (Hong Kong Observatory, 2003)

Si las condiciones climáticas y del terreno no permiten mantener una capa vegetal, debe hacerse lo posible para que la superficie del suelo se asemeje a la superficie natural y a los alrededores. No deberá colocarse el instrumento sobre una losa o pedestal de concreto ni sobre asfalto ni capas de grava. (OMM, Guía de prácticas hidrológicas, 2011).

También, si es necesario se deberá protegerse de los pájaros y animales con una pantalla de tela metálica colocada encima del recipiente, o con el uso de repelentes químicos que no contaminen agua en el tanque de evaporación. La ubicación de las pantallas de tela pueden influenciar en el régimen del viento y las características térmicas del tanque, lo que se deberá comparar las mediciones del tanque protegido con otros tanque que no se encuentre cubierto, en la estación más próxima (OMM, Guía de prácticas hidrológicas, 2011).

Actualmente el IDEAM utiliza un tanque de evaporación dotado de un sensor que se monta en un pocillo tranquilizador para medir la altura de la capa superficial del agua en el tanque, obteniendo la cantidad de agua evaporada entre diferentes lecturas, pudiendo detectar variaciones de altura de décimas de milímetro. La

información es enviada a un datalogger que transmite la información a una base de datos (Figura 37).

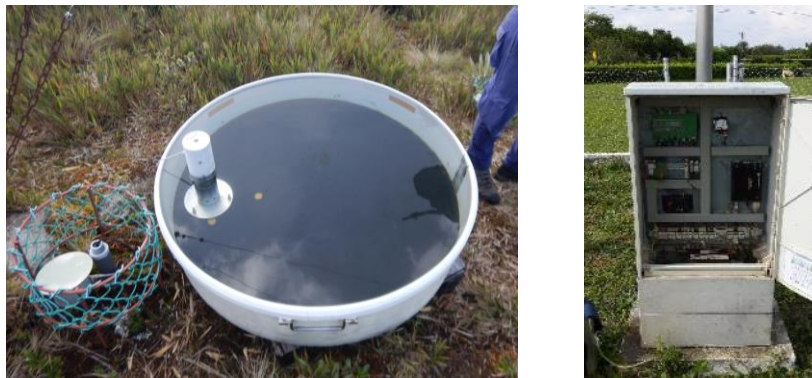


Figura 37. Izquierda: Tanque de evaporación automático y gabinete donde se ubica el datalogger utilizado por el IDEAM en sus estaciones meteorológicas. Fuente: Área Operativa 11-IDEAM.

Fuente: Grupo de Automatización, 2017.

Existen en el mercado otros modelos de tanques evaporímetros automáticos, como el presentado en la Figura 38, que cuentan un sensor que consiste de un flotador, una polea y contrapeso adherido a un potenciómetro de precisión, montados a través de un conjunto de engranajes. El datalogger almacena la información de evaporación (en mm) en su memoria no volátil al mismo tiempo que puede ser visualidad en la pantalla LCD que posee (Agromatic S.A., 2016).

Para el caso de mediciones de **evaporación de nieve**, según la OMM, (2011) los tanques de evaporación deben ser de polietileno o plástico incoloro con una superficie de al menos 200 cm² y una profundidad de 10 cm, y debe ser ubicado al mismo nivel de la superficie de nieve.



Figura 38. Tanque de evaporación automática. Fuente: (Agromatic S.A., 2016).

Evaporímetro

También llamado atmómetro, siendo el más utilizado es el evaporímetro de papel poroso de tipo *Piche*, el cual consiste en un tubo cilíndrico de vidrio de 25 cm de largo y 1.5 cm de diámetro. El tubo está graduado y cerrado en su parte superior, y en la parte inferior presenta una abertura que se encuentra taponada por una hoja circular de papel filtro normalizado de 30 mm de diámetro y 0.5 mm de espesor, fijada por capilaridad y mantenida por un resorte.

Al llenarse el tubo con agua (normalmente agua destilada), el agua se evapora a través de la hoja de filtro, permitiendo calcular la tasa de evaporación en mm en un tiempo determinado. El disco poroso permanece siempre mojado por el agua del tubo. La evaporación se mide leyendo la altura del agua desaparecida del tubo graduado.

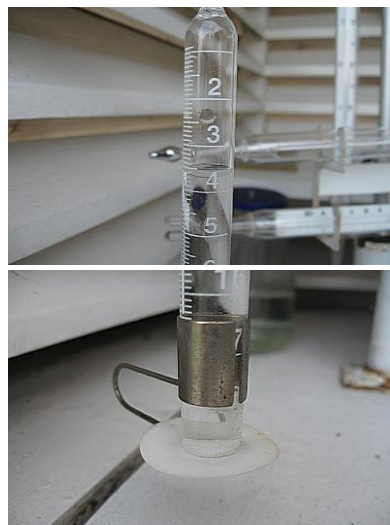
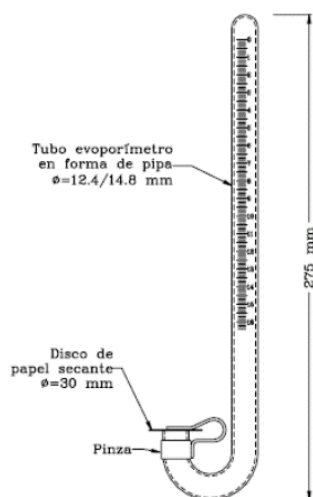


Figura 39. Izquierda: Detalle del evaporímetro Piché. Fuente: (Ruiz Romera & Martínez Santos, 2015). Derecha: Evaporímetro tipo Piche, donde se observa el disco poroso de papel sujeto al evaporímetro mediante una arandela metálica. Fuente: (Pelayo Arce, 2011)

Otros menos usados, son los evaporímetros de balanza, conocidos como el modelo Wild y los recipientes de porcelana porosa. El evaporímetro Wild consiste en un pequeño depósito de 250 cm² de sección y 35 mm de profundidad, lleno de agua e instalado sobre una balanza tipo pesa-cartas, en la que se hacen lecturas sucesivas para medir la pérdida de peso al bajar la superficie de agua por la evaporación (Figura 40).

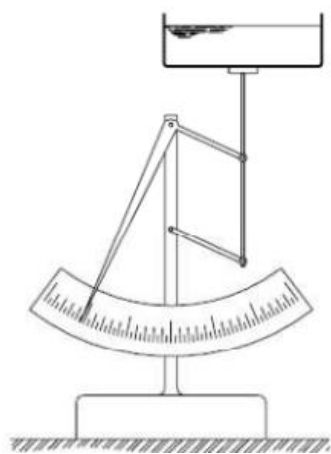


Figura 40. Izquierda: Esquema de evaporímetro tipo Wild. Tomado de (Ruiz Romera & Martínez Santos, 2015). Derecha: Evaporímetro tipo Wild. Tomado de: (Martínez, 2012).

Los recipientes de porcelana porosa, consisten en una esfera de porcelana porosa con un vástago barnizado e impermeable, la cual se adjunta a un tubo de vidrio que entra a una botella con agua. La esfera es alimentada por el vapor de agua que pasa a través del tubo y la evaporación se mide calculando la pérdida de agua del depósito (Ruiz Romera & Martínez Santos, 2015).

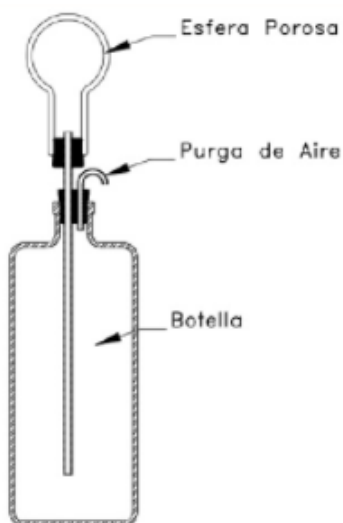


Figura 41. Evaporímetro de esfera porosa tipo Livingstone (Ruiz Romera & Martínez Santos, 2015).

Lisímetro

Son recipientes en el que se coloca el suelo y el cultivo en estudio, ubicados en el campo para representar sus condiciones naturales, aislados del resto de suelos con el propósito de medir exactamente el agua que ingresa (por precipitación o riego) y el agua que sale (por drenaje) en un determinado tiempo en el que se considera que no hay variación en almacenamiento de agua dentro del sistema (FAO, 2006).

Este tipo de mediciones consisten en evaluar los flujos de agua que entran y salen de la zona radicular del cultivo dentro de un determinado periodo de tiempo (FAO, 2006). La siguiente ecuación, deduce la evapotranspiración, a partir de la ecuación del balance hídrico:

$$ET = R + P - ES - D + C \pm \Delta FS \pm \Delta SW$$

En donde:

ET= evapotranspiración

P= precipitación

R= riego

ES= escurrimiento superficial; ; puede ser evitada por el diseño del lisímetro

P= percolación profunda o agua de drenaje

C= capilaridad

ΔFS = transferida horizontal por flujo sub-superficial hacia dentro o fuera de la zona radicular

ΔSW = cambio en el contenido de agua en el suelo

En el caso de los métodos directos, se han propuesto varias ecuaciones empíricas, cuyo uso depende de contar con los datos necesarios para aplicarlas. En el Anexo A-2, se describen algunas de estas metodologías aplicadas a nivel nacional e internacional, compiladas y presentadas en el Informe *Actualización de la variable Evapotranspiración Potencial (ETP) o de Referencia (ETo) para Colombia- Contrato 249 de 2017- IDEAM*, presentado por Gómez Blanco, (2017).

Procedimientos para medición/ estimación de variables

Evaporación

Tanque de evaporación

Una vez elegida la ubicación del tanque, este debe ser llenado con agua limpia hasta un nivel de 5 cm o 7,5 cm de su borde superior. Se debe colocar en la superficie del agua un termómetro de extremas provisto de un flotador para que no se hunda, pero de tal modo que haya al menos 1 centímetro de agua entre el termómetro y el nivel del agua.

Al momento de hacer las mediciones de deberá medir el nivel de agua en el tanque, además de registrar el valor de la precipitación dada en el pluviómetro, el recorrido del viento y la temperatura máxima y mínima. Se recomienda medir el nivel de tanque antes y después de llenar el tanque, el cual debe hacerse siguiendo las recomendaciones de la OMM:

- a) Se puede medir el nivel de agua utilizando el aforador de gancho que consta de una escala móvil y de un vernier dotado de un gancho dentro de una cámara de agua tranquila montada en el tanque. Se puede usar también un flotador. Mediante un recipiente calibrado, se agrega o retira agua en cada observación de modo que el nivel de ésta se mantenga en un valor previamente especificado;
- b) También se puede determinar el nivel del agua mediante:
 - i. se coloca encima de una señal de referencia, hecha en el tanque por debajo de la superficie del agua, un recipiente de diámetro pequeño dotado de una válvula;
 - ii. se abre la válvula hasta que el nivel del agua contenida en el recipiente sea igual con el nivel del agua del tanque;

- iii. se cierra la válvula y se determina con exactitud el volumen de agua contenido en el recipiente mediante una probeta de medida;
- iv. la altura del nivel del agua por encima de la señal de referencia se determina a partir del volumen de agua contenida en el recipiente y de las dimensiones del mismo.

La evaporación diaria se calcula evaluando la diferencia entre los niveles del agua en el tanque en días sucesivos, teniendo en cuenta las precipitaciones durante el período considerado (OMM, Guía de prácticas hidrológicas, 2011). El volumen de evaporación entre dos observaciones del nivel del agua en el tanque se determina mediante la fórmula:

$$E = P \pm \Delta d$$

Donde:

P= altura de las precipitaciones producidas durante el período entre las dos mediciones

Δd = altura del agua añadida (+) o sustraída (-) del tanque.

Las lecturas se hacen una vez cada 24 horas y siempre a la misma hora del día. Se recomienda a las 7 de la mañana, hora local colombiana.



Figura 42. Tanque de evaporación utilizado en las estaciones meteorológicas del IDEAM, dotado de un tornillo micrométrico o gancho graduado, y un cilindro de reposo. Fuente: Campañas de mantenimiento estaciones Área Operativa 11. IDEAM 2017.

Para mediciones de *evaporación de la nieve*, se debe cortar una muestra de nieve con la que se llena el evaporímetro, se determina el peso total y se nivela el evaporímetro con la superficie de la nieve. Se debe tener cuidado de que las características de la superficie de la muestra sean las mismas que las de la capa de nieve sobre la que se sitúe el evaporímetro. Al final del período de mediciones se quita el evaporímetro de la capa de nieve, se seca su superficie exterior y se hace una medida final de su peso. La diferencia entre los pesos iniciales y finales se convierte en valores de la evaporación o la condensación expresados en centímetros (OMM, Guía de prácticas hidrológicas, 2011).

No son válidas las mediciones hechas durante períodos de nevada o de ventisca alta de nieves. Durante el período de fusión de la nieve, se deben pesar los evaporímetros y tomar muestras a intervalos más próximos, debido a que al disminuir el espesor de la capa de nieve queda expuesto el borde del evaporímetro y se altera así el flujo del aire sobre la muestra (OMM, Guía de prácticas hidrológicas, 2011).

Evaporímetro de balanza

El depósito debe ser llenado diariamente hasta que el índice marque cero, y al cabo de 24 horas, la escala mostrará el número de milímetros que ha bajado el nivel del agua.

Métodos indirectos

Para determinar la evaporación utilizando métodos teóricos, se puede utilizar diferentes métodos como el balance hídrico, el balance energético y el método aerodinámico.

El método de balance hídrico está basado en el principio de conservación de masa aplicado a una parte del ciclo hidrológico. La evaporación en un cuerpo de agua natural o artificial queda determinada por la diferencia entre las variables de entrada, precipitación P y caudal de entrada I , y las variables de salida: almacenamiento en las orillas V_s , caudal de salida O y la variación en el volumen de almacenamiento DS .

Existen numerosos métodos de cálculo para estimar la ETP, entre los que se encuentran:

- Los métodos combinados, caracterizados por la fórmula de Penman, llamados así por solo incluir en su formulación los enfoques energéticos y aerodinámicos. Es el más utilizado en las latitudes tropicales.
- Los métodos de radiación en los cuales se incluye al método de la FAO del mismo nombre.
- Los métodos de temperatura, como los de Thornthwaite, Turn, Hargreaves, Blaney-Criddle, entre otros.
- Métodos de evaporación en tanque.

Para tal efecto, se analiza la metodología desde el punto de vista del balance hídrico, cuya expresión general es:

$$P - E_{esc} - ETR - \Delta E = 0$$

P Precipitación en mm

Eesc Escorrentía en mm

ETR Evapotranspiración real en mm

ΔE Término residual de discrepancia, error de medición o estimación.

Como fórmula empírica se utiliza la de TURC, como una ayuda para verificar o estimar la ETR en regiones con deficiencia de información. Para dicho cálculo se utiliza la precipitación y un parámetro heliotérmico en función de la temperatura media del sitio, cuya expresión es la siguiente:

$$ETR = \frac{P}{\left[0.9 + \left(\frac{P^2}{L^2}\right)\right]^{1/2}}$$

Donde

ETR Evapotranspiración real en mm

P Precipitación anual en mm

L Parámetro heliotérmico expresado como:

$$L = 300 + 25\theta + 0.05\theta^3$$

7.1.3. Isótopos estables y radiactivos

Los isótopos del agua, ^2H y ^{18}O , son muy útiles para precipitación, ríos y agua subterránea, debido a su comportamiento conservativo en el agua y a la gran variabilidad en sus relaciones isotópicas $^2\text{H}/^1\text{H}$ y $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$.

La combinación de las medidas del ^{18}O y del ^2H es importante para cuantificar el efecto de la evaporación, y estudiar los procesos de mezcla entre el agua del río y el agua subterránea o precipitación. Ayudando a determinar la variación isotópica de cuencas grandes o pequeñas.

Selección de los puntos de monitoreo

Para la selección de los puntos de monitoreo, la OIEA/GNIP, (2014), recomienda algunas consideraciones en el caso de monitoreo de isótopos estables:

- Hay que considerar la accesibilidad o la disponibilidad del personal para realizar el muestreo.
- La instalación del colector debe hacerse preferiblemente en terreno abierto o con vegetación natural, que no exceda los 0.5 metros. Son aceptables áreas de pastos y con pendientes de hasta $\pm 15\%$. En un área 30 metros próximos al colector, no se debe presentar ningún cambio abrupto de pendiente.
- Se debe minimizar la influencia de estructuras o edificios cercanos al colector. Como regla general, en zonas con edificios, postes, árboles etc. el colector deberá estar alejado de dichas estructuras una distancia igual a su altura (proyectando sobre el colector bajo un ángulo de no más de 45°).

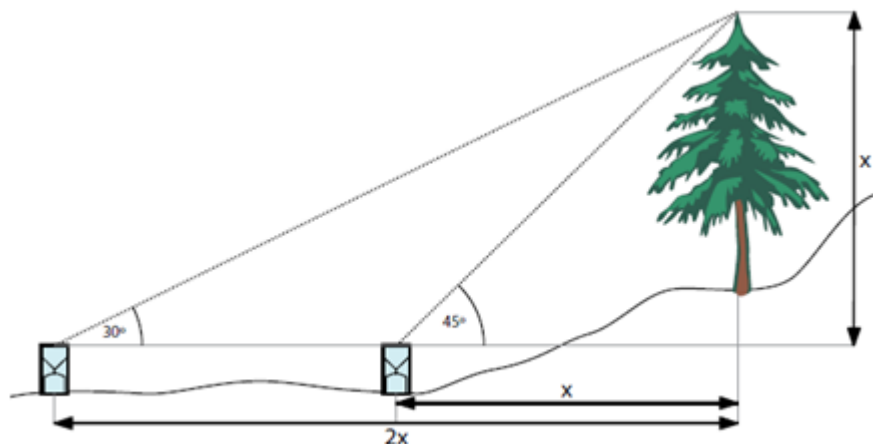


Figura 43. Ubicación del colector minimizando la influencia de estructuras cercanas.

Fuente: (OIEA/GNIP, 2014).

- En zonas muy despejadas, se debe instalar el dispositivo de tal manera que el orificio del embudo se encuentre a aproximadamente 30 centímetros por encima del suelo, con el propósito de reducir las turbulencias causadas por el viento. En zonas con estructuras o vegetación, el orificio del embudo deberá encontrarse aproximadamente entre 100-120 cm por encima del suelo (para reducir los efectos adversos de las estructuras cercanas).

Según (Vélez & Rhenals, 2008) se debe considerar:

- La distribución altitudinal en función de la variabilidad isotópica que puede presentar la lluvia con la altitud, además de tener en cuenta la distribución espacial de la precipitación de la zona de estudio (cantidad de precipitación).

Tipo de mediciones

Medición en colectores de agua lluvia: se utilizan colectores que recolecten muestras de agua lluvia en estado líquido o sólido considerando eventos individuales o muestreos acumulativos integrados.

El muestreo a base de eventos significa que la precipitación será recogida inmediatamente después de un evento lluvioso (o por lo menos una vez al día), mientras que un muestreo acumulativo significa que el agua será acumulada durante un periodo definido de observación (puede ser una semana, un mes, etc.) (OIEA/GNIP, 2014).

Medición de perforaciones en la nieve: En este caso se realizan perforaciones con el objetivo de recuperar muestras para reconstruir la historia de la composición isotópica del ciclo anual de la lluvia. A partir de la cantidad supuesta de nieve caída, se va dividir el perfil en el número de muestras elegidas, y se va a recuperar una muestra media en cada parte al raspar el perfil con un cuchillo plástico o metálico (Francou & Pouyaud, 2004).

Equipos

Para muestreo de isótopos estables en el agua lluvia ^{18}O (Oxígeno 18), ^2H (Deuterio) y ^3H (Tritio)), se deben emplear totalizadores que eviten la evaporación de las muestras. Varios son los diseños empleados de monitoreo de isótopos estables de agua lluvia en el mundo, sin embargo la selección de algún equipo de muestreo depende de las condiciones de accesibilidad o de la disponibilidad del personal para la recolección de las muestras; muchas de estas estaciones utilizan los pluviómetros y otras pueden emplear colectores diseñados conforme a las condiciones que cada región, para una recolección mensual o mayor.

Según OIEA/GNIP, (2014), para la selección de un colector de aguas lluvias es necesario considerar si el muestreo se va a realizar en base de eventos individuales o considerando un muestreo acumulativo integrado. En un muestreo a base de eventos, la muestra deberá ser recogida inmediatamente después de un evento lluvioso (o por lo menos una vez cada día), mientras que en un muestreo acumulativo el agua será recogida durante el periodo definido de observación.

Tomando como referente la Red Global de Isotopos en la Precipitación (GNIP), que maneja sus propios protocolos de muestreo, se presentan algunos de los diseños de colectores que ellos proponen para muestreo isotópico de agua lluvia.

Diseño 1- Pluviómetro Convencional

Para este instrumento, el agua lluvia debe ser recogida después de cada evento en un recipiente de acumulación (Figura 44). La boca de captación del instrumento recibe la lluvia y las transmite a un tubo de medición o colector que está graduado. La escala de medición de este colector, permite identificar fácilmente la lluvia en milímetros.

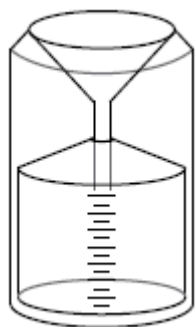


Figura 44. Pluviómetro convencional utilizado para muestreo a base de eventos o con transferencia diaria). A la izquierda esquema del pluviómetro (OIEA/GNIP, 2014), a la derecha ejemplo de un pluviómetro utilizado en la Estación Isotópica de Ibagué- Tolima, que hace parte de la Red Nacional de Isotopía del IDEAM.

Este tipo de instrumento requiere un manejo diario, lo que puede de personal que haga una recolección diaria personal. Hay que considerar que existe el riesgo a evaporación si la muestra de lluvia no es recogida inmediatamente después de que ocurra el evento.

Diseño 2- Totalizador simple con embudo conectado al tanque de almacenamiento

Este diseño consiste un totalizador de acumulación mensual, que permite valores muy bajos de evaporación, el cual recoge el agua lluvia en un recipiente a través de un embudo (Figura 45). Para evitar que se ensucie el recipiente de recolección, es común utilizar una pelota de tenis de mesa o una malla de acero inoxidable dentro del embudo. En el caso de la pelota de tenis, al comienzo de un evento lluvioso, la pelota flotará por encima del agua y permitirá que el agua fluya desde el embudo al recipiente. Después del evento, con el embudo sin agua, la pelota retorna a su posición inicial (OIEA/GNIP, 2014).

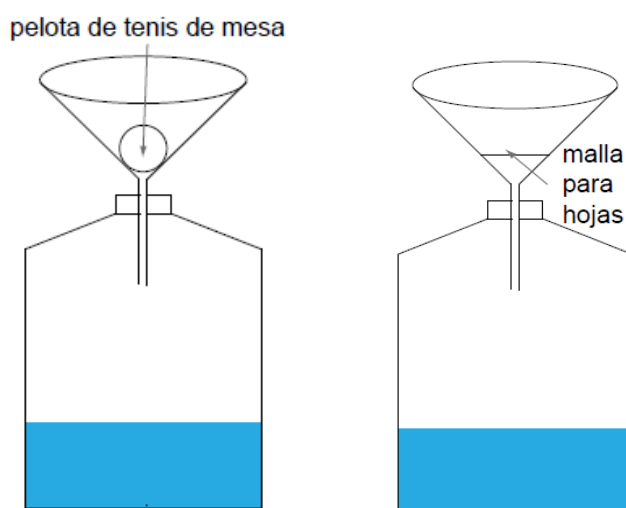


Figura 45. Totalizador simple. A la izquierda, pelota de tenis de mesa dentro del embudo, a la derecha, malla de acero inoxidable dentro del embudo. Tomado de (OIEA/GNIP, 2014).

Para este colector es indispensable conocer la cantidad de lluvia que cae en el sector de instalación para especificar las dimensiones de la botella de acumulación e integración. Además, es necesario que el sistema tenga una balanza o cilindro de medición graduado en caso que no existe un pluviómetro cerca para conocer el valor de la precipitación mensual.

Diseño 3- Totalizador simple con embudo conectado al tanque de almacenamiento y con uso de parafina.

Este diseño recomienda la utilización de aceite de parafina ligera para evitar la evaporación de agua. Este uso es común en totalizadores que no contienen con un aislamiento adecuado. Según la OIEA/GNIP, (2014), el aceite debe ser añadido al tanque recolector en una capa de espesor de unos 0.5 cm para que este flote encima del agua y prevenir su evaporación (Figura 46).

No se deben utilizar aceites aromáticos (p.ej. aceite de bebé) ni aceites pesados que no floten encima del agua. En este caso hay que tener presente que el aceite de parafina puede comprometer los análisis de isotopos estables efectuados a través de espectroscopia laser, por lo que siempre se debe informar al laboratorio en caso de que se use este (OIEA/GNIP, 2014).

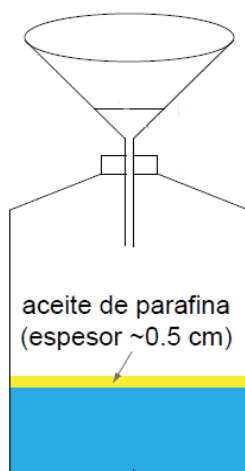


Figura 46. Totalizador con tubo sumergido con uso de una capa delgada de aceite de parafina para evitar la evaporación del agua lluvia. Fuente: (OIEA/GNIP, 2014).

Diseño 4- Totalizador con tubo sumergido y equilibrio de presión

Este diseño consiste en un tubo que conduce el agua desde la salida de un embudo hacia el fondo de un recipiente, permitiendo acumular precipitaciones

hasta por un mes. El embudo de aproximadamente 15 cm, presenta una malla para hojas que evita que se ensucie la botella de recolección de muestra. Un sistema de equilibrio de presión asegura el flujo desde el embudo hasta el recipiente (*Figura 47*).

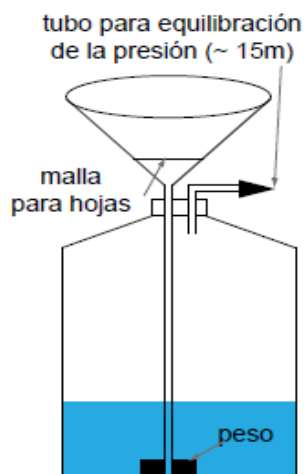


Figura 47. Totalizador con tubo sumergido y equilibrio de presión. Tomado de (OIEA/GNIP, 2014).

La botella que se encuentra en el interior permite la acumulación de precipitaciones hasta por un mes, siempre y cuando su capacidad sea dependiente de la cantidad de lluvia que cae en la zona. Es necesario que el totalizador presente una balanza o cilindro de medición graduado para conocerla precipitación mensual en caso de que no exista un pluviógrafo cerca.

Gröning, y otros, (2012), desarrollaron un colector de agua lluvia que permite un muestreo prácticamente libre de evaporación, colectando muestras mensuales compuestas necesarias para las redes globales de monitoreo de composición isotópica de la precipitación. Este totalizador puede minimizar el tiempo del personal en el muestreo con un fácil y rápido cambio en las botellas de muestreo, además que no considerar el uso de aceites para prevenir la evaporación. Del mismo modo, su construcción es muy económica y su instalación es bastante fácil y puede ser usado en áreas remotas para hacer muestreo mensual.

Para minimizar la evaporación del agua, el diseño reduce la superficie del agua expuesta a la atmosfera, utilizando un tubo de polipropileno suave y estrecho (manguera) de 4 mm de diámetro, alcanzado desde el embudo colector hasta el fondo de la botella de recogida que es de 3 litros (*Figura 48, Figura 50*).

El tubo de plástico se mantiene presionado por un peso de acero inoxidable para asegurar su extremo inferior. Para ajustar la presión de aire en la botella con el nivel de la presión atmosférica que se encuentra en el exterior, de lo contrario si se disminuye la presión atmosférica, el agua en el interior del colector podría subir a través del tubo de plástico hasta el embudo y evaporarse rápidamente. Para esto, la cabeza de la botella cuenta con una conexión permanente con el aire exterior en la tapa con una manguera de polipropileno (diámetro interior de 5 mm) de 15 m de longitud, el cual se encuentra enrollado alrededor del contenedor interno que contiene la botella y está protegido de la luz solar por el recipiente exterior. El embudo está equipado de un tamiz para evitar la entrada de basura o partículas macroscópicas a la botella de la muestra. El extremo superior del embudo está equipado con agujas de metal para reducir la contaminación de la muestra por excrementos de aves (*Figura 48Figura 50*).

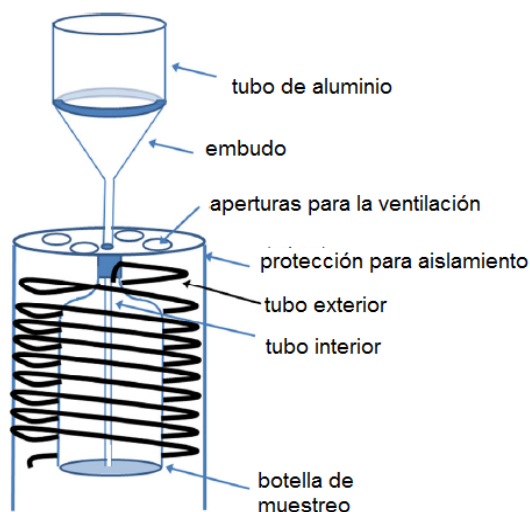


Figura 48. Totalizador simple con tubo sumergido. Tomado de (Gröning, y otros, 2012)

Para evitar grandes cambios de temperatura en el colector de agua, la botella es térmicamente aislada de calentamiento por radiación solar, logrado a partir del uso de un doble contenedor alrededor de la botella. El aire puede circular verticalmente entre el contenedor interior y el contenedor exterior pintado de plata a través de aberturas de ventilación en la parte superior para mejorar aún más el aislamiento de la botella de muestreo a un sobrecalentamiento. El contenedor puede ser montado en un mástil por dos varillas roscadas.

Actualmente, se pueden encontrar en el mercado, totalizadores como el descrito anteriormente, los cuales han sido avalados por la OIEA y la Red Mundial de Isótopos en Precipitación (GNIP), mostrando un excelente rendimiento sobre algunos convencionales (*Figura 49*). Este instrumento puede ser instalado en cualquier lugar, adaptándose a cualquier periodo de tiempo con un ajuste de tamaño del embudo o el cambio del tipo o volumen de la botella.



Figura 49. Totalizador comercial con tubo sumergido. Izquierda Rain Sampler RS1, derecha: Fuente Rain Sampler RS1. Fuente: Información enviada en el 2017 por Palmex d.o.o, para los dos totalizadores que producen.

Diseño 4- Totalizador enterrado

Este modelo consiste en un embudo montado en un mástil, conectado por una manguera a un recipiente ubicado en un hoyo subterráneo, lo que permitiría reducir la tasa de evaporación (OIEA/GNIP, 2014). El embudo es ajustable y cuenta con una malla para prevenir la introducción de hojas, u otro tipo de basura. El recipiente sirve tanto para acumulación e integración de las muestras de agua lluvia. En este caso, es necesario realizar una excavación para introducir el recipiente, sin embargo hay que considerar la necesidad de un sistema de drenaje para la desviación de caudales superficiales, o la posibilidad de realizar actividades de mampostería. El recipiente es colocado dentro de una caja o un material de aislamiento entre el suelo y el mismo y es cubierto por una placa/tapa (Figura 50).

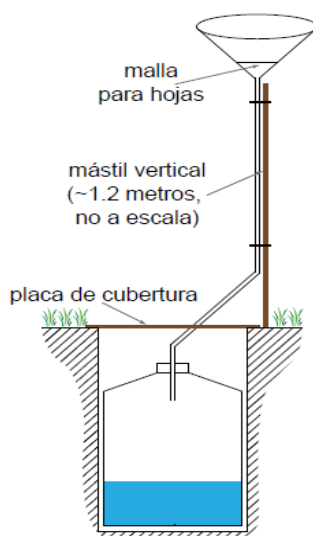


Figura 50. Totalizador enterrado. Tomado de (OIEA/GNIP, 2014)

Para tener en cuenta:

Los embudos pueden variar en diámetro para ajustar el muestreo dependiendo de las condiciones climáticas y los periodos de muestreo, por ejemplo en temporada de lluvia o seca.

A continuación se presenta los volúmenes de agua recogidas en función del diámetro del embudo y de la cantidad de precipitación, los cuales pueden ser usados como referencia para escoger el tamaño del embudo de cada totalizador.

Tabla 1. Volúmenes de agua recogidas (mL) en función del diámetro del embudo y de la cantidad de precipitación (dando ejemplos de pluviómetros bien establecidos: A – pluviómetros de 5”, p.ej. UK Mk2/Mk3 o Nipher; B – Diseño estandarizado OMM, p.ej. Hellmann o Tretyakov; C – NOAA 8”; D – NOAA 12”).

Cantidad (mm)	Diámetro del embudo (área del orificio en cm ²)				
	12.72 (127) ^A	15.96 (200) ^B	20.32 (324) ^C	25.24 (500)	30.48 (730) ^D
0.1	1.3	2.0	3.2	5.0	7.3
0.5	6.4	10.0	16.2	25.0	36.5
1	12.7	20.0	32.4	50.0	73.0
5	63.5	100.0	162.1	250.0	364.8
10	127.0	200.0	324.3	500.0	729.7
50	635.0	1000.0	1621.5	2500.0	3648.3
100	1270.0	2000.0	3242.9	5000.0	7296.6
500	6350.0	10000.0	16214.6	25000.0	36482.9

Fuente: (OIEA/GNIP, 2014)

Muestreo

Toma de muestras

De un totalizador/ pluviómetro

- Durante la recolección, se debe retirar el agua del depósito colector de lluvia inmediatamente después de haberse producido la precipitación, y proteger la muestra de la evaporación utilizando aceite de parafina medicinal (o vaselina medicinal) (Vargas & Bobadilla, s.f).
- Cada muestra debe representar la precipitación integrada de un período de un mes, a partir del primer día del mes hasta el último del mismo (Ibin).

- En el caso que el agua de lluvia se recoja en un pluviómetro normal, debe hacerse una lectura del volumen recogido y posteriormente vaciarse el pluviómetro tan pronto sea posible después de cada precipitación, o sino cada mañana, en un recipiente con tapa y contratapa de plástico, con capacidad para almacenar el agua recogida del mes. El recipiente se debe guardar en un lugar fresco y oscuro para evitar su evaporación. En caso de altas temperaturas y humedad en la zona de muestreo, se recomienda refrigerar el tanque, para evitar evaporaciones que puedan modificar la composición química del agua.

Si se utiliza aceite de parafina para impedir la evaporación, esta se puede transferir periódicamente al recipiente hermético. Al cabo de un mes se puede separar el agua del aceite con un embudo separador o sencillamente retirando el aceite con un sifón. Si quedan algunos residuos de parafina es importante comunicar al laboratorio el uso de esta técnica.

- Si el colector es un totalizador que almacena el agua lluvia por un mes, mida el volumen (mL) de agua lluvia colectada, tras pesar y sustraer el peso del recipiente vacío, o mediante el uso de un cilindro de medición graduado. En éste caso, es obligatorio anotar también el radio del embudo (r_F , en cm). Calcule la cantidad de lluvia según la siguiente ecuación: $ppt [mm] = 10V/(\pi r_F^2)$ (OIEA/GNIP, 2014).

Al cabo del mes, se debe agitar toda el agua contenida en el recipiente hermético antes de llenar los frascos que se han de enviar al laboratorio. Si el aceite de parafina medicinal se encuentra presente, no se debe agitar el recipiente, sino que se debe dejar en reposo durante una semana antes de llenar los frascos. Con esto se obtiene una mezcla adecuada y se evita que el aceite se emulsione con el agua, lo que haría más difícil la separación (Ibín).

En caso del uso de aceite de parafina, se debe separar el agua del aceite; si las muestras se van con algún rastro de parafina, se debe comunicar al laboratorio que se añadió este aceite (de debe anotar en la etiqueta de la botella), para que antes de realizar los respectivos análisis, ésta sea eliminada completamente. En caso que el totalizador tenga un buen aislante térmico que evite la evaporación

no es necesario el uso de parafina, y solo se deben transferir periódicamente al recipiente hermético.

- La muestra debe ser recolectada según los volúmenes requeridos por el laboratorio. Según las recomendaciones de la (OIEA/GNIP, 2014), los volúmenes requeridos en el programa de isótopos estables son de 30-50 mL, y de 500 mL (tritio).
- Después de recolectada la muestra, se debe vaciar completamente el restante del agua lluvia que queda en el recipiente y utilizarlo para acumular la precipitación del mes siguiente.

De una perforación o calicata

Según Francou & Pouyaud, (2004), para monitoreo de O^{18} y Deuterio, se debe considerar la cantidad de nieve caída, a partir de la cual se va a dividir el perfil en el número de muestras elegidas, y se va a recuperar una muestra medida en cada parte del perfil, raspado con un cuchillo de plástico o metálico.

Se debe recolectar alrededor de un equivalente a 10 ml de agua, sin embargo solo con 3 ml es suficiente para hacer un análisis.

Para Berilio 7, el pozo debe ir hasta la capa de nieve del año de acumulación. Se debe limpiar la superficie interna del pozo para evitar la contaminación posible con la pala. Al momento de realizar el muestreo, se debe introducir horizontalmente la botella en la nieve.

Recipientes

Con respecto a los recipientes para muestreo isotópico de aguas lluvia, se recomienda el uso de botellas de vidrio o de polietileno de alta densidad (PE-AD), de capacidad de 30 o 50 ml para el muestreo de 2H (deuterio) y ^{18}O (oxígeno), y del

500 o 1000 ml en PEAD para ^3H (tritio) (**Figura 51**). La cantidad mínima necesitada para el análisis de isótopos estables es de ~20 mL; para isótopos estables y tritio ~300 mL (OIEA/GNIP, 2014). Estos recipientes deben contar con tapa y contratapa para evitar la evaporación de la muestra.



Figura 51. Frascos de muestreo isotópico de ^2H , ^{18}O y ^3H : frascos de 500 mL de polietileno de alta densidad y frascos de vidrio color ámbar de 30 mL, suministrados por la OIEA.

Con respecto a los recipientes de acumulación mensual, deben ser de polietileno de alta densidad (PE-AD) con tapa que cierre herméticamente el contenido. Su tamaño dependerá de las condiciones climáticas y del diámetros del embudo que se utilice en colector (OIEA/GNIP, 2014). Estos no deben ser reutilizados de otras actividades. Si el recipiente presenta un deterioro a medida de su uso, es necesario cambiarla.

Para muestreo isotópico de ^{13}C , se requieren frascos de plástico de capacidad de 2 litros con tapa y contratapa. En el caso de muestro de ^{15}N , se deben utilizar recipientes plásticos de un litro (Vargas & Bobadilla, s.f).

Para muestreo de O^{18} y Deuterio de nieve, se requiere de una botella de unos 30 ml, la cual puede ser adaptada a la cantidad que se requiera que debería ser de 10 ml. Otra posibilidad es recuperar la nieve con la utilización de una bolsa plástica tipo congelación, con cerradura hermética. -Una vez recogida las muestras de nieve, se

debe transferir a una botella plástica o de vidrio oscuro con capacidad de 10 y 30 ml cuando esta se haya derretido (Francou & Pouyaud, 2004).

Para el muestreo de Berilio 7, se deben utilizar botellas de polietileno/polipropileno, cilíndricas de gran abertura con tapa y con capacidad entre 2000 y 4000 ml (Francou & Pouyaud, 2004).

Consideraciones en el llenado de muestras

Para la recolección de muestras de ^2H , ^{18}O y ^3H , se recomienda (Vargas & Bobadilla, s.f):

- Rotular cada frasco antes de llenarlo preferentemente con rotulador resistente al agua, colocando un código sencillo de identificación, lugar de muestreo y sus coordenadas, fecha y hora de recolección o mes de recogida; nombre del recolector; para el caso de recolección de agua lluvia, colocar los valores de precipitación máxima medida; profundidad de muestreo para el caso de recolección de puntos como piezómetros, pozos o aljibes. Se recomienda rotular también el tapón de la botella, repitiendo el código utilizado para la identificación del punto de muestreo.
- Purgar el frasco de muestreo con el agua recolectada mínimo dos veces.
- Colectar la muestra llenando completamente la botella, para no dejar burbujas de aire. (En caso de que las muestras sean enviadas por vía aérea es conveniente llenar solamente 2/3 de las botellas).

Estabilización, almacenamiento y transporte de las muestras

Para el caso de muestras de agua para análisis isotópico ya sea de ^2H , ^3H , ^{18}O , ^{13}C y ^{15}N , las muestras deben ser almacenadas en un lugar fresco hasta su análisis

para evitar su evaporación. Para lugares donde las condiciones de humedad y temperatura sean altas, se recomienda que las muestras sean refrigeradas en el tiempo que se demore su envío.

Identificación de las muestras

Los recipientes de muestras deben estar marcados en forma clara y sin la menor ambigüedad y siempre se debe llenar fichas al momento de recoger la muestra (IDEAM, 2013), con la siguiente información.

La información básica que se debe incluir es la siguiente:

- Código de la muestra;
- Identificación del punto: lugar de muestreo y sus coordenadas.
- Fecha y hora en que se recogió la muestra;
- Tipo de punto de muestreo: totalizador de agua lluvia, piezómetros, pozos o aljibes.
- Cualquier información descriptiva pertinente; para el caso de recolección de agua lluvia, colocar los valores de precipitación máxima medida; profundidad de muestreo para el caso de recolección de puntos como piezómetros, pozos o aljibes.
- Apariencia de la muestra en el momento de la recolección (por ejemplo, color, claridad y olor);
- Resultados del análisis en el sitio (pH, Conductividad, Temperatura);
- Detalle de cualquier técnica de preservación empleada;
- Detalles de cualquier filtro que se haya utilizado en el sitio (por ejemplo, tamaño de los poros del filtro);
- Detalles de cualquier método de almacenamiento de las muestras que se haya empleado o requerido;
- Nombre (o iniciales) de la persona que recogió la muestra.

7.2. Monitoreo de Agua Superficial

El monitoreo de agua superficial permite realizar el seguimiento del comportamiento de los cuerpos de agua, de igual manera permite determinar la oferta disponible en calidad y cantidad, así mismo, genera información de utilidad para comprender y predecir fenómenos climáticos y eventos hidrológicos.

En el monitoreo de agua superficial, es importante identificar el tipo de fuente, básicamente para definir si se trata de fuentes lénticas o lólicas, porque el muestreo de variables y los equipos utilizados en cada uno de ellos es diferente.

En corrientes o fuentes superficiales lólicas se requiere un aforo convencional que mida la cantidad de agua con el respectivo transporte de sedimento y pruebas de calidad físico-químicas e hidrobiológica. Para las fuentes lénticas o aguas estancadas como lagos, lagunas, humedales y embalses se deben realizar batimetrías y pruebas de calidad físico-químicas e hidrobiológica.

En la sección de agua superficial se encuentra información para el monitoreo de Cantidad (niveles y caudales), Sedimentos, Calidad (físicoquímico, hidrobiológico) e Isotopía. Las consideraciones generales de embalses y batimetrías se encuentran en el Anexo B.

7.2.1. Monitoreo de Cantidad

Monitorear los niveles y caudales en ríos, quebradas, lagos, lagunas o embalses, y los niveles de descenso de los glaciares, constituye un modo de control y seguimiento de la cantidad de agua superficial sobre la superficie de la tierra. Lo que se busca con el monitoreo de cantidad es el de poder obtener información veraz, apropiada, confiable y oportuna que permitan dar alertas tempranas para el control de inundaciones y manejo de embalses, un ordenamiento y desarrollo territorial, balances hídricos y gestión integrada de los recursos, el uso para el desarrollo productivo ya sea en obras civiles (alcantarillados, presas, carreteras, etc.), en riego y drenaje en actividades como la agricultura, ganadería y silvicultura,

en agua potable, en generación hidroeléctrica, el impacto en los recursos hídricos a sequías y el cambio climático y hasta en el sector académico de investigación y programas internacionales de intercambio de datos.

La mayor parte de la información, se obtiene de puntos de observación y de medición ubicados en los ríos y cuerpos de agua, denominados estaciones hidrométricas, las cuales pueden estar constituidas por instrumentos de medición automática como limnógrafos o los de lectura directa como es la mira hidrométrica o limnímetro, el limnicontacto y el máxímetro. Otras mediciones como velocidades de las corrientes, utilizan correntómetros o molinetes hidrométricos, como también equipos y accesorios como malacates, varillas de vadeo, contadores de revoluciones, escandallos o tocadores de fondo, muestreadores de sedimentos, molinetes, equipos automáticos para aforo químico para aforos líquidos o sólidos, además, de los instrumentos específicos de topografía y batimetría.

Para el caso de mediciones en alta montaña, particularmente en glaciares, desde, espesores de hielo, retroceso de frente glaciar, el balance de masa glaciológico y las etapas que se emplean para su estimación. Se emplean radares para medir espesores glaciares

De igual forma se presenta la forma de medición de la zona de ablación, que representa la pérdida de masa de una glaciar medida por el sistema de balizas.

Se describen a continuación cada uno de estos instrumentos y accesorios utilizados para las mediciones de las variables hidrológicas nivel, caudal y transporte de sedimento, así como de levantamientos de hidrotopográficos.

La sección de cantidad de agua ha sido elaborada con base en documentos previamente elaborados por el IDEAM: “Protocolo para el seguimiento y monitoreo del agua (IDEAM, 2007)”, “Guía y protocolos de seguimiento y monitoreo del agua”, contrato No C-0427-05 proyecto SINA II (IDEAM, 2006, Sánchez F. D.), Protocolos y Procedimientos de Monitoreo. Contrato 214 de 2010. EPAM e.s.p.

7.2.1.1. Niveles

El nivel de agua (o altura) es la elevación de la superficie de una corriente fluvial, lago u otra masa de agua respecto de un valor de referencia, y su medición puede utilizarse directamente para:

- Conocer el caudal o volumen de agua que pasa por un sitio durante un período dado de tiempo.
- Conocer la amenaza que las crecidas de la corriente representan para las instalaciones o actividades humanas existentes o previstas en las proximidades del cauce, la cual puede manifestarse en forma de inundaciones, destrucción de infraestructuras, viviendas, cultivos, pastos, animales, etc.
- Soportar programas de protección de fuentes hídricas frente a amenazas de origen antrópico, como intervención de cauces, erosión y sedimentación.
- Conocer el nivel de agua alcanzado por los eventos máximos anuales a efectos de determinar el componente hidrológico-hidráulico de la ronda hídrica.

Selección de Puntos de Monitoreo

La selección del sitio o sitios de medición de niveles depende del objetivo del monitoreo. Sin embargo, como generalidad, cuando se va a definir el sitio o sección de medición, se deben considerar los siguientes requerimientos mínimos, para la ubicación de la estación hidrométrica.

- 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.

- La sección debe ser profunda y tener márgenes naturales altas, para evitar desbordamientos en aguas máximas, con lo cual se garantiza la medición de niveles máximos.
- 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.
- 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.
- La geología del terreno deberá facilitar la construcción de las instalaciones para los equipos de medición de niveles

Según la (OMM, Guía de prácticas hidrológicas, 2011), es importante tener en cuenta las condiciones hidráulicas, siendo un factor importante en la selección del emplazamiento en corrientes fluviales, particularmente cuando se utilizan los niveles de agua para calcular valores de caudal.

Una vez definido el sitio, se procede a levantar la **hidrotopografía**, la cual tiene por objeto documentar la topografía del cauce y georreferenciar la estación, con el fin de determinar la cota cero de la mira, tomando como base el sistema de referencia del Instituto Geográfico Agustín Codazzi IGAC. Para este efecto se desarrollan las siguientes actividades:

- Se ubica el punto geodésico/ de referencia (BM, del inglés Bench Mark) o punto de nivelación (NP) más cercano del sistema geodésico nacional del IGAC.

- Se efectúa una nivelación de alta precisión de doble recorrido entre el BM o NP seleccionado y un punto previamente localizado en un punto seguro de la orilla del río, lo más cerca posible a la estación, arriba del nivel de aguas máximas, en un terreno estable que no sufra alteraciones, para evitar su destrucción durante eventos extremos, preferiblemente sobre una estructura permanente como un puente, una roca, etc. Este punto debe materializarse mediante un mojón en concreto, con una placa metálica que indique el nombre de la estación y número.
- La nivelación de precisión debe tener un error máximo acumulativo de $\pm 3(n)^{1/2}$ milímetros, donde n es el número de estaciones de la nivelación. Si el error es mayor, no se debe aceptar la nivelación y se la debe repetir.
- En distancias horizontales (X, Y), la precisión está dada por la diferencia entre las coordenadas del BM IGAC y las obtenidas del recorrido inverso estación-BM. Tal diferencia debe ser inferior a una décima de la distancia representada por un milímetro a la escala del plano de la estación hidrométrica⁵.
- Una vez materializado el BM de la estación y conocidas sus coordenadas por la nivelación de precisión, se deben determinar los elementos principales de la estación, a saber:
 - Nivel del agua el día de la nivelación; se debe registrar la hora de la lectura y marcar este nivel en la cinta de registro del limnógrafo, en caso de que exista (ver más adelante, sección 1.3.1, Instrumentos).
 - Nivel de la superficie de soporte del limnógrafo.
 - Nivel de la solera del pozo (en caso de instalaciones de pozo, ver sección 1.3.2).

⁵ Por ejemplo, si la escala del plano es 1:1.000, un (1) mm a esta escala es 1.000 mm, o sea 100 cm, por lo cual el error en distancia horizontal X o Y no debe ser superior a $0,1 \times 100 \text{ cm} = 10 \text{ cm}$.

- Nivel del cero de mira y de los empalmes de los distintos tramos de la mira y del maxímetro.
- Nivel del punto de referencia de las orillas izquierda y derecha de la sección de aforo.
- Elaboración de diagramas esquemáticos de localización de la mira durante la nivelación.

Frecuencia de Monitoreo

La frecuencia con que se registre el nivel estará determinada por el régimen hidrológico de la masa de agua y por los fines a que responda la recopilación de datos. El intervalo entre registros en una estación dada se decidirá en función de la rapidez con que podría cambiar la altura del agua y de su importancia respecto a la variación del caudal. En el caso de los cursos de agua con crecidas repentinas se necesitará una periodicidad menor, mientras que para las grandes corrientes fluviales la periodicidad podrá ser mayor (ISO, 1981, en OMM, 2011).

Para medir corrientes fluviales pequeñas o con crecidas repentinas y cuencas de drenaje urbanas será necesario registrar más frecuentemente la altura del agua, con el fin de obtener un hidrograma suficientemente aproximado (OMM, Guía de prácticas hidrológicas, 2011).

En Colombia, y por recomendación y estandarización mundial de la Organización Meteorológica Mundial (OMM), para medición de niveles en corrientes (ríos, quebradas, arroyos) y cuerpos de agua (embalses, lagunas), en estaciones cuya observación sea directa con un observador local, la información debe ser tomada diariamente, realizando dos lecturas, a las 6 a.m. y 6 p.m., (06 y 18 horas) y lecturas extras si ocurren crecientes. Para los casos en que solo se requiere calcular las variaciones del almacenamiento, bastará con medir diariamente la altura del agua en lagos y embalses, (OMM, 2011).

En el caso de uso de instrumentos automáticos, las mediciones se harán con la mayor frecuencia posible. Esto dependerá de la capacidad de batería y memoria de almacenamiento de datos con que cuenten dichos elementos (OMM, 2011).

Finalmente, si se utilizan sistemas telemetría, los datos se registrarán cuando la altura del agua varíe en una magnitud predeterminada (OMM, 2011).

Tipos de Medición

La medición de niveles, se realiza teniendo en cuenta dos tipos de observación: Observación directa, observación registro continuo.

Observación Directa o Discreta: Consiste en la medición directa del nivel del agua a una hora determinada mediante la utilización de instrumentos (mira hidrométrica ó limnómetro, maxímetro, limnicontacto) con diferente conformación física. Este tipo de observación es la más sencilla y económica, sin ser la más precisa, ya que requiere que los datos sean obtenidos por un observador en horas fijas establecidas por la Organización Meteorológica Mundial, con el propósito de estandarizar estadísticamente el origen de las series históricas y los procedimientos para el manejo de las mismas.

Observación Registro Continuo: Consiste en el registro permanente del nivel del agua a través de equipos automáticos mecánicos o digitales, Este tipo de observaciones permite obtener un detalle permanente y preciso de las variaciones de los niveles en las distintas épocas hidrológicas, es decir, en temporadas húmedas, secas e intermedias.

Sin embargo, los costos de estos equipos limitan su operación, pero por eficacia y exactitud ha sido indispensable su instalación.

Equipos

Teniendo en cuenta el tipo de medición, existen diferentes equipos, para la medición de niveles. Entre ellos se encuentran:

Instrumentos para observación directa

Limnímetros

La mira hidrométrica o limnímetro es una regla graduada dispuesta en tramos de (1) metro, que se utiliza para medir las fluctuaciones de los niveles del agua en un punto determinado de una corriente o de un cuerpo de agua, como se observa en la Figura 52.

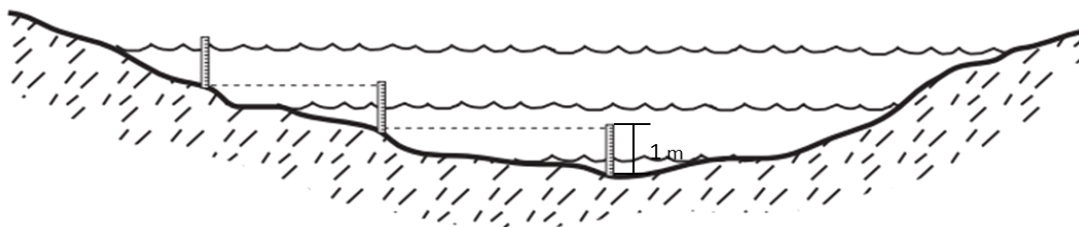


Figura 52. Escala Limnimétrica. Fuente. (OMM, 2011)

Las miras pueden ser construidas en varios materiales:

Hierro fundido. La numeración va fijada en alto relieve, con lo cual dichos caracteres no se borran, garantizando la durabilidad de este elemento y la confiabilidad de los datos.

Lámina esmaltada. Están limitadas por la fragilidad del esmalte, por lo cual se recomienda su uso en corrientes que no tengan arrastre de rocas o palizadas que las puedan dañar.

Lámina pintada. Estas miras tienen poca duración, debido a que la pintura se deteriora fácilmente en el tiempo; tienen la ventaja de ser más baratas y de fácil construcción.

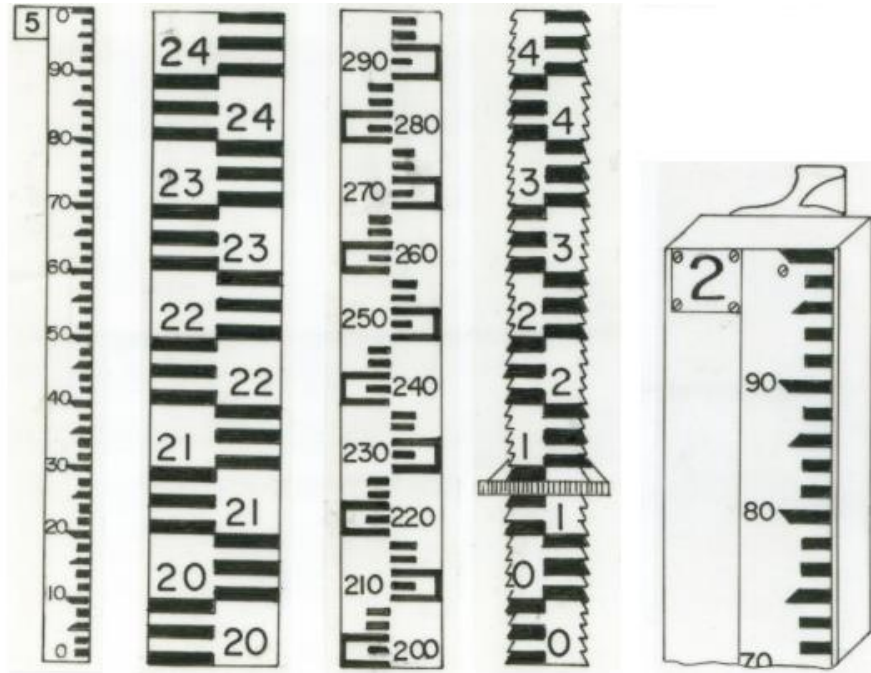


Figura 53. Tipos de miras hidrométricas. Tomado de (Pérez, 2005)



Figura 54. Mira de lignímetro Estación La Laja.

Para su instalación, se deben considerar los siguientes requerimientos:

- ❖ Deben ser instaladas sobre la orilla próxima al sector más profundo del cauce, cuidando que la cota cero quede a 0.5 metros por debajo del fondo del cauce para ríos pequeños, y 0.5 metros por debajo del nivel de aguas mínimas, en ríos grandes. El extremo superior del limnómetro debe sobrepasar por lo menos en un metro el nivel máximo de la creciente posible o la registrada históricamente según huellas y/o información de los habitantes de la región.
- ❖ Las misas deben tener una buena fijación, que garantice que no se produzcan movimientos verticales que alteren las lecturas. Para ello se recomienda su instalación en sitios estables como en rocas, pilas de puentes, muelles, u otras estructuras resistentes (Figura 55).
- ❖ En el caso que sea imposible encontrar una estructura estable, se recomienda fijar los limnómetros en rieles, listones de madera, perfiles de acero, estructuras en concreto o talud en roca (Figura 55).
- ❖ Las miras deben ser colocadas de tal manera que permitan una fácil operación; se deben leer con comodidad, seguridad y precisión, en consecuencia, deben tener facilidades de acceso.
- ❖ Su instalación se hará de tal manera que el plano cero de la mira esté referenciado a un (BM) que en lo posible esté ligado a la red de nivelación del IGAC, a fin de verificar periódicamente la cota cero o para restituir con precisión la posición inicial en caso de ser removidas (robadas) o destruidas por eventos naturales. Este punto o BM deberá estar colocado en un sitio seguro, arriba del nivel de aguas máximas y en un terreno estable que no sufra alteraciones.

- ❖ Su instalación no debe obstruir los perfiles transversales de la corriente.



Figura 55. Fijación de las miras. Derecha: Estación Puente reyes, río Guavio, Fuente: Área Operativa 11- IDEAM 2017.

Maxímetro

El máxímetro, es un dispositivo asociado a una mira limnimétrica, que permite con posterioridad determinar el nivel alcanzado por el agua, (Figura 56). Se caracteriza por ser un instrumento medidor de crecientes en los ríos, por cuanto en ellos queda registrado el nivel máximo alcanzado.

Existen varios tipos de máxímetros, entre los que se encuentran:

Maxímetro de tubo: en este instrumento, el agua se deposita en un conjunto de recipientes que se encuentran colocados dentro de un tubo con perforaciones laterales que permiten la entrada del agua, borrando una señal previamente pintada o dejando una huella en un corcho adherido a las paredes interiores de un tubo.

Estos recipientes tienen 5 cm de altura y se construyen en vidrio, latón, tubo galvanizado o PVC; van colocados dentro de un soporte cilíndrico que se introduce

en un tubo galvanizado, que a su vez es fijado mediante platinas en los extremos a una estructura estable metálica o de concreto.

Maxímetros de placa graduada: son aquellos que se pinta con tiza o cal, la cual va dentro de un tubo perforado u otra estructura que admite el acceso de agua. Al subir el agua la tiza es lavada hasta el nivel máximo alcanzado por la corriente de agua, quedando de esta forma el registro de dicho nivel.

Otros tipos diseñados y construidos en fibra de vidrio: entre estos pueden considerarse los que corresponden a un tubo de 1 metro de longitud, graduado en centímetros y decímetros, con cinta adhesiva que al contacto con el agua cambia de color, indicando así la altura alcanzada.

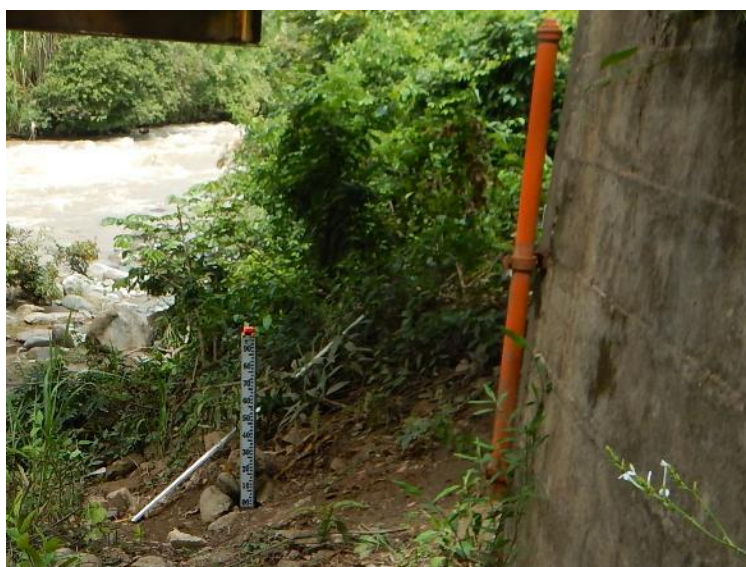


Figura 56. Maxímetro. Estación Puente Venado, río Venado. Fuente. Área Operativa 7- IDEAM 2017.

Las dimensiones más usuales que conforman el maxímetro son las siguientes:

- Diámetro del tubo 2.5 pulgadas (6.35 cm) puede ser de hierro galvanizado o PVC.
- Longitud de 1 m o 1.50 m.

El maxímetro se instala generalmente a continuación del penúltimo metro de mira, al igual que en el caso de los limnímetros, para su instalación se deben seguir los mismos patrones y requerimientos técnicos que garanticen una buena fijación y comodidad para realizar las lecturas con exactitud. Igualmente debe ligarse topográficamente al mismo punto de referencia de las miras y el cero (0) del maxímetro debe coincidir con un valor del limnímetro que sea múltiplo de 0, es decir, 3.50, 4.00, 4.30, 4.70, 5.20, etc.

Mantener los recipientes en buen estado, el lavado del tubo y los vasos, hace parte del mantenimiento del maxímetro.

Limnicontacto

El limnicontacto o sonda indicadora de nivel, es un dispositivo simple constituido esencialmente por una polea, un contrapeso y un flotador unidos por un cordel o cable abscisado para facilitar la medición. Según el nivel de agua el cable se desplaza con relación a un punto de referencia, permitiendo así obtener la lectura de nivel, La mira propiamente dicha, colocada sobre las estructuras superiores de los puentes, está conformada por placas metálicas de 1 metro.

Existen varias clases de limnicontacto o sonda, siendo las más usadas la sonda luminosa o eléctrica y la sonda de presión. Normalmente estas sondas se colocan en la parte superior de un punto de medición y con una sencilla manipulación se desciende el cable por medio de una manivela.

- Limnicontacto tipo sonda luminosa: consiste en una cinta graduada que tiene un dispositivo al final, que al hacer contacto con el agua emite un impulso eléctrico que enciende una lámpara de señal o envía señales acústicas (Figura 57).
- Sonda de presión manométrica con o sin terminal de datos: consiste una célula capacitiva de cerámica, que mide la presión hidrostática de la columna de agua a través de una membrana de presión que la transforma en señal

eléctrica. También puede hacer mediciones de temperatura y conductividad (Figura 57).

Tiene una carcasa y un cable de longitud estable garantizan que pueda utilizarse para las tareas más diversas de medición del nivel de agua y que se pueda conectar sin problemas a distintos tipos de registradores de datos o de sistemas de control de proceso. Los valores medidos pueden ser leídos en una pantalla (display) o almacenados en un colector de datos incorporado en el cuerpo de la sonda.



Figura 57. Izquierda: Sonda luminosa cuya operación es de manivela. Derecha: Sonda con sensor de presión. (OTT Hydromet, 2017)

La instalación del limnicontrato se hace generalmente sobre barandas de puentes, en lugares que permitan medir toda la gama de variación de niveles. La parte fija de esta instalación es el punto de referencia y los demás elementos el observador los instala en el momento de la medida.

El sitio elegido para el contacto del flotador con el agua debe estar alejado de la línea de velocidades máximas, para evitar la inclinación (ángulo) del cable por el arrastre del flotador.

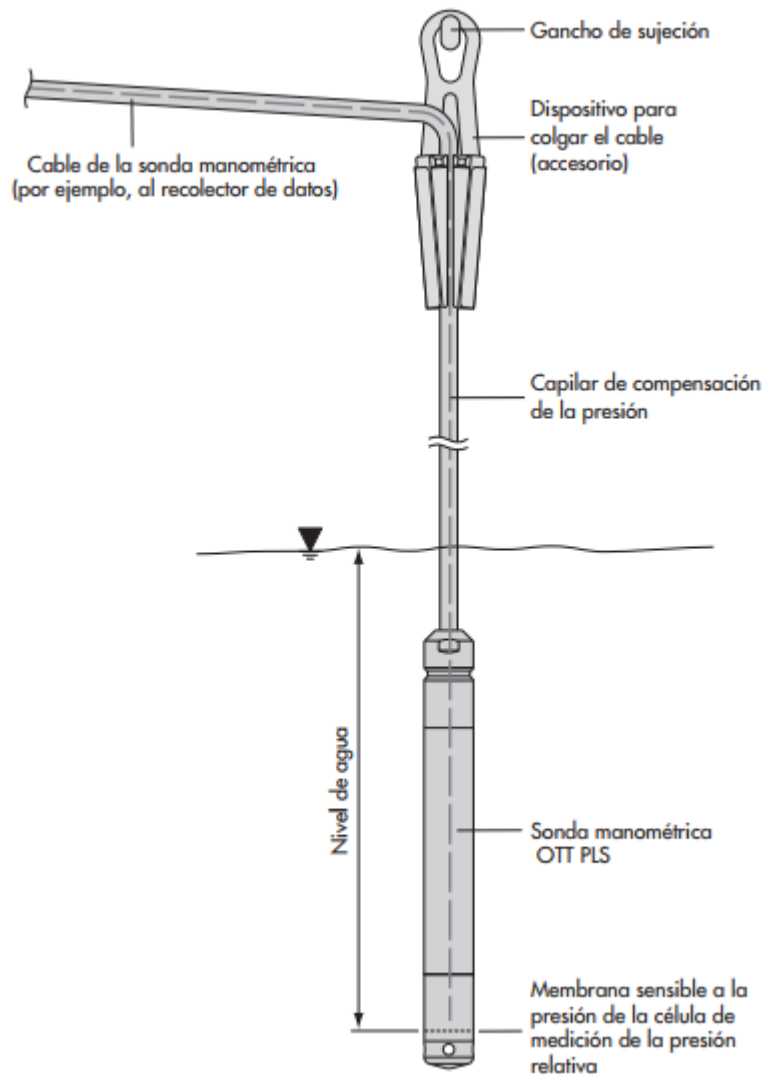


Figura 58. Montaje de un punto de medición de nivel de agua provista de una sonda manométrica (OTT Hydromet, 2017)

Instrumentos para observación continúa

Limnógrafos

Es un equipo automático con el cual se obtiene un registro continuo de los niveles del río que registra continuamente los niveles de agua en el transcurso del tiempo. Su instalación es esencial en las corrientes cuyo nivel este sujeto a fluctuaciones.

Se pueden encontrar limnógrafos mecánicos o digitales, cuyo uso depende de los recursos financiero con que cuente el programa de monitoreo.

Limnógrafos mecánicos. Está conformado fundamentalmente por tres dispositivos: el primero corresponde al elemento sensible, que puede ser un flotador y contrapeso o un manómetro, el segundo es el sistema que traduce a escala y registra los niveles del agua (eje helicoidal, poleas de escala y mecanismo de registro), y el tercero proporciona una escala de tiempo, basado en un mecanismo de relojería y alimentado mecánicamente (cuerda) o por medio de baterías.



Figura 59. Limnógrafo (Ochoa, 2013)

La instalación del limnógrafo se hace en una caja hermética (Figura 60), la cual protege los equipos de los factores del clima, animales y comunidad.



Figura 60. Limnógrafo Izquierda. Estación Agroyaco, área operativa 7, Derecha. Estación las animas, río Chochal área operativa 11. Fuente. IDEAM 2017

En este limnógrafo, el contacto con la superficie del agua se establece por medio del flotador, ligado a través de un cable provisto de contrapeso que acciona una polea. Cuando la instalación es directa a la corriente del agua o cuando hay pozo quietador, el flotador se encuentra dentro del tubo cono o dentro de la estructura del pozo, conectado, en este último caso, hidráulicamente a la corriente por el principio de los vasos comunicantes, a través de tuberías de aguas máximas, medias y mínimas.

En el equipo manométrico, la presión del agua se transmite a través de una tubería que contiene gas el cual a su vez se acopla a un mecanismo de inscripción. Existe el limnógrafo manométrico estático, en el cual el gas permanece encerrado en la tubería, y el limnógrafo manométrico de burbujas, en el cual la tubería es alimentada con un leve flujo de gas que burbujea lentamente por su extremo abierto.

El limnógrafo manométrico estático funciona con base en aire y dispone de una bomba manual que sirve para reponer el aire que se pierde por fugas en la tubería. Al ser inyectado el aire a la tubería pasa por un medio disecante, como ácido sulfúrico. La parte terminal de la tubería que se encuentra en contacto con la corriente, se halla abierta hacia abajo en forma de campana o bien cerrado con una colchoneta o vejiga compresible.

El limnógrafo manométrico de burbuja es alimentado a presión con un gas, generalmente Nitrógeno, que burbujea a través de la tubería, asegurándose así que permanezca libre de obstrucciones. Para asegurar el funcionamiento de éste tipo de limnógrafo, se necesita un cilindro del gas especificado por el fabricante de los equipos.

Entre los mecanismos de registro gráfico utilizados para limnógrafos de flotador o de manómetro se encuentran los de tambor y los de banda. Los primeros tienen una duración de registro limitada por el tamaño del tambor y se fabrican habitualmente para una duración de 1 a 30 días. Los limnógrafos de banda tienen una cuerda o batería de larga duración mayor a 90 días y no exigen, dentro de este plazo, una fecha fija de inspección y cambio de papel. En cada inspección se recorta la parte registrada de la banda que transita de una bobina de alimentación a otra de recepción.

En el limnógrafo de banda el avance del papel es generalmente del orden de 2 mm por hora, y la altura útil de registro de 250 mm, pero muchos modelos de éstos instrumentos contemplan la posibilidad de cambiar la velocidad de avance y la escala de medición por intercambio de engranajes y poleas. Los dos tipos de limnógrafo cuentan con un dispositivo que amplía indefinidamente el rango de registro de niveles y que se conoce con el nombre de inversor de escala, mediante el cual el registro no se detiene cuando llega al tope de la escala, sino que continúa registrando en sentido inverso.

La inscripción se realiza con lápiz o tinta sobre el papel corriente o por medio de un estilete sobre papel encerado, observando que los lápices o minas de grafito proporcionan un registro seguro, pero poco nítido, por lo que generalmente se prefiere la inscripción con tinta. En los limnógrafos de tambor, de duración limitada, se usa frecuentemente una plumilla en forma de tetraedro que se recarga en cada inspección, en cambio, los limnógrafos de larga duración vienen provistos de una plumilla de tipo capilar unida a un depósito de tinta.

En ocasiones, el sistema de inscripción basado en tinta se convierte en fuente de perturbaciones por fallas de la plumilla; en estos casos se opta por un sistema de inscripción basado en un estilete que registra por presión sobre papel encerado de mayor costo, exigiendo además manipulación cuidadosa debido a que por su sensibilidad se originan registros ante cualquier presión que se haga sobre el mismo.

Alternativas como la satelital, transmisión de datos en tiempo real (momento de ocurrencia del evento), vía radio, teléfono o celular, han venido siendo acogidas por las Corporaciones Autónomas Regionales o las Autoridades Ambientales Urbanas para el control hidrológico y la gestión ambiental incluyendo la prevención de desastres.

Para el funcionamiento permanente del equipo, con producción de datos de buena calidad, se requiere de la disposición de operarios con buen conocimiento sobre la estructura y conformación de las partes del equipo y sobre el funcionamiento y relación entre esas partes. Adicionalmente del diseño y ejecución precisa de rutinas de operación y mantenimiento preventivo, que incluyen el cambio de la gráfica, dotación de tinta, revisión de plumilla, limpieza y lubricación general, revisión y relevo del soporte de energía, revisión del funcionamiento y calibración de las escalas de nivel y tiempo.

Estas estructuras deben ser instaladas en la orilla más cercana a la profundidad máxima del cauce, para evitar que el elemento sensible (flotador o sensor automático) quede en seco durante los periodos de estiaje. La Instalación limnigráfica debe estar siempre acompañada de un sistema de miras para su control y calibración.

Existen tres categorías o tipos principales de instalaciones limnigráficas: de **tubo**, de **pozo** y **neumáticos**.

Instalaciones de tubo

Este sistema es instalado directamente en el cauce del río sobre paredes verticales de roca, concreto o ladrillo, protegidos contra la fuerza de la corriente mediante aleta construida en concreto dentro del cauce

Instalaciones de pozo

Se instalan cuando las orillas son bajas e inclinadas, constituidas por materiales fácilmente excavables. El extremo superior del pozo debe quedar no menos de 1 m por encima del nivel máximo posible de las crecidas

Neumáticos

Las instalaciones para limnógrafos neumáticos se construyen para gamas de variación de niveles muy grandes en condiciones que hacen muy difícil o costosa cualquier otra instalación. Consta de una caseta para albergar los instrumentos y un tubo de conexión entre el registrador y la corriente fluvial. En el extremo, que hace contacto con el río, se empotra el tubo en un bloque de concreto que descansa directamente en el lecho, posicionado acorde con el nivel de aguas mínimas para no perder registros.

Limnógrafos Digitales

En circunstancias especiales, cuando se necesita información continua e inmediata sobre los niveles de una corriente, por requerimientos de operación de obras hidráulicas o por alarma ante crecidas, se acopla a los instrumentos registradores un sistema automático (Figura 61), que consta de un decodificador, un panel de sensores y una antena con alimentación de una batería, que es recargada a través de un panel solar.



Figura 61. Izquierda. Estación satelital Pilispi, Derecha. Estación Automática San Juan. Área Operativa 7 IDEAM. Fuente IDEAM 2017.

El dato colectado es transmitido a intervalos de tiempo (cada 4 horas) al satélite y este lo envía a una plataforma central de recepción instalada convenientemente en oficinas. Los datos recibidos se pueden manipular (consultar, graficar, hacer tratamiento estadístico) instantáneamente para su aplicación en diferentes tareas.

En cuencas de magnitud menor, en las cuales se facilitan las visitas frecuentes (mes), se utilizan equipos automáticos con funcionamiento digital, conformados por un sensor de presión hidrostática instalado en el fondo del canal, un cable que lleva la señal a un transformador de señales análogas en impulsos digitales, los cuales se almacenan en un Data Logger (memoria digital); la información almacenada en un período determinado, por ejemplo un mes, se transfiere mediante una interfase a un computador portátil y posteriormente se procesa, almacena y analiza utilizando un software especializado, diseñado por la casa fabricante del sistema.

Procedimientos para la toma de niveles

Si se utiliza un limnómetro

Si la estación es *limnimétrica*, se debe revisar la secuencia de variación de los niveles con respecto a las características hidráulicas de la corriente o depósito de agua sobre la cual está ubicada la estación. Si es un río con régimen de montaña los niveles pueden presentar variaciones grandes durante el día como respuesta a las lluvias, mientras que, si es un río de régimen aluvial o un depósito de agua, las variaciones son menores y presentan cambios suaves (secuencia escalonada); en ambos casos las variaciones serán mínimas cuando los datos corresponden al período seco o de estiaje.

Si se utiliza un limnigráfo

Si la estación es *limnigráfica* se debe retirar la gráfica y hacer una primera evaluación para determinar adelantos o atrasos en la escala de tiempo, lo mismo verificar si hay coincidencia entre el nivel registrado y el observado en la mira en el momento del retiro de la gráfica. Realizada esta actividad se procede en presencia del observador a plotear (colocar) las lecturas de mira y de máxímetro sobre la gráfica, permitiendo determinar la calidad de las lecturas de mira. En caso negativo, se hace el respectivo llamado de atención al observador y si el problema es recurrente y se presenta en un largo período, el valor de la toma de las lecturas no se cancela, dejando así sentado un precedente para que el observador corrija su actitud y los datos vuelvan a ser consistentes.

Si se utiliza un máxímetro

Su operación se basa en hacer una inspección después de una creciente; para lo cual se debe:

- Retirar la tapa superior del máxímetro y sacar el soporte cilíndrico con los recipientes.
- Se debe identificar el frasco superior que contenga agua
- Se debe determinar el nivel máximo alcanzado o la corriente en concordancia con la cota del plano cero del máxímetro.
- Anotar el valor leído.

Si se utilizan instrumentos de medición automática o radares

Con respecto al *registro automático de niveles RAN* y de *estaciones de radar*, considerando que los datos digitales del RAN se almacenan en una plataforma colectora de datos (DCP), estos pueden ser bajados a un computador portátil y almacenados o transmitidos a la base de datos central. También pueden ser transmitidos vía telefónica, celular, radio o satélite a la estación central de recepción, donde son procesados y almacenados.

Recomendaciones Adicionales en los procedimientos para la lectura de nivel según la OMM

A fin de evitar lecturas negativas, el medidor estará instalado de modo que la lectura del valor cero sea inferior a la altura del agua más baja prevista. Es importante mantener una misma la cota del cero de la escala durante todo el período de registro. La ubicación precisa de los accidentes del terreno utilizados como

referencia será objeto de una documentación detallada (OMM, Guía de prácticas hidrológicas, 2011).

Los diferentes limnógrafos se ajustan tomando como referencia un medidor auxiliar flotante de cinta graduada o un limnómetro situado en el interior del pozo de amortiguación. Se necesitará una estaca, rampa graduada o medidor de cable lastrado referidos a la misma cota del cero de la escala con el fin de comparar la elevación de la superficie del agua en el pozo de amortiguación con la del río.

Suele haber pequeñas diferencias debidas a la velocidad, más allá de los extremos de las conducciones de toma. Diferencias de gran magnitud indicarán que las conducciones de toma pueden estar obstruidas.

Muchos de los elementos indicados no pueden ser medidos mediante instrumentos, por lo que deberán ser evaluados subjetivamente y registrados en lenguaje descriptivo. Por esa razón, será muy importante que los observadores tengan una preparación adecuada y que las instrucciones estén claramente redactadas.

El formato de toma de datos de nivel, se encuentra en el Anexo B-1.

Recomendaciones Adicionales para el mantenimiento de instrumentos de medición

Para mantener en funcionamiento una instalación limnimétrica se debe tener en cuenta las siguientes instrucciones:

- Visitar la estación periódicamente para revisar su estado, en cuanto a la parte física, operación por parte del observador y específicamente en lo atinente a continuidad y calidad de los datos.
- Verificar la posición de la cota cero y de los empalmes entre los diferentes tramos de limnómetro instalados en la estación.

- Cambiar los tramos que se encuentren averiados especialmente cuando la pintura o esmalte del tramo se encuentren borrosos o ilegibles.
- Revisar los numeradores que identifican los diferentes tramos de la estación.

7.2.1.2. Caudales

El caudal expresado en unidades de volumen por unidad de tiempo, es la tasa a la que el agua discurre a través de una sección transversal, y se expresa en metros cúbicos por segundo (m³/s) o en litros por segundo (l/s), cuando se manejan pequeñas magnitudes. El caudal en un instante dado puede medirse utilizando diferentes métodos, y la selección entre éstos dependerá de las condiciones existentes en un emplazamiento dado. Por lo general, el valor del caudal se expresará en función de la altura correspondiente del agua en una estación de aforo.

La exactitud de la medición del caudal dependerá del período de tiempo necesario para efectuar la medición y de la variación de la altura del agua y del caudal durante la observación. Las variaciones de las condiciones aguas abajo durante la medición podrán influir en el resultado, por lo que convendría evitarlas (OMM, Guía de prácticas hidrológicas, 2011).

La necesidad de medir el caudal de una corriente de agua se puede dar de acuerdo con los siguientes propósitos, entre otros:

- Para conocer la oferta hídrica de una cuenca hidrográfica, de la cual depende la posibilidad de atender la demanda de agua para distintos fines.
- Para conocer, junto con los niveles, la amenaza que las crecidas de la corriente representan para las instalaciones o actividades humanas existentes o previstas en las proximidades del cauce, la cual puede manifestarse en forma de inundaciones, destrucción de infraestructuras, viviendas, cultivos, pastos,

- animales, etc.
- Para soportar programas de protección de fuentes hídricas frente a amenazas de origen antrópico.

Selección de Puntos de Monitoreo

Para el monitoreo de caudales, no es necesario que se efectúen exactamente en el mismo lugar que las mediciones de altura, ya que el caudal suele ser el mismo a lo largo de un tramo de la corriente en las proximidades del instrumento de medida. (OMM, 2011).

Teniendo en cuenta los objetivos fijados en el programa de monitoreo para la medición de caudales, y si la red no existe, se debe definir el sitio o sitios específicos de medición, los cuales deben cumplir unos requerimientos mínimos, entre los cuales son de mencionar los siguientes:

- 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.
- 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.
- 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.
- 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.

- 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, de tal manera que la medición de la velocidad sea precisa para la obtención del caudal. Cualquier desviación en las líneas de flujo produce alteración en la magnitud, por cuanto vectorialmente no corresponde al 100 % de la velocidad, sino a una componente de la misma.
- La geología del terreno deberá facilitar la construcción de las obras para medición como tarabitas, puentes, pasarelas, etc.

Un aspecto a tener en cuenta es que si se necesita conocer en un sitio la variabilidad de los caudales de manera continua, lo cual se logra a través de la relación Nivel-Caudal, en el sitio en donde se realice las mediciones de caudales puntuales deben tener instalado equipos de medición de los niveles, siguiendo los criterios de la sección de niveles.

Frecuencia de Monitoreo

La medición de caudal (aforo) se debe realizar periódicamente, buscando cubrir toda la gama potencial de niveles, con el fin de obtener parejas nivel - caudal que faciliten la calibración de la sección de aforos, la cual se plasma en la curva de gastos o de calibración. Esta curva transformada en una expresión matemática (ecuación) o en una tabla obtenida por lectura de puntos sobre la curva y posterior interpolación, permite la conversión de niveles horarios en caudales horarios.

El aforo es un procedimiento que consiste en realizar en campo, una serie de mediciones de factores de área en la sección transversal y de velocidad del agua y permite posteriormente calcular el caudal de un corriente, el cual esta referenciado a un nivel de agua. En otros casos, la medición entrega resultados inmediatos para ser aplicados en actividades que así lo requieren.

El caudal se puede medir en un tiempo dado por diferentes métodos y la elección del método depende de las condiciones halladas en un emplazamiento en particular, observando que el de mayor aplicación práctica está basado en la medición de la velocidad y el área de la sección transversal de aforo.

Tipos de Medición

Para la medición del caudal en una corriente se han desarrollado diversos métodos de aforo que se aplican según el tamaño del cauce, la magnitud del caudal, las características hidráulicas del flujo, la necesidad de contar con datos inmediatos o a corto plazo y, en general, las dificultades para realizar el aforo, entre otros.

El aforo debe ser planeado teniendo en cuenta las características de la sección y el caudal de la corriente.

Existen diferentes métodos de medir el caudal:

- Método Área-Velocidad
- Método Volumétrico
- Método con Trazadores (dilución)
- Estructuras Aforadas

Método Área-Velocidad

Dado que el caudal es función del área de la sección ocupada por el agua y la velocidad media del flujo, éste procedimiento se basa en la determinación de estas variables. Este sistema de aforo es el de mayor uso y requiere que el flujo tenga un comportamiento laminar y que las líneas de flujo sean normales a la sección transversal de aforo.

El caudal en una corriente de agua es función del área de la sección de aforos y de la velocidad media del flujo y se obtiene mediante el producto de estas dos variables.

$$Q = V * A$$

Si la geometría del perfil de la sección de aforos no se modifica, la velocidad mantiene su comportamiento horizontal y en profundidad, por el contrario, si la geometría cambia se altera la relación nivel - área, en consecuencia, la velocidad cambia su comportamiento.

El método de área-velocidad se realiza con diferentes métodos de aforo:

- Molinete Hidrométrico (vadeo, suspensión, angular, bote cautivo, lancha en movimiento)
- Aforo con Flotadores
- Aforo ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler)

La medición de caudales a través del método área-velocidad, se determina a través de la selección de número de vértices, determinación del ancho, determinación de la profundidad, cálculo del área, medición de la velocidad, cálculo del área y caudal. (Figura 62).

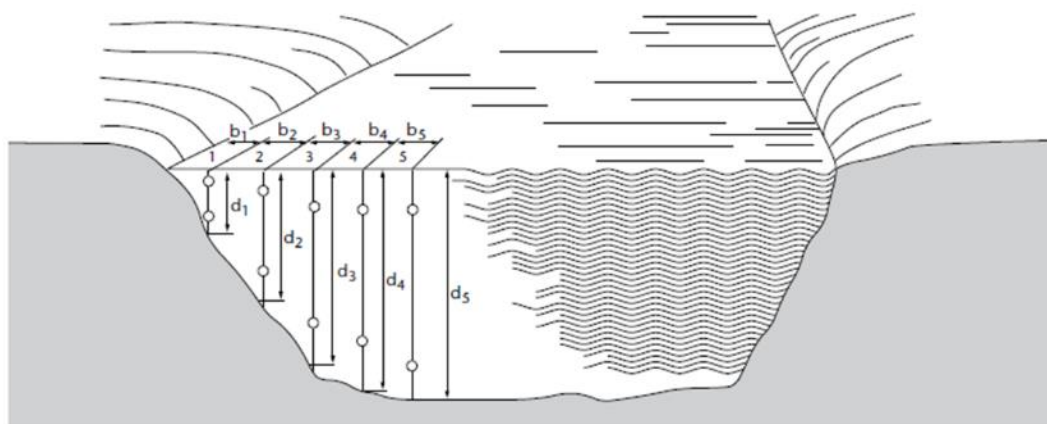


Figura 62. Vista de una sección transversal de una corriente, en la que figura la posición de los puntos de observación. (OMM, 2011)

La profundidad del flujo en la sección transversal se mide en las verticales mediante una varilla o hilo de sondeo. Al tiempo que se mide la profundidad, se efectúan observaciones de la velocidad mediante un molinete en uno o más puntos de la vertical. Las anchuras, profundidades y velocidades medidas permiten calcular el caudal para cada segmento de la sección transversal. La suma de estos caudales parciales será el caudal total. (OMM, 2011).

Molinete Hidrométrico

Teniendo en cuenta las diferentes alternativas de medir el caudal, se determina el tipo de aforo con molinete hidrométrico (vadeo, suspensión, angular, bote cautivo, lancha en movimiento) que mejor se ajuste a las condiciones existentes, en el momento de la campaña de monitoreo, específicamente la magnitud de la profundidad, el ancho, la velocidad, la disposición de estructuras de apoyo como puentes o tarabitas y el tipo de régimen de caudales predominante.

Aforo por vadeo

Se utiliza cuando la profundidad es menor de un metro (< 1 m) y la velocidad de la corriente menor de un metro por segundo (< 1 m/s). Estas condiciones permiten que los operarios y los equipos se metan al cauce con seguridad, garantizando de esta manera que la medición se realice con comodidad y sin riesgo.

Aforo por suspensión

Cuando las condiciones del flujo (profundidad y/o velocidad) presentan amenaza para los operarios y equipos, es necesario realizar las mediciones desde un puente o una tarabita. Aquí los equipos van suspendidos desde un malacate o torno a través de un cable coaxial, que adicionalmente sirve para medir la profundidad en las diferentes abscisas de medición.

Aforo angular

Aplicado en grandes ríos, cuando la definición del abscisado no se puede realizar por mediciones directas con cinta o con marcaciones indirectas registradas en puentes o tarabitas. Para este tipo de aforos es necesario el apoyo topográfico para ubicar, a través de la sección del río, la posición que debe tener la lancha en el momento de actividad foronómica.

Aforo en bote cautivo

Aplicable en ríos o canales medianos, donde es posible tender una manila o cable de orilla a orilla, que sirve de apoyo a la embarcación para contrarrestar el empuje de la corriente.

Aforo con lancha en movimiento

Aforo con bote móvil o lancha en movimiento. Se utiliza en ríos muy anchos y caudalosos. Se instala en un bote un molinete especialmente diseñado que indica los componentes de la corriente y los valores instantáneos de la velocidad. Las mediciones se realizan atravesando el río a lo largo de un recorrido preestablecido perpendicular a la corriente. Durante la travesía, efectuada sin detenerse, un ecosonda registra la geometría de la sección transversal y el molinete en funcionamiento continuo mide las velocidades combinadas de la corriente y del bote. Estos datos, recogidos en 30 a 40 puntos de observación (verticales) a través del recorrido, se convierten en caudales. La velocidad registrada en cada punto de observación de la sección transversal es un vector de cantidad que representa la velocidad relativa de la corriente que pasa por el mecanismo del molinete.

Aforo con Flotadores

Se utiliza cuando se requiere medir en forma rápida el caudal en una corriente que presenta una lámina de pocos centímetros de profundidad, cuando se esté en presencia de grandes cantidades de material en suspensión, o cuando deba efectuarse una medición del caudal en un período muy breve, para lo cual se mide la velocidad superficial a lo ancho del cauce utilizando flotadores especialmente diseñados y suministrados para este efecto, (Figura 63).

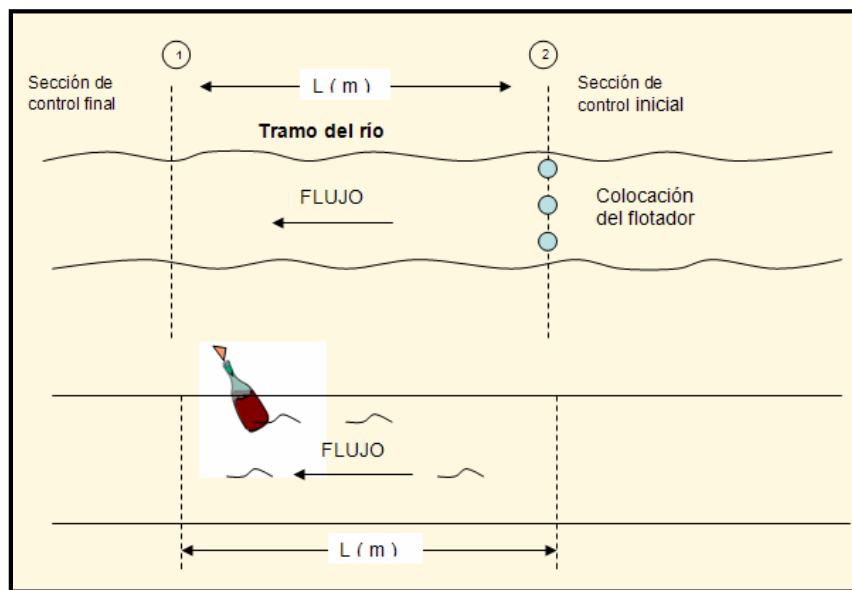


Figura 63. Aforo con Flotadores. Fuente. (IDEAM, 2006)

Aforo ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler)

Se utiliza para medir el caudal en ríos grandes o pequeños, sin rocas grandes que permita el desplazamiento horizontal del equipo para medir el caudal.

Los instrumentos ADCP, basados en el efecto Doppler, pueden instalarse en una embarcación en movimiento, como se observa en la Figura 64, (B.). El instrumento mide simultáneamente la velocidad y profundidad del agua y la trayectoria de la embarcación para calcular el caudal. Este método permite calcular el caudal parcial a medida que la embarcación atraviesa el río. El resultado de una medición no es suficiente para proporcionar un valor exacto del flujo/caudal; únicamente proporciona una imagen instantánea del flujo. Para conseguir un valor más exacto del caudal del río es importante calcular el promedio de varias travesías. Para calcular el caudal en un emplazamiento se recomienda efectuar como mínimo cuatro travesías. (OMM, 2011)



Figura 64. Medición de caudal en el equipo ADCP. A. río Amazonas, B. río San Juan, C. Transmisión del ADCP al computador, con información de: perfil transversal, caudal parcial, profundidad, distancia, velocidad del agua, velocidad de la barca. Estación Rumichaca, río Guáitara. Fuente. Áreas operativas 11 y 7 IDEAM, 2017.

El ADCP utiliza el efecto Doppler transmitiendo sonido a una frecuencia fija y escuchando los ecos retornados por los reflectores presentes en el agua, como pequeñas partículas o plancton que reflejan el sonido hacia el ADCP, los cuales se mueven a la misma velocidad horizontal del agua.

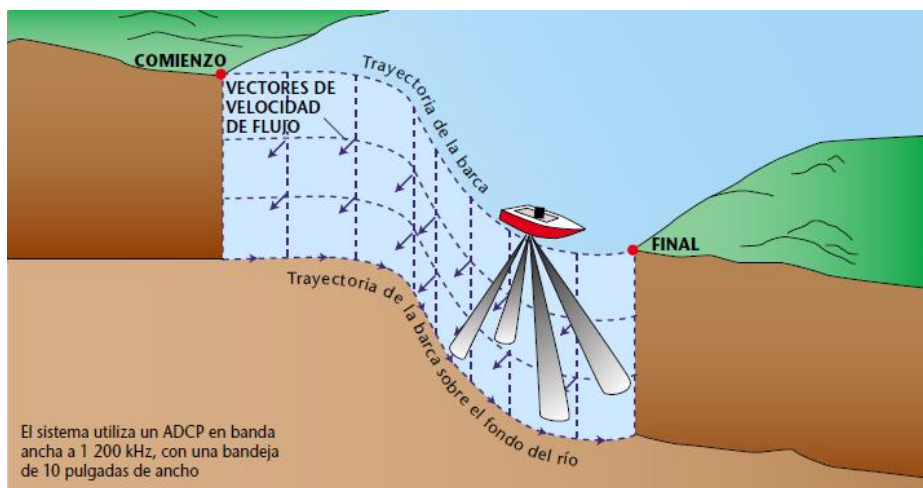


Figura 65. Configuración típica de una medición con un instrumento de efecto Doppler. Fuente. (OMM, 2011).

Cuando el sonido enviado por el ADCP llega a los reflectores, este se desplaza a una mayor frecuencia debido al efecto Doppler como se observa en la Figura 65, este desplazamiento frecuencial es proporcional a la velocidad relativa entre el ADCP y los reflectores. Parte de este sonido desplazado es reflejado hacia el ADCP

donde se recibe desplazado una segunda vez. Los archivos generados por el equipo pueden llevarse las gráficas a impresión a Excel mediante el software del equipo, así como la tabla de trayectos para plotear el aforo.

Método Volumétrico

El aforo volumétrico se realiza cuando se trata de medir caudales pequeños (de algunos pocos litros por segundo) en condiciones que no permitan el uso del molinete, o no se cuente con este equipo, se utiliza el aforo volumétrico, (Figura 66).

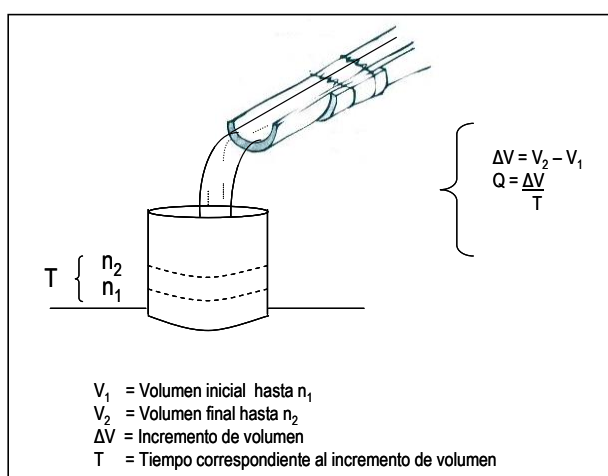


Figura 66. Aforo Volumétrico. Fuente (IDEAM, 2006)

Se recomienda utilizarlo en corrientes pequeñas, en las cuales se pueda coleccionar en un recipiente calibrado el 100% del flujo a medir. La calibración del recipiente y el tiempo de recolección deben ser muy precisos para garantizar la buena calidad de la medición del caudal.

Método con Trazadores (dilución)

La medición del caudal mediante este método está basada en la determinación del grado de dilución en el agua de la corriente de una solución del trazador vertida en ella, como se observa en la Figura 67. Este método se recomienda utilizar para secciones de aforo donde se encuentren grandes turbulencias y remolinos, régimen

torrencial, altas pendientes, poca profundidad, lechos inestables y líneas de flujo desordenadas. Los aforos con trazadores también llamados aforos químicos, permiten conocer el caudal a partir de la variación de concentración de una sustancia inyectada en el cauce que permite estudiar su comportamiento y evolución.



*Figura 67. Ensayo con trazadores en el río Cravo Sur en el sector de La Cabaña, Yopal, Casanare.
Fuente: Archivo Empresa Fluvia, 2014*

Características de los trazadores

Para que las mediciones de caudal tengan aceptabilidad, las sustancias usadas como trazadoras deben tener ciertas características físicas, químicas y ambientales, establecidas como fruto de investigaciones a nivel internacional y nacional. Las principales son:

Su comportamiento debe ser idéntico al del medio a medir, en este caso agua, siendo necesario que se desplace a igual velocidad, lo que implica que no debe efectuar intercambio iónico y tampoco debe sufrir absorción química o física,

además de no alterar las propiedades y condiciones del agua, tales como densidad, viscosidad y temperatura.

- Si el trazador se inyecta artificialmente al flujo, este no debe contener cantidades apreciables de la sustancia inyectada.
- Es conveniente que sea fácilmente soluble en agua y no se precipite, permitiendo marcar grandes cantidades de fluido con una pequeña masa de trazador.
- Es importante que pueda ser medido "in situ".
- No debe contaminar el medio durante períodos prolongados ni afectar a seres vivos.
- Es importante que su costo sea reducido.
- Que se disuelva rápidamente en el río a una temperatura normal. Que no se encuentre en el agua del río o sí está presente que lo esté en cantidades mínimas.
- Que no se descomponga, ni sea retenido o absorbida por sedimentos, plantas y organismos.
- Que su concentración sea detectada por métodos sencillos.
- Que sea inofensiva para el ser humano y los animales, en el grado de concentración que alcance en la corriente.

Solamente un trazador ideal puede cumplir con todos estos requerimientos por lo que se hace indispensable tener un conocimiento práctico de cada uno de estos, para utilizar el apropiado de acuerdo a la necesidad del estudio y a las características hidráulicas, morfológicas, físicas y químicas del cauce y el agua de la corriente.

Las sustancias que más se utilizan en el método de trazadores son:

Cloruro de sodio: La sustancia trazadora más económica es la sal común (NaCl). El trazador se inyecta en la corriente, y su detección "in situ" por el método de conductividad es relativamente sencilla, el grado de disolución es de 600 gramos por litro.

Dicromato de sodio: El dicromato de sodio se usa extensamente como trazador en el método de aforo por dilución, por su alta solubilidad (600 gramos por litro). Esta sal satisface la mayor parte de los requerimientos indicados y su análisis colorimétrico realizado en el laboratorio permite medir concentraciones muy reducidas de dicromato.

Cloruro de litio: El cloruro de litio presenta una solubilidad de (600 gramos por litro) y en laboratorio el análisis fotométrico de la llama puede detectar concentraciones de litio de 0.001 gramos por litro (espectrofometría de emisión).

Otros trazadores químicos utilizados son el yoduro de sodio, nitrado de sodio y sulfato de manganeso.

Rodamina W: El uso de la rodamina está ampliamente difundido en los Estados Unidos de América para el aforo por dilución, ya que sus características de absorción son mejores que las de otras tintas. La concentración de la tinta se puede medir en la estación de aforos usando fluorímetros que puedan detectar concentraciones de 5 a 10 partes por millón (ppm).

Elementos radiactivos

Se han utilizado isótopos radiactivos tales como la bromina 82, la yodina 131 y el sodio 24; las concentraciones de estos elementos del orden de 10⁻⁹, pueden determinarse exactamente con un contador o un dosímetro, cuya sonda de detección esté suspendida sobre la corriente o en un tanque contador normalizado. Aunque los elementos radiactivos constituyen trazadores ideales para el método de

dilución, los peligros que presentan para la salud y en general para el medio natural limitan su utilización.

Estructuras Aforadas

Son estructuras que han sido estudiadas y calibradas en diferentes condiciones experimentales. Para cada una de ellas es posible obtener una ecuación de descarga (relación Nivel-Caudal) que permite determinar el caudal instantáneo en función de la altura de la lámina de agua con respecto a un punto de la estructura, que se mide con ayuda de una mira o un instrumento registrador. A continuación, se presentan las estructuras más utilizadas.

Vertederos: Son dispositivos hidráulicos fijos o removibles que consisten en una escotadura a través de la cual se hace circular el flujo que se quiere medir en el canal o corriente natural. La precisión del aforo depende de la velocidad de llegada a la estructura, por lo tanto es importante remansar el agua ampliando la sección del canal arriba del sitio para obtener velocidades mínimas ($< 0,15$ m/s). Existen diferentes tipos de vertederos:

- a. Vertedero rectangular: puede ocupar total o parcialmente el ancho del canal, presentando contracciones laterales que reducen la longitud efectiva de la cresta, y en consecuencia el caudal medido por pérdidas por rozamiento.
- b. Vertedero trapezoidal (Cipolletti): se construye con paredes laterales inclinadas en una relación 1 horizontal a 4 vertical.
- c. Vertedero triangular: se recomienda para medición de caudales pequeños, siendo en particular conveniente para medición de caudales muy fluctuantes. Los más utilizados son los de escotadura con ángulo de 90° y 60° .

Los vertederos ofrecen las siguientes ventajas en la medición del agua:

- Las mediciones de caudal son precisas e instantáneas

- La construcción de la estructura es sencilla para las geometrías citadas anteriormente.
- No son obstruidos por materiales que flotan en el agua
- La duración del dispositivo es larga, desde luego con un buen mantenimiento.

La elección del tipo de y las dimensiones del vertedero se basan, en primera instancia, en el caudal máximo previsto a medir o en los límites del caudal en el caso de corrientes fluctuantes.

Debe tomarse en consideración lo siguiente:

- La altura no debe ser inferior a 6 centímetros (cm) para el caudal previsto y no debe exceder de 60 cm.
- Para vertederos rectangulares o trapeziales, la altura no debe exceder de un tercio de la longitud del vertedero.

Canaletas: Son estructuras de gran aplicación en terrenos planos ya que funcionan a flujo libre con pérdidas de carga pequeñas. Las canaletas más utilizadas son:

- a. Tipo Balloffet: se caracteriza por tener paredes paralelas y fondo plano, por lo cual se hace extremadamente fácil su construcción, posee características de solidez y resistencia a las condiciones de campo.
- b. Medidor sin cuello (cutthroat): Consiste principalmente en una sección de entrada, una sección de salida, una garganta y un fondo aforador. El caudal (Q) del aforador se obtiene midiendo las profundidades de flujo aguas arriba H_a y aguas abajo H_b de la garganta.
- c. Canaleta Parshall: Está conformado por tres secciones principales: una sección convergente de contracción que se localiza en su extremo aguas arriba, una garganta y una sección divergente o expansión aguas abajo. Para determinar

el caudal, se dispone de dos medidores de profundidad (H_a y H_b), los cuales se calibran colocando la cota "cero" coincidiendo con la cota de la cresta del canal (sección convergente). Opera como un dispositivo de cabeza sencilla con mínima pérdida de energía, por lo cual se utiliza en canales poco profundos y con escasa pendiente, como se observa en la Figura 68.



Figura 68. Canaleta Parshall, Parque Natural Nacional los Nevados. Fuente. Subdirección de Ecosistemas. IDEAM 2017.

Condiciones de uso de métodos de aforo

Con anterioridad a la realización de un aforo, éste debe ser planeado teniendo en cuenta las características de la sección y el caudal de la corriente. Teniendo en cuenta los anteriores métodos, la Tabla 2, muestra un resumen de las condiciones de uso de cada método de aforo.

Tabla 2. Condiciones de uso de los métodos de aforo.

Método de aforo	Sección	Caudal o velocidad
Volumétrico	Pequeña (< 1 m ²)	Q<100 l/s
Estructuras aforadoras		
- Vertederos	Pequeñas (< 1 m ²)	v< 0,15 m/s
- Canaletas	Pequeñas (preferible <2,5 m ancho)	Q<4 m ³ /s
Molinete hidrométrico		
- Por vadeo	Profundidad < 1m	V<1 – 3 m/s
- Por suspensión	Profundidad > 1m	V>1 – 3 m/s
- Angular	Grandes ríos donde se requiere apoyo topográfico para medir posición del bote en su recorrido	Velocidad en general entre 1 y 3 m/s
- Bote cautivo	Ríos o canales medianos que permiten extender y alinearse con manila	Velocidad en general entre 1 y 3 m/s
- Bote móvil	Ríos muy anchos y caudalosos	Velocidad en general entre 1 y 3 m/s
Flotadores	Muy baja profundidad	Baja precisión
Dilución con trazadores	Muy baja profundidad, alta presencia de sedimentos	Turbulencia, velocidades muy altas. Baja precisión.
Ultrasónico	ADCP: hasta 220 m de profundidad. Pequeños a grandes ríos.	Velocidades hasta 9 m/s.

Fuentes: (EPAM S.A ESP, 2011)

Equipos

En la Tabla 3 se presentan los materiales y equipos utilizados para los diferentes métodos (Método Área-Velocidad, Método Volumétrico, Método con Trazadores (dilución), Estructuras Aforadas) de medir el caudal.

Tabla 3. Equipos en general para medición de caudal a partir de aforos.

Métodos		Equipo	Tipo de equipo
Métodos área velocidad	Aforo por vadeo Aforo por suspensión Aforo angular Aforo en bote cautivo	Estos métodos utilizan molinetes o mini molinetes de copa o de hélice.	Electromecánico

Métodos		Equipo	Tipo de equipo
	Aforo en bote cautivo Aforo con lancha en movimiento		
	Aforo con flotadores	Flotadores que miden la velocidad superficial	Mecánico
	Perfilador de corrientes acústico Doppler (ADCP)	ACDP que calcula las componentes de la velocidad del agua en las 3 direcciones.	Electrónico
	Método área- pendiente	Se determinan la pendiente y rugosidad, la velocidad se calcula con Manning o Chezy	Mecánico
Método volumétrico	Aforo volumétrico	Recipiente con volumen conocido y cronómetro	Mecánico
Método de dilución	Inyección de la sustancia a un caudal constante Inyección instantánea	Aforo con sustancias químicas (trazadores).	Químico
Estructuras aforadoras	Vertederos: Rectangular, trapezoidal, triangular Canaletas: Parshall, medidor sin cuello, tipo Balloffet	Tienen ecuaciones que permiten determinar el caudal instantáneo en función de su geometría.	Mecánico o electromecánico

Con respecto a los métodos de medición que incluyen área –velocidad, se consideran, aquellos que utilizan el molinete hidrométrico, los flotadores y el ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler).

En la Tabla 4, se observan los equipos necesarios para los tipos de aforo por **molinete hidrométrico**.

Tabla 4. Equipos para los tipos de aforo por Molinete hidrométrico

Equipos necesarios	Personal necesario	Tipo de aforo
Molinete o micromolinete Contador de revoluciones Cinta métrica Varilla de vadeo Cartera de aforo Molinete o micromolinete Contador de revoluciones Cinta métrica Varilla de vadeo Cartera de aforo	Inspector Aforador Auxiliar	Por vadeo
Molinete Contador de revoluciones Malacate y tabla con polea Escallos de 30, 60, 75 y 100 kg Transportador para medición del ángulo de arrastre Cartera de aforos y tabla de conversión para corrección de profundidades por ángulo de arrastre	Inspector Aforador Auxiliar	Por suspensión
Molinete Contador de revoluciones Malacate y tabla con polea Escallos de 30, 60, 75 y 100 kg Jalones y banderolas de colores vivos Sextante o tránsito Lancha con motor fuera de borda Radios portátiles o celulares Cartera de aforos	Aforador Motorista Auxiliar de topografía	Angular
Molinete Contador de revoluciones Malacate y tabla con polea Escallos de 30, 60, 75 y 100 kg Bote Manila Cartera de aforos	Inspector Aforador Auxiliar Motorista	Bote cautivo
Molinete Contador de revoluciones Soporte para fijación de molinete Jalones y banderolas de colores vivos Sextante o tránsito Lancha con motor fuera de borda Ecosonda Batería de 12 voltios Cronómetro Cartera de aforos	Inspector Aforador Auxiliar técnico Motorista	Lancha en movimiento

Fuente: IDEAM, 2007.

En la Tabla 5, se observan los equipos necesarios para los tipos de aforo por **flotadores**.

Tabla 5. Equipos para los tipos de aforo por Flotadores

Equipos necesarios	Personal necesario	Tipo de aforo
Flotadores, suministrados por casa especializada en hidrometría (norma técnica) Cinta métrica Cronómetro Cartera de aforo y planillero Radios portátiles o celulares	Técnico Aforador	Flotadores

Fuente: IDEAM, 2007

En la *Tabla 6*, se observan los equipos necesarios para los tipos de aforo por ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler).

Tabla 6. Equipos para los tipos de aforo ADCP

Equipos necesarios	Personal necesario	Tipo de aforo
Perfilador ADCP Bote para sujetar el perfilador Transmisor BlueTooth Una PDA a prueba de agua, Software y el programa para PC	Tecnico capacitado manejo Software	Efecto Doppler

Fuente: (IDEAM, 2006)

Para los métodos volumétricos, se presentan los equipos descritos en la *Tabla 7*,

Tabla 7. Equipos para los tipos de aforo por volumétrico

Equipos necesarios	Personal necesario	Tipo de aforo
Canaleta para conducción de flujo al recipiente Recipiente (balde, caneca, tanque) aforado en litros Cronómetro Cartera de aforos y Planillero	Técnico Aforador	Volumétrico

Fuente: (IDEAM, 2006)

Con respecto a los métodos con uso de trazadores (disolución) se presentan los siguientes equipos:

Tabla 8. Equipos necesarios para aforo por dilución con trazadores.

Equipos necesarios	Personal necesario	Tipo de aforo
Conductímetro Cronómetro Botella de Mariotte Cinta métrica Dos botellas de 1 litro y 500 ml Baldes graduados Mezclador que no altere la solución Agua destilada Trazador Frascos de 100 ml Radios portátiles o celulares Cartera de aforos	Inspector Aforador Auxiliar técnico	Por dilución

Fuente: (IDEAM, 2006)

Instrumentos de Apoyo

Aparte de los materiales y equipos para los aforos de caudal y sedimentos, también son necesarios otros instrumentos que sirvan de apoyo para tomar mediciones de área, velocidad y muestras puntuales de sedimentos. Entre ellos se menciona principalmente, **puentes hidrométricos** y **tarabitas**, que se construyen y diseñan considerando la altura y pendiente de los taludes de los cauces.

Estos instrumentos, son instalaciones necesarias para realizar aforos líquidos, sólidos, tomar muestras para calidad de agua entre otras. El puente hidrométrico debe quedar como mínimo 1 m., por encima del nivel máximo histórico, con el objeto de evitar daños durante avenidas y para ofrecer condiciones óptimas de aforo. Igualmente debe construirse perpendicular al eje de la línea de la corriente del agua.

Las estructuras deben ser lo más rígidas posibles y diseñadas para resistir cargas hasta de 1000 kg, con el fin de que al momento de realizar las mediciones hidrométricas tengan el menor movimiento.

La construcción de cables y canastillas (Figura 69) deben tener ciertas condiciones entre las cuales se destacan las siguientes:

El soporte inferior de la canastilla no debe tocar en ningún momento la superficie del agua, para lo cual es importante definir la altura máxima que han alcanzado las crecientes del río.

El cable o los cables deben formar con la horizontal una catenaria del 2 % de la longitud del ancho, es decir para 100 metros sería de dos metros, valor que se debe tener en cuenta en el momento de diseñar la altura de los pórticos de la tarabita.

El sistema constituido por cables, tensores, anclajes y canastilla debe poder soportar cargas móviles hasta de 500 Kg., y sus componentes deben estar convenientemente protegidas contra la corrosión de la intemperie.

En función del ancho de la sección de aforos, las tarabitas pueden ser monofilares o bifilares, es decir tener uno o dos cables de apoyo para el desplazamiento de la canastilla.



Figura 69. Tarabita, Estación Carlosama. Río Blanco, Área Operativa 7. Fuente. IDEAM. 2017

Procedimientos para la toma de muestras

En la presente sección se indicará las condiciones de uso de los métodos de aforo, el procedimiento paso a paso como complemento para alguno de los aforos mencionados en la sección tipos de medición de aforos.

Método Área-Velocidad

Dado que el caudal es función del área de la sección y la velocidad media del flujo, éste procedimiento se basa en la determinación de estas variables. Este sistema de aforo es el de mayor uso y requiere que el flujo tenga un comportamiento laminar y que las líneas de flujo sean normales a la sección transversal de aforo.

Medición de la Sección Transversal

La exactitud de una medición de caudal dependerá del número de verticales en que se obtengan observaciones de profundidad y de velocidad. Las verticales de observación estarán situadas de modo que definan óptimamente la variación de elevación del lecho del río y la variación horizontal de velocidad.

Por lo general, el intervalo entre dos verticales cualesquiera no será superior a $1/20$ de la anchura total, y el caudal de cada segmento no será superior al 10% del caudal total.

La anchura del cauce y la distancia entre verticales se obtendrán de acuerdo a los midiendo a partir de un punto de referencia fijo (por lo general, un punto inicial situado en la orilla), que estará situado en el mismo plano que la sección transversal. La distancia entre verticales se determinará mediante cinta métrica que se tiende provisionalmente a través del río, o también de marcas semipermanentes pintadas en la baranda de un puente o en un cable de suspensión (tarabita). En grandes ríos

podrán utilizarse sistemas de telemetría o prácticas de triangulación para medir las anchuras.

La profundidad media de la sección es el promedio de las dos profundidades sucesivas y así para cada una de las secciones parciales.

$$P_{\text{media}} = \left(\frac{P_1 + P_2}{2} \right)$$

Donde:

P_{media} = Profundidad media entre verticales

P_1 y P_2 = Profundidades de las verticales 1 y 2.

La profundidad puede ser leída directamente sobre una varilla graduada insertada en el lecho fluvial si la medición se efectúa mediante vadeo. Si se utiliza para la medición el sistema tambor-alambre-lastre, se hará descender primero el molinete y el lastre hacia el fondo hasta que la parte inferior del lastre toque la superficie del agua, en cuyo momento la lectura del dial se fijará en cero. Seguidamente, se hará descender el lastre hasta que descansa sobre el lecho fluvial, en cuyo momento se leerá la profundidad en el dial. (OMM, 2011).

Si el lastre del hilo de sondeo no fuera suficiente para mantener el hilo perpendicular a la superficie del agua, se medirá el ángulo comprendido entre la línea y la vertical, redondeándolo al grado más próximo, mediante un transportador. La relación entre la profundidad correcta, d , y la profundidad observada, dob , tomando como base el ángulo observado, ϕ , y la distancia desde la superficie del agua hasta el punto de suspensión del hilo de sondeo, x , aparece indicada en la Figura 70, y es la siguiente:

$$d = [dob - x (\sec\phi - 1)][1 - k]$$

Los valores de k indicados en la Tabla 9. Factor de corrección k para valores φ dados están basados en el supuesto de que la presión de tracción ejercida sobre el lastre en el agua cercana al fondo, comparativamente más estática, puede ser ignorada, y en el supuesto de que el alambre de sondeo y el lastre están diseñados para ofrecer escasa resistencia a la corriente del agua.

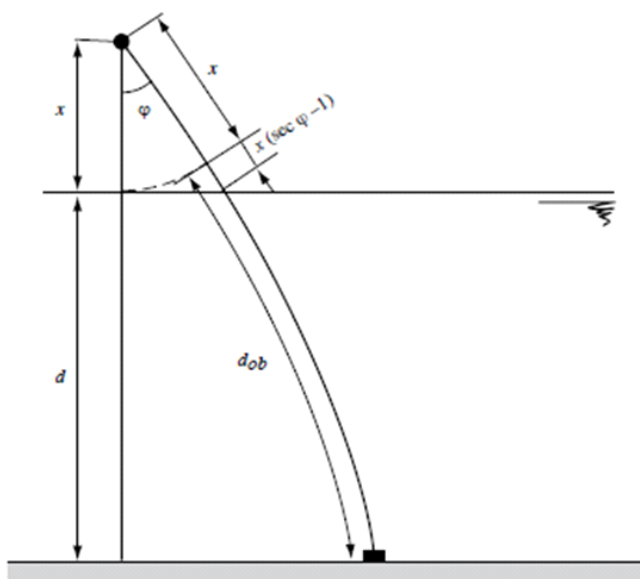


Figura 70. Relación entre la profundidad correcta d y la profundidad observada, dob . Fuente (OMM, 2011).

Las incertidumbres de esta estimación son de tal índole que podrían obtenerse errores importantes cuando el ángulo vertical sea superior a 30° .

Tabla 9. Factor de corrección k para valores φ dados

φ	k	φ	k	φ	k
4°	0,0006	14°	0,0098	24°	0,0256
6°	0,0016	16°	0,0128	26°	0,0350
8°	0,0032	18°	0,0164	28°	0,0408
10°	0,0050	20°	0,0204	30°	0,0472
12°	0,0072	22°	0,0248		

Fuente. (OMM, 2011).

Cálculo del área parcial y total

El área de una sección parcial corresponde a la superficie de cada tramo en que se ha dividido el cauce y se encuentra multiplicando la profundidad media por el ancho parcial.

$$A_p = P_{media} * a_p$$

El área total de la sección de aforos se obtiene sumando las áreas de las secciones parciales.

Medición de la velocidad puntual del agua

En el mercado nacional e internacional se dispone de diversos equipos diseñados para medir la velocidad del agua en diferentes puntos del cauce de la corriente, a lo ancho y en profundidad. Tradicionalmente, el dispositivo de velocidad lo constituye una hélice que gira al recibir el empuje horizontal de las líneas de flujo, midiendo el número de revoluciones en un tiempo determinado; la relación entre las revoluciones y el tiempo se denomina frecuencia, factor que se lleva a la ecuación de calibración del equipo para obtener la velocidad en un punto de la sección de aforos.

Determinación de la velocidad media en la vertical

La velocidad media del agua en cada vertical puede determinarse mediante métodos que se aplican dependiendo de la profundidad de la lámina de agua, de las condiciones del lecho, de la distribución de la velocidad en profundidad, del grado de precisión que se quiere y del tiempo disponible. Los métodos de establecen teniendo en cuenta el porcentaje de profundidad en los cuales se posiciona la hélice del molinete para la tomar velocidades puntuales en función del número de revoluciones y el tiempo de muestreo.

Método de un punto (60%)

Se realiza la observación de velocidad en cada vertical colocando el molinete al 60% de la profundidad total por debajo de la superficie, (Figura 71). El valor obtenido se considerará como la velocidad media de la vertical. Este método se emplea en secciones de poca profundidad, pero no menores a 40 centímetros, para evitar que la hélice del molinete roce con el fondo del cauce o con cualquier elemento que se encuentre en él. Para profundidades menores la velocidad obtenida al 50% es representativa para utilizarla en el cálculo del aforo.

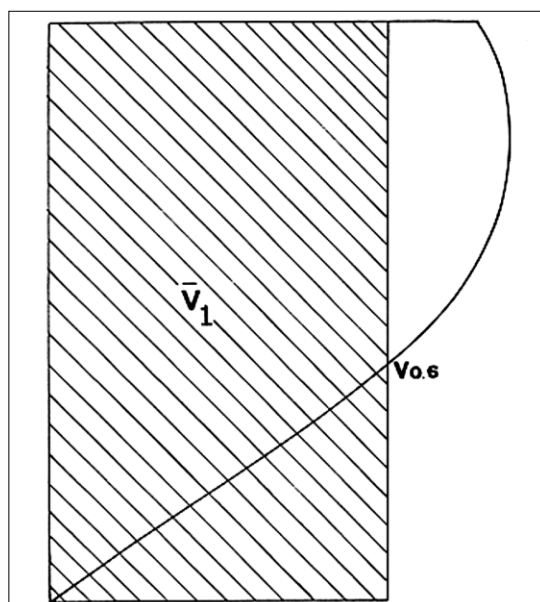


Figura 71. Método de un punto (60%). Fuente. (IDEAM, 2006)

Método de dos puntos (20% - 80%)

Las observaciones de velocidad se hacen en cada vertical colocando el molinete al 20% y 80% de la profundidad total por debajo de la superficie (Figura 72). El promedio de los dos valores puede considerarse como velocidad media en la vertical. Este método es el más empleado y se usa cuando ya se conoce el

comportamiento de la velocidad en la sección, obtenido mediante mediciones detalladas en los primeros aforos.

$$V_{\text{media}} = (V_{0.2} + V_{0.8})/2$$

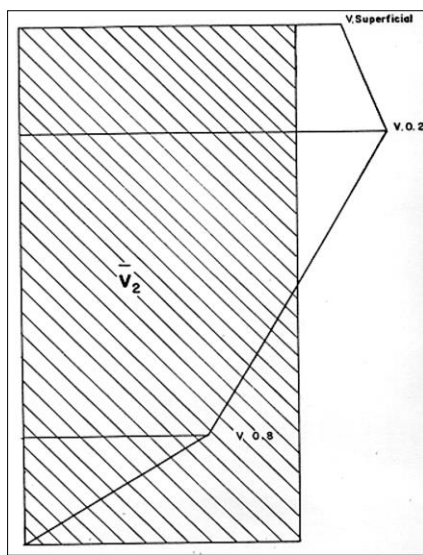


Figura 72. Método de dos puntos (20% - 80%). Fuente. (IDEAM, 2006)

Método de tres puntos (20% - 60% - 80%)

Las observaciones de velocidad se realizan ubicando el molinete en cada vertical al 20%, 60% y 80% de la profundidad total, (Figura 73). El promedio para este método se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$V_{\text{media}} = 0.25(V_{0.2} + 2V_{0.6} + V_{0.8})$$

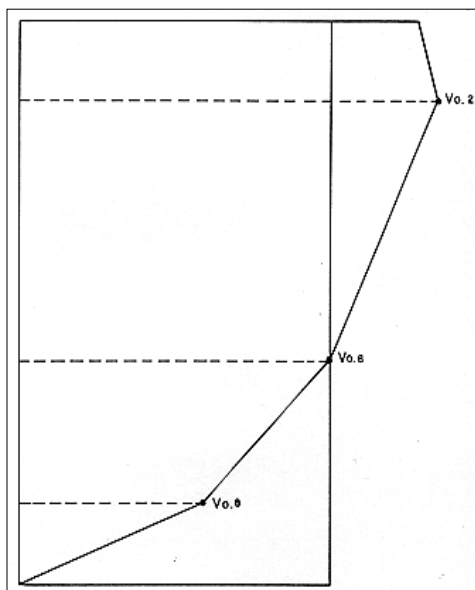


Figura 73. Método de tres puntos (20% - 60% - 80%). Fuente. (IDEAM, 2006)

Este método se utiliza cuando la velocidad del 80% es insegura a causa de la turbulencia y no se ajusta a la tendencia normal de la velocidad en la vertical, entonces se incluye una medición al 60 % para obtener más detalle y ajustar el promedio de la abscisa. Se observa que a la velocidad del 60% se le da un factor de ponderación doble con respecto al 20% y 80%, por la mayor representatividad que tiene esta velocidad en la distribución vertical.

Método de cinco puntos (superficie - 20% - 60% - 80% - fondo)

Cuando el cauce está libre de vegetación acuática y se quiere conocer el comportamiento de la velocidad media en la vertical de una manera más exacta se utiliza el método de los cinco puntos. Este se aplica ubicando el molinete en la superficie, al 20%, 60% y 80% y fondo, dándole diferentes pesos a cada uno de los porcentajes referidos como se observa en la ecuación. Cuando se sitúa el correntómetro en superficie y fondo este no debe quedar ni por fuera de la superficie del agua ni rozando el fondo del cauce. (Figura 74).

La velocidad media se determina a partir de la ecuación:

$$V_{\text{media}} = 0.1(V_{\text{super}} + 3V_{0.2} + 2V_{0.6} + 3V_{0.8} + V_{\text{fondo}})$$

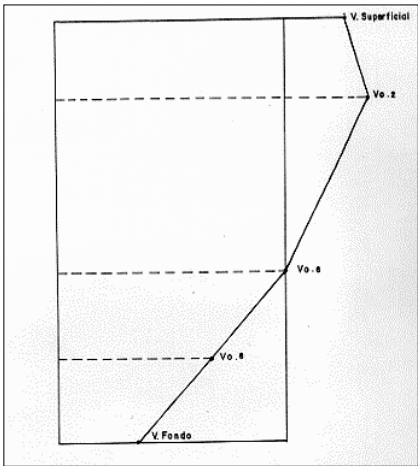


Figura 74. Método de cinco puntos (superficie - 20% - 60% - 80% - fondo). Fuente. (IDEAM, 2006)

Método puntual (once puntos)

Es recomendado utilizar este método cuando se afora por primera vez en una corriente, para conocer en detalle la distribución vertical de la velocidad y verificar su evolución en cada abscisa. En grandes ríos que mantienen láminas de agua de gran magnitud, es recomendable tomar este detalle para monitorear con precisión la evolución de la velocidad en función de la profundidad y así lograr buena precisión en el resultado del caudal. La velocidad media en la vertical se obtiene promediando los once valores de velocidad puntual.

Siempre que se realice un aforo líquido debe tomarse las velocidades superficiales, con el fin de conocer el comportamiento de la velocidad media total de la sección con respecto de la velocidad superficial, es decir la relación $K = V_m/V_s$, (Figura 75).

$$K = V_m/V_s$$

- K = Constante
- V_m = Velocidad media (m/s)
- V_s = Velocidad superficial (m/s)

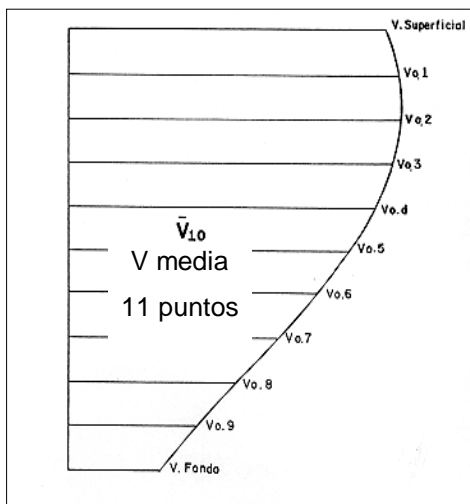


Figura 75. Método puntual. Fuente. (IDEAM, 2006).

Método superficial

Se realizan mediciones de velocidad 20 cm por debajo de la superficie del agua. Este método se utiliza para medir la velocidad en crecientes, las cuales no permiten, por efecto de las palizadas, efectuar aforos convencionales, el objetivo es proteger el equipo hidrométrico por su alto costo.

Cuando se presenta un aforo de esta índole, se utiliza el factor K, (ver fórmula) para convertir la velocidad superficial a velocidad media en la vertical. Cuando no se tiene aforos anteriores y por consiguiente no se han calculado el factor de conversión para cada uno de los aforos, se emplea 0.85, cifra promedio obtenida en experimentación en canales.

$$V_{\text{media}} = K * V_{\text{super}}$$

Método de integración

En este método el molinete es sumergido y elevado a lo largo de toda la vertical a una velocidad uniforme. La velocidad de descenso o ascenso del molinete no

deberá ser superior al 5 % de la velocidad media del flujo y en todo caso deberá estar comprendida entre 0.04 y 0.10 m/s. En cada vertical se realizan dos ciclos completos y si los resultados difieren de más de 10 %, se repite la medición.

Determinación de la velocidad media de la sección

Para determinar la velocidad media de la sección de aforos, se toman secciones parciales a las cuales se les van calculando sus velocidades de la siguiente manera: se toma una sección entre verticales con velocidades conocidas, se promedian estas velocidades y el resultado es la velocidad media de la subsección, así:

$$V_{\text{media}} = \left[\frac{V_1 + V_2}{2} \right]$$

Cálculo del caudal parcial y caudal total

El producto del área parcial multiplicada por la velocidad media de la sección parcial nos define el caudal parcial, que corresponde al caudal que pasa por cada tramo del cauce.

$$Q_p = A_p * V_p. \text{ media}$$

Qp=	Caudal parcial
Ap=	Área parcial
Vp.media	Velocidad media de la sección parcial.

Los caudales parciales se suman para obtener el caudal total. Con la relación del caudal total (QT) y el área total (AT) se obtiene la velocidad media (Vm) de la sección de aforos. Ver ecuación.

$$QT = AT * V_m$$

QT = Caudal total

AT = Área total

Vm = Velocidad media del aforo

Molinete Hidrométrico- Lancha en movimiento

Para la ejecución de aforos por el método de lancha en movimiento, se requiere, fijar puntos en las dos orillas, los cuales definen la sección de aforos, los puntos de alineamiento y la base, como se observa en la Figura 76

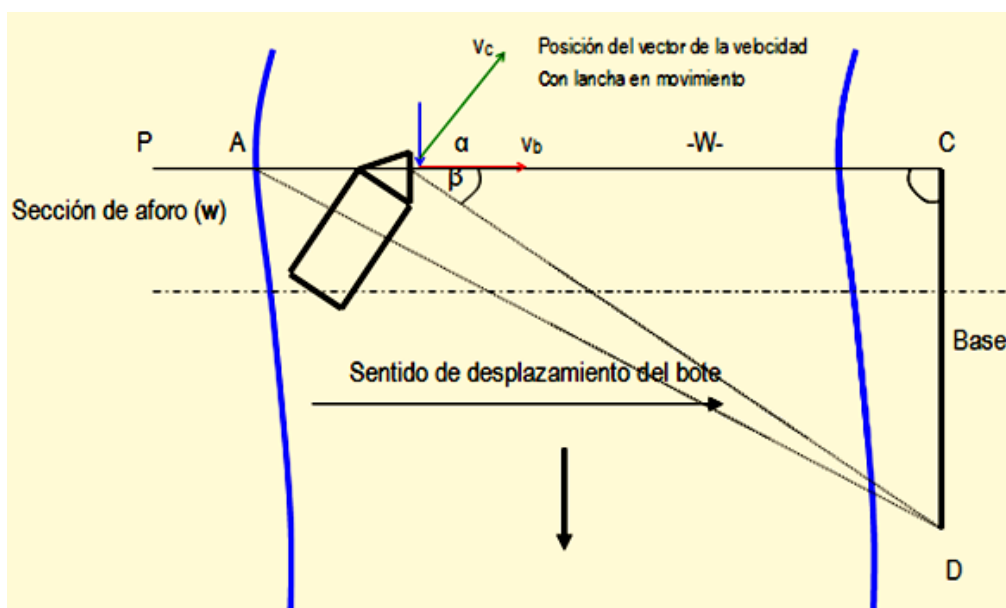


Figura 76. Aforo con lancha en movimiento. Fuente: (IDEAM, 2006)

Para la determinación del ancho de la sección (W) se requiere fijar puntos en ambas orillas (P) y (C), en lo posible por fuera del nivel de aguas altas. Esta línea, sección de aforos, con la base C - D, debe ser construida de tal manera que el ángulo (β)

se encuentre entre 15° y 75° para facilitar una mayor precisión tanto en el cálculo como en la localización del objetivo al momento de la observación.

V = velocidad de la corriente.

V_c = velocidad resultante del agua que pasa por la aleta del molinete

V_b = velocidad del bote

α = ángulo entre la aleta y la sección transversal de recorrido

L_b = distancia recorrida por el bote entre los puntos de observación en la sección transversal, a la velocidad del bote. V_b .

L_c = distancia entre dos puntos de observación consecutivos (del indicador y contador), con la velocidad resultante o V_c .

Δt = Tiempo transcurrido entre dos puntos de observación de la corriente.

Entonces la velocidad de la corriente requerida es V :

$$V = V_c \operatorname{seno} \alpha$$

Además

$$L_b = V_c \operatorname{coseno} \alpha \Delta t$$

Y como

$$\Delta t = L_c$$

$$L_b = L_c \operatorname{coseno} \alpha$$

El caudal se calcula de manera similar al método convencional área - velocidad, sumando los productos de las áreas de los segmentos por las velocidades medias en cada sección parcial.

Como el molinete generalmente se sitúa un metro por debajo de la superficie, es necesario el uso de un coeficiente para ajustar la velocidad medida. En ríos grandes, el coeficiente es generalmente uniforme a través de la sección. Investigaciones efectuadas en varios ríos han mostrado que el coeficiente varía entre 0.9 y 0.92.

El método de lancha en movimiento proporciona una única medida del caudal, es decir una observación en la relación nivel descarga con una aproximación de más o menos del 5% para un 95% de nivel de confianza.

Aforo con Flotadores

Para el aforo con flotadores, normalmente se toman las velocidades a $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$ y $\frac{3}{4}$ del ancho de la sección, para lo cual se selecciona un tramo de la corriente limitado por dos secciones, entre las cuales las líneas de flujo sean paralelas. En la sección uno, se colocan los flotadores y en la sección dos se registra la llegada, tomando el tiempo de desplazamiento de cada uno de los flotadores. Las distancias entre el flotador y la margen al paso de cada sección transversal se determinarán mediante medios ópticos adecuados, por ejemplo, un teodolito.

La velocidad del flotador es igual a la distancia entre secciones transversales dividida por el tiempo de desplazamiento. Deberían obtenerse como mínimo cinco valores de velocidad del flotador en cada segmento, y la media de estos valores se multiplicará por un coeficiente para obtener la velocidad media del agua en cada segmento. El coeficiente está basado en la forma del perfil de velocidad vertical y en la profundidad relativa de inmersión del flotador. El coeficiente a aplicar a la velocidad medida se determinará, a ser posible, en cada punto de observación mediante un análisis de las mediciones de caudal efectuadas con el molinete.

Cuando no se disponga de tales resultados podrá utilizarse un factor de ajuste, F , de la Tabla 10 para efectuar una estimación aproximada.

Tabla 10. Factor de ajuste F de la velocidad de un flotador en función del coeficiente R entre la profundidad del flotador sumergido y la profundidad del agua

R	F
0.10 o menos	0.86
0.25	0.88
0.50	0.90

R	F
0.75	0.94
0.95	0.98

Fuente. (OMM, 2011)

Otra posibilidad consistiría en representar gráficamente la velocidad del flotador en función de la correspondiente distancia desde la margen, con el fin de determinar la velocidad superficial media al través del río. La velocidad media del flujo en la sección transversal es igual a la velocidad superficial media multiplicada por un coeficiente, K , cuyo valor se deducirá, a ser posible, de las mediciones precedentemente efectuadas mediante un molinete para caudales menores.

El caudal correspondiente a cada segmento se calcula multiplicando el área promediada de la sección transversal del segmento por la velocidad media del flujo en éste. El caudal total será la suma de todas ellas.

Aforo ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler)

En el momento de la medición del caudal, el instrumento ADCP debe estar debidamente calibrado, teniendo en cuenta los manuales correspondientes a la referencia de este. Del mismo modo este instrumento debe estar conectado y transmitiendo señal a un computador para el cálculo del caudal.

Cuando un instrumento ADCP procesa la señal reflejada por las partículas del agua, divide la columna de agua en varios segmentos discretos apilados a lo largo de la vertical. Estos segmentos se denominan celdas de profundidad. Un instrumento ADCP determina la velocidad y dirección de cada celda de profundidad. Al mismo tiempo, la señal proveniente del fondo, denominada pista de fondo, mide la velocidad y dirección de la barca. Esto significa que la barca no tiene que atravesar perpendicularmente el flujo. Los procedimientos utilizados para obtener datos de calidad son cada vez más estándar en todo el mundo. El número de travesías

dependerá de la diferencia entre las mediciones del caudal. Si el caudal correspondiente a cualquiera de las cuatro travesías difiriera en más de un 5 %, se efectuarán como mínimo otra travesía adicional para obtener la medición del caudal a partir del promedio de las cinco travesías. En ocasiones se efectúa un número mayor de travesías para reducir los posibles errores sistemáticos de la dirección. El usuario deberá configurar los instrumentos antes de comenzar las operaciones. El modo de configuración seleccionado dependerá de las condiciones en el emplazamiento (profundidad y velocidad del agua, etc.) en el momento de la medición. Será importante seleccionar el modo adecuado para conseguir la mayor exactitud de las mediciones del caudal. El usuario ha de determinar la profundidad y distancia adecuadas desde el ADCP hasta las márgenes, y se asegurará de que el cabeceo y balanceo y la velocidad de la barca/instrumento se sitúan dentro de unos límites aceptables durante las mediciones. Un error sistemático en alguna de éstas podría dar lugar a un importante error sistemático en los valores del caudal resultantes. (OMM, 2011).

Método Volumétrico

Para el método volumétrico, es necesario definir y adecuar la sección, para tal efecto, se recurre a recipientes de uso común como un balde o caneca que tenga registros de volumen; en otros casos el aforo se realiza en tanques de mayor tamaño que tengan dimensiones precisas, de tal manera que mediante la medición de un diferencial de nivel se determina un incremento de volumen y tomando el tiempo de incremento de volumen se puede calcular directamente el caudal que lleva la corriente o el canal.

La calidad de la medición depende del cuidado que se tenga en las maniobras, por ejemplo, que ingrese al recipiente el 100% del flujo, es decir que no se presenten pérdidas y que la medición del tiempo sea muy exacta, para lo cual en algunos casos es necesario adelantar adecuaciones en el cauce con el propósito de

transportar el total del flujo al recipiente mediante ayudas adicionales, por ejemplo, una caña (media) o una canaleta, según la magnitud del caudal.

El caudal se obtiene por la relación entre el volumen recolectado en litros y el tiempo correspondiente en segundos:

$$Q = \text{Volumen} / \text{Tiempo}$$

Método con Trazadores (dilución)

El desarrollo tecnológico permite actualmente realizar aforos químicos de manera automatizada, evitando el transporte de equipos de laboratorio y obteniendo adicionalmente al caudal y otras variables de significativa importancia para el control hidrológico y el modelamiento de calidad del agua, como parte de la gestión de vertimientos en ríos, como la velocidad, el área de la sección, los coeficientes de Manning y Chezy y la longitud de mezcla.

Aforo por dilución

En las mediciones del caudal se pueden emplear dos (2) métodos en los que intervengan sustancias trazadoras; el primero basado en la inyección de la sustancia a un caudal constante y el segundo con inyección (vertimiento) instantánea.

La condición fundamental de la selección de los emplazamientos para la medición del caudal mediante el método por dilución, es que se produzca una mezcla homogénea de la solución inyectada en el agua de la corriente en un tramo relativamente corto de un canal. La mezcla se ve mejorada por las rugosidades del canal y la presencia de cantos rodados que aumentan la turbulencia de la corriente, tal como cascadas y estrangulamientos abruptos del curso del agua.

Seleccionado el sitio del emplazamiento o de medición, se debe determinar la distancia L aproximada en metros, requerida entre el sitio de inyección y el sitio de medición, la cual se puede calcular a partir de la siguiente expresión definida por:

$$L = 0.13 \times C \times \left(\frac{(0.7 \times C) + 6}{g} \right) \times \frac{b^2}{d}$$

En donde:

b = Ancho medio del río.

d = Profundidad media de la corriente.

C = Coeficiente de Chezy para el tramo ($15 < C < 50$).

g = Aceleración de la gravedad.

Ejemplo:

b = 2.9 metros d = 0.35 metros g = 9.81 m/s² C = 15.33

$$L = 0.13 \times 15.33 \left(\frac{(0.7 \times 15.33) + 6}{9.81} \right) \times \frac{2.9^2}{0.35}$$

L = 81.7 metros.

Según Kutter el coeficiente C se define a partir de la siguiente ecuación, en función de la rugosidad, la pendiente y el factor hidráulico.

$$C = \frac{23 + \frac{(0.00155)}{S} + \frac{1}{n}}{1 + \left[23 + \left(\frac{0.00155}{S} \right) \times \left(\frac{n}{R^{(1/2)}} \right) \right]}$$

En donde:

S = Pendiente del tramo en m/m

R = Radio Hidráulico de la sección = A / P m/m

A = Área en m²

P = Perímetro mojado = Ancho sección + 2 (profundidad media)

n = Rugosidad del cauce

En una corriente, en que el tramo de medición tiene una pendiente de 185 m/km. (0.185 m/m), una rugosidad de 0.045 y un radio hidráulico de 0.28194 m, calcular el

coeficiente C, tomando como base los datos del ejemplo anterior; el coeficiente de Chezy resultante es:

$$C = \frac{23 + \left(\frac{0.00155}{0.185} + \frac{1}{0.045} \right)}{1 + \left[23 + \frac{0.00155}{0.185} \times \left(\frac{0.045}{0.2819^{0.5}} \right) \right]}$$

$$C = 15.33$$

También puede definirse según otros autores como Manning que emplea una ecuación más sencilla:

$$C = \frac{1}{n} \times R^{\frac{1}{6}}$$

Siendo:

n = Rugosidad del cauce

$$C = 17.99$$

R = Radio hidráulico de la sección

En campo, se vierte en la corriente una solución de un elemento químico estable o radiactivo a un ritmo constante o instantáneamente y la solución se diluirá en la corriente por efecto de la mezcla. La relación entre el caudal constante de la solución inyectada y la determinación de la concentración resultante en la corriente en el sitio de medición, nos permite conocer el caudal de la corriente; la precisión del método depende principalmente de:

- a. Que la solución inyectada se diluya uniformemente en toda la sección transversal de la corriente, antes de llegar a la sección de muestreo. Si la solución trazadora se inyecta en forma continua, la concentración de esta solución deberá ser constante en toda la sección de medida. Si el elemento trazador se inyecta en forma instantánea se deberá cumplir con que la concentración sea la misma en todos los puntos de la sección y que:

$$C_2 = \int_0^T C dt$$

C_2 = Concentración resultante

T = Tiempo en el que toda la muestra pasa por determinado punto de la sección.

- b. Que los materiales, sedimentos, plantas u organismos depositados en el lecho del río no absorban la sustancia trazadora y que esta no se descomponga con el agua de la corriente. La concentración deberá determinarse en la sección de muestreo y como mínimo, en otra sección transversal situada aguas abajo, a fin de asegurar que no existe una diferencia sistemática en la concentración media entre una u otra sección de muestreo.

Determinación del peso del trazador

El peso (P_e) en gramos de trazador a emplear en una medición de caudal, este definido por la siguiente expresión:

$$P_e = Q_a * T * C_o$$

Ejemplo:

Caudal (Q_a) aproximado = 300 l/s.

Tiempo (T) en segundos de muestreo = 200 s.

Concentración esperada (C_o) = 0.010 g/l

P_e = 300 l/s * 200 s * 0.010 g/l

P_e = 600 g

Determinación del tiempo de medición

Para el caso de disolución de sales y disponiendo en terreno de un conductímetro, es posible graficar la conductividad contra el tiempo (Figura 78, Figura 79), determinado así el comienzo y el final del aforo; las mediciones de conductividad se realizan desde el momento que se inicia la inyección continua o instantánea de la

solución y el muestreo comienza cuando se registra el incremento de la conductividad, el cual se continúa a intervalos de tiempo (Δt), hasta que la conductividad se haga constante para el primer caso, mientras que en la inyección instantánea (Figura 77) el aforo termina cuando la conductividad es igual al dato inicial, es decir que la corriente recupera su estado natural.

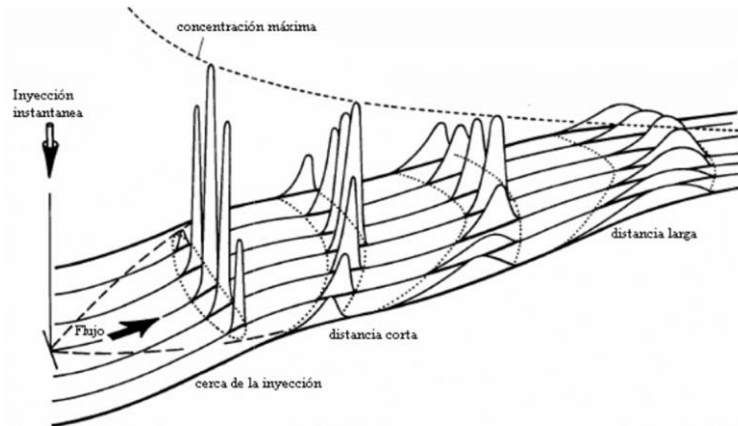


Figura 77. Variación de la curva de respuesta a lo largo del canal. Fuente. (Galecio Valdes, 2007)

El tiempo (T_i), medido desde el momento de iniciarse la inyección, hasta el instante en que comienza a pasar la onda, está dado por la relación entre la distancia L y la velocidad (V_e) de la corriente en m/s, estimada previamente para el tramo definido.

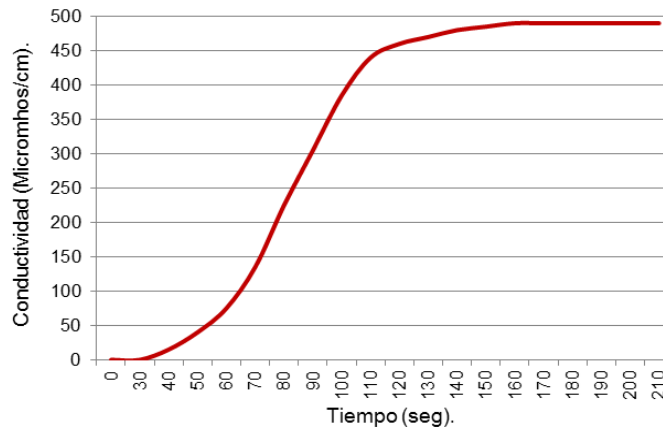


Figura 78. Conductividad según inyección constante. Fuente (IDEAM, 2006).

$$T_i = \frac{L}{V_e}$$

Reemplazando se tiene:

$$T_i = 81.7 \text{ m} / 0.65 \text{ m/s} \Rightarrow T = 126 \text{ s.}$$

El tiempo de muestreo (T) está dado por la sumatoria de los Δt constantes, empleados para la extracción de cada una de las muestras, para las cuales se emplean recipientes con capacidad de 100 mililitros. Este tiempo va a depender, para el caso de inyección constante, del tiempo que dure la inyección más el T_i y en el caso de inyección instantánea, del tiempo que tarde en pasar totalmente la onda de trazador.

Aunque no se conoce una norma que defina con precisión, los intervalos de tiempo (Δt), normalmente se utilizan 10 - 15 - 20 - 25 ó 30 segundos; lo importante es que se tomen el número de muestras necesarias para definir con precisión el comportamiento de las concentraciones durante el aforo.

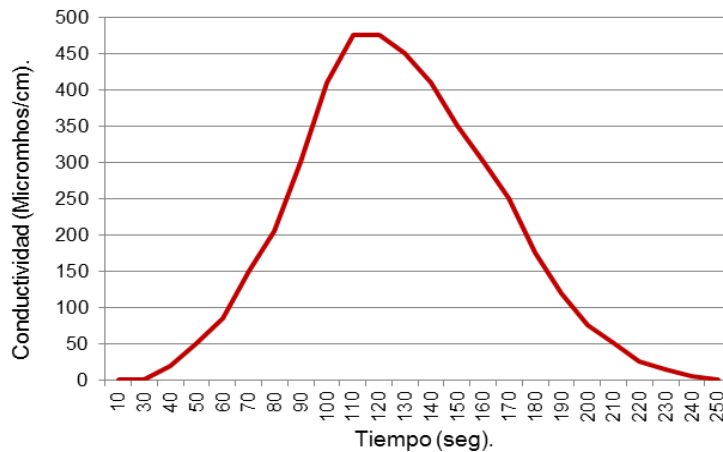


Figura 79. Conductividad según inyección constante. Fuente (IDEAM, 2006).

Cálculo del caudal - método de inyección continua

El cálculo del caudal (Q) en l/s, sin concentración inicial de trazador en la corriente, se determina a partir de la siguiente expresión:

$$Q = Q_{tr} \times \frac{C1 - C2}{C2 - C0}$$

Q_{tr} = Caudal de inyección

C1 = Concentración de la solución inyectada

C2 = Concentración obtenida en la sección de muestreo

C0 = Concentración inicial de la corriente

El caudal (Q) en lt/s., con concentración inicial de trazador en la corriente se obtiene a partir de: (Ver Tabla 11)

Cálculo del caudal - método de inyección instantánea

$$Q_{tr} = \frac{V \times C1}{\int_0^t C_x dt}$$

Si la corriente no presenta conductividad inicial el caudal (Q) en lt/s., está dado por:

V = Volumen de la solución inyectada en litros

$\int C_x dt$ parcial. = Sumatoria de las concentraciones parciales por tiempo

El caudal (Q), cuando la corriente tiene concentración inicial de trazador se obtiene mediante la fórmula de: (Ver Tabla 12).

$$Q = \frac{V \times (C1 - C0)}{\int_0^T C_x dt - C0 \times T}$$

C₀ × T = Concentración inicial de la corriente por tiempo total

$$\int_0^T C_x dt - C0 \times T = C3$$

T = Tiempo en que toda la solución cruza por el punto de muestreo.

PROTOCOLO DE MONITOREO DEL AGUA

Tabla 11. Aforo Inyección Constante

ESTACION	El puente	CORRIENTE	Guaza	FECHA	ABR-26-1990
PESO TRAZ. en gr.	1500	VOLUMEN en l	20.0	C ₀ en mg / l	2.0
C ₁ en mg / l	75000	C ₂ en mg / l	14.2	C ₃	
Q INYECCION l/s	0.045	NIVEL INIC. en m.	0.92	NIVEL FINAL en m	0.90
VELOC. MEDIA m/s	0.21	CAUDAL en l/s	276.6	NIVEL MEDIO en m	0.91
AREA en m ²	1.3				
INTERVALO DE t EN SEGUNDOS	NUMERO DE MUESTRA	CONCENTRACION mg / l	CONCENTRACION CONSTANTE mg / l	OBSERVACIONES	
15	1	2.1	14.2		
15	2	2.5			
15	3	2.7			
15	4	3.5			
15	5	6.2			
15	6	5.4			
15	7	8.3			
15	8	7.8			
15	9	9.3			
15	10	9.9			
15	11	10.7			
15	12	11.6			
15	13	12.3			
15	14	12.6			
15	15	12.8			
15	16	13.1			
15	17	13.5			
15	18	13.7			
15	19	13.8			
15	20	14.0			
15	21	14.1			
15	22	14.3			
15	23	14.3			
15	24	14.3			
15	25	14.1			
15	26	14.3			
15	27	14.3			
15	28	14.1			
15	29	13.5			
15	30	12.3			
15	31	11.6			
15	32	10.8			
15	33	9.8			
15	34	9.1			
510					
C ₂ = 14.2		Q = 276.6 l/s			
Q = Q ₀ ((C ₁ -C ₂)/(C ₂ -C ₀))		Dato obtenido en laboratorio			
Datos Obtenidos en campo					

Fuente. (IDEAM, 2006)

PROTOCOLO DE MONITOREO DEL AGUA

Tabla 12. Aforo Inyección Instantánea.

ESTACION	El puente	CORRIENTE	San Antonio	FECHA	May-17-1990
PESO TRAZ. en gr.	300	VOLUMEN en l	6.0	C₀ en mg / l	0.05
C₁ en mg / l	50000	C₂ en mg / l		C₃ (mg / l)xs	207.15
NIVEL INICIAL en m.	0.77	NIVEL FINAL en m.	0.77	NIVEL MEDIO en m	0.77
VELOC. MEDIA m/s	0.58	CAUDAD en l/s	1448	AREA en m²	2.50
INTERVALO t en s	10				
INTERVALO DE t EN SEGUNDOS	NUMERO DE MUESTRA	CONCENTRACION mg / l	CONCENTRACION CONSTANTE mg / l	CxAt (mg / l)*s	OBSERVAC.
10	1	0.05	0.025	0.25	
10	2	0.06	0.055	0.55	
10	3	0.07	0.065	0.65	
10	4	0.08	0.075	0.75	
10	5	0.08	0.080	0.80	
10	6	0.09	0.085	0.85	
10	7	0.15	0.120	1.20	
10	8	0.64	0.395	3.95	
10	9	1.89	1.265	12.65	
10	10	3.87	2.880	28.80	
10	11	6.94	5.405	54.05	
10	12	3.92	5.430	54.30	
10	13	1.73	2.825	28.25	
10	14	1.02	1.375	13.75	
10	15	0.63	0.825	8.25	
10	16	0.22	0.425	4.25	
10	17	0.10	0.160	1.60	
10	18	0.08	0.090	0.90	
10	19	0.07	0.075	0.75	
10	20	0.05	0.060	0.60	
200				217.15	
$C_3 = \sum \bar{C} \times \Delta t - (C_0 \times \Delta t \times N^\circ \text{ Intervalos})$					
Q = $V_x(C_1 \times C_0)/C_3$		Q = 1448 lt/s			
<div style="background-color: #cccccc; width: 100px; height: 15px; display: inline-block;"></div> Datos Obtenidos en campo		<div style="background-color: #ffffcc; width: 100px; height: 15px; display: inline-block;"></div> Dato obtenido en laboratorio			

Fuente. (IDEAM, 2006)

Tabla 13. Clasificación de las Aguas Según Salinidad

Clasificación	C.E. micromhos/cm.
C1 Baja	0 - 250
C2 Media	251 - 750
C3 Alta	751 - 2250
C4 Muy alta	> 2251

Fuente. (IDEAM, 2006)

Aforo con trazadores (químico) automatizado

Mediante últimas investigaciones, se ha podido consolidar un procedimiento totalmente automatizado para la ejecución de aforos químicos en corrientes que no pueden ser aforados por los métodos tradicionales con la utilización del molinete, ya que el cauce es irregular en geometría y pendiente longitudinal y tiene rocas, piedras y otros elementos que interfieren el flujo, originando turbulencia.

El equipo es una herramienta avanzada de ingeniería para la medición, análisis y caracterización de cauces naturales, que entrega resultados en tiempo real y en el sitio de aforo, con base en la técnica de trazadores, conocida por su precisión. La señal se toma con electrónica de dos tipos de sensores (Cloruro de sodio - sal y rodamina) y el análisis lo hace un PC manual mediante modelos físico - matemáticos propios que producen y entregan la información inmediatamente y la almacenan en memoria.

Sirve para todo tipo de cauces, con caudales muy bajos (pocos litros) hasta caudales muy grandes (100 m³/s con trazador fluorimétrico) y ofrece información novedosa hasta ahora difícil de obtener de manera precisa, conjuntamente con la información convencional, obviando problemas técnicos asociados con irregularidades en el flujo, implícitos en los métodos desarrollados mundialmente para realizar aforos de caudal.

Los modelos teóricos están basados en enfoques de gran alcance (termodinámica) concordantes con las leyes físicas conocidas y verificadas experimentalmente por más de 5 años. El equipo es amigable y de uso fácil, al disponer en el sitio de una computadora de mano (PDA), que facilita el proceso y análisis de información en ambiente gráfico en Windows.

El equipo mide parámetros hidráulicos como la velocidad y el caudal y permite establecer parámetros de geomorfología de cauces representados en la rugosidad según Manning y Chezy, además calcula la longitud de mezcla, parámetro que alimenta los modelos de calidad del agua, mediante los cuales se establece la capacidad de asimilación de un vertimiento por parte de una corriente, lo cual facilita la toma de decisiones en gestión ambiental relacionada con permisos de vertimientos a cauces y la aplicación de tasas retributivas.

El sistema está constituido por un sensor de conductividad eléctrica, una interfase electrónica, una computadora de mano (PDA) y un software para procesamiento, análisis, almacenamiento y consulta de información. Estos elementos se presentan enseguida.

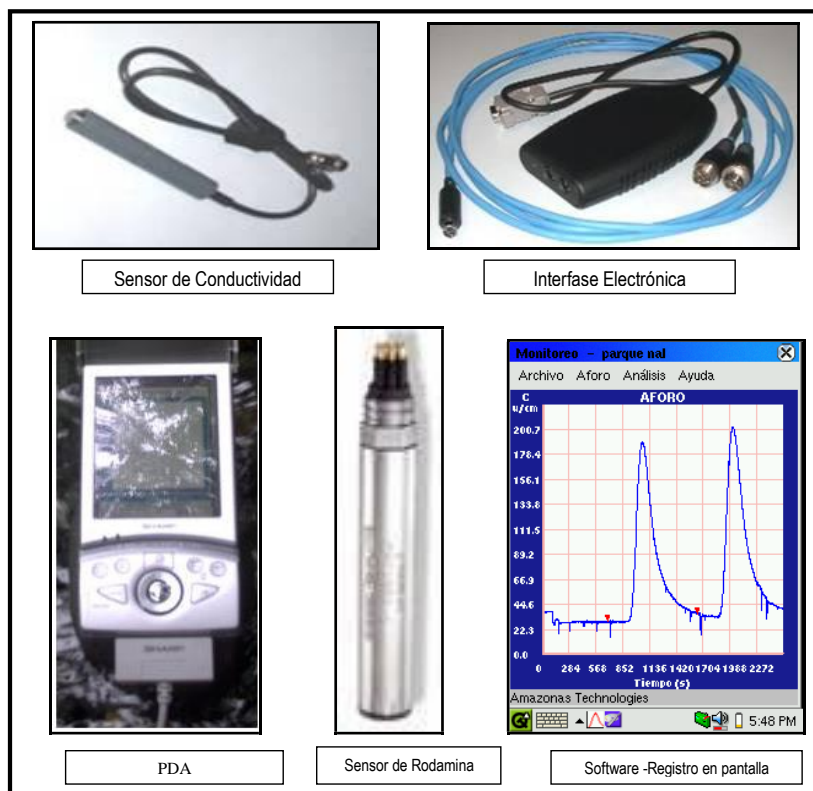


Figura 80. Trazadores Automatizados. Fuente. (IDEAM, 2006).

Procedimiento

- Seleccionar un tramo del cauce con facilidad de acceso para inyectar el trazador (sal o rodamina) en la sección uno y medir el paso de la nube del trazador en la sección dos.
- Medir la conductividad de la corriente antes de inyectar el trazador, para detectar la presencia (concentración) natural del trazador en el agua.
- Preparar una solución del trazador con concentración conocida.
- Instalar el equipo (sonda, interfase y PDA) en la sección dos, para medir el paso de la nube del trazador.

- Verter la solución con el trazador en la sección uno y al mismo tiempo, marcar en la gráfica de la pantalla de la PDA una señal (triángulo).
- Iniciar la medición. En la pantalla de la PDA se va observando instantáneamente el paso de la nube con, inicialmente, aumento de la concentración hasta llegar a un punto máximo en un tiempo X; posteriormente se observa el descenso formando una onda que en la parte final del paso de la nube se vuelve constante manteniendo el valor de la concentración detectada en la corriente antes del vertimiento.
- Una vez ha pasado la nube se cierra la aplicación y se puede allí mismo, ejecutarse las rutinas de cálculo, con base en los datos que el software extrae de la curva experimental.
- Mediante la rutina de modelamiento el usuario aplica las ecuaciones implícitas en el software y genera una curva teórica, la cual es comparada con la curva experimental.
- Si el usuario considera que la modelación (curva) es apropiada, es decir hay coincidencia entre teoría y experimento, pasa a conocer los resultados de los diferentes parámetros: velocidad, caudal, área, longitud de mezcla, coeficientes de Chezy y Manning y el número de Reynolds.

Estructuras Aforadas

Vertedero rectangular

Para un vertedero sin contracciones laterales, es decir que la cresta ocupe todo el ancho del cauce, con las dimensiones mostradas en la Figura 81, la ecuación de descarga según Francis, es:

Donde:

L = Longitud de la cresta

H = Carga hidráulica sobre la cresta, medida a una distancia mínima de 4 veces la carga hidráulica máxima, concebida en el diseño (la cota del cero de la mira coincide con la cota de la cresta del vertedero), con el fin de eliminar el efecto de la contracción vertical de la lámina de agua al paso por el vertedero y asegurar una pérdida de energía despreciable entre la sección de medición y el borde aguas arriba de la coronación. El coeficiente 1.84 representa el efecto por estrangulamiento del flujo.

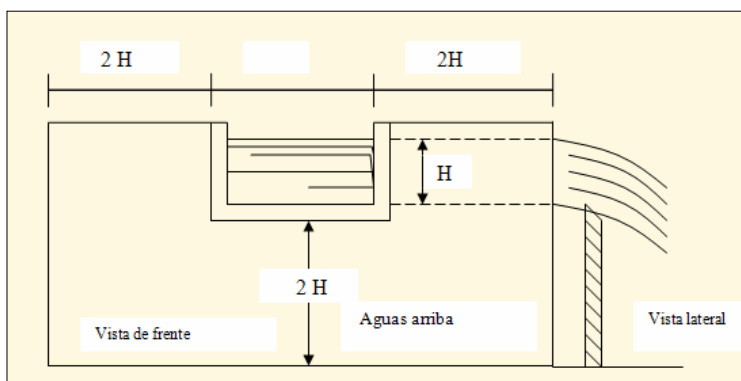


Figura 81. Vertedero con dos contracciones laterales. Fuente. (IDEAM, 2006)

En caso de contracciones laterales, la ecuación se transforma así.

$$Q = 1.84 (L - 0.1 nH) H^{3/2}$$

Donde:

L = Longitud de la cresta

H = Carga hidráulica sobre la cresta

n = Número de contracciones laterales (1 o 2)

Vertedero trapecial (Cipolletti)

Este vertedero se construye con paredes laterales inclinadas en una relación 1 horizontal a 4 vertical (Figura 82) y su ecuación de descarga es:

$$Q = 1.859 L H^{3/2}$$

L = Longitud de la cresta

H = Carga hidráulica sobre la cresta

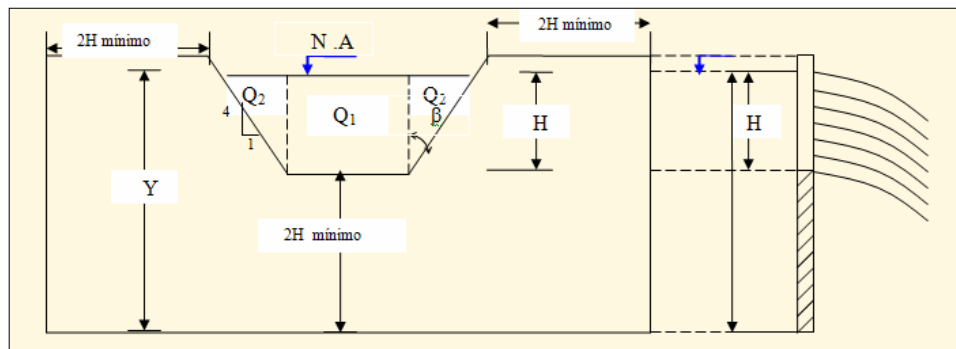


Figura 82. Vertedero trapecial. (IDEAM, 2006)

Vertedero triangular

Recomendado para medición de caudales pequeños, siendo en particular conveniente para medición de caudales muy fluctuantes. Los más utilizados son los de escotadura con ángulo de 90° y 60° , caracterizados por los elementos mostrados en la Figura 83.

El elemento de área AB corresponde a:

$$AB = 2 AC = 2 P \tan \beta$$

También se puede establecer que:

$x = h - p$; derivando apropiadamente se obtiene:

$dx = -dp$; el caudal de la franja será:

$$dQ = V dA; V = Cd \sqrt{2gx}$$

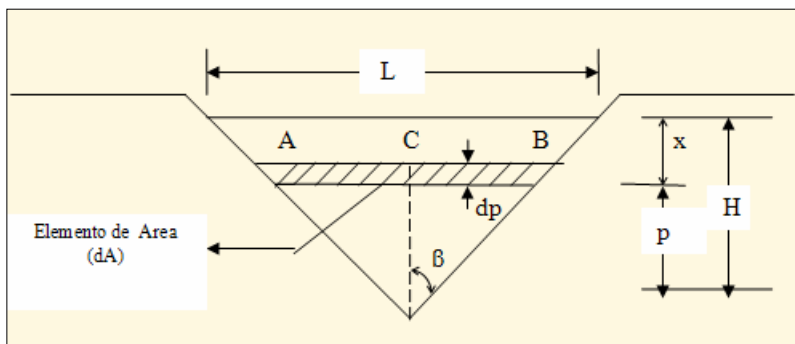


Figura 83. Vertedero Triangular. (IDEAM, 2006)

Reemplazando términos se llega a las ecuaciones de descarga para los vertederos de mayor uso, es decir, de 60° y 90°⁶.

$$Q = 1.402 h^{2.50} (90^\circ)$$

$$Q = 0.809 h^{2.50} (60^\circ)$$

H = carga sobre el ángulo formado por los dos lados

Para los diferentes tipos de vertederos, las mediciones de caudal son precisas mientras se mantengan las consideraciones de diseño y funcionan perfectamente en corrientes que no transporten grandes cantidades de sedimento, por cuanto este material se deposita en el fondo del canal (tanque de amortiguación), inmediatamente arriba de la estructura, haciendo que las líneas de flujo alteren su dirección, lo que implica la des calibración. En consecuencia, es necesario revisar continuamente el cauce de la corriente y los diferentes elementos de la estructura y efectuar trabajos mantenimiento preventivo y conservación, así:

- Revisión del estado y la posición del limnómetro, verificando por topografía la cota cero.
- Extracción de malezas acuáticas, piedras, gravilla y sedimento fino, del tanque amortiguador, aguas arriba de la estructura.

⁶ Hidrología Básica II Hernán Materón - Universidad del Valle.

- Verificación de la cota y nivel (horizontal) de la cresta del vertedero, realizando los trabajos de conservación pertinentes
- Corrección de filtraciones a través de los estribos y muros
- Verificación del estado del piso y taludes a la salida de la estructura, realizando los trabajos de conservación requeridos.

Canaletas

Tipo Balloffet

Su estructura es muy sencilla, y en el caso de instalarla en un canal rectangular ya construido, resulta muy económica su construcción. Su funcionamiento hidráulico preciso se ajusta a ecuaciones comprobables basadas en los principios generales de la hidráulica.

Dimensiones de la estructura

Las características geométricas de estas canaletas se expresan en función del ancho (B) de la sección de acceso y se define a continuación según la Figura 84.

Longitud total del medidor (L)	= 3 B
Longitud de la sección de acceso (L')	= 2 B
Longitud de la sección contraída o garganta (L')	= B
Ancho de la sección de acceso	= B
Ancho de la sección contraída	= rB
Relación de contracción (r)	= b/B
Altura máxima	= 2B
Ancho de los abultamientos y radio de curvatura (e)	= ((1 - r)/2) B

La placa de fondo debe construirse perfectamente horizontal.

La medición de la altura de la lámina de agua se efectúa en un limnómetro ubicado a una distancia (B) antes de la garganta.

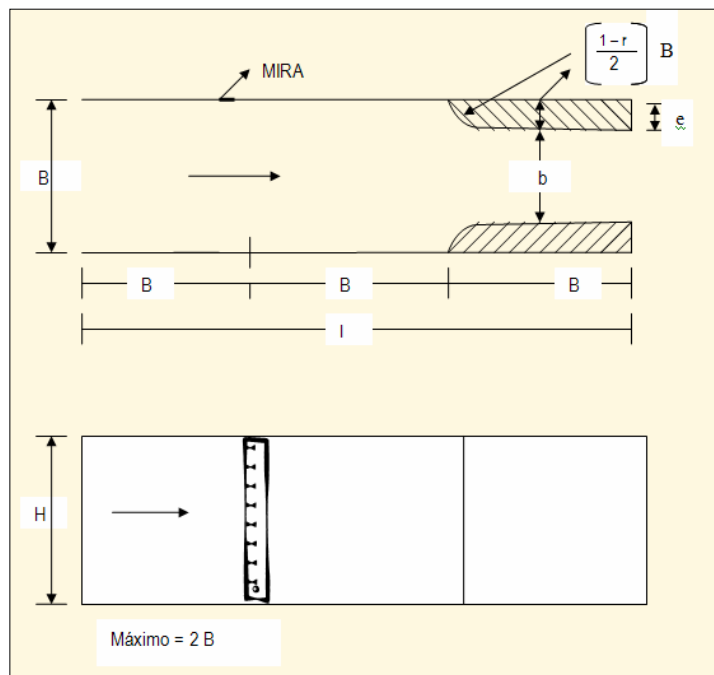


Figura 84. Canaleta Tipo Balloffet. (IDEAM, 2006)

Selección del ancho de una canaleta

Para canales en concreto, el ancho (B) del aforador deberá representar en la medida que sea posible, el ancho promedio de la sección del canal, es decir, que las dos áreas a sección plana sean aproximadamente iguales. Si el canal es en tierra, el ancho B puede ser menor.

En los dos casos esta dimensión depende del caudal (Q) que se desea cuantificar y el diseñador puede disminuirla en función de esta característica y del costo de la estructura.

Relación de contracción (r)

A pesar de poder utilizar cualquier valor para la relación de contracción, es preferible utilizar las relaciones $r = 1/3$ y $r = 2/3$, escogiendo la más apropiada de acuerdo con el borde libre aguas arriba. Si hay poco borde libre, deberá tomarse $r = 2/3$, por

cuanto esta relación produce menor elevación de nivel aguas arriba, en caso contrario se toma $r = 1/3$.

Al seleccionar el ancho (B) se recomienda que al aplicar la relación de contracción, la garganta y los dos abultamientos queden con dimensiones expresadas en cifras redondas lo cual facilita la construcción de la estructura y, consecuentemente, garantiza la calibración y la precisión de las mediciones.

Cálculo de la descarga en condiciones de flujo libre

La ecuación establecida por profesor Balloffet para $r = 2/3$ es la siguiente:

$$Q = c M b h \sqrt{2 g h}$$

Donde:

C = coeficiente de calibración

M = Factor que depende la relación de contracción = 0.434

$$M = 2 [(1/r^3) \cos 3 ((\pi/3)+ (1/3) \text{ arc cos } r)]^{1/2}$$

$$b = (2/3) B$$

h = nivel de agua medida a una distancia (B) aguas arriba de los abultamientos. La cota cero de la mira coincide con la placa de fondo.

Agrupando los factores constantes se tiene:

$$Q = (0.96) (0.434) (2/3) (4.4295) B h^{3/2}$$

Efectuando las operaciones, se obtiene la ecuación de descarga para canaletas con $r = 2/3$

$$Q = 1.23 B h^{3/2}$$

Con las siguientes unidades:

(B) en metros, (h) en metros, (Q) en m³/s

Para relación de contracción $r = 1/3$, la ecuación de descarga es la siguiente:

$$Q = c M r B \sqrt{(2g) h^{3/2}}$$

Donde:

$C = 0.95$, $M = 0.397$, $r = 1/3$, $h =$ Nivel agua

Reemplazando y efectuando operaciones se obtiene.

$$Q = 0.557 B h^{3/2}$$

Con las siguientes unidades:

(B) en metros, (h) en metros, (Q) en m³/s

Medidor sin cuello (cutthroat)

Consiste principalmente en una sección de entrada, la sección de salida, la garganta y la plantilla o fondo aforador. La sección de entrada está constituida por dos paredes verticales convergentes, con una convergencia de 3:1; la sección de salida está formada también por dos paredes verticales, pero divergentes, con una divergencia de 6:1, formando una constricción o garganta; la amplitud de la garganta es designada con la letra W. El fondo o plantilla de aforador es plano horizontal.

El tamaño del aforador es generalmente especificado por la amplitud de la garganta W, y por la longitud total del aforador L.

Tanto la sección de entrada como la sección de salida, tienen una amplitud igual denominada por la letra B y cuyo valor está dado por la ecuación:

$$B = W + 2/3 (L - 1) = W + 1/3 (L - 2)$$

O también puede expresarse así:

$$B = W + (L / 4.5)$$

Donde L que es la longitud total, es igual a:

$$L = L_1 + L_2$$

La Figura 85 representa un esquema del aforador sin cuello en donde se indican sus dimensiones básicas.

La descarga Q del aforador se obtiene midiendo las profundidades de flujo aguas arriba H_a y aguas abajo H_b de la garganta. Con el objeto de medir con precisión las profundidades H_a y H_b el medidor debe estar provisto de pozos tranquilizadores.

Estos pozos deben estar colocados a un lado de la estructura y comunicados con ella en un punto bien definido en la sección de entrada y salida del aforador, a una distancia L_a y L_b aguas arriba y aguas abajo de la garganta respectivamente. Su uso es restringido en el campo, pues quedan expuestos a innumerables factores que pueden causar obstrucciones y en general el deterioro de su funcionamiento, por lo cual son reemplazadas por rejillas graduadas, que cumplen satisfactoriamente el mismo trabajo. Las longitudes de L_a y L_b se pueden calcular por medio de las siguientes expresiones:

$$L_a = 2/9 L \quad L_b = 5/9 L$$

En estos pozos tranquilizadores se pueden colocar flotadores y limnógrafos cuando se requieren mediciones precisas y continuas.

El grado de sumergimiento S, se encuentra mediante la siguiente relación:

$$S = (H_b / H_a) \times 100, \text{ en } \%$$

El efecto del sumergimiento es disminuir la descarga en el aforador. La disminución principia sin embargo en un valor determinado de sumergimiento transitorio S_t . Cuando el aforador “sin cuello” opera con un valor de sumergimiento por debajo del sumergimiento transitorio, el flujo no es afectado y se considera como flujo libre. Por

otro lado, si el sumergimiento es mayor que el sumergimiento transitorio se dice que el aforador está operando sumergido y la descarga se hace menor a medida que aumenta el porcentaje de sumergimiento; en el aforador sin cuello St varía de acuerdo con la longitud del aforador.

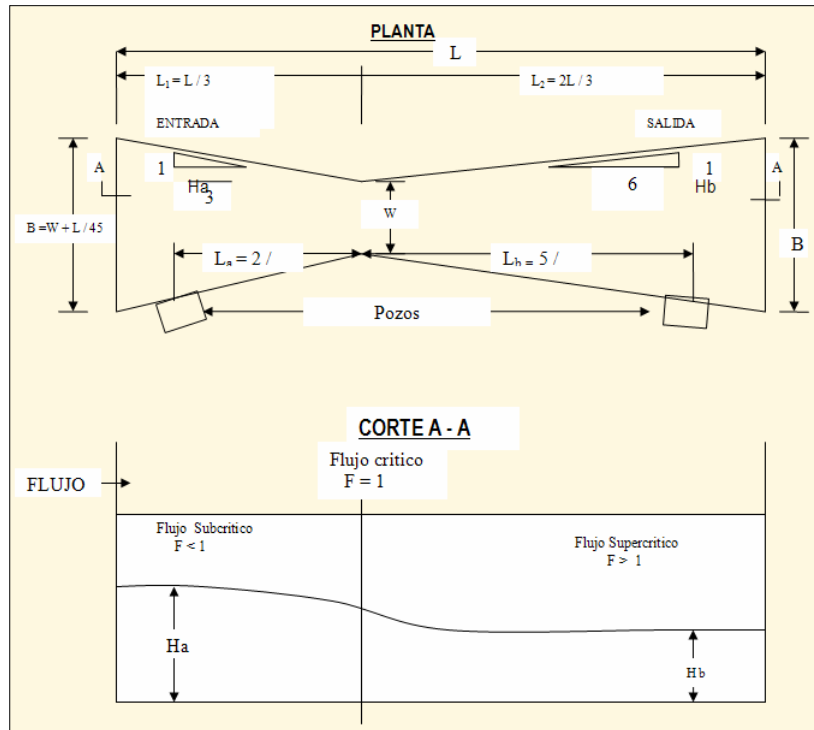


Figura 85. Medidor sin cuello (cutthroat). Fuente. (IDEAM, 2006)

Cuando el flujo es libre:

$$Q = C (Ha)^n$$

Donde:

Q = Descarga en m³/s

Ha = Profundidad del flujo aguas arriba en metros

Hb = Profundidad del flujo aguas abajo en metros

n = Exponente de flujo libre

C = Coeficiente de flujo libre

El valor de (n) es función únicamente de la longitud (L) o sea que es constante para todos los medidores de una misma longitud, independientemente de la amplitud de la garganta.

El coeficiente (C) depende de la longitud y de amplitud de la garganta (W) y se puede encontrar mediante la siguiente función empírica:

$$C = K W^{1.025}$$

En donde (K) es el coeficiente de longitud del aforador para flujo libre. En la Tabla 14. valores de k_s y n_s , se muestra la relación entre (K) y (n), con respecto a longitud del aforador, en condiciones de flujo libre o sumergido.

Cuando el flujo es sumergido:

$$Q = C_s (H_a - H_b)^{n/(100S)^{n_s}}$$

Q = Descarga en m³/s

H_a = Profundidad del flujo aguas arriba en metros

H_b = Profundidad del flujo aguas abajo en metros

n = Exponente de flujo libre

n_s = Exponente de flujo sumergido

S = Sumergimiento (H_a/H_b) en porcentaje

C_s = Coeficiente de flujo sumergido

El valor de n_s solo depende de la longitud del aforador L, el coeficiente de flujo sumergido c_s varía en función de la longitud del aforador L y de la amplitud de la garganta W, y se puede calcular mediante la siguiente ecuación:

$$C_s = k_s w^{1.025}$$

En donde k_s es el coeficiente de longitud del aforador para flujo sumergido; los valores de k_s y n_s pueden obtenerse directamente de la Tabla 14. valores de k_s y n_s para cualquier longitud de aforador seleccionado.

Tabla 14. valores de ks y ns

L (m)	S (%)	Flujo Libre		Flujo	
		N	K	Ns	Ks
0,5	60,7	2,1	6,2	1,7	3,5
0,6	62,0	2,0	5,2	1,6	2,9
0,7	63,0	1,9	4,6	1,6	2,6
0,8	64,2	1,9	4,2	1,5	2,4
0,9	65,3	1,8	3,9	1,5	2,2
1,0	66,4	1,8	3,6	1,5	2,0
1,2	68,5	1,8	3,2	1,4	1,8
1,4	70,5	1,7	2,9	1,4	1,6
1,6	72,0	1,7	2,7	1,4	1,5
1,8	73,8	1,6	2,5	1,4	1,3
2,0	75,5	1,6	2,4	1,4	1,2
2,2	77,0	1,6	2,3	1,4	1,2
2,4	78,4	1,6	2,2	1,4	1,1
2,6	79,5	1,6	2,2	1,4	1,1
2,7	80,5	1,6	2,1	1,4	1,1

Fuente: (IDEAM, 2006)

Aforador Parshall

El aforador Parshall está formado por tres secciones principales: una sección convergente de contracción, se localiza en su extremo aguas arriba; una sección constreñida o garganta; y una última sección divergente ó expansión aguas abajo, Figura 86.

El piso de la sección convergente está nivelado, tanto longitudinal como transversalmente; el de la garganta se inclina hacia abajo y el de la sección divergente tiene un declive ascendente. El ancho de la garganta (W) se emplea para señalar el tamaño del aforador.

El flujo en la estructura puede ocurrir bajo dos diferentes condiciones hidráulicas: una donde no existe sumergimiento, llamado flujo libre y otra donde la elevación de la superficie del agua corriente hacia abajo, desde el aforador, tiene altura suficiente para retardar el índice de descarga, denominada flujo sumergido. Para determinar el gasto, se dispone de dos medidores de profundidad (Ha y Hb), los cuales se

calibran colocando la cota “cero” coincidiendo con la cota de la cresta del canal (sección convergente).

Cuando se elige la relación correcta entre el ancho de la garganta y la descarga, la velocidad de aproximación queda controlada automáticamente. Este control se logra seleccionando una anchura de garganta suficiente para admitir el flujo máximo que habrá de aforarse, pero al mismo tiempo, suficientemente angosta para que cause un aumento en la profundidad del flujo aguas arriba. El resultado es un área transversal mayor en el cauce que aproxima y, en consecuencia, una reducción en la velocidad.

El cálculo del caudal en el caso del flujo libre solo requiere medir una altura de nivel del agua, lo cual ocurre cuando la altura de la escala inferior es menor del 60% de la que se lee en la escala superior. La salida libre se determina midiendo la altura en la escala superior y la anchura de garganta, con estos datos se entra a una tabla que da el caudal.

Cuando la altura de la escala sea mayor que el 70% de la alcanzada en la superior se produce un flujo sumergido y la lectura de la escala superior queda afectada por este hecho. Investigaciones adelantadas por Parshall mostraron que cuando el grado de sumergimiento supera el 95% la determinación del gasto se vuelve incierta, debiéndose adoptar este valor como máximo.

Una ventaja importante del aforador Parshall es la posibilidad de que opere como dispositivo de cabeza sencilla con la mínima pérdida de carga. Esta cualidad permite emplearlo en canales relativamente poco profundos con pendiente escasa.

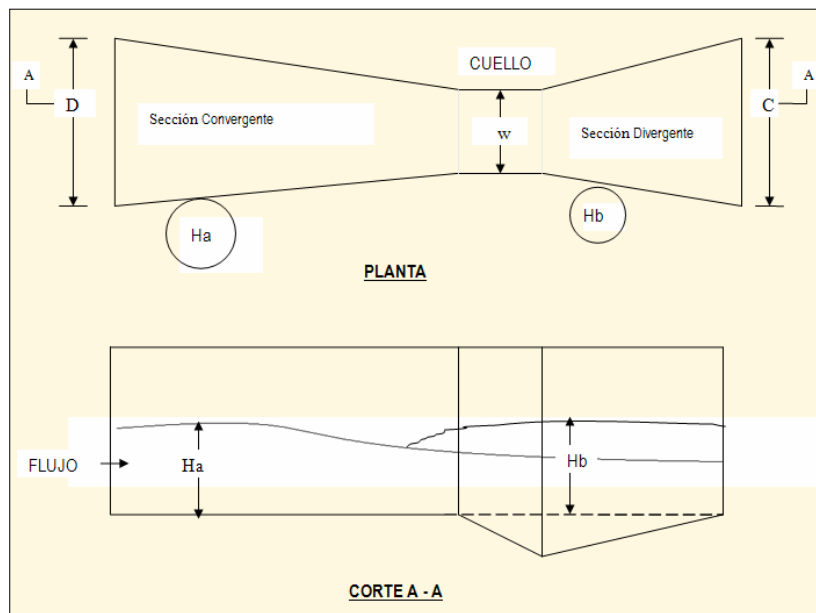


Figura 86. Aforador Parshall (IDEAM, 2006)

Para una descarga determinada, la pérdida de carga a través de un aforador Parshall es aproximadamente, una cuarta parte de la que requiere un vertedero en condiciones similares de flujo libre.

Como desventaja de este aforador, se puede mencionar su diseño relativamente complicado y su tolerancia crítica en lo que se refiere a construcción e instalación, por lo cual se requiere mano de obra calificada y supervisión cuidadosa para obtener aforos satisfactorios; el error del aforador Parshall es generalmente inferior al 2%.

En los cálculos debe tenerse en cuenta que si $H_b = H_a$, el aforador trabaja con sumergimiento y la descarga (Q) es función de H_a y H_b .

El grado de sumergimiento (S) se determina así:

$$S = H_b / H_a$$

Donde:

H_a = Profundidad del flujo arriba

Hb = Profundidad del flujo abajo

Los valores de sumergimiento permiten conocer si el aforador trabaja a flujo libre o ahogado. En la tabla siguiente se presentan valores encontrados experimentalmente para diferentes tamaños del aforador:

Tabla 15. Valores para diferentes tamaños del aforador.

Tamaño del aforador (m)	Descarga Libre	Descarga con sumersión
W < 0.30	S < 0.6	0.6 < S < 0.95
0.30 < W < 2.50	S < 0.7	0.7 < S < 0.95
2.50 < W < 15	S < 0.8	0.8 < S < 0.95

Las ecuaciones para determinar la descarga en los aforadores Parshall, son:

Para flujo libre

$$Q = m Ha^n$$

Para flujo con sumergimiento: $Q = m Ha^n - C$

$$Q = m Ha^n - C$$

Los valores que pueden tomar los parámetros m y n varían de acuerdo con el tamaño del aforador. Parshall encontró experimentalmente los valores de los parámetros que para el caso de la descarga libre son:

$$W = 0.15 \text{ m} \quad Q = 0.381 Ha^{1.58}$$

$$0.30 < w < 2.50 \text{ m} \quad Q = 0.372 W (3.281 Ha) [1.57 (W)^{0.026}]$$

$$2.50 < W < 15.0 \text{ m} \quad Q = (2.293 W + 0.474) Ha^{1.6}$$

Tabla 16. Valores de m y n para el Cálculo de la Descarga Aforador Parshall.

Valores de m y n para fórmula de descarga en unidades métricas					
W (m)	M	N	W (m)	m	N
0,15	0,381	1,580	4,5	10,790	1,6
0,30	0,680	1,522	5	11,937	1,6
0,50	1,161	1,542	6	14,229	1,6
0,75	1,774	1,558	7	16,522	1,6
1,00	2,400	1,570	8	18,815	1,6
1,25	3,033	1,579	9	21,107	1,6
1,50	3,673	1,588	10	23,400	1,6
1,75	4,316	1,593	11	25,692	1,6
2,00	4,968	1,599	12	27,985	1,6
2,50	6,277	1,608	13	30,278	1,6
3,00	7,352	1,600	14	32,570	1,6
3,50	8,498	1,600	15	34,863	1,6
4,00	9,644	1,600			

Fuente. (IDEAM, 2006)

Cuando el aforador trabaja ahogado, se puede estimar el parámetro C con las expresiones siguientes:

$W < 0.15$ m

$$C = \frac{0.0285 Ha^{2.22}}{\left(\frac{Ha + 3.05}{3.05} - S\right)^{1.44}} - \frac{Ha - 0.056}{87.94}$$

$0.30 < W < 2.50$ m

$$C = \left\{ \left[\frac{3.28Ha}{(1.8/S)^{1.8} - 2.45} \right] 4.57 - 3.14S + 0.093S \right\} W^{0.815}$$

$2.5 < W < 15.0$ m

$$C = 69.671(S - 0.71)^{3.333} Ha^2W$$

7.2.1.3. Observaciones en cuerpos de hielo y nieve

En Colombia por encima de los 4800 metros de altitud aún es posible encontrar cuerpos de agua en estado sólido llamados técnicamente "Glaciares" y comúnmente "Nevados", los cuales se consideran parte de la criosfera terrestre y por lo tanto del ciclo del agua. Así son entidades observables, medibles, cuantificables y objeto de estudio en especial por ser excelentes indicadores de cambio climático. Su tendencia actual es el cambio de estado de sólido a líquido a causa del aumento térmico de la baja atmósfera.

Se asocia a esta importancia, que los cuerpos de hielo son puntos significativos dentro de la hidrología de cuencas, ya que actúan como reguladores de las corrientes y aportan agua por medio de la fusión glacial. Paralelamente aportan agua a ecosistemas anexos, ayudando a mantener cuerpos y cursos de agua claves dentro de la ecología de especies de animales y vegetales. También permiten evaluar tendencias en cambios climáticos e indicadores en el clima, ya que mantienen un registro del tiempo en su interior, con la conservación de partículas de aire y polen, y responden a los cambios de temperatura y precipitación (IDEAM, Glaciares de Colombia, más que montañas con hielo, 2012).

Actualmente este tipo de estudios implica hacer un seguimiento a los parámetros físicos necesarios para identificar los cambios en el glaciar en un periodo dado, con lo cual se pueden conformar una serie de datos para el análisis. A continuación, se presenta lo relacionado a la recolección de datos y a la instrumentación para evaluar los cambios en la geometría del glaciar durante un periodo de tiempo, conociendo las variaciones en la longitud, superficie y volumen.

Selección de Puntos de Monitoreo

Si se está monitoreando un glaciar, se deben considerar los siguientes criterios de selección (Ceballos Liévano, 2015):

- Representatividad del glaciar: debe representar las condiciones climáticas locales y regionales; además debe tener un rango altitudinal suficientemente amplio que permita definir área de ablación (perdida) y de acumulación (ganancia)
- Tamaño del glaciar: un glaciar pequeño es más vulnerable y responde rápidamente a los pequeños cambios atmosféricos, mientras que un glaciar grande permite realizar un estudio más extenso a lo largo del tiempo
- Morfología de la cuenca: Es fundamental para la medición de un balance glaciológico e hidrológico una cuenca con sus límites bien definidos, permitiendo obtener datos coherentes con la realidad, en otras palabras su cuenca no debe entregar aportes a otras cuencas antes de su punto de concentración de agua.
- Estado del frente glaciar e hidrología: es importante que posea un frente limpio, sin hielo muerto cubierto de escombros, con un drenaje definido el cual pueda ser medido.
- Viabilidad, Accesibilidad y seguridad: el glaciar debe tener buenas rutas de acceso, que permita instrumentarlo, que en lo posible sea uniforme y no se encuentre muy agrietado, que no presente lugares peligrosos como zonas de avalanchas, desprendimiento de bloques o pendientes muy fuertes.

Con base en lo anterior, se elige un glaciar o parte de él. Los datos, análisis e interpretaciones que se obtengan serán estimativos de lo que ocurre en todo el glaciar.

Frecuencia de Monitoreo

Cuando se definen las frecuencias de medición de variaciones en el régimen de los glaciares, estas deberán estar programadas en ciertas épocas del año que permitan obtener datos representativos según la época del año y de acuerdo con lo que se quiere medir.

Una vez seleccionado el glaciar o glaciares (glaciar piloto), la frecuencia en el monitoreo dependerá de lo que se quiere analizar. Retroceso del frente inferior glaciar, cambio de área, volúmenes almacenados, cambios en la superficie, acumulación de nieve, sinterización de la nieve o la neviza, agua de fusión, balance de masas, balance hidroglaciológico, balance energético, reconstrucciones fotogramétricas, seguimientos fotográficos; definirán la escala del estudio, el número de visitas y el tipo y cantidad de instrumentación.

En Colombia por su ubicación ecuatorial y la influencia de la Zona de Confluencia Intertropical, es recomendable realizar por lo menos una visita cada cambio de temporada de lluvia a temporada seca y teniendo en cuenta el ciclo del año hidrológico, es decir, definir un inicio en la temporada más seca o más húmeda del año y terminar al año siguiente. Para facilidad y por la coincidencia entre el año gregoriano con la temporada seca en la región Andina colombiana, se sugiere iniciar en el mes de enero.

Por ejemplo, para mediciones de retroceso del frente del glaciar, es recomendable dos veces al año o en su defecto una vez al año.

Para mediciones de espesor del hielo se sugiere realizar dos campañas de mediciones al año o mínimo una vez anual.

Para el cálculo del balance de masa glaciológico por el método directo (in situ) se deberían realizar mensual, bimestral, trimestral o por lo menos semestralmente.

El Balance de masa de grandes áreas glaciares por métodos fotogramétricos se deberían realizar en periodos de años (5, 10 años).

Cálculos de área mediante métodos indirectos como el uso de imágenes de satélite cada 2, 3 a 5 años.

En todo caso y debido a las condiciones de accesibilidad, climáticas y de altitud, toda campaña de campo debe ser optimizada para capturar la mayor cantidad de datos posible.

Tipos de Medición

En la actualidad el IDEAM realiza monitoreos directo e indirecto a los seis actuales glaciares nacionales. De forma directa (in situ) en el volcán nevado Santa Isabel sector Conejeras y en la sierra nevada de Santa Marta sector Ritacuba Blanco. Para las otras zonas glaciares del país se realiza seguimiento al cambio de área por medio de imágenes de satélite de alta resolución espacial.

Se siguen metodologías avaladas mundialmente y recomendadas por el Grupo de Trabajo de Niveles y Hielos (GTNH-PHI-LAC-UNESCO) del Institut de Recherche Pour le Développement (IRD), la Universidad de Zürich (Suiza) y el World Glacier Monitoring Service (WGSM, por sus siglas en ingles) (IDEAM, Glaciares de Colombia, más que montañas con hielo, 2012).

Estos tipos de análisis, corresponden a observaciones de la geometría del glaciar y cambios de masa, los cuales son descritos a continuación:

Geometría de glaciar. Busca evaluar sus cambios en la geometría durante determinado tiempo, conociendo las variaciones de la masa de hielo en longitud, superficie y volumen. Estas mediciones incluyen métodos geodésicos del terreno, análisis de fotografías aéreas e imágenes de satélite, reconstrucción con base a análisis geomorfológicos o de investigaciones históricas (IDEAM, Glaciares de Colombia, más que montañas con hielo, 2012).

Las actividades más importantes para cuantificar estas variaciones son:

- ❖ Las mediciones de longitud, con respecto a retroceso del frente del glaciar, las cuales se realizan mediante la ubicación de puntos fijos (rocas de gran tamaño, taludes de roca) cerca al límite inferior del glaciar para obtener series de retroceso longitudinal (IDEAM, Glaciares de Colombia, más que montañas con hielo, 2012).

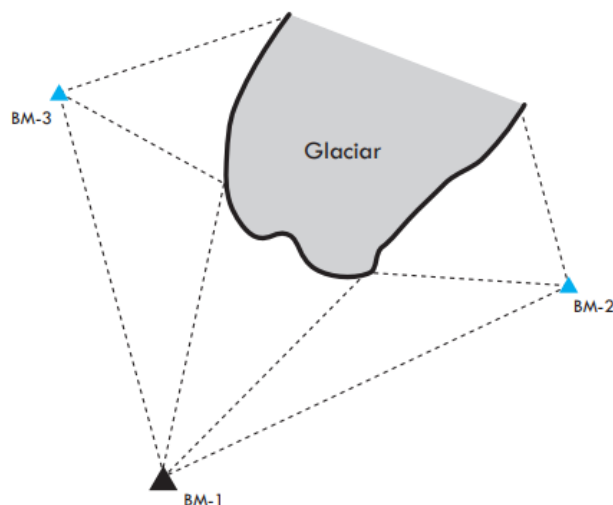


Figura 87. Esquema de medición de retroceso. Fuente: (IDEAM, 2012)

Si se dispone de equipos topográficos o equipos de posicionamiento satelital se sugiere levantar semestral o anualmente el perímetro del frente glaciar siempre con la misma georreferencia con el fin de hacer comparaciones y cálculos de velocidades de retroceso.



Figura 88. Ubicación de un punto fijo, utilizando un talud de roca para mediciones de retroceso.

Fuente: Fotos de campañas de monitoreo de glaciares colombianos, IDEAM, 2004.

- ❖ Mediciones de superficie referidas al cálculo de área del glaciar; se realizan con base a la interpretación y procesamiento digital de fotografías aéreas y de imágenes de satélite (Landsat ETM, QuickBird, Spot, Aster, Alos y Rapid Eye) (IDEAM, Glaciares de Colombia, más que montañas con hielo, 2012)

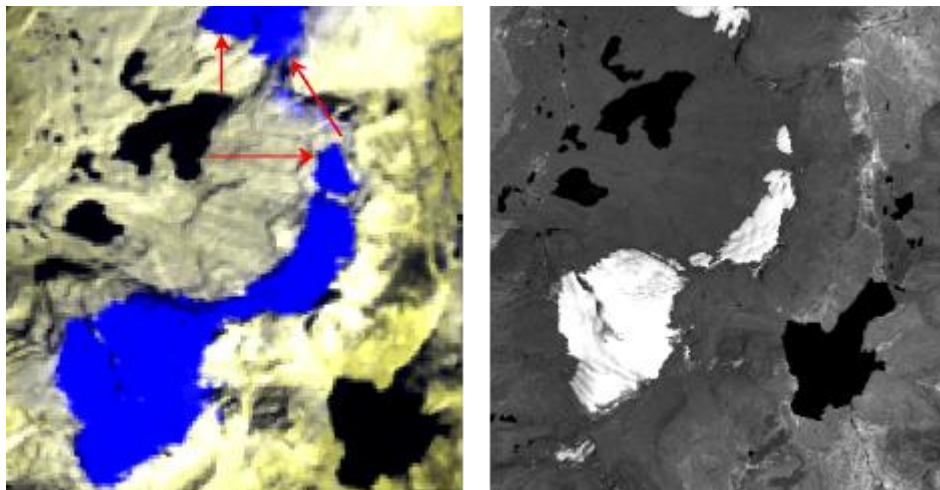


Figura 89. Evolución glaciar de la sierra nevada de El Cocuy 2003 - 2009. Sector "Pasó de Bellavista". Izquierda. Imagen satelital Landsat 2003. Derecha. Imagen satelital ALOS 2009.

Fuente: (Ceballos Liévano, 2015).

- ❖ Mediciones del espesor del hielo, las cuales utilizan métodos geofísicos, destacándose los radares de penetración del suelo (GPR, por sus siglas en inglés), cuyo funcionamiento se basa en el principio de reflexión de ondas al encontrar dos medios físicos diferentes (hielo-roca). Básicamente se trata de una emisión y recepción de ondas desde la superficie del glaciar al encontrar en su recorrido el contacto entre el hielo y la roca (Ceballos Liévano, 2015).

También se pueden hacer mediciones, tales como la gravimetría, la sísmica de refracción o a prospección eléctrica.

- ❖ Mediciones con registro fotográfico. Consiste en capturar fotografías digitales del frente del hielo de la zona baja del glaciar con cierta periodicidad, generalmente asociada al año hidrológico, para poder seguir visualmente la evolución del glaciar. La fotografía debe ser tomada desde el mismo lugar y ángulo, y si es posible a la misma hora y con el mismo tipo de lente, además que cada punto de toma de la fotografía debe ser georeferenciado con GPS (IDEAM, Glaciares de Colombia, más que montañas con hielo, 2012).
- ❖ Mediciones topográficas, las cuales permitirán construir la cartográfica del glaciar, suministrando información del área del glaciar, área parcial del glaciar (zona de ablación/acumulación), topografía del glaciar, hipsometría, cambios del borde de hielo del glaciar, evaluación del área glaciar, velocidad de desplazamiento del glaciar, además de ser insumo para el cálculo del volumen del hielo del glaciar y el balance de masa glaciológico (IDEAM, Glaciares de Colombia, más que montañas con hielo, 2012).

Cambios de masa. Este tipo de mediciones permiten conocer cuánta agua gana o pierde la superficie de un glaciar en un periodo de tiempo determinado. La estimación de este balance de masa glaciológico, se puede realizar por medio de mediciones directas en el terreno a través de balizas o estacas, sondas para nieve y pozos de acumulación (IDEAM, Glaciares de Colombia, más que montañas con hielo, 2012). Las balizas permiten cuantificar los cambios en la superficie del nivel del hielo o la nieve, la sonda para nieve permite conocer el espesor hasta el hielo.

Para el caso de pozos de acumulación permiten cuantificar la acumulación neta de nieve o hielo. La acumulación neta en un punto se mide directamente mediante un pozo excavado o una perforación preferiblemente al final del año hidrológico. El cambio de hielo y/o nieve a agua se calcula midiendo la densidad del mismo, empleando para ello una balanza electrónica (Ceballos Liévano, 2015).

Equipos/Instrumentación

El monitoreo de los glaciares requiere la manipulación de métodos e instrumentos en los campos de la topografía, de la geodesia y de la prospección geofísica. Se trata no solamente de herramientas indispensables para analizar la dinámica de la masa de hielo, sino también de técnicas, como la restitución aerofotogramétrica o el análisis de imágenes de satélites, que pueden ofrecer una alternativa a varias observaciones efectuadas tradicionalmente a partir del terreno (Francou & Pouyaud, 2004).

Se presentan algunos de los instrumentos utilizados para medición de los glaciares, entre los que se encuentra: las balizas para determinar el desplazamiento superficial, sondas para nieve y equipos de prospección geofísica como el radar de penetración del suelo.

Balizas o estacas: son utilizadas para medir los cambios de masa en la superficie del glaciar reflejados como pérdida o ganancia de hielo y se pueden homologar al limnómetro o a la mira hidrológica para la estimación de niveles de los ríos.

Estos instrumentos son en tubería PVC de 1 pulgada de diámetro y se clavan sobre el glaciar a una profundidad no menor a 5 metros, dejando sobresalir en la superficie un tramo de algunas decenas de centímetros (emergencia de la baliza). Las balizas se clavan en secciones de dos metros y cada sección va unida a la otra con cordel o cable metálico. Cada sección de estaca se identifica con un número romano (I, II, III). La sección III es la superior. La idea de las secciones es dar flexibilidad a las balizas, disminuir el riesgo de pérdida total y que a medida que se funde el hielo no quede un solo tubo sobresaliendo (Ceballos Liévano, 2015).

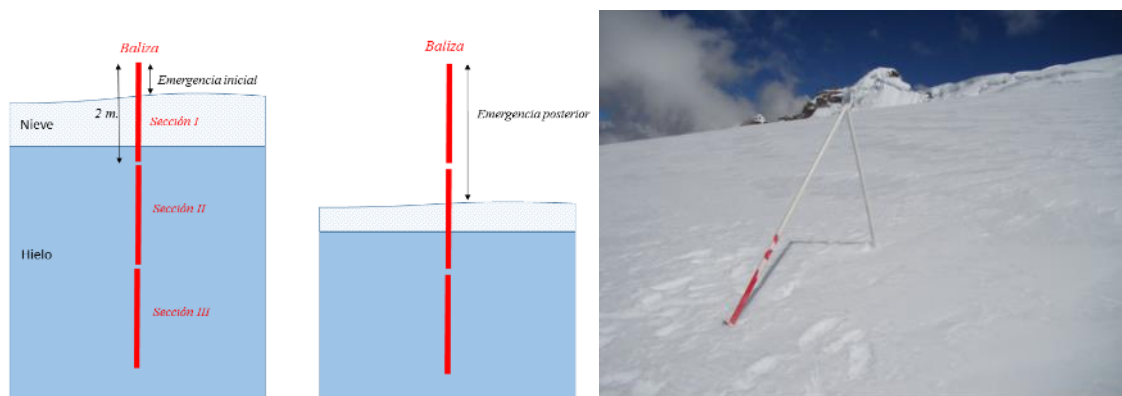


Figura 90. Izquierda: Baliza dispuesta sobre la superficie del glaciar y su medida entre dos periodos de tiempo. Fuente: IDEAM. Derecha: Baliza Ritacuba Blanco 3, Sierra nevada El Cocuy ó Güicán. Fuente: Fotos de campañas de monitoreo de glaciares colombianos, IDEAM, 2008.

Estas balizas pueden estar distribuidas en una red, que permitan una mayor precisión. Esta red puede estar distribuida en forma de cuadrilla (malla o en forma lineal, con balizas separadas cada 25 o 50 m de altitud (IDEAM, Glaciares de Colombia, más que montañas con hielo, 2012) .

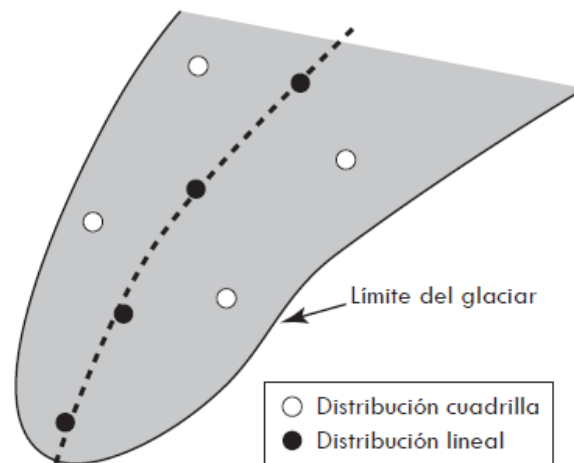


Figura 91. Distribución de la red de balizas. Fuente: (IDEAM, Glaciares de Colombia, más que montañas con hielo, 2012).

Sondas para nieve: consiste en un tubo de aluminio plegable delgado, el cual tiene una escala métrica; es un instrumento bastante delgado que traspasa fácilmente la nieve y permite conocer su espesor hasta el hielo (IDEAM, Glaciares de Colombia, más que montañas con hielo, 2012).



Figura 92. Captura de valores de espesor de nieve con el uso de una sonda para nieve. Fuente: Fotos de campañas de monitoreo de glaciares colombianos, IDEAM, 2012.

Radar de penetración del hielo: este equipo utiliza impulsos cortos de energía electromagnética de radiofrecuencia que se dirigen al sustrato glaciar mediante una antena trasmisora. Consiste en un transmisor ubicado en la superficie glaciar y un receptor ubicado en la misma superficie a una distancia horizontal del transmisor. Cuando la onda radiada encuentra heterogeneidades en las propiedades eléctricas de los materiales del hielo, una parte de la energía se refleja de nuevo a la superficie y la otra parte se transmite hacia profundidades mayores. La onda en retorno es captada por el receptor y el equipo registra los tiempos dobles de transmisión del pulso (Figura 93, Figura 94). El espesor del hielo se determina a partir del tiempo empelado por la sonda, entre su salida desde el transmisor y su retorno al receptor (IDEAM, Glaciares de Colombia, más que montañas con hielo, 2012).

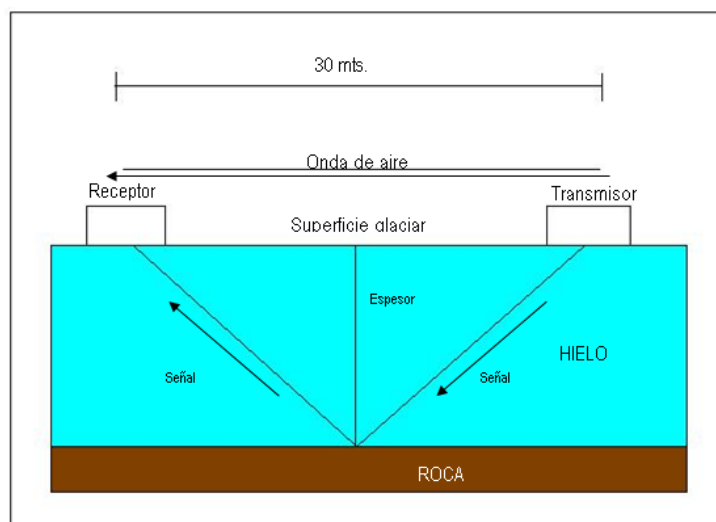


Figura 93. Esquema ilustrativo del sistema de radar de impulso upara determinar espesores de hielo. Tomado de (Ceballos Liévano, 2015).



Figura 94. Transmisor utilizado para determinar el espesor del hielo, este envía una señal la cual será recibida por un receptor. Fotos de campañas de monitoreo de glaciares colombianos, IDEAM, 2014.

Existen en el mercado varias referencias, algunas utilizadas por el IDEAM son el sistema de osciloscopio Fluke y el osciloscopio Picoscope, siendo este último el más utilizado ya que permite analizar de forma más eficiente los datos provenientes del radar.

Perforadora de hielo tipo Heucke: es un instrumento utilizado cuando se va a trabajar con balizas; genera vapor de agua caliente que es conducido por una manguera y al contacto con el hielo lo funde formando un orificio de una pulgada de diámetro y hasta 12 metros de profundidad para insertar una baliza de varias secciones. (Figura 95).



Figura 95. Izquierda: Detalle de perforadora Heucke. Derecha: Perforación de hielo empleando la perforadora Heucke. Fotos de campañas de monitoreo de glaciares colombianos, Sierra Nevada El Cocuy. IDEAM, 2008 y 2016.

Levantamiento topográficos: Para levantamientos topográficos del glaciar, se utilizan instrumentos topográficos y geodésicos tales como el el Sistema Global de Navegación por satélite (GNSS por sus siglas en inglés) en sus modos dinámicos (navegación y cinemático) o estático (diferencial) o los métodos tradicionales de topografía como teodolitos y distanciómetros (IDEAM, Glaciares de Colombia, más que montañas con hielo, 2012).



Figura 96. Levantamiento topográfico utilizando un equipo GNSS diferencial. Fotos de campañas de monitoreo de glaciares colombianos, IDEAM, 2017.

Sensor de nivel de agua de fusión glaciar: Para el cálculo del caudal de agua líquida (agua de fusión glaciar) que aporta un glaciar es necesario instalar cerca al borde del glaciar y donde se concentra el agua de derretimiento, una estructura aforadora de cualquier tipo según las condiciones locales. Estas estructuras son descritas en el acápite 7.2.1.2.

Procedimientos para las mediciones

Retroceso del glaciar

Para las mediciones de retroceso del glaciar, se deben medir desde puntos fijos como rocas de gran tamaño o taludes de roca, cerca al límite inferior cerca al límite inferior glaciar la distancia hasta el límite del hielo (no la nieve). Estas rocas son marcadas, colocando la fecha de medición, y desde ese punto, utilizando una cinta métrica y en dirección de la pendiente, se mide la distancia hasta la mínima del hielo Figura 97. También se debe registrar la altitud del borde del hielo (*Ceballos Liévano, 2015*).

Cada medida se anota en metros y se registra en un formato indicando la fecha y las observaciones de las medidas. Es recomendable tener varios puntos de medición alrededor del glaciar, los cuales deben ser georeferenciados con GPS (*Ceballos Liévano, 2015*).

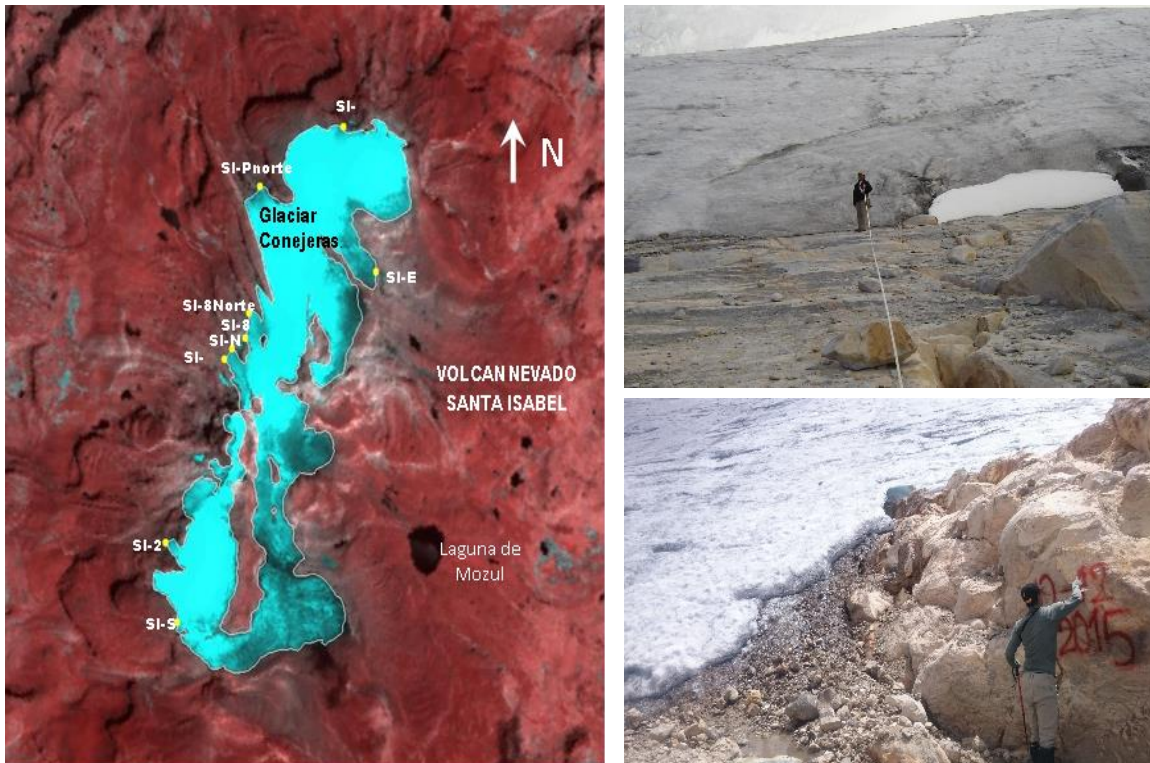


Figura 97. Puntos de retroceso longitudinal monitoreados a 2015 en el volcán nevado Santa Isabel por el IDEAM. (Imagen Spot 2006.). Fuente: Izquierda (Ceballos Liévano, 2015); Derecha: Fotos de campañas de monitoreo de glaciares colombianos, IDEAM, 2005.

Hay que considerar que después de varios años, estos puntos que inicialmente fueron marcados, van a quedar alejados del borde del hielo. En este caso, se debe identificar otros puntos fijos.

Espesor del hielo

Para mediciones del espesor del hielo con el radar de penetración, los puntos deben estar georeferenciados y deben ser identificados con un código. Es recomendable emplear este código de identificación para cualquier glaciar precedido por el nombre del mismo y de esa manera identificar fácilmente el punto de registro (tiempo, ubicación, espesor).

Balance de masa

En el caso de utilizar balizas, estas deben ser insertadas en el glaciar. La forma más práctica es utilizando es utilizando una perforadora de hielo tipo Heucke.

Las mediciones de estos instrumentos, consisten en medir con un flexómetro la parte de la baliza que está en la superficie, desde el borde superior hasta el punto donde se encuentra el hielo (Figura 98). Estos datos deben ser registrados en un formato, en donde se debe escribir el número de la sección en la que se encuentra la baliza, escribir la medida de emergencia, el espesor de nieve y las observaciones década baliza.



Figura 98. Medición de balizas. Fotos de campañas de monitoreo de glaciares colombianos, Parque Nacional Natural Los Nevados, IDEAM, 2006.

Cuando se utilizan sondas para realizar mediciones de la capa de nieve, esta debe ser enterrada y se debe tomar a medida de la profundidad a la que se encuentra el hielo o hasta donde la sonda frene (Ceballos Liévano, 2015) (Figura 99).



Figura 99. Captura de medición del espesor de la capa de nieve con el uso de una sonda. Fotos de campañas de monitoreo de glaciares colombianos, Sierra Nevada El Cocuy. IDEAM, 2012.

Cuando se realicen pozos de acumulación, se deben considerar las siguientes recomendaciones presentadas en el documento *Método de Observación de Glaciares en los Andes Tropicales* (Francou & Pouyaud, 2004):

- Escoger una zona regular y seleccionar un rectángulo de 3m X 1m, paralelo al eje de la pendiente general.
- Excavar de tal manera que la pared donde se haga el muestreo sea ubicada en la parte que da hacia la pendiente mayor, evacuando la nieve hacia la parte baja del pozo perforado
- Hacer peldaños hacia la parte baja del pozo aproximadamente cada 50 cm
- Dejar homogénea la pared del muestreo con una pala lisa
- Cuando se encuentre la capa basal, colocar el flexómetro contra la pared para medir constantemente la altura.
- Tomar la muestra de nieve haciendo penetrar el tubo verticalmente.

- Una vez llenado el tubo se pesa la muestra sobre la balanza, la cual debe estar ubicada horizontalmente
- Tomar nota del dato arrojado por la balanza para cada muestra de nieve recolectada.

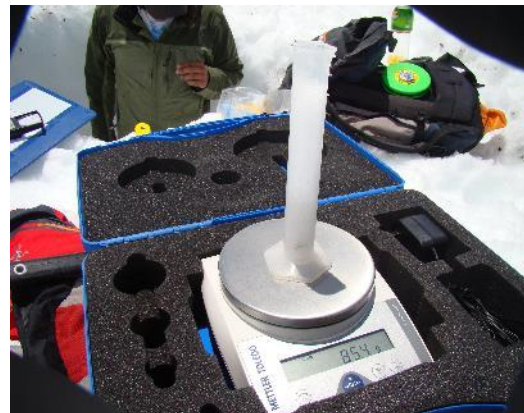


Figura 100. Consideraciones generales para las mediciones en pozos de acumulación. Fotos de campañas de monitoreo de glaciares colombianos, Sierra Nevada del Cocuy. IDEAM, 2011 y 2012.

En Colombia, la tendencia es la disminución en la cantidad de precipitación sólida (nieve y neviza), por lo que hacer pozos de acumulación resulta cada vez más esporádico. Solo en los glaciares altos que superen los 5000 metros de altitud aún es posible encontrar acumulaciones de algunos metros susceptibles de medir. Sin embargo, pequeñas y eventuales acumulaciones de nieve deben ser registradas

(espesor promedio en varios puntos ó aprovechando las balizas de ablación instaladas sobre la superficie del glaciar).

Es recomendable para calcular de forma general la nieve acumulada durante un periodo de tiempo que puede ser un año, esparcir en las cumbres nevadas aserrín sobre algunos metros cuadrados (2 a 4 m²), registrar su posición geográfica y en lo posible instalar una baliza para identificar, un año después, el sitio donde se arrojó este material. Una vez identificado, se excava hasta encontrar el aserrín y se mide la altura de la excavación que será el dato de acumulación. Se aprovecha el pozo para tomar muestras de nieve y calcular su densidad cada 10, 20 ó 30 centímetros.

7.2.2. Monitoreo de Sedimentos

De acuerdo con el Glosario Hidrológico Internacional⁷, 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”.

La concentración de partículas o sedimentos en los cauces es el resultado del arranque de partículas provenientes de procesos degradacionales de las laderas que conforman la cuenca y el vertimiento de materiales por actividades humanas. Los sedimentos hacen parte de la dinámica de los cauces y su análisis (tamaño, cantidad, concentración) es importante en la hidráulica de los ríos. (Montoya & Contreras, 2015)

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 cuatro tipos:

⁷ UNESCO. Glosario Hidrológico Internacional. Paris. 2011,
<http://webworld.unesco.org/water/ihp/db/glossary/glu/HINDES.HTM>.

- 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.

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 distintos fines.
- Para soportar programas de protección de fuentes hídricas frente a amenazas de origen antrópico.
- Permite llegar a indicadores que dan cuenta del estado de la cuenca, en la medida que ellos tienen inmerso transporte y depósitos de sedimentos, el cual se basa en el rendimiento de sedimentos. (Montoya & Contreras, 2015).

De acuerdo con la manera como se transportan los sedimentos en las corrientes, estos 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 de la corriente 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 más o menos igual a la de ésta.

La mayoría de los ríos arrastran sedimentos de muy variadas características tanto en su origen mineralógico como en densidad y tamaño, en consecuencia, los procesos de sedimentación son diferentes de acuerdo con el tipo de material.

Los sedimentos se clasifican según su tamaño, en gruesos, con diámetros en el rango de gravas y arenas y finos en rango de arenas finas, limos y arcillas. Esta clasificación no es simplemente estática, sino que tienen implicaciones dinámicas relacionadas con la forma como estos materiales son transportados y depositados por el flujo.

Los sedimentos gruesos se mueven preferentemente por arrastre sobre el fondo de las corrientes y la intensidad de su movimiento depende de las condiciones del flujo y de la turbulencia de las aguas en las vecindades del fondo. Estas partículas viajan parcialmente sustentadas por el lecho del río y rara vez se encuentran en suspensión en cantidades apreciables; por esta razón, su transporte disminuye rápidamente en cualquier reducción de la intensidad del flujo, causada por ejemplo por aumento en la profundidad o 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 preferentemente en suspensión en el agua y están sustentados por el flujo,

aún para velocidades muy bajas. 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, donde las aguas se embalsan como las ciénagas o reservorios.

Selección de Puntos de Monitoreo

No existe una forma única para efectuar medidas del transporte de sedimentos en las corrientes, dado que este es un fenómeno que depende de muchas circunstancias y varía notablemente en el tiempo y en el espacio, entre otros, tamaño del área aportante, la distribución espacial de la intensidad de la lluvia, los tipos y uso de suelo.

Los sitios específicos de medición, deben cumplir los mismos requerimientos de un punto de monitoreo de caudal líquido, ver sección (7.2.1.2.) Caudales “Selección puntos de monitoreo caudales”.

Frecuencia de Monitoreo

La frecuencia del monitoreo de sedimentos debe estar definida a partir de la variabilidad del régimen hídrico, esto es, conocer la carga sólida en un punto determinado para diferentes estados (mínimo, medio, máximo) de caudal líquido. Lo anterior permite establecer las relaciones que existen entre el caudal líquido y caudal sólido y, la concentración media y la concentración superficial, a partir de las cuales, es calculado el transporte del sedimento.

Tipos de Medición o Muestreo

Para el Monitoreo de sedimentos, en esta sección se presentan dos tipos de medición:

- Suspensión: Puntual e Integrada (Bolsa Plegable)
- Fondo

Monitoreo de Sedimentos en suspensión

Para el monitoreo de los sedimentos en suspensión, se tienen dos tipos de muestro **puntual e integrado**, los cuales dependen de la profundidad del río, en el momento del monitoreo.

Muestras puntuales

Se realizan en secciones donde las profundidades son mayores de 5.0 metros y a diferentes puntos de la vertical. La muestra se toma en botellas, la cual no debe sobrepasar los 4/5 de su capacidad para garantiza que no exista recirculación. Muestras inferiores a los 2/3 de la capacidad de la botella se consideran pequeñas, las cuales se deben rechazar y repetir la medición.

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

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.

Cuando se tienen otras variaciones de las anteriores formas se debe tener en cuenta la siguiente consideración según Vanoni: el problema en la estimación de la concentración media, derivada de varias muestras puntuales, conlleva a que pequeñas variaciones de la concentración con la profundidad son de esperarse que sean anormales para el sedimento fino (limo, arcilla), de tal suerte que unos cuantos muestreos darán la concentración media en la vertical.

Sin embargo, las arenas tienden a localizarse cerca del fondo, de tal manera que las muestras puntuales pueden dar valores erróneos respecto a la concentración de arenas. También la distribución de arenas a lo largo de la profundidad varía con el tamaño de los granos. Así el error en concentración para diferentes tamaños podrá diferir, ocasionando errores en la distribución de tamaños en las arenas. Debido a esto, puede resultar un error apreciable en la concentración de las arenas y solamente un pequeño error en la concentración total.

La relación de la concentración verdadera y aquella determinada por medio de una o más muestras puntuales, puede ser definida comparando las concentraciones provenientes de muestreos integrados y las resultantes de muestreos puntuales. Si las concentraciones y volúmenes de transporte se calculan por medio de muestras puntuales, esta relación deberá determinarse tanto para la concentración total como para la concentración de arena. (IDEAM, 2004)

Muestras integradas.

Consiste en tomar una muestra integrada, en profundidad en cada vertical. Permite tomar una muestra integrada en la vertical en ambas direcciones mientras desciende hasta el fondo y vuelve a subir (superficie - fondo - superficie), y durante este proceso doble desplazamiento en la vertical se toma una muestra que representa la concentración media en la vertical.

El IDEAM utiliza para esta clase de muestreo los integradores USDH - 49 y USDH - 59, los cuales no deben emplearse en profundidades mayores a cinco metros por la poca capacidad del recipiente.

El procedimiento como en caso anterior debe cumplir con algunas disposiciones, así:

- Se requiere un malacate de mínimo 30 kg de capacidad y suficientes botellas para el muestreo.
- Del aforo líquido se toman las velocidades medias de las verticales para determinar por medio de un nomograma o ábaco, las velocidades de tránsito y tiempos necesarios para tomar una muestra adecuada.
- Se selecciona la boquilla de acuerdo a las velocidades del flujo y se coloca la botella correspondiente en el instrumento.
- El número de verticales no debe ser menor de seis.

Muestreo con Bolsa Plegable

El uso de muestreadores de sedimentos con bolsa plegable ha sido ensayado en países como los Estados Unidos, Canadá, Alemania, Francia y Holanda.

En Colombia fue en el río Orinoco donde se desarrollaron las primeras experiencias durante el desarrollo del “Taller sobre hidrometría de grandes ríos”, organizado por Venezuela y patrocinado por la OMM. Esta metodología se implementó para grandes ríos por primera vez en el río Putumayo, dentro del marco del convenio Colombo - Peruano.

En sí, el muestreador de bolsa plegable, diseñado por el Geological Survey de los E.E. U.U., se utiliza para recoger muestras integradas de sedimentos en suspensión en corrientes con profundidades mayores a 5 m. También se puede emplear en forma horizontal, para recoger muestras integradas de una sección, a una misma profundidad (embarcación a velocidad constante y uniforme).

Algunas ventajas de los muestreadores de este tipo son:

- Económicos.
- Sencillos en su construcción.
- Más livianos.
- Sus partes y elementos se consiguen fácilmente en el mercado nacional o se pueden fabricar, dada su sencillez.
- Recogen muestras integradas en una misma vertical.
- Recogen muestras integradas de una sección a una misma profundidad.
- Recogen muestras de gran volumen.

Algunas desventajas son:

- Las muestras recogidas en la bolsa plegable siempre deben ser depositadas en otro recipiente para enviarlas al laboratorio.
- 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.
- 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.

Utilización de técnicas de teledetección

Es una metodología, que en Colombia se necesita incursionar, para disminuir la incertidumbre de la variable, consiste en determinar la cantidad de sedimentos presente en el agua está basada en la reflectancia de la radiación en las regiones visible e infrarroja del espectro electromagnético. Por lo general, la reflexión es una

función no lineal de la concentración de sedimentos en suspensión, y la reflectancia máxima depende de la longitud de onda y de la concentración de sedimentos en suspensión. Dado que la turbidez y los sedimentos en suspensión están estrechamente vinculados en la mayoría de las masas de agua, es posible efectuar también estimaciones de la turbidez. (OMM, 2011).

Muestras de fondo.

Para el monitoreo de fondo, se muestrea para conocer el porcentaje de distribución de las partículas, (arena, limos y arcillas) de sedimentos en el lecho. 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.

La forma más sencilla de calcular el arrastre de fondo consiste en cavar un agujero en el lecho de la corriente como en la Figura 101 y pesar el material que cae en él un período de tiempo determinado. La cuenca aguas arriba de un vertedero o canal de aforo puede actuar análogamente como una trampa de sedimentos, pero es posible que no se sepa si se ha recogido todo el arrastre de fondo. En los lugares con grandes cargas de arrastre, este procedimiento puede necesitar mucho tiempo y resultar engorroso (CVC, 2000)

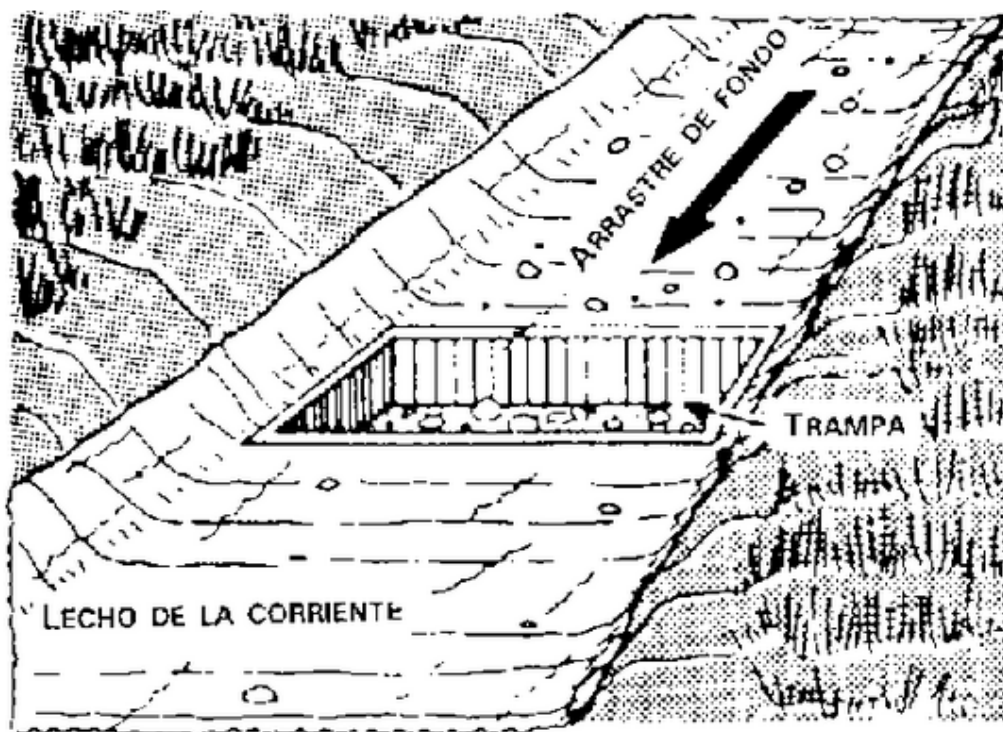


Figura 101. Medición directa del arrastre de fondo. Fuente. FAO. 1997⁸

La otra alternativa consiste en utilizar muestreadores que tienen una sección de dispersión detrás del orificio, lo que permite la entrada a la misma velocidad de la corriente circundante, es el caso del muestreador Helley-Smith.

El cual es un dispositivo de toma de muestras de diferencia de presión⁹, que puede ser usado en corrientes naturales que transportan sedimentos gruesos y permite obtener datos comparables a las estimaciones hechas por el modelo de Meyer-Peter y Muller. Es importante resaltar que este muestreador tiene la habilidad de recopilar datos en la zona no medida por los muestreadores de sedimento en suspensión.

⁸ Medición sobre el terreno de la erosión del suelo y de la escorrentía. (Boletín de suelos de la FAO-68). <http://www.fao.org/docrep/T0848S/t0848s00.htm#Contents>. Recuperado 27 de Julio de 2017.

⁹ Development and calibration of a pressure-difference bedload sampler (- ed.). Open-File Report. <https://pubs.usgs.gov/of/1973/0108/report.pdf>. Recuperado 2 de octubre de 2017.

Métodos no tradicionales utilizados para la medición de la carga de sedimentos de fondo.

Actualmente existen diversas tecnologías utilizadas para la estimación de la carga de fondo; se pueden categorizar según el tipo de sensor. Y los sensores a su vez pueden ser categorizados según su modo de operación en sensores activos o pasivos. Los sensores activos funcionan emitiendo señales y registrando las propiedades seleccionadas de la señal reflejada, los sonares ping-pong o los dispositivos laser son ejemplos de sensores activos. Las tecnologías que operan con sensores pasivos funcionan con un registro natural que genera señales, por ejemplo, los hidrófonos, que se despliegan en el agua, o geófonos, que se montan en o cerca de un arroyo. (Gray, Laronne, & Marr, 2010)

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, se resumen las diferentes tecnologías que pueden ser utilizadas para la medición de sedimentos según el tipo de sensor con el que operan:

- Facilidad de Uso: 1 fácil; 5 difícil.
- Durabilidad: 1 durable; 5 frágil.
- Portabilidad: 1 portable; 5 no portable.
- Confiabilidad: 1 necesita poco mantenimiento; 5 necesito mantenimiento elevado.

Para conocer una descripción más detallada de las tecnologías para el monitoreo de la carga de fondo, se recomienda el documento de referencia <https://pubs.usgs.gov/sir/2010/5091/pdf/sir2010-5091.pdf>, recuperado 27 de octubre 2017.

Tabla 17. Características de las tecnologías seleccionadas para el monitoreo de carga de fondo. Fuente. (Gray, Laronne, & Marr, 2010)

Sensores Activos (Todos requieren calibración en Campo)											
Tecnología	Descripción	Operación Continua	Modo de Operación	Tipo de Sedimentos	Etapas de Desarrollo	Facilidad de	Durabilidad	Portabilidad	Confiabilidad	Cobertura Espacial	Costo
(ADCP) Acoustic Doppler current profiler	Principio del formulario Dispositivo comercialmente disponible, utiliza sonar y los principios del efecto Doppler para determinar el perfil vertical de la velocidad. Además, este dispositivo también proporciona información sobre el movimiento de carga de fondo (velocidad).	Si	Dispositivo estacionario ADCP - Sonar	Arena y Grava	Moderadamente bien desarrollado. En uso preliminar.	2	4	2	1	Punto/Secci ón Transversal	Elevado
Sonar: Retro dispersión	Sonar tranceptor de alta frecuencia para medir las fluctuaciones espaciales y temporales en las	Si	Sonar Estacionari o	Arena	Principio del formulario Necesita seguir trabajando para	4	4	2	3	Punto/Secci ón Transversal	Bajo

	concentraciones de sedimentos de arena en la forma del lecho.				cuantificar las características espaciales y temporales de transporte de sedimentos en suspensión. Aplicaciones a pequeña escala. Etapa temprana de desarrollo.						
Sonar: Diferenciación del Lecho	Principio del formulario Las técnicas de diferenciación computacional a partir de levantamientos batimétricos temporalmente distintos de un arroyo / río alcanzan para determinar el flujo total de carga de fondo.	No	Sonar multifrecuencia montando en barco y su procesamiento posterior.	Arena	Principio del formulario Moderadamente bien desarrollado. Se utiliza en los grandes ríos.	4	5	5	1	Extensión	Elevado
Radar	Principio del formulario Las ondas electromagnéticas de	No	Retorno de la onda electromag	Gravas	Probado en el laboratorio, pero no en el campo.	4	4	3	4	Extensión	Moderado

	pulsos cortos se transmiten en el flujo en canales abiertos. Las partículas se encuentran dispersas por las ondas en el transporte y se registran mediante la recepción de antenas.		nética producida por la presencia de granos.		Etapa temprana de desarrollo.						
Trazadores Inteligentes	Transmisores Micro-radio, la identificación por radiofrecuencia y otros trazadores avanzados que se utilizan para realizar un seguimiento de las partículas a través del canal o de las cuencas hidrográficas.	Si	Coloque el trazador en el sistema y se debe monitorear la ubicación a través de diversas técnicas.	Gravas	Pruebas de laboratorio y de campo completas. Útil para aplicaciones específicas. Los sistemas son asequibles, pero puede ser delicado para operar.	4	3	2	3	Extensión	Moderado

Sensores Pasivos (Todos requieren calibración en Campo)											
Tecnología	Descripción	Operación	Modo de Operación	Tipo de Sedimentos	Etapas de Desarrollo	Facilidad de Uso	Durabilidad	Portabilidad	Confiabilidad	Cobertura Espacial	Costo
Tubos de Impacto	Tubería instalada dentro de cauce con sensor pasivo (geófonos o hidrófonos) grabación de impactos de granos en el tubo lleno de aire.	Si	Señal producida por impacto de grano en la tubería.	Gravas > 4mm	Moderadamente bien desarrollado. Pruebas en laboratorio y campo. Requiere calibración local.	2	2	4	2	Sección Transversal	Bajo
Placas de Impacto	Principio del formulario Placa de acero instalado en cauce del río con sensor pasivo (geófonos o hidrófonos) grabación de	Si	Principio del formulario Señal producida por el contacto del grano en la placa.	Gravas > 10 mm	Moderadamente bien desarrollado. Pruebas en laboratorio y campo. Requiere calibración local.	2	2	4	2	Sección Transversal	Bajo

	impactos de granos en las placas.										
Columnas de Impacto	Principio del formulario Sensor de transporte de grava (GTS) - sensor de vibración piezoeléctrico o un sensor de movimiento.	Si	Principio del formulario Señal producida por el contacto del grano en la Columna.	10 a 128 mm	Principio del formulario Desarrollo temprano sólo con las pruebas de laboratorio hasta la fecha. Requiere calibración local.	3	3	2	2	Sección Transversal	Moderado
Trazadores Magnéticos: Registro de Bobina	Técnica del trazador que utiliza imanes naturalmente magnéticos o incrustados en partículas naturales para realizar un seguimiento del flujo y la trayectoria de las partículas de la carga de fondo. Se colocan en paralelo "Inductores" en el lecho del canal para	Si	Señal producida por el paso de grano sobre inductor.	Gravas Magnéticas	Temprano a moderado desarrollo. La tecnología es de aplicación específica y los sitios específicos donde se encuentran las partículas magnéticas.	3	3	4	4	Sección Transversal	Bajo

	medir el paso de partículas magnéticas.										
Trazadores magnéticos: detector de movimiento para carga de fondo	Técnica del trazador que utiliza imanes naturalmente magnéticos o incrustados en partículas naturales para rastrear el flujo y la trayectoria de las partículas de la carga de fondo. El detector de movimiento de carga de fondo tiene un aproximado de 1 cm. El "inductor" detecta el movimiento de las partículas magnéticas.	Si	Contables / Hora	8 a 90 mm Piedra Artificiales	Desarrollo temprano realizado en el laboratorio. La tecnologías de aplicación específica donde se encuentran las partículas magnéticas.	2	2	2	3	Punto / Sección Transversal	Bajo

<p>Hidroacústicos Pasivos</p>	<p>Grabación de sonido natural generado por las colisiones de roca a roca durante el transporte de carga sólida en los canales que utilizan un sistema de adquisición de hidrófono y los datos.</p>	<p>Si</p>	<p>Señal producida por el impacto de los granos unos con otros.</p>	<p>Grava</p>	<p>Necesita trabajo adicional para ser una técnica de control operativo.</p>	<p>2</p>	<p>3</p>	<p>1</p>	<p>3</p>	<p>Extensión</p>	<p>Bajo</p>
--------------------------------------	---	-----------	---	--------------	--	----------	----------	----------	----------	------------------	-------------

Selección tipo de muestra

Para la campaña de monitoreo de sedimentos o aforo sólido se recomienda la toma de las siguientes muestras de acuerdo a los objetivos del plan de monitoreo y del tipo de lecho identificado en los estudios preliminares, tanto geológicos, geomorfológicos como morfométricos y fisiográficos como se muestra en la Tabla 18.

Tabla 18. Tipos de muestras de sedimentos de acuerdo a los objetivos.

TIPO DE MUESTRA DE SEDIMENTOS	LECHO ROCO SO	LECHO ALUVIAL	LECHO ARENOSO
Sedimento suspendido integrado isocinético en cada vertical donde se mide velocidad	X	X	X
Muestra del material del lecho en cada vertical donde se mide la velocidad		X	X
Sedimento suspendido integrado isocinético en toda la sección de aforo	X	X	X
Sedimento suspendido a diferentes profundidades en la vertical que presenta mayor velocidad	X	X	X
Muestra material de una barra del río	X	X	X
Muestra de la arena localizada en las barras laterales del río			X
Muestra del material de fondo del lecho			X
Toma de muestra aleatoria de piedras en el lecho del río		X	
Maxímetro de sedimentos	X	X	X

Fuente: IDEAM, 2015.

Todas las muestras de sedimento requieren el cálculo de las concentraciones para el sedimento en suspensión y de las curvas granulométricas para el material del lecho.

Parámetros y Unidades de medida en Sedimentos

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 en unidades de peso por unidades de volumen, (mg/l), (Kg/m³) ó (Ton/m³). El transporte o caudal sólido se expresa en unidades de peso por unidades de tiempo, (Kg/s), (Ton/d), (KTon/año).

Equipos

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, es por ello, que a nivel mundial se ha investigado y se han diseñado y construido equipos y apoyos logísticos para evaluar cada tipo de sedimento, con el propósito de obtener muestras con alto grado de representatividad, con respecto al comportamiento natural del transporte de partículas sólidas presentes en los flujos de corrientes hídricas.

La

Tabla 19, muestra algunos de los equipos de muestreo de sedimentos más utilizados.

Tabla 19. Equipos y métodos para medición de sedimentos en suspensión.

Equipos de muestreo de sedimentos en suspensión más utilizados, en función de la profundidad del cauce		
Integradores en Profundidades	Superficie	USD H-48 USD H-48 Canastilla metálica Botella de 500 cm ³
	Profundidades de 5m	Línea Manual: USDH-59 USDH-76 USDH-95 Carrete: USD-74, USD-74-A1, USD-95 Bolsa plegable (Canastilla, Botellas o garrafas, plásticas perforadas, Tapa plástica hidrodinámica, Boquillas, Bolsas plásticas, Escandallo,
	Profundidades de 10m	USD H-2
	Profundidades de 30m	US D-96 US D-96-A1
	Profundidades de 60m	US D-99

Integradores Puntuales	USP-61-A1 US P-72 US P-63	
Medidores de Acción Continua	Bombeo	
Muestreadores instantáneos	Tipo Van Dorn	

Fuente: Modificado, (EPAM S.A ESP, 2011)

Muestreadores integradores puntuales

Consisten en un recipiente provisto de una válvula accionada desde la superficie, que permite abrir y cerrar a voluntad el acceso del agua y así tomar muestras en los puntos deseados. (Figura 102). Conjuntamente con la válvula de acceso funciona un dispositivo de compensación de presiones que facilita la entrada del agua a la misma velocidad del flujo.

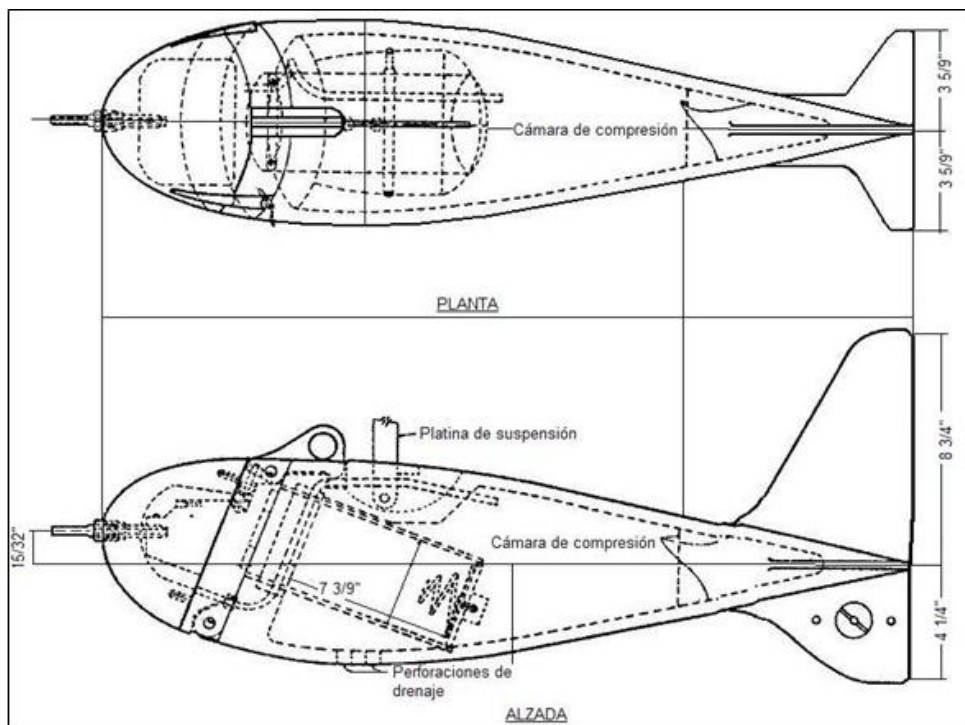


Figura 102. Muestreador tipo U.S.P. – 61. Fuente. Wilches H, IDEAM. 2009

Un modelo perfeccionado es el desarrollado por el Inter - Agency Committee on Water Resources (Comité inter - institucional de los E.U., sobre Recursos Hídricos), corresponden al tipo U.S.P. - 61 el cual fue construido en forma original con características hidrodinámicas y consta de un cuerpo de bronce fundido y está provisto de aletas y cola direccional.

En la parte anterior se aloja un frasco (en Colombia se utilizan botellas de 500 Cc) de 0.473 litros. La parte delantera del muestreador es rebatible para permitir el acceso a la cavidad donde se aloja el frasco de la muestra; al cerrarla se ajusta a la boca del frasco un empaque en forma de anillo dejando la botella solamente en comunicación con la válvula de acceso y el escape de aire. El muestreador tiene un peso de 46 kilogramos, (100 libras aprox.). Para el acceso del agua al frasco se emplean tres tamaños de boquillas (de 1/4", 3/16" y 1/8"), para utilizar de acuerdo a la velocidad de agua y tiempo de llenado.

Muestreadores integradores en profundidad

Los más utilizados son los tipos USDH - 48, USD - 49 Y USDH - 59. Tienen forma hidrodinámica y su peso de 2, 28 y 11 kilogramos respectivamente. Poseen una válvula reguladora de presión que permite la entrada del agua a la boquilla a la misma velocidad del flujo. La botella para la muestra es igual que para el U.S.P. - 61, 0.473 litros Igualmente se utilizan las mismas boquillas de diámetros de 1/4", 3/16" y 1/8". En la Figura 103, se observa el muestreador USD-49, imagen Izquierda, momento en que el muestreador es sumergido a la corriente, imagen Derecha momento en que se retira el muestreador para extraer la muestra. En la Figura 104, se observa en la Muestreador para Sedimento en Suspensión USDH – 59.



Figura 103. Integrador en Profundidad de Sedimento en Suspensión USD – 49. Izquierda. muestreador se sumerge en la corriente. Derecha. Muestreador es retirado para extraer la muestra. Fuente. Subdirección de hidrología. IDEAM.2017.

El muestreador USD - 49 se emplea para mediciones en profundidad hasta un máximo de 5 metros y velocidades máximas de 2.0 y 1.5 m/seg. El muestreador USDH - 59, por su menor peso, debe utilizarse solamente cuando la velocidad de la corriente sea menor a un (1) metro por segundo.



Figura 104. Muestreador para Sedimento en Suspensión USDH – 59. Fuente. Subdirección de Hidrología. IDEAM

El muestreador USDH - 48, es el más pequeño de todos y está construido para operarlo con la mano por medio de una varilla en secciones en donde se afore por el sistema de vadeo, Figura 105.



Figura 105. Muestreador para sedimentos en suspensión tipo USDH-48. Izquierda. Toma de muestra, estación Palo Gordo, corriente, río de Oro. Fuente. Subdirección de Hidrología. IDEAM.

2015

Muestreo con Bolsa Plegable

La bolsa plegable (Figura 106), por su capacidad de volumen (2 a 4 litros) se puede utilizar en mayores profundidades, teniendo en cuenta que la exposición del instrumento a la corriente no exceda los límites de tiempo de llenado para una boquilla dada.



Figura 106. Uso del muestreador en aforo de bolsa plegable. Fuente: Contreras. C. (IDEAM, 2016).

La bolsa plegable consta de los siguientes elementos:

- 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).
- Botellas o garrapas plásticas perforadas. En el comercio local se consiguen estas botellas plásticas, de uno o dos galones con el cuello y la boca posicionadas lateralmente. Los huecos que debe tener la botella, sirven para evitar la presión a la que se somete cuando está sumergida.
- Tapa plástica hidrodinámica. En el HIMAT se diseñó una tapa especialmente adaptada a la garrafa que soporta la boquilla. La tapa original que trae la botella no debe desecharse, ya que se utiliza mientras no se use la tapa con la boquilla y así evitar que se dañe la rosca de la botella.

- 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.

Los diámetros son:

Boquilla N° 1 $\frac{1}{8}$ de pulgada o 3.18 mm

Boquilla N° 2 $\frac{3}{16}$ de pulgada o 4.76 mm

Boquilla N° 3 $\frac{1}{4}$ de pulgada o 6.35 mm

Boquilla N° 4 $\frac{5}{16}$ de pulgada o 7.94 mm

Las boquillas de teflón se emplean primordialmente cuando se requieren muestras no contaminadas por las boquillas de metal.

Los anteriores equipos no poseen válvula que controle el acceso del agua y se utilizan para obtener muestras representativas de toda una vertical de medición. El proceso consiste en hacer descender el instrumento hasta el fondo y luego de vuelta a la superficie, de tal manera que recorra dicha vertical a una velocidad de tránsito constante, en función de la velocidad de la corriente, de la profundidad y diámetro de la boquilla.

Muestras 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.
- 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 107).
- 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 107. Muestreador de material de fondo usado en IDEAM. Fuente: Wilches H. IDEAM 2009.

Muestreador Helley-Smith



Figura 108. Muestreador Helley-Smith. Fuente. (IMTA, 2015)

Otro muestreador de fondo, es el sistema Helley-Smith () es un sistema desarrollado por el Servicio Geológico de los Estados Unidos USGS (sigla en inglés), En corrientes fuertes y/o profundidades grandes, el aparato es arrastrado hacia agua

abajo y llega cerca del fondo en velocidades menores, donde disminuye la fuerza de arrastre de tal modo que la boca puede cortar el lecho y sacar material del fondo en vez del transporte de sedimento.

De acuerdo a los muestreadores anteriormente expuestos, 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.

Toma de Muestras Diarias

La toma de muestras diarias de sedimentos en suspensión se realiza utilizando una canastilla metálica con una botella de 500 c.c., manipulada con una cuerda desde la tarabita o puente (Figura 109). 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.

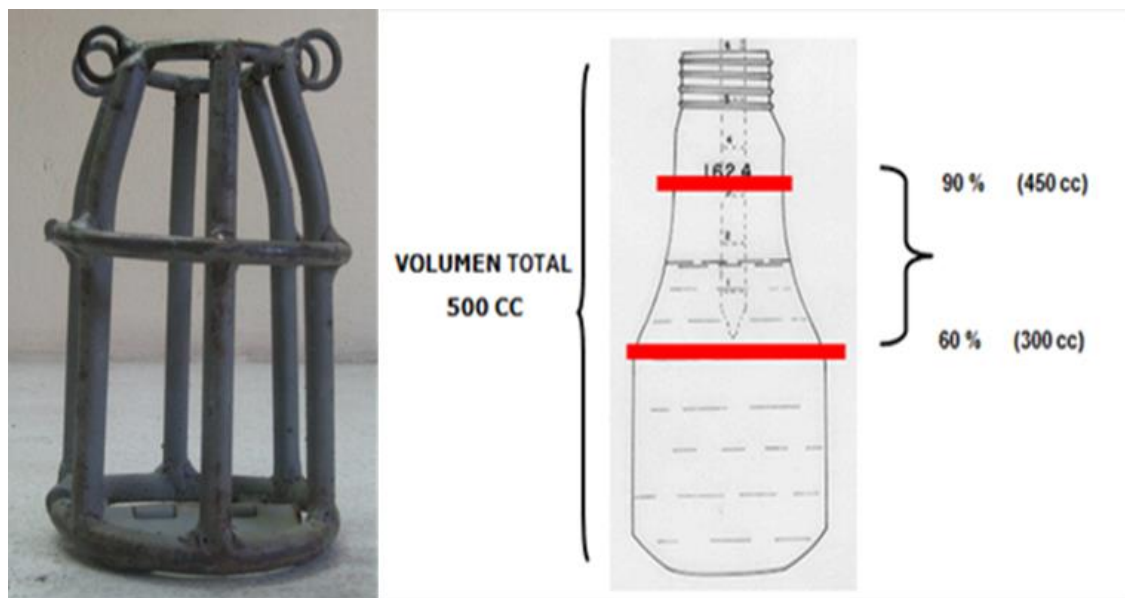


Figura 109. Material para toma de muestras diarias de sedimentos en suspensión. Izquierda. Canastillas de hierro soldado. Derecha. botella ½ L. Fuente: Wilches. IDEAM.2007

Otros Materiales o Equipos para la toma de muestra de Sedimentos

Bolsas de plástico

Las bolsas de plástico o polietileno utilizadas, tienen un calibre de 45 milésimas de milímetro y el tamaño de 25 por 40 cm y sirven para botellas de un galón; el tamaño de 35 por 50 cm se usa para las botellas de dos galones. Es importante que antes de usarse las bolsas se humedezcan preferiblemente con agua de la corriente objeto de la medición (por lo general se llenan con agua hasta la mitad), para verificar que ésta no tenga escapes.

Pesa o 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.

Lastre de la bolsa

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 (bola de cristal de 2 cm de diámetro).

Procedimientos para la toma de muestras

A continuación, se describe paso a paso a paso, el procedimiento para la toma de muestras y otras recomendaciones.

Aforo puntual

El procedimiento para la toma de muestra de aforo puntual, se observa en la Figura 110.

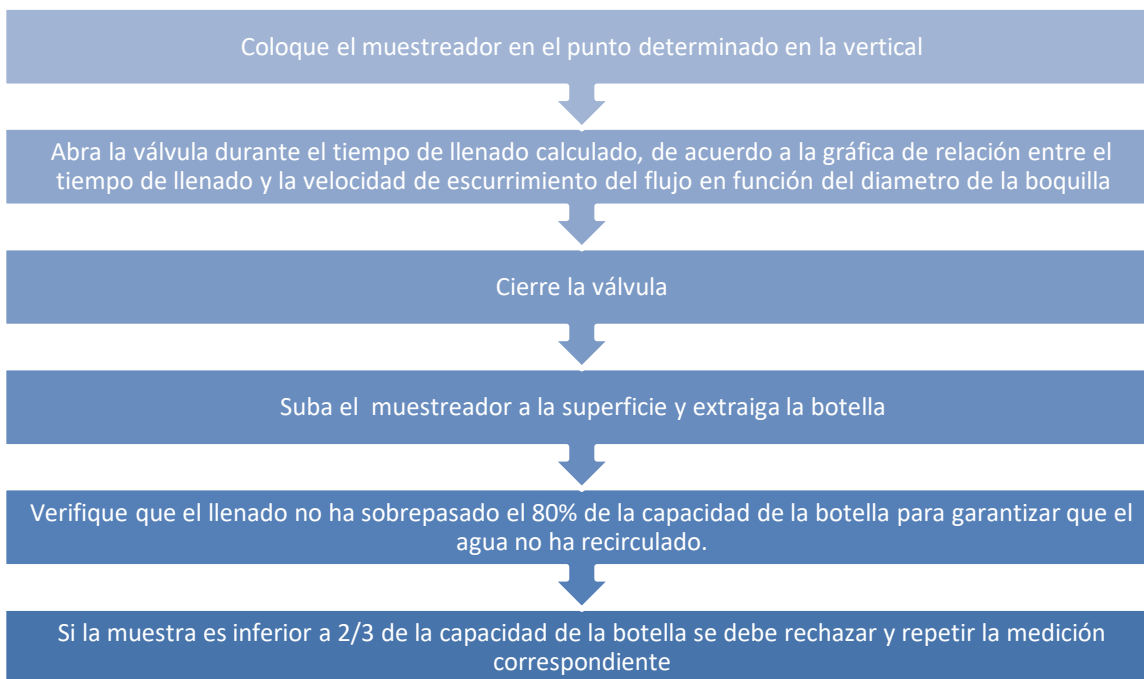


Figura 110. Procedimiento para realizar el aforo sólido puntual. Fuente. (EPAM, 2011)

Aforo integrado

El procedimiento para la toma de muestra para aforo integrado, se observa en la Figura 111.

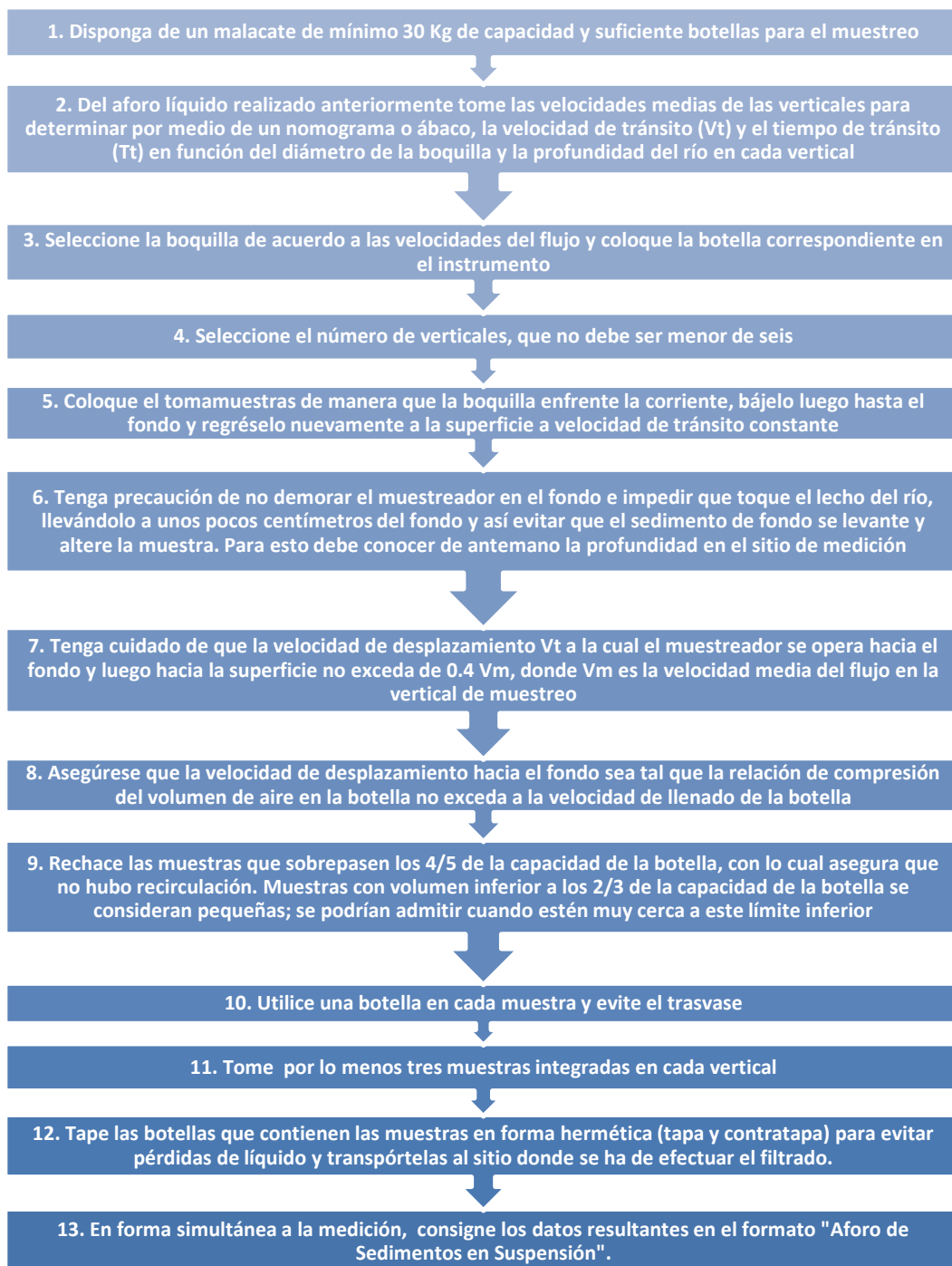


Figura 111. Procedimiento para realizar el aforo sólido integrado Fuente: Wilches, 2009 IDEAM.

Muestreo con Bolsa Plegable

El procedimiento para la toma de muestra integrada con bolsa plegable, se observa en la Figura 112.



Figura 112. Procedimiento para realizar el aforo sólido integrado con bolsa plegable. Fuente, (EPAM S.A ESP, 2011)

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.

Muestras de fondo.

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 113).

Procedimiento para procesamiento de muestra de bolsa plegable en el sitio



Figura 113. Procedimiento para procesamiento de muestra de bolsa plegable en el sitio

Toma de muestra de fondo con el muestreador Helley-Smith,

Una vez capturada la muestra del Helley-Smith, durante un minuto, se procede a calcular el transporte de fondo (S_b) asociado al caudal líquido Q , teniendo el peso capturado por la muestra i , P_i (kg). Entonces para el cálculo de la carga de fondo total se calcula la cantidad de material capturado en cada sección vertical i , lo cual corresponde al valor en peso (gr) de la muestra de cada vertical, que fue tomada durante 1 minuto con el muestreador de fondo Helley-Smith. (Figura 114) Entonces al tener un peso por unidad de tiempo se conoce el transporte, pero se hace necesario extrapolar el área del muestreador de 3 pulgadas x 3 pulgadas, al área de cada sección vertical de muestreo de sedimentos a_i . Por lo tanto, para la estimación del transporte en cada sección vertical muestreada S_{bi} , se aplica la siguiente expresión, teniendo en cuenta que se debe disponer de los datos del aforo líquido, específicamente de los anchos b_i y de las profundidades y_i , para cada vertical:

$$S_{b_i}(\text{gr}/\text{min}) = \sum_{i=1}^n \frac{P_i \times a_i}{0.075^2}$$

$$S_b \text{ total } \left(\frac{\text{ton}}{\text{año}} \right) = 0.5256 \times \sum_{i=1}^n S_{b_i}$$

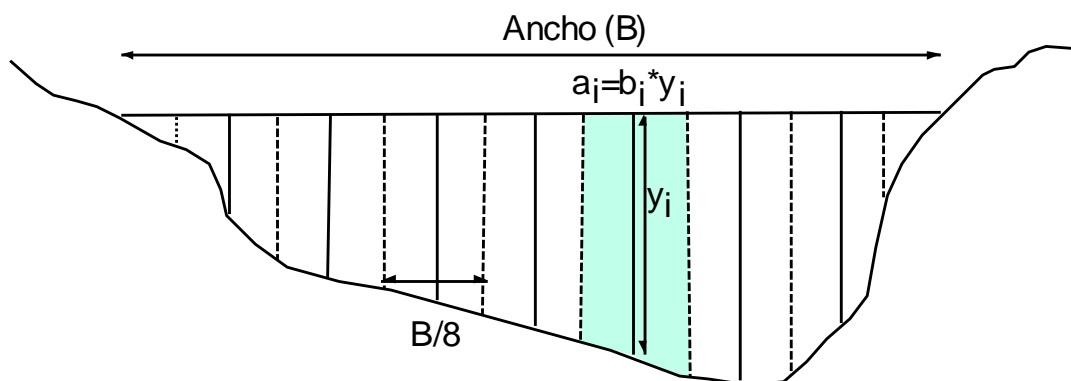


Figura 114. Cálculo del transporte de fondo en la sección vertical.

La carga total del lecho o transporte anual del material de fondo, S_b (ton/año), se puede correlacionar con el caudal líquido mediante una expresión de tipo potencial de la siguiente manera:

$$S_b = \epsilon Q^Y$$

Otras Recomendaciones para la toma de muestras de sedimentos

Montaje y uso del muestreador

Dependiendo de los muestreos a realizar; es decir, si se requieren tomar solamente 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 de trabajo en el sitio, de tal forma que se podrá instalar de arriba hacia abajo, el muestreador, el correntómetro y el escandallo o arreglar este orden como convenga, siempre y cuando el escandallo esté por debajo. como se observa en la Figura 115. Definido esto se procede a introducir la bolsa dentro de la botella, dejando 5 cm. que se doblan sobre la boca del recipiente, procurando que los pliegues queden uniformemente distribuidos al enroscar la tapa con la boquilla, a continuación la botella se coloca dentro de la canastilla y se asegura con una cuerda, dando una vuelta completa alrededor del cuello.

Posteriormente se baja el muestreador al nivel de agua, permitiendo que la botella perforada se llene de agua y procurando que ésta entre por la boquilla. Al iniciar el muestreo se pone en funcionamiento el cronómetro, el contador de revoluciones del molinete y se inicia el tránsito vertical el cual debe ser constante, aproximadamente entre 0.2 y 0.4 veces la velocidad de la corriente.

Al recuperar la muestra es importante verificar que al salir la boquilla del agua no salga agua por ella, si esto ocurre, se ha presentado recirculación y el muestreo debe realizarse nuevamente. A continuación se toma la botella por el cuello y se

inclina ligeramente hacia adelante, se suelta el cordel y se retira la muestra de la canastilla, luego se desenrosca la tapa de la botella, cuidando que la bolsa no resbale hacia adentro y se pierda la muestra. Después que la muestra se haya medido con la probeta y se haya pasado por el microtamiz, parte del sedimento queda pegado a la bolsa; por tanto, es necesario lavarla con un atomizador y pasar este contenido por el microtamiz sin tener en cuenta, para la cuantificación del volumen de agua, el agua utilizada en el lavado de la bolsa pues no forma parte de la muestra.

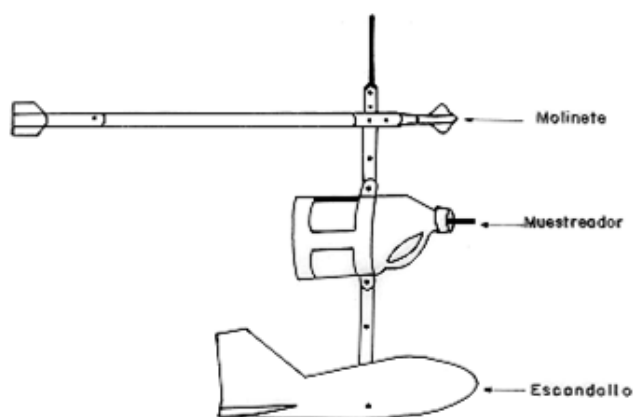


Figura 115. Colocación de Muestreador. Fuente. (IDEAM, 2006)

Calibración de campo

El muestreador deberá calibrarse en el campo antes de usarlo y chequear esta calibración tantas veces como se pueda. El procedimiento consiste en medir la velocidad de la corriente (v_c) en un punto y recoger una muestra de (t) segundos en el mismo punto.

La velocidad de desplazamiento de la boquilla v_b , es:

$$vb = \frac{V(\text{cm})^3}{A(\text{cm})^2 \times T(\text{seg.})} = \frac{\text{cm}}{\text{seg}}$$

En donde:

V = Volumen de la muestra en cm³

A = Área de la boquilla en cm²

T = Tiempo en segundos

El área de cada una de las boquillas es:

BOQUILLA N°	AREA cm ²
1	0.079173
2	0.178139
3	0.316692
4	0.494832

La eficiencia hidráulica eh es:

$$eh = \frac{vb}{vc}$$

vb = Velocidad en la boquilla

vc = Velocidad de la corriente

eh = Eficiencia hidráulica

Si la eficiencia hidráulica está por debajo de 0.90, es necesario verificar si la boquilla tiene protuberancias o irregularidades a la entrada. Esta 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.

Concentración de sedimentos

En general 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/m³.

Para este análisis se tiene en cuenta el mecanismo de las partículas en suspensión y su distribución debido al flujo turbulento. Teóricamente las mayores concentraciones 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, aquellas que suben transportan más partículas hacia la superficie que las descenden 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 demuestra 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 grandes concentraciones próximas 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/m³) en la sección resulta de dividir la carga de sedimentos "T" (kg/s) entre el caudal líquido "Q" (m³/s),

$$C_m = T / Q$$

Transporte de sedimentos

La obtención de muestras de sedimentos permite determinar la cantidad de sólidos que transporta una corriente en la unidad de tiempo.

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 m³/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 C_m (Kg/m³) por el caudal líquido Q (m³/s) que pasa por una sección.

$$T = Q \cdot C_m$$

Errores y limitaciones en las mediciones

Se pueden considerar dos formas que originan errores frecuentes durante la actividad de muestreo de los sedimentos:

Uso incorrecto de los muestreadores

La velocidad de acceso en la boquilla del instrumento debe ser igual a la velocidad del flujo en el punto de muestreo. Cuando estas condiciones cambian los errores de medición que se producen pueden ser determinantes. 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 en el rango de las partículas menores de 0.06 mm.

Para partículas mayores de 0.06 mm., el error es tanto más pronunciado cuando mayor es el tamaño de partícula y la desviación de la velocidad de entrada respecto a la velocidad de la corriente en el punto de toma. Cuando la velocidad en la boquilla es menor que la velocidad de la corriente, las muestras contienen un exceso de sedimentos, mientras que las muestras recogidas a mayor velocidad que la que tiene la corriente arrojan valores por defecto de la concentración de sedimentos. La magnitud de los errores en la concentración para diferentes relaciones de velocidad de toma varía entre 0.25, 0.50, 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.

La orientación incorrecta del equipo respecto a la dirección del flujo reduce la concentración de la muestra. En ensayos, en laboratorios de hidráulica, se ha encontrado que una desviación angular menores de 20 grados no tiene un efecto apreciable en la precisión del muestreo mientras que una desviación de 30 grados resulta en un error de - 7%. La sección de la boquilla debe ser normal a las líneas de flujo.

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.

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. (IDEAM, 2004)

Representatividad de las muestras

Dadas las características de variación temporal y espacial del proceso de difusión que gobierna el fenómeno de la suspensión, se puede requerir de un gran número de muestras para definir con exactitud la concentración media de la carga en un punto dado del campo de flujo. La experiencia demuestra que las máximas desviaciones de la concentración media se presentan en corrientes donde la carga suspendida consiste principalmente de partículas de arena, mientras que en la carga compuesta primordialmente por limos y arcillas estas desviaciones son menores.

Tamaño óptimo de la muestra

Debido a la limitada capacidad de los recipientes de los muestreadores especialmente de la serie "US" en donde se aprecia que cuando la muestra presenta baja concentración y las partículas son de variado tamaño puede resultar un peso relativamente mayor que el real, distorsionando la distribución de los tamaños de diámetros a la carga medida, para lo cual es necesario tomar varias muestras del mismo punto. Para obviar este problema se ha implementado el muestreador de la bolsa plegable el cual toma una muestra mucho más grande.

7.2.3. Monitoreo de Calidad

El monitoreo de calidad del agua es fundamental para evaluar las condiciones y el estado de diferentes cuerpos de agua.

Los objetivos de monitoreo de la calidad del agua, hacen parte del programa de monitoreo estructurado de manera estratégica, con fines académicos, de investigación, control, toma de decisiones, entre otros, que permiten finalmente brindar información del estado del agua en una corriente o tramo determinado.

Es importante resaltar que obtener solo información de calidad de agua no es suficiente para realizar una evaluación integrada, para ello es necesario contar con información de cantidad, por tanto, se recomienda en las campañas de monitoreo de calidad de agua se tenga en cuenta la cantidad (aforos).

En la sección de calidad de agua, se presenta procedimientos para la toma de muestras Físicoquímicas e hidrobiológicas.

7.2.3.1. Físico-químico

El monitoreo físico-químico del agua, hace parte de la evaluación del estado y las condiciones de una corriente, teniendo en cuenta como base una red establecida, o puntos seleccionados para hacer seguimiento y control.

En la sección de calidad de agua físico-químico, se encontrará, los aspectos básicos para realizar el monitoreo de calidad de agua superficial.

Selección de Puntos de Monitoreo

Por lo general, los puntos de monitoreo se encuentran ya establecidos en la red de monitoreo de calidad del agua Nacional, Regional o Local, que fueron seleccionados de acuerdo al programa de monitoreo. En caso contrario, cuando es necesario la ubicación de un punto de monitoreo (Figura 116) por evaluación, seguimiento y control, es importante tener en cuenta la necesidad de obtención de los datos, de

acuerdo a la evaluación de las necesidades de uso, o a la evaluación de las influencias sobre la calidad, ya que puede ser por información, para el control, o por recopilación de datos para realizar un análisis en el tiempo, la necesidad de establecer un nuevo punto.

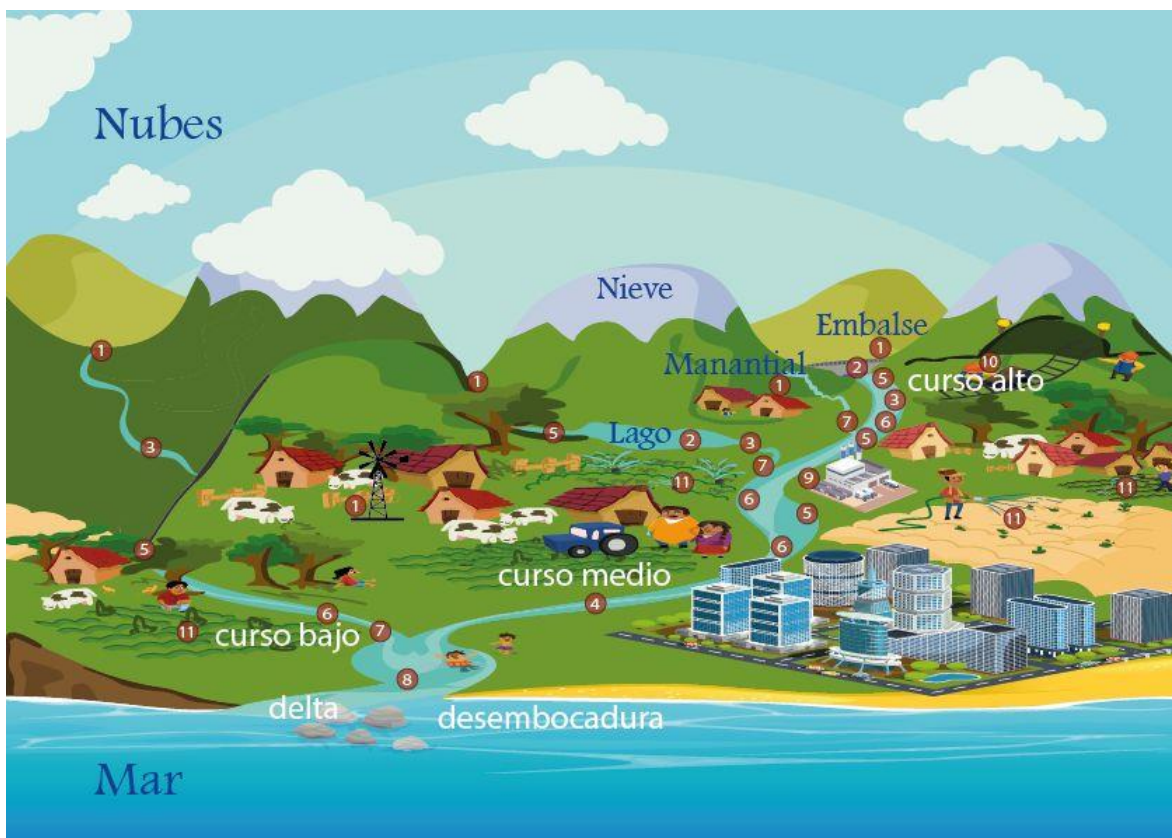


Figura 116. Posibles sitios de monitoreo. Modificado "Guía para el monitoreo de vertimientos, aguas superficiales y subterráneas. Fuente. (IDEAM, 2002)

Tabla 20. Descripción de los sitios de Monitoreo

Número de sitio de muestreo	Descripción del sitio de muestreo
1	Fuente superficial en cercanías al nacimiento, acuífero o manantial
2	Lago, embalse
3	Fuente superficial aguas arriba de una ciudad
4	Fuente superficial aguas abajo de una ciudad
5	Fuente superficial aguas arriba de zonas industriales, mineras y agrícolas

Número de sitio de muestreo	Descripción del sitio de muestreo
6	Fuente superficial aguas abajo de zonas industriales, mineras y agrícolas
7	Sobre los principales tributarios antes de la desembocadura a la fuente superficial
8	Fuente superficial aguas arriba de la desembocadura al mar
9	Vertimiento de zonas industriales
10	Vertimiento de áreas mineras
11	Vertimientos de áreas agrícolas

Fuente. (IDEAM, 2002)

Frecuencia de Monitoreo

La frecuencia de monitoreo de calidad de agua, se establece de acuerdo a los objetivos planteados en las campañas de monitoreo o al programa de monitoreo de cada entidad. Lo recomendado, es realizar 4 campañas en el año, para parámetros básicos, teniendo en cuenta que por lo menos 2 corresponda a lluvias altas y estiaje; los restantes serán distribuidos en sus correspondientes periodos de transición. Para otros parámetros como plaguicidas y metales pesados, se propone en este caso un mínimo de 2 muestreos al año, en las estaciones que se seleccionen para tal fin.

Tipos de Muestra

Uno de los aspectos importantes a tener en cuenta en el momento de hacer la campaña de monitoreo de calidad de agua, es el tipo de muestra que se va a tomar, para esto existen diferentes tipos de muestra: muestra puntual, compuesta e integrada.

Muestra puntual: Es la muestra tomada en un lugar representativo, en un tiempo determinado. Representa condiciones y características de la composición de un cuerpo de agua, está indicado para los casos en que el flujo y la composición del líquido (agua o aguas residuales) no difieren significativamente (en tiempo y/o espacio).

Muestra compuesta: Es la mezcla de varias muestras puntuales de una misma fuente, tomadas a intervalos programados y por periodos determinados, las cuales pueden tener volúmenes iguales o ser proporcionales al caudal durante el periodo de muestras. Este tipo de muestras son usadas generalmente para la caracterización de aguas residuales.

Este tipo de muestra se compone, mezclando en un mismo recipiente las alícuotas de acuerdo a la siguiente formula:

$$V_i = \frac{V * Q_i}{n * Q_p}$$

Dónde:

V_i = Volumen de cada alícuota

V = Volumen total a componer

Q_i = Caudal instantáneo en el momento de la toma de la muestra

Q_p = Caudal promedio durante el muestreo

n = Número de muestras tomadas

Muestra integrada: La muestra integrada es aquella que se forma por la mezcla de muestras puntuales tomadas de diferentes puntos simultáneamente, con la finalidad de conocer las condiciones promedio de calidad de agua en los cuerpos de agua. Un ejemplo de este tipo de muestra ocurre en un río o corriente que varía en composición de acuerdo con el área (varias muestras tomadas en varios puntos de determinada área (ancho del río)) y la profundidad (muestras simples o compuestas tomadas a lo largo de la columna de agua). (Sierra Ramirez, 2011)

Parámetros Calidad de Agua

En la Tabla 21, se presentan los parámetros básicos a tener en cuenta de acuerdo al objetivo de la campaña de monitoreo.

Tabla 21. Parámetros básicos recomendados para el monitoreo de calidad del agua.

Variables <i>in situ</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Temperatura (C°), Conductividad Eléctrica, Oxígeno Disuelto, Porcentaje de saturación de oxígeno, pH
Físicos	<ul style="list-style-type: none"> • Sólidos suspendidos totales, Sólidos disueltos totales, Turbidez.
Nutrientes	<ul style="list-style-type: none"> • Nitrato, Nitrito, Nitrogeno Amoniacal, Nitrogeno Total (como la suma de las formas de nitratos, nitritos, nitrógeno amoniacal (NID) y nitrógeno orgánico), Nitrógeno total Kjeldahl (NTK), Fosforo Total.
Materia Orgánica	<ul style="list-style-type: none"> • Demanda bioquímica de oxígeno DBO, Demanda química de oxígeno DQO.
Microbiológicos	<ul style="list-style-type: none"> • Coliformes fecales, Coliformes totales

Fuente: Modificado, WMO, 2008.

Lo sugerido en la anterior tabla, no limita la posibilidad de adicionar o quitar parámetros de evaluación en el monitoreo de calidad del agua superficial, en cumplimiento a la normatividad vigente o a lo establecido en el programa de monitoreo, ya que, en todo punto o estación no es necesario medir todos los parámetros.

Equipos

Los materiales y equipos a utilizar en la campaña de monitoreo de calidad del agua, deben estar relacionados en una lista de chequeo y corresponder a los tipos de variables que va a ser determinadas, sin embargo, en la Tabla 22, se da una indicación de los materiales y equipos básicos para la campaña de monitoreo.

Tabla 22. Materiales y equipos monitoreo calidad del agua

Materiales	Equipos
<ul style="list-style-type: none"> • Mapas red de calidad del agua o puntos de monitoreo georeferenciados previamente seleccionados. • Libreta de campo • Marcadores o rotuladores • Cinta enmascarar • Bolsas • Documentos (Formato captura de datos, etiquetas, cadena de custodia) • Dotación (Guantes, Botas de seguridad, chalecos, gorros, cascos) • botellas de plástico y de vidrio previamente esterilizadas, de acuerdo a la tabla 13 • Reactivos para preservar muestras, reactivos para análisis in-situ) • Aguas Destilada. 	<ul style="list-style-type: none"> • Multiparámetros (Conductividad, pH, T°) • Cámara Fotográfica • botella de Van Dorn. • Muestreador de Kemmerer • Bombas • Muestreadores múltiples • Muestreador de oxígeno disuelto.

Fuente: IDEAM, 2017

Equipo Multiparámetro

El equipo multiparámetros, posee una o varias sondas, las cuales son utilizadas para medir variables in-situ, como se observa en la Figura 117, este medidor estará protegido frente a cambios de temperatura extremos durante las mediciones, ya que éstas afectan a la estabilidad del sistema electrónico y a la exactitud de la medición, la calibración y verificación del equipo de acuerdo a sus manuales es la clave de obtener exactitud en el dato.

Se recomienda, antes de realizar cualquier medición, verificar el equipo, cuantas veces sea necesario, sobre todo si se van a realizar mediciones sucesivas o si se

van a cambiar las condiciones medioambientales del lugar de muestreo (por ejemplo visitar el mismo día dos sitios con condiciones climáticas diferentes Bogotá-Girardot) también es importante purgar los depósitos y la sonda con la muestra de agua objeto de estudio. Por ejemplo, para medir la conductividad no deberían utilizarse muestras de agua anteriormente utilizadas.

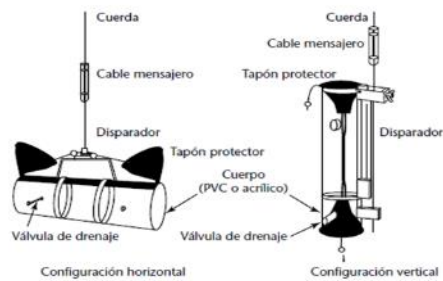


*Figura 117. Equipo multiparámetro, utilizado campaña binacional 2017, Estación Carlosama.
Fuente, IDEAM 2017*

Otros Materiales y Equipos

- La botella de Van Dorn, (Figura 118) está diseñada para obtener muestras a una profundidad de aproximadamente 2 m. En posición horizontal sirve para tomar muestras del fondo, en la interfaz sedimentos-agua.
- El muestreador de Kemmerer, es uno de los más antiguos muestreadores verticales operados mediante cable mensajero. Se suele utilizar en masas de agua de 1 m o más de profundidad. Existen muestreadores de Kemmerer (Figura 118) para volúmenes comprendidos entre 0,5 y 8 litros.

- Los muestreadores múltiples (Figura 118) permiten tomar simultáneamente varias muestras de volumen igual o diferente en el mismo lugar. Cada muestra se recoge en una botella diferente. Cuando las muestras son de igual volumen, se puede obtener información sobre la variabilidad instantánea entre las muestras replicadas.
- El equipo típico para medir la concentración oxígeno disuelto y demanda bioquímica de oxígeno (DBO) (Figura 118), es un equipo que también se puede utilizar en campo, esta deberá ser abierto, para conseguir una mezcla con las capas de agua superiores. Este tipo de muestreadores no es aconsejable para corrientes fluviales poco profundas. Para recolectar las muestras, se utilizan botellas de DBO, de boca estrecha con obturadores de vidrio biselados, para evitar la retención de aire en las muestras.



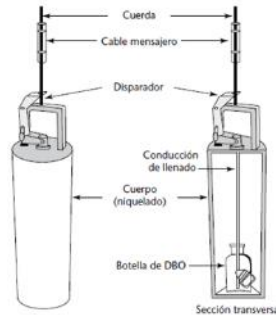
Botella de Van Dorn



Muestreador de Kemmerer



Muestreador múltiple



Muestreador de oxígeno disuelto

Figura 118. Equipos de monitoreo calidad de agua. Fuente (OMM, 2011)

En la siguiente tabla, se encuentra las recomendaciones para el almacenamiento y preservación en el manejo de muestras.

Tabla 23. Recomendaciones para el almacenamiento y preservación manejo de muestras.

Determinación	Recipiente ²	Volumen mínimo de muestra, mL	Tipo de muestra ³	Preservación ⁴	Almacenamiento máximo recomendado	Almacenamiento máximo regulatorio ⁵
Acidez	P, V(B)	100	s	Refrigerar	24 h	14 d
Alcalinidad	P, V	200	s	Refrigerar	24 h	14 d
DBO	P, V	1000	s,c	Refrigerar	6 h	48 h
Boro	P(PTFE) o cuarzo	1000	s, c	HNO ₃ hasta pH<2, 4°C	28 d	6 meses
Bromuro	P, V	100	s, c	No requiere	28 d	28 d
Carbono orgánico total	V(B)	100	s, c	Analizar inmediatamente; o refrigerar y adicionar HCl, H ₃ PO ₄ o H ₂ SO ₄ hasta pH<2	7 d	28 d
Cloruro	P, V	50	s, c	No requiere	N.E.	28 d
Cloro residual total	P, V	500	s	Analizar inmediatamente	0.25 h	0.25 h
Clorofila	P, V	500	s	Sin filtrar, guardar en la oscuridad a 4°C Filtrada, guardar en la oscuridad a -20°C (No almacenar en congelamiento)	24-48 h 28 d	
Dióxido de cloro	P, V	500	s	Analizar inmediatamente	0.25 h	N.E.
Color	P, V	500	s, c	Refrigerar	48 h	48 h
Conductividad específica	P, V	500	s, c	Refrigerar	28 d	28 d
Cianuro: Total	P, V	1000	s, c	Agregar NaOH hasta pH>12, refrigerar en la oscuridad ⁶	24 h	14 d; 24h si presenta sulfuros.
Disponibilidad a cloración	P, V	1000	s, c	Agregar 0.6 g de ácido ascórbico si tiene cloro y refrigerar	No almacenar; analizar inmediatamente.	14 d; 24 h si presenta sulfuros
Fluoruro	P	100	s, c	No requiere	28 d	28 d
Dureza	P, V	100	s, c	Adicionar HNO ₃ o H ₂ SO ₄ hasta pH<2	6 meses	6 meses
Yoduro	P, V	500	s, c	Análisis inmediato	0.25 h	N.E.
Metales en general	P (A), V(A)	1000	s,c	Para metales disueltos filtrar inmediatamente, adicionar HNO ₃ hasta pH<2	6 meses	6 meses
Cromo VI	P (A), V(A)	1000	s	Refrigerar	24 h	24 h
Cobre por			s, c			

Determinación	Recipiente ²	Volumen mínimo de muestra, mL	Tipo de muestra ³	Preservación ⁴	Almacenamiento máximo recomendado	Almacenamiento máximo regulatorio ⁵
colorimetría ¹ Mercurio	P (A), V(A)	1000	s, c	Adicionar HNO ₃ hasta pH<2, refrigerar a 4°C	28 d	28 d
Nitrógeno:						
Amoniaco	P, V 500		s, c	Analizar lo más pronto posible, o adicionar H ₂ SO ₄ hasta pH<2; refrigerar	7 d	28 d
Nitrato	P, V	100	s, c	Analizar lo más pronto posible o refrigerar	48 h	48 h (28 d para muestras cloradas)
Nitrato + nitrito	P, V	200	s, c	Adicionar H ₂ SO ₄ hasta pH<2, refrigerar	1- 2 d	28 d
Nitrito	P, V	100	s, c	Analizar lo más pronto posible; refrigerar	ninguna	48 h
Orgánico, Kjeldahl	P, V	500	s, c	Refrigerar; adicionar H ₂ SO ₄ hasta pH<2	7 d	28 d
Olor	V	500	s	Analizar lo más pronto posible; refrigerar	6 h	N.E.
Grasas y aceites	V	1000	s	Adicionar HCl o H ₂ SO ₄ hasta pH<2, refrigerar	28 d	28 d
<p>¹ Para detalles adicionales ver el texto y los protocolos respectivos. Para las determinaciones no enumeradas, usar recipientes de vidrio o plástico; preferiblemente refrigerar durante el almacenamiento y analizar lo más pronto posible.</p> <p>² P = plástico (polietileno o equivalente); V = vidrio; V(A) o P(A) = enjuagado con HNO₃ 1:1; V(B) = vidrio borosilicatado; V(S)= enjuagado con solventes orgánicos o secado en estufa.</p> <p>³ s = simple o puntual; c = compuesta.</p> <p>⁴ Refrigerar = almacenar a 4°C ± 2°C, en ausencia de luz. Analizar inmediatamente = analizar usualmente dentro de los 15 minutos de recogida la muestra.</p> <p>⁵ Ver referencia ⁸ para posibles diferencias contempladas en el envase y requerimientos de preservación. N.E. = No establecido en referencias citadas.</p> <p>⁶ Si la muestra está clorada, consultar su pretratamiento en el protocolo o en <i>Standard Methods</i>.</p> <p>⁷ U.S. Environmental Protection Agency. 1996. 40 CFR Part 136, Table II</p> <p>⁸ U.S. Environmental Protection Agency. 1992. Rules and Regulations.40 CFR Parts 100-149. Fuente: Standard Methods 21th EDITION, 2005.</p>						

Fuente. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (Bridgewater, W. Rice, B. Baird, D. Eaton, & S. Clesceri, 2012)

Procedimientos para la toma de muestras

Antes de salir a la campaña de monitoreo es indispensable tener en cuenta el

Lista de chequeo:

- Verificación de equipos para la toma de muestra in-situ teniendo en cuenta los manuales de cada equipo
- Reactivos para la toma y preservación de muestras
- Ubicación exacta de los puntos de monitoreo
- Documentación requerida (manuales, protocolos, formatos de campo),
- Neveras
- Botellas y recipientes previamente esterilizadas
- Botiquín primeros auxilios
- Demás elementos necesarios de acuerdo a la programación previa de la campaña.

Toma de muestras

Los procedimientos de muestreo dependen de las condiciones del sitio, tales como profundidad, velocidad, caudal y ancho del cauce. En campo, antes de iniciar con la toma de muestras, el personal debe estar equipado de acuerdo a sus artículos de dotación (botas de seguridad, chaleco, casco, guantes, mascara, entre otros.) y los equipos y materiales se deben encontrar previamente calibrados, esterilizados e identificados de acuerdo a las muestras que se van a tomar.

- Antes de tomar las muestras, se debe seguir las indicaciones dadas por el laboratorio donde se realicen los análisis de agua, en cuanto si se purga el recipiente donde se tome la muestra o si el recipiente viene previamente muflado y no se deben de purgar.
- Para la toma de muestra, se recomienda identificar el tipo de muestra que se va a tomar (puntual, compuesta, integrada).
- Si la toma de muestra es desde un puente, se recomienda ubicarse en el centro del puente, evitar la remoción de sedimentos del fondo del cauce, y

en el momento de subir el balde, evitar raspar cualquier estructura con el fin de no contaminar la muestra.

- Si la muestra se toma en una quebrada o río de poca profundidad Para la medición de parámetros de campo se recomienda tomar directamente en el río o tomar un volumen considera de agua en un balde limpio, evitando hacer remoción del sedimento. Para la toma de muestras, se recomienda coger la botella por debajo del cuello sumergida en dirección contraria al flujo de agua, evitando tener contacto directo al interior de la misma.
- Si la muestra se toma en aguas profundas se recomienda utilizar botellas Van Dorn y Niskin, por tener capacidad de mayor volumen, son ideales para la obtención de muestras en el análisis de pigmentos fotosintéticos y contaminantes (pesticidas, metales pesados, etc). Es importante abrir ambos extremos de la botella y asegurarlos para que no se cierren, luego de bajar la botella esperar por lo menos un minuto para la estabilización, toma de muestra y cierre de la botella para luego subirla, depositar el agua en un balde y medir los parámetros in-situ y tomar las muestras para su posterior análisis.
- Para la toma de parámetros como grasas y aceites la toma de muestra se realiza en la superficie del río
- En las muestras que necesitan preservación, tener en cuenta dejar un espacio considerado para el proceso de preservación.
- En las muestras microbiológicas el espacio debe ser mayor para el correspondiente suministro de oxígeno para las bacterias.
- En el momento de la toma de muestra para la DBO5, el frasco debe llenarse totalmente en forma lenta para evitar así la formación de burbujas.

Medición de Parámetros In-Situ

Si el sitio de muestreo corresponde a una estación hidrométrica, debe anotar la lectura del nivel del limnómetro o limnógrafo, para posteriormente, con base en la curva de calibración de la corriente calcular el caudal. Si la sección no corresponde

a una estación, es importante realizar un aforo de caudal, para poder correlacionarlo con los parámetros de calidad. (EPAM, 2011)

Los parámetros de medición en campo (in situ) son pH, conductividad, temperatura del agua, oxígeno disuelto y saturación de oxígeno. De acuerdo a las recomendaciones de la guía de prácticas hidrológicas de la OMM, la lectura de los valores debe ser de forma inmediata, luego de ser tomada la muestra, ya que el valor puede variar durante el almacenamiento de la muestra (OMM, Guía de prácticas hidrológicas, 2011). Estas mediciones deberán registrarse de la misma manera en el formato de registro de datos de campo (Figura 119).

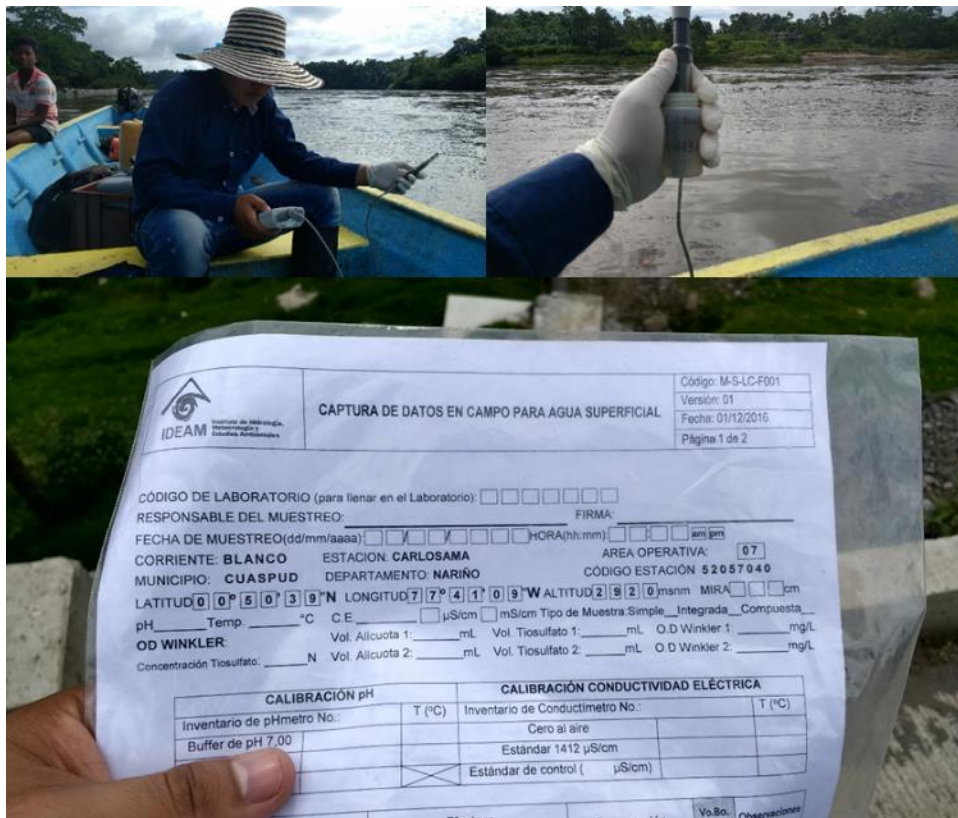


Figura 119. Verificación de equipos, toma de muestra y registro del parámetro in-situ, estación hidrológica San Juan. Fuente IDEAM 2017

En este procedimiento, se recomienda limpiar el electrodo del multiparámetro con agua destilada, inmediatamente después que se haga el registro del dato, con el

objetivo de evitar posibles contaminaciones entre las muestras y el deterioro del mismo.

El técnico debe observar e identificar rasgos extraños en la corriente o cuerpo de agua a muestrear, en especial cambios con respecto a muestreos previos, como olores o colores inusuales, capas o películas superficiales, objetos flotantes, así como lluvia, viento fuerte o tormentas en el momento de la medición.

Control de calidad en el campo

El control de calidad es un elemento esencial en todo programa de garantía de calidad en el campo. Además de los procedimientos estándar, el control de calidad requiere de la presentación de blancos y muestras duplicadas para constatar la pureza de los preservantes químicos; para detectar la contaminación en recipientes para muestras, papeles filtrantes, equipo de filtración y cualquier otro equipo empleado en la recolección o manipulación de muestras; y para detectar cualquier otro error sistemático o casual desde el momento en que se toma la muestra hasta el momento del análisis. También hay que recolectar réplicas de muestras para comprobar la reproducibilidad del muestreo. La oportunidad y la frecuencia de blancos y de réplicas de muestras se establecen en el diseño del proyecto.

- **Blancos de recipientes**

Antes de realizar una visita a campo para efectuar el muestreo, se debe tomar al azar uno de cada diez recipientes de los que se usarán en el muestreo, se lo llena con agua destilada ultra pura, se lo preserva de igual forma que las muestras de campo y se lo separa para su posterior envío con las otras muestras para su análisis químico como "blancos de recipientes". De esta forma se podrá detectar cualquier contaminación generalizada que se haya producido durante el lavado.

- **Blancos de filtros**

Si las muestras de agua son "filtradas en el campo" para determinar el componente disuelto de ciertos elementos de la calidad del agua, los filtros a utilizar en campo deben lavarse previamente en el laboratorio con una solución que pueda eliminar cualquier contaminante que pudiera afectar la precisión de la medición de la variable de interés. Inmediatamente después del lavado, los filtros deben ubicarse en cajas Petri de plástico para su transporte a campo. Los equipos de filtración, tales como los embudos, deben lavarse previamente en el laboratorio utilizando el mismo procedimiento y luego transportarse en bolsas de polietileno selladas.

Se debe preparar diariamente un "blanco de filtros" pasando una muestra de agua destilada ultra pura a través de uno de los filtros previamente lavados en el equipo de filtración y conservarlo igual que las muestras de agua para su posterior envío al laboratorio para analizar la(s) variable(s) de interés.

- **Blancos de campo**

Se debe preparar "blancos de campo" (se sugiere un blanco por cada diez muestras de agua) al concluir cada jornada de muestreo, llenando los recipientes para muestra con agua destilada ultrapura, agregándoles el conservador de la misma forma que a las muestras de agua, cerrando los recipientes herméticamente y transportándolos luego al laboratorio de igual forma que las muestras de agua.

- **Réplicas de muestras (alícuotas)**

Las réplicas de muestras se obtienen dividiendo una muestra en dos o más sub-muestras colectadas en condiciones lo más similares posibles. Esto se debe realizar periódicamente a fin de obtener la magnitud de los errores provocados por contaminación, errores casuales y sistemáticos y cualquier otra variación que se haya producido desde el momento en que se toman las muestras hasta que llegan al laboratorio.

- **Muestras con adiciones de concentración conocida de la(s) variable(s) de interés (adición estándar)**

Al menos una vez en cada punto de muestreo se deben preparar muestras de control para cada variable medida. Estas se preparan agregando a cuatro alícuotas de una sola muestra tres concentraciones diferentes conocidas de la variable de interés, dentro del rango de concentración que el método analítico utilizado sea capaz de medir o detectar. La información obtenida a través de estas muestras de control se utiliza para detectar cualquier error sistemático o sesgo en la metodología analítica, lo que es muy importante para la interpretación de los datos (PNUMA, 1994).

Cantidad de Muestra

Los volúmenes de unas muestras en particular dependen del tipo y del número de parámetros que se han de analizar, del método analítico y de las concentraciones esperadas de los constituyentes en el agua. El personal de laboratorio determinará el volumen de muestra requerido. Este volumen puede determinarse haciendo una lista de todos los parámetros que son conservados en la misma forma, totalizando el volumen necesario para la preparación y el análisis y multiplicando luego por dos para duplicar y por tres para triplicar los análisis.

Se deben tener en cuenta los siguientes puntos:

- El recipiente de la muestra debe llenarse completamente, cuando sea importante evitar el contacto con el aire.
- El recipiente no debe llenarse completamente, cuando sea necesario batir rigurosamente las muestras antes del análisis.
- Cuando se deban satisfacer ambos requerimientos, llenar completamente la botella, pero añadir unas piezas de un sólido inerte, limpio y esterilizado, como un anillo o reborde.

- Cuando la muestra contenga partículas discretas, como materiales no disueltos, bacterias y algas, se necesitará un volumen de muestras mayor que el usual para minimizar errores.

Las cantidades que se reportan en la Tabla 23, se refieren a los volúmenes por parámetro, pero hay que tener en cuenta la realización de diluciones, duplicados o repeticiones de los ensayos, por estas razones a continuación se dan algunas guías de los volúmenes utilizados generalmente de acuerdo a las técnicas analíticas descritas en los procedimientos anexos.

Para la mayoría de análisis físicos y químicos tomar 2 litros de muestra, estos incluyen nitritos, sólidos, DBO₅, detergentes, acidez, alcalinidad, color, etc. Para análisis de DQO, nitratos, fósforo total resulta conveniente un envase plástico de 500 ml preservado con ácido sulfúrico. 500 ml de muestra para la determinación de metales y preservada con ácido nítrico, para metales totales.

Para muestras microbiológicas 250 ml en envase estéril y llenar el recipiente hasta un 90% de su volumen total. Para el análisis de fósforo soluble un frasco de 200 ml enjuagado con HCl es el más conveniente.

Colectar siempre un volumen de muestra suficiente en el recipiente adecuado que permita hacer las mediciones de acuerdo con los requerimientos de manejo, almacenamiento y preservación. (IDEAM, 2006)

Preservación de las muestras.

Luego de tomada las muestras, se adiciona el preservante de acuerdo a lo recomendado por el Standard methods Tabla 23, como se observa en la Figura 120, una vez preservada la muestra se recomienda homogenizar y cerrar bien el recipiente.



Figura 120. Preservación de muestras con Ácido en Estación Pipiguay. Fuente. IDEAM 2017

En la Figura 121, se observan algunas recomendaciones dadas por la OMM para el filtrado y preservación de las muestras.

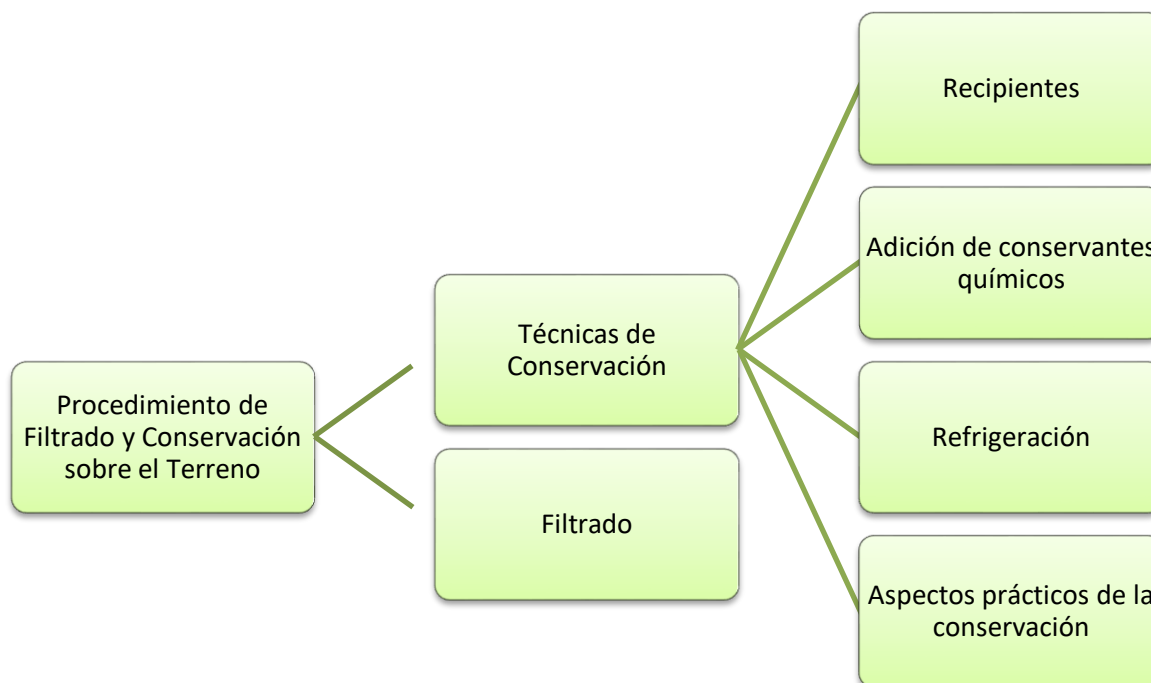


Figura 121. Recomendaciones para el filtrado y conservación de las muestras. Fuente, modificado (OMM, 2011)

En el filtrado, la OMM recomienda filtrar las muestras para separar la materia disuelta de las partículas, en el caso de metales, la muestra no se filtrará, esta será sometida a una digestión ácida en laboratorio para permitir la disolución de las partículas. Los filtros orgánicos (policarbonato, acetato de celulosa o teflón) son recomendados para las para las sustancias minerales, y para los compuestos orgánicos, son recomendados los filtros de fibra de vidrio.

En el caso de las técnicas de conservación en cuanto a los aspectos mencionados en la Tabla 23 se encuentran las recomendaciones de acuerdo al tipo de parámetro que se va a medir.

Precauciones para evitar contaminación de muestras

La calidad de los datos generados por un laboratorio depende principalmente de la integridad de las muestras que ingresan al laboratorio. Por consiguiente, el investigador de campo debe tomar las precauciones necesarias para impedir la contaminación y el deterioro de las muestras. Dado que existen muchas fuentes de contaminación, se deben tomar algunas precauciones:

- Las mediciones a campo siempre deben realizarse en una sub-muestra separada, la cual una vez efectuada la medición se descarta. Las mediciones nunca deben hacerse en la misma muestra de agua que se entrega al laboratorio para su análisis químico.
- Los recipientes para la extracción de muestras, nuevos o usados, deben limpiarse de acuerdo con los métodos recomendados (Tabla 23).
- Solo se debe usar el tipo de recipiente recomendado para cada tipo de variable (Tabla 23).
- Los frascos para muestras de agua solo se deben usar para muestras de agua. Los recipientes que hayan sido usados en el laboratorio para

almacenar reactivos concentrados nunca deben usarse como recipientes para muestras.

- Antes de ser utilizados a campo, se debe controlar todos los preservantes y el material de vidrio para asegurarse que estén perfectamente limpios.
- Se deben utilizar los métodos de preservación recomendados. Todos los conservadores deben ser de pureza analítica. Normalmente son provistos y certificados por el laboratorio de análisis.
- Cuando se preservan muestras, la forma de evitar la posibilidad de agregar el preservante incorrecto a una muestra o de que los preservantes se contaminen entre sí es preservando juntas todas las muestras que se analizarán para un grupo dado de variables.
- Se puede usar film de teflón o papel de aluminio lavado con solvente para evitar que las tapas de los recipientes contaminen las muestras de agua que deben ser analizadas para la determinación de compuestos orgánicos.
- No se debe tocar la parte interior de los recipientes para muestras o de sus tapas con las manos descubiertas, ni con guantes, etc.
- Los recipientes para muestras deben guardarse en un ambiente limpio, libre de polvo, gases, suciedad y basura. La limpieza de los vehículos es un factor importante para evitar problemas de contaminación.
- Los productos del petróleo (gasolina, aceite, gases de escape) constituyen una fuente principal de contaminación. Los derrames o goteos (que suelen producirse en los botes) deben limpiarse inmediatamente. Los gases de escape y el humo del cigarrillo pueden contaminar las muestras con plomo y otros metales pesados. Los equipos de aire acondicionado también constituyen una fuente de contaminación por metales traza.

- Los filtros y demás aparatos deben mantenerse limpios lavándolos con ácido o remojándolos en soluciones especiales; deben envolverse en papel de aluminio enjuagado con solvente
- Los recipientes esterilizados deben mantenerse en ese estado hasta que se recolecte la muestra. Si el papel esterilizado ultrafuerte o el papel de aluminio se han perdido o si la tapa se ha roto, el recipiente debe descartarse.

Cadena de custodia

Luego de tomar la muestra en campo, se recomienda que esta esté acompañada de la cadena de custodia, esto permite la identificación correcta de la muestra y permitirá que el error en el propósito del análisis para medir el parámetro sea mínimo. La información básica recomendada que debe ir registrado en este documento de campo es:

Nombre de la campaña de monitoreo

Nombre de la entidad que realiza la campaña de monitoreo

Nombre de la persona quien toma las muestras

Nombre o código del punto de monitoreo

Tipo de corriente

Fecha y hora de muestreo

Número y tipo de envases por punto de muestreo

Método de preservación de la muestra

Que parámetro analizar con la muestra

Observaciones de campo en el momento de la toma de la muestra

Almacenamiento y transporte de muestras.

Los recipientes deben almacenarse dentro de las neveras, con el debido cuidado de tal manera que no se rompan, o queden expuestos a la luz directa (figura 45).



Figura 122. Mantenimiento de la refrigeración de las muestras con hielo en Estación Hidrológica San Juan

Las neveras se deben encontrar debidamente selladas para el traslado de las muestras de acuerdo a los tiempos de almacenamiento recomendados de acuerdo a la Tabla 23.

7.2.3.2. Hidrobiológico

Los recursos hídricos del país contienen una importante diversidad de organismos acuáticos. En los últimos años, desde el IDEAM se ha impulsado la inclusión de las variables hidrobiológicas en el estudio de la calidad de las aguas. En este documento se incluyen por primera vez protocolos de muestreo y de laboratorio para el estudio de las comunidades acuáticas de fitoplancton, zooplancton, ficoperifiton, diatomeas, macroinvertebrados acuáticos y macrófitas.

Así, monitorear las comunidades acuáticas es importante por su carácter integrador de las características del medio acuático. A diferencia de los parámetros físicos y químicos que proporcionan información detallada de las condiciones en el momento del muestreo, las comunidades de organismos proveen información integral sobre el estado del medio en las últimas semanas o meses, según su ciclo biológico (Li, Zheng, & Liu, 2010), y permiten inferir de qué manera las condiciones ambientales o antrópicas puede afectar el desarrollo de su comunidad (Dolédéc & Statzner, 2010).

De modo que usar un conjunto de diferentes especies de organismos, como indicadores biológicos, proporciona una evaluación integral de las condiciones ambientales, las cuales son altamente variables en los cuerpos de agua (Stevenson, Pan, & van Dam, Assessing environmental conditions in rivers and streams with diatoms. En: Smol J.P., Stoermer E.F., 2010. The diatoms: applications for the environmental and Earth Sciences., 2010).

En el ámbito global, las comunidades bióticas son ampliamente usadas para monitorear las condiciones del medio acuático, por lo que se desarrollaron normativas de aplicación nacional o internacional que garantizan el seguimiento de un mismo protocolo, como es el caso de las directivas que cubren el entorno Europeo (Comisión Europea, 2000). En Colombia, se realizaron algunos estudios dirigidos al desarrollo de indicadores de la calidad del agua, por ejemplo: (Díaz-Quiróz & Rivera-Rondón, 2004); (Pinilla G. , 2010); (Riss, Ospina, & Rodríguez,

2002); (Roldán G. , 2016); y se han propuesto algunos protocolos para la colecta de muestras bióticas, como (Asociación Colombiana de Limnología, 2002).

No obstante, estas aproximaciones no están integradas en un mismo marco de procedimientos que permita recopilar información de manera sistemática y procesarla para analizar comparativamente la calidad del agua en todo el país. De acuerdo con esto, este protocolo constituye un primer paso en la necesaria unificación de metodologías orientadas a conocer la biodiversidad acuática, desarrollar índices bióticos de la calidad del agua y garantizar el desarrollo de programas de monitoreo.

Con el objeto de realizar un adecuado monitoreo, es aconsejable estudiar simultáneamente varias de las comunidades acuáticas (Tabla 15), y realizar al mismo tiempo el monitoreo fisicoquímico.

Tabla 24. Tipos de comunidades a estudiar en los dos principales tipos de ecosistemas acuáticos.

Comunidades Biológicas	Lótico	Léntico
Fitoplancton		X
Zooplancton		X
Ficoperifiton	X	X
Diatomeas	X	X
Macroinvertebrados acuáticos	X	X
Macrófitas	X	X
Peces	X	X

Asimismo, la calidad de la información colectada no solo dependerá del seguimiento riguroso de los procedimientos, sino también de la experticia en taxonomía de los analistas encargados del procesamiento de las muestras. Por otro lado, el muestreo debe contar con los respectivos permisos de colecta y de traslado de especímenes (Decretos 3016 de 2016, 1076 de 2015 y 309 de 2000 o en aquellos que los modifiquen o sustituyan); el material colectado se debe depositar en colecciones registradas ante el Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt (Decreto 1375 de 2013 o en aquel que lo modifique o sustituya).

Fitoplancton

Los organismos fitoplanctónicos son organismos microscópicos que se encuentran suspendidos en la columna de agua de ecosistemas lénticos tales como: lagos, lagunas, ciénagas, humedales e incluso ríos no vadeables que tienen un flujo muy lento u otros ecosistemas artificiales como estanques y embalses. Las algas fitoplanctónicas pueden ser unicelulares, coloniales, o formas filamentosas con un ciclo de vida corto que les permite responder muy rápidamente a los cambios ambientales (John, Whitton, & Brook, *The Freshwater Algal Flora of the Isles: An Identification guided to Freshwater and Terrestrial Algae*, 2011); (Bellinger & Sigeo, 2015); (Whitton & Potts, 2000).

Las algas fitoplanctónicas se han utilizado ampliamente como indicadores de la calidad del agua, algunas especies se encuentran en ambientes muy enriquecidos por nutrientes, mientras que otros son muy sensibles a vertimientos químicos u orgánicos. Hay especies que pueden desarrollar un crecimiento excesivo en ciertas condiciones, denominadas floraciones o “Bloom”; estos florecimientos pueden generar olor, sabor, condiciones anóxicas o toxicidad, con causas incluso de la muerte a mamíferos y al hombre (Whitton & Potts, 2000). Por lo tanto, es necesario su monitoreo constante en cuerpos de agua que se utilicen para diversas actividades, como el consumo o preservación de la flora y fauna.

Los métodos propuestos en este protocolo se derivan de la revisión de diferentes documentos tales como: (Bellinger & Sigeo, 2015), (Universidad Nacional Mayor de San Marcos, 2014); (Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2013); (IOC - Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO, 2010); (APHA.AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION, 2015); (Wetzel & Likens, 2000); (Donato Rondón, 2002) (Rivera, 2009) y del consenso de diferentes investigadores colombianos expertos en este tema.

Selección de Puntos de Monitoreo

La selección de los puntos de muestreo del fitoplancton debe ajustarse a los objetivos del programa de monitoreo o proyecto. Para un monitoreo a largo plazo se busca que la muestra sea representativa del ecosistema y es importante que el sitio de muestreo sea permanente. De manera general, se debe considerar que exista una columna de agua sin flujo turbulento, por lo tanto, no se debe evaluar esta comunidad en ríos, quebradas o caños.

De manera que, en el sitio de muestreo se debe tener en cuenta que el fitoplancton responde no solo a las características químicas del agua, sino también a factores físicos tales como el gradiente vertical que ofrece la luz, donde en las zonas superficiales con mayor incidencia se favorecen los procesos fotosintéticos. No obstante, en zonas de alta radiación, como las zonas tropicales, se puede presentar inhibición fotosintética; por lo que algunos organismos han desarrollado mecanismos para evitar altas intensidades lumínicas y se ubican en zonas subsuperficiales, otros pueden desarrollarse en zonas profundas e incluso formar floraciones en el betos (Dodds & Whiles, 2010).

Otro factor de importancia para la distribución del fitoplancton en la columna de agua es el régimen de estratificación y mezcla. De esta forma, ecosistemas lénticos profundos o ecosistemas protegidos del viento presentan periodos de estratificación térmica que condiciona la distribución del fitoplancton por la presencia de una termoclina (cambio brusco en temperatura causada por un gradiente en la densidad del agua), que puede constituir una barrera física para microorganismos como el fitoplancton (Reynolds, Ecology of phytoplankton. Ecology, Biodiversity and conservation, 2006). En este protocolo se realizan recomendaciones para la colecta de muestras de la comunidad fitoplanctónica en los diferentes escenarios.

Frecuencia de Monitoreo

La frecuencia de monitoreo de la comunidad del fitoplancton debe obedecer a los objetivos del programa de monitoreo o proyecto. Las algas fotosintéticas tienen una tasa de renovación semanal o quincenal, por lo que en el caso de estudios sucesionales esta sería la frecuencia óptima. Sin embargo, son muchos los factores que inciden en la definición de la frecuencia y casi siempre es el tema presupuestal el más sensible. Se recomienda abarcar diferentes periodos climáticos (lluvias y sequía). Si el muestreo solo se puede realizar una vez al año se recomienda la época seca.

Tipos de Muestras

Las muestras de algas fitoplanctónicas pueden ser de tipo **cuantitativo** o **cualitativo**. En el primer caso se pretende expresar la biomasa de algas, ya sea en células por mililitro o por biovolumen (micras cúbicas por mililitro). Estos datos son muy útiles para establecer la calidad del agua, la muestra de este tipo corresponde a un volumen de agua (entre 250 a 300 mL), al que se le adiciona un preservante. La muestra cuantitativa no debe ser filtrada.

Para las muestras cualitativas se permiten hacer las identificaciones de los organismos y un registro o listado de los morfotipos presentes en el cuerpo de agua; así se pueden realizar arrastres horizontales y verticales con la red, con un mayor número de arrastres se logrará tener una mayor representación de las especies de fitoplancton. Los organismos en este caso solo se reportan como presencia-ausencia, y se permite identificar, por ejemplo, la presencia de organismos potencialmente tóxicos.

Equipos

Para campo

- Frascos de vidrio o plástico de 200 - 300 mL preferiblemente traslucido de color ámbar para proteger la muestra de la luz. Si la muestra va a ser almacenada por largo tiempo se requiere envasar en botellas de vidrio, para garantizar una menor evaporación del reactivo fijador.
- Botella muestreadora de profundidad, tipo Van Dorn o Kemmerer para muestras puntuales (Figura 123).



Figura 123. Botella muestreadora tipo Van Dorn horizontal para toma de muestras en profundidad.

Fuente: Ángela Zapata (2017)

- Muestreador integrador de la columna de agua (tubo flexible de silicona con lastre de longitud predeterminada o tubo de PVC entre 2 - 2.5 cm de diámetro), para muestras integradas. También se puede utilizar la botella muestreadora para la composición de muestras integradas a partir de muestras puntuales.
- Contenedor o balde para la mezcla de la muestra integrada.
- Red de plancton fabricada en nylon de 20 μm de luz de poro.

- Disco Secchi.
- Sonda multiparamétrica con al menos sensores de temperatura, oxígeno disuelto y cable marcado para establecer la profundidad de los registros.
- Aparato de localización geográfica (GPS).
- Ecosonda manual para determinar el punto de máxima profundidad.
- Neveras portátiles para transporte de la muestra.
- Bolígrafo o rotulador permanente (o cualquier otro método para etiquetar las muestras). Si se usan etiquetas, estas deben ser resistentes a la humedad.
- Bote o lancha adecuada para las condiciones locales con el equipo de seguridad apropiado.
- Pértiga telescópica con adaptador de recipiente o dispositivo similar (Figura 124).



Figura 124. Pértiga telescópica modificada para toma de muestras sin disturbar los sedimentos en la zona litoral. Fuente: Angela Zapata (2017)

Reactivos fijadores:

Las muestras para el recuento de fitoplancton se fijan con solución de Lugol (mezcla de yoduro de potasio y yodo). Este preservante reacciona con el almidón que es la sustancia de reserva de algunos grupos de algas y permite una mejor sedimentación de las células.

La solución de Lugol se utiliza en periodos de conservación cortos, manteniendo la muestra adecuadamente unos pocos meses en oscuridad. Para garantizar el almacenamiento de las muestras en colecciones biológicas se debe adicionar este reactivo periódicamente (una o dos veces al año).

Solución ácida de Lugol

Preparación

- Balanza
- Cabina o campana de extracción (en caso de no disponer de este equipo utilizar mascara de seguridad y gafas)
- Yodo (I_0 , atención este reactivo puede ser tóxico)
- Yoduro de Potasio (KI)
- Ácido acético glacial (CH_3COOH)
- Agua destilada
- Mortero de mano y pistilo
- Probeta
- Balón aforado de 200mL
- Guantes
- Papel filtro
- Frasco de vidrio color ámbar debidamente rotulado para el almacenamiento.

Mezclar en mortero 10 g de I_0 (Yodo) y 20 gr de KI (yoduro de potasio) hasta que la mezcla sea homogénea adicione agua destilada y disuelva la mezcla

(aproximadamente 20mL). Una vez los granos estén disueltos adicione 20 mL de ácido acético glacial y lleve la preparación a 200ml con agua destilada en un balón aforado (APHA.AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION, 2015). Deje decantar o pase por un papel filtro para eliminar residuos o partículas. Trásváselo al recipiente de almacenaje.

El líquido resultante se debe conservar en un recipiente hermético y protegido de la luz (frasco de vidrio color ámbar) para minimizar su sublimación. El reactivo puede ser almacenado en gotero plástico para el trabajo de campo. **No almacenar** en recipientes metálicos o recipientes con tapa metálica. Esta solución se utilizará para las muestras de fitoplancton procedentes de masas de agua con pH < 7. Se debe utilizar 0.5 mL de esta solución por cada 100mL de muestra, o hasta que la muestra adquiera una coloración semejante a la miel.

Para Laboratorio:

- Microscopio invertido con reglilla ocular para toma de medidas
- Cámaras de sedimentación tipo Utermöhl (10mL, 50mL y 100mL) (Figura 125).

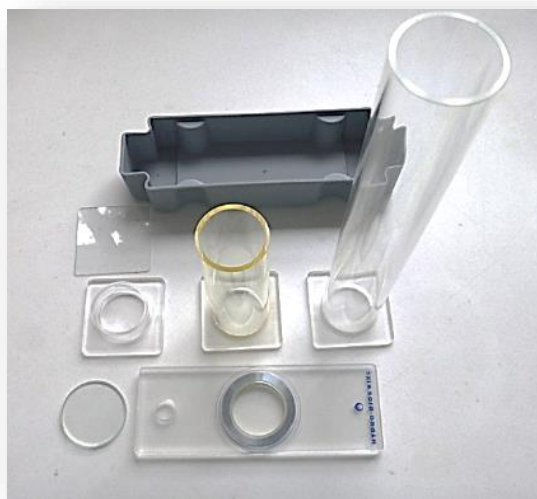


Figura 125. Cámaras de sedimentación Utermöhl. Fuente: Angela Zapata (2017)

- Microscopio óptico
- Portaobjetos y cubreobjetos
- Micropipetas plásticas desechables
- Aceite de inmersión
- Tinta china
- Cámara fotográfica en el microscopio
- Claves taxonómicas especializadas en cada grupo algal

Procedimiento para la toma de muestras

En campo

La toma de muestras de fitoplancton se realizará en los mismos puntos en los que se tomen muestras fisicoquímicas. La profundidad del cuerpo de agua y la disponibilidad de luz son factores determinantes como criterio de toma de muestras de fitoplancton.

- En ecosistemas con una zona limnética libre de macrofitas y fácil acceso al espejo de agua:
 - Establezca el punto más profundo del cuerpo de agua con la ecosonda o una cuerda marcada y un lastre.
 - Referencie el punto con el GPS.
 - Realice una toma de datos en el perfil vertical de temperatura y oxígeno disuelto con la sonda multiparametro, registre estas dos variables en intervalos de 20 cm a 1 metro según la profundidad del cuerpo de agua con el ánimo de establecer la capa de mezcla.
 - Registre la transparencia a partir del Disco Secchi.

- Si la capa de mezcla y la transparencia van hasta el fondo del cuerpo de agua se puede tomar una muestra integrada de la columna con el muestreador integrador. Todo el contenido del tubo se puede vaciar en un balde. Tomar 300 mL en un frasco previamente rotulado con datos del punto de muestreo, coordenadas, fecha y nombre del colector por último se fija con lugol. Otra forma puede ser utilizando la botella muestreadora: se seleccionan tres puntos en la columna (subs superficial, mitad de zona fótica y cercana al fondo), se integran en el balde y se toma una submuestra de 300 mL en el frasco rotulado, se fija con lugol.
- Si el cuerpo de agua se encuentra estratificado térmicamente o químicamente entonces tome una muestra subsuperficial o integrando la capa de mezcla y una segunda muestra en la termoclina u oxiclina (en caso que sea difícil establecer el cambio de temperatura).
- En ecosistemas dominados por macrófitas y con difícil acceso al punto más profundo del ecosistema, puede realizar la evaluación en la zona litoral. Utilice un dispositivo como una pértiga telescópica de tal manera que se pueda tener acceso al cuerpo de agua sin disturbar los sedimentos. Dependiendo de las condiciones o de los parches de macrófitas realice una muestra compuesta intégreala en el balde o contenedor y almacene 300 ml en un frasco y fije con lugol.
- En los ríos no vadeables, con muy baja corriente suele presentarse una alta concentración de sólidos suspendidos, por lo que el desarrollo del fitoplancton es bajo. Sin embargo, se puede cuantificar esta comunidad haciendo muestreos con red, con el ánimo de concentrar la muestra. Sin embargo, este método no es muy recomendable pues los organismos se seleccionan de acuerdo al tamaño de poro de la red. En este caso filtre un volumen de agua conocido a través de la red hasta que esta se sature.

Transfiera la muestra a un frasco rotulado y fije con lugol. No olvide anotar el volumen filtrado.

En Laboratorio

Determinación de organismos

- A partir de la muestra cualitativa, muestra de arrastre con red, o de una submuestra de la muestra cuantitativa deje en reposo por al menos 12 horas y tome del fondo una gota.
- Ponga la gota en un portaobjetos y cubra con un cubreobjetos, observe en el microscopio óptico en objetivo de 40x y de 100x.
- Mediante claves especializadas identifique los organismos en el mínimo nivel taxonómico posible. Identifique los morfotipos presentes.
- Realice tinciones con tinta china o los procedimientos que las claves taxonómicas sugieren para las identificaciones.
- Tome las medidas correspondientes con la reglilla ocular previamente calibrada para la identificación de especies y de géneros.
- Realice registros fotográficos de los diferentes morfotipos.

- Recuento de organismos

- Agite la muestra cuantitativa que tomó en campo de manera suave y constante, invirtiendo el frasco al menos entre quince a cincuenta veces para asegurar una buena homogenización de la muestra. No lo haga

violentamente porque puede producir burbujas difíciles de eliminar en la cámara.

- Deposite en la cámara de sedimentación Utermöhl de 10, 50 o 100mL, dependiendo de la cantidad de biomasa presente o la cantidad de sólidos en suspensión que contenga la muestra. Para cuerpos de agua muy transparentes se sugiere utilizar la cámara de 50 ml o 100mL. Para ecosistemas de mayor concentración de nutrientes o con muchos sólidos se recomienda la cámara de menor volumen, esto obedece a que la acumulación de partículas en el fondo puede obstruir la correcta visualización de organismos en el fondo.
- Evalúe antes de realizar la sedimentación si la cámara y el volumen utilizado es el adecuado, si la muestra contiene muchas partículas, el conteo se debe realizar en otro tipo de dispositivo, como por ejemplo cámaras de Sedgwick - Rafter.
- El tiempo de sedimentación es variable según el volumen sedimentado, en términos generales se recomienda una hora por cada mililitro sedimentado. Así, una cámara de 50 mL requiere un tiempo de sedimentación de 50 horas.
- Para hacer el conteo de células se requiere de un microscopio invertido, provisto de una reglilla ocular y en la medida de lo posible de cámara fotográfica.
- El método de sedimentación asume que las células tendrán una distribución de Poisson en el fondo de la cámara. Los conteos se pueden realizar en transectos transversales o campos al azar, o alternativamente se puede realizar recuentos de todo el fondo de la cámara (Figura 126).

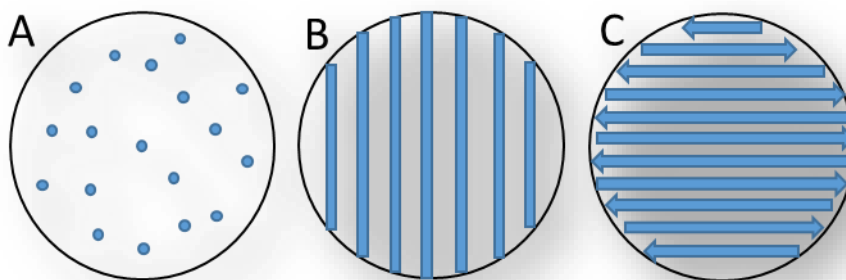


Figura 126 . Esquema del fondo de la cámara de sedimentación y las posibilidades de conteo de células. A. Campos al azar, cada punto representa un campo óptico. B. Transectos, también pueden ser horizontales. C. Dirección del conteo de todo el fondo de la cámara. Fuente: Angela Zapata (2017)

- Para alcanzar una confiabilidad del conteo del 80% se deben contar al menos 100 unidades y para una confianza del 90% se deben contar al menos 400 unidades. Por lo tanto se recomienda contar entre 100 a 400 células del morfotipo dominante.
- Lleve el registro de todos los morfotipos su frecuencia de aparición y el número de campos necesarios para alcanzar el recuento.
- La estimación de la densidad de cada morfotipo se debe realizar a partir de la siguiente fórmula:

$$Células\ ml^{-1} = \left(\frac{\text{No. de células contadas} * \text{area total de la cámara}}{\text{Area de un campo} * \text{No de campos contados} * \text{volumen sedimentado}} \right)$$

Área del fondo de la cámara (mm²)

Área del campo óptico (mm²)

Volumen sedimentado (mL)

Para obtener la biomasa total de la muestra en células por mililitro sume los datos de cada morfotipo presente.

- Para el caso del recuento de todo el fondo de la cámara, el cálculo para cada morfotipo se realiza con la siguiente fórmula:

$$Células\ mL^{-1} = \left(\frac{\text{No. de células contadas}}{\text{volumen sedimentado (mL)}} \right)$$

- Cuando se estima la densidad de cada morfotipo a partir de una muestra de red, el cálculo es el siguiente:

$$Células\ mL^{-1} = \left(\frac{\text{No. de células contadas}}{(\text{volumen sedimentado (mL)} * \text{volumen filtrado (mL)}) / \text{volumen concentrado (mL)}} \right)$$

- Finalmente consigne la información en el Sistema de Información Biológica (SIB), administrada por el Instituto de Investigaciones Biológicas Alexander Von Humboldt. <https://www.sibcolombia.net/>
- Las muestras deben ser depositadas en una colección biológica registrada en el Instituto Alexander Von Humboldt. Si su institución debe realizar un programa continuo de monitoreo se sugiere tener su propia colección de muestras y catálogo de fotografías de los especímenes.

- **Cálculo del Biovolumen**

- Para la aplicación de algunos índices es necesario el cálculo del volumen celular o biovolumen. Este dato se estima, a partir de la medición de las dimensiones de al menos 30 células de cada uno de los morfotipos seleccionadas aleatoriamente.

- Calcule la equivalencia de la forma celular a una forma geométrica de acuerdo con lo establecido por (Hillebrand, Dürselen, Kirschtel, Pollinger, & Zohary, 1999) y (Sun & Liu, 2003).
- Calcule el volumen promedio a partir de las 30 mediciones de cada morfotipo, en el caso de los morfotipos poco frecuente utilice las medidas disponibles o consulte en literatura.
- A partir de los datos de densidad de cada morfotipo multiplique por su volumen medio.

$$\text{Biovolumen } (\mu\text{m}^3/\text{mL}) = \text{Volumen medio } (\mu\text{m}^3) * \text{densidad (células/mL)}$$

- Para establecer la biomasa total de la muestra realice una sumatoria de todos los datos de los morfotipos presentes (AIEA, Procedimiento técnico para las estaciones de la Red Global de Isótopos en la precipitación (GNIP), 2012); (Wetzel & Likens, 2000).

Zooplankton

Los organismos pertenecientes al zooplankton corresponden a organismos heterotróficos, microscópicos o de tamaño muy pequeño (algunos milímetros). En las aguas dulces está constituido por categorías taxonómicas como protozoarios, rotíferos, cladóceros y copépodos como los más comunes, aunque también se pueden incluir otros grupos como ostrácodos, cnidarios y platelmintos, entre otros.

El análisis de esta comunidad permite hacer inferencias ecológicas de los ecosistemas, a partir de la composición y el tamaño de los organismos. Aunque en los ecosistemas tropicales aún no se tienen métricas del zooplankton que definan la calidad del agua, su estudio junto con el fitoplankton, parámetros fisicoquímicos y otras comunidades biológicas, pueden dar una información integral del ecosistema

y su funcionamiento (Dumont, Green, & Masundire, 1994); (Lampert & Sommer, 2007).

Este protocolo de muestreo y análisis de laboratorio se realizó según las recomendaciones de: (Universidad Nacional Mayor de San Marcos, 2014); (APHA.AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION, 2015); (Aranguren, Métodos para el estudio del Zooplancton de sistemas epicontinentales. Manual de Métodos en Limnología. Asociación Colombiana de Limnología, 2002); (Galbraith M. &, 2000) y del consenso de diferentes investigadores colombianos expertos en este tema.

Selección de Puntos de Monitoreo

La selección de puntos de muestreo del zooplancton depende de los objetivos del programa de monitoreo o proyecto. Sin embargo, en monitoreos a largo plazo de la calidad del agua se debe mantener el punto de muestreo de manera permanente, la selección del sitio debe representar el ecosistema. Se debe presentar una columna de agua sin flujo turbulento. Los factores que determinan la distribución en el ecosistema son variados entre ellos la presencia de alimento (algas, bacterias, detritus, etc) y la presencia de depredadores, entre otros.

Estos organismos realizan migraciones verticales particularmente en ambientes donde existen predadores, prefieren las zonas litorales cubiertas por macrófitas, hay registros de migraciones horizontales en las horas del día. Evitan los rayos solares (UV) que les puede causar algún daño. Su distribución es en parches en el ecosistema y poseen mecanismos que les permite evadir los muestreadores (Lampert & Sommer, 2007). Ante estas características se debe hacer algunas consideraciones iniciales antes del muestreo, relacionadas con la profundidad del ecosistema, la morfometría de este, la estratificación física, como la proporción de zona litoral en el cuerpo de agua.

En este protocolo se realizan recomendaciones para la colecta de muestras de la comunidad zooplanctónica en los diferentes escenarios.

Frecuencia de Monitoreo

La frecuencia de muestreo de la comunidad del zooplancton depende de los objetivos del proyecto. Sin embargo, en monitoreos se recomienda evaluar las dos comunidades planctónicas (fitoplancton y zooplancton) simultáneamente, de tal manera que se pueda dar una interpretación ecológica de la presencia de estos organismos en el ambiente de una manera integral.

Se recomienda realizar la colecta en periodos climáticos diferentes (lluvia y sequía). Si el muestreo solo se puede realizar una vez al año se recomienda la época seca, cuando las condiciones ambientales son extremas.

Tipo de Muestras

Muestras cualitativas: En estas muestras se trata de representar la totalidad de especies de la comunidad, a partir de esta muestra no se pueden obtener datos de densidad.

Con la red de plancton realice arrastres horizontales que incluyan los diferentes sitios de muestreo, y adicionalmente en cada sitio realice arrastres verticales desde 50 cm antes del fondo hasta la superficie.

Al material retenido en el frasco recolector de la red agregue una cantidad de agua carbonatada hasta que los organismos estén quietos, entonces transfiera la muestra al frasco de almacenaje de la muestra previamente rotulado con el código de la muestra, además de datos de la localidad, nombre del colector, volumen filtrado, y finalmente fije con solución Transeau.

Muestras cuantitativas: permiten referenciar la biomasa de los organismos en un volumen de agua filtrada o colectada, ya sea por número de individuos o por peso. Generalmente se expresa la densidad en individuos por litro.

El volumen de agua que debe ser concentrado para obtener una muestra representativa depende de la producción primaria del ecosistema, de tal manera que ecosistemas poco productivos u oligotróficos se deben filtrar de 30 a 100 litros por muestra. Para ecosistemas muy productivos o eutróficos se deben filtrar entre 1 y 10 litros (Figura 127).



Figura 127. Concentración de muestra con botella Van Dorn y red de plancton. Fuente: Ángela

Equipos

Para Campo

- Frascos plásticos de 200 a 300 mL para almacenar la muestra
- Botella muestreadora específica para esta comunidad Schindler-Patalas, la cual puede tomar un volumen de muestra en una profundidad determinada y a la vez consta de una red que permite la concentración del volumen muestreado. Si no dispone de este muestreador puede utilizar una botella muestreadora tipo Van Dorn y una red.

- Red de plancton de tamaño de poro de 20 μ m. Aunque muchos protocolos señalan redes de mayor tamaño para esta comunidad hay que señalar que en nuestros ambientes muchos de los rotíferos son de tamaño pequeño y de manera frecuente son la comunidad más abundante.
- Balde o contenedor aforado para almacenar muestra hasta su concentración por la red.
- Sonda multiparamétrica con al menos sensores de temperatura, oxígeno disuelto y cable marcado para establecer la profundidad de los registros.
- Aparato de localización geográfica (GPS).
- Ecosonda manual para determinar el punto de máxima profundidad.
- Neveras portátiles para transporte de la muestra.
- Bolígrafo o rotulador permanente (o cualquier otro método para etiquetar las muestras). Si se usan etiquetas, estas deben ser resistentes a la humedad.
- Bote o lancha adecuada para las condiciones locales con el equipo de seguridad apropiado.
- Pértiga telescópica con adaptador de recipiente o dispositivo similar (Figura 124).
- -Para la preservación de las muestras de zooplancton se utiliza comúnmente alcohol al 70% o solución Transeau la cual se prepara en una proporción de 6:3:1, correspondientes a seis partes de agua destilada, tres partes de alcohol y una de formol, se adiciona a la muestra en proporción 1:1, es decir se debe adicionar el mismo volumen de preservante que de muestra.
- -Agua carbonatada, esta se utiliza para narcotizar los individuos antes de la fijación y evitar que se contraigan para facilitar su observación.

Para Laboratorio

- Microscopio invertido con reglilla ocular para toma de medidas
- Microscopio óptico
- Estéreo microscopio
- Portaobjetos y cubreobjetos
- Agujas de disección especializadas.
- Pinzas especializadas.
- Caja de Petri.
- Micropipetas plásticas desechables
- -Cámara fotográfica en el microscopio
- -Rosa de Bengala, es una tinción que se utiliza para resaltar estructuras y facilitar la identificación taxonómica.
- -Glicerina, facilita el manejo de los ejemplares durante la identificación taxonómica
- -Hipoclorito de sodio (necesario para el tratamiento de rotíferos)
- -Claves taxonómicas especializadas en cada grupo

Procedimiento para la toma de muestras

La toma de muestras del plancton (fitoplancton y zooplancton) se realiza en general siguiendo los mismos criterios. En ecosistemas con una zona limnética libre de macrofitas y fácil acceso al espejo de agua:

- Establezca el punto más profundo del cuerpo de agua con la ecosonda o una cuerda marcada y con un lastre.
- Referencie el punto con el GPS.
- Realice una toma de datos en el perfil vertical de temperatura y oxígeno disuelto con la sonda multiparametro, registre estas dos variables en intervalos de 20 cm a 1 metro según la profundidad del cuerpo de agua con el ánimo de establecer la capa de mezcla.

Si el cuerpo de agua presenta una condición de mezcla tome con la botella muestreadora en al menos tres zonas de la columna de agua subsuperficie, zona media y 20 a 30 cm antes del fondo e integre en un contenedor el volumen total requerido. Entonces filtre por la red de plancton, adicione el agua carbonatada, espere hasta que los individuos estén narcotizados, transfiera al frasco previamente rotulado con el código de la muestra y datos de la localidad, nombre del colector, volumen filtrado y por ultimo preserve con solución transeau.

Si el cuerpo de agua está estratificado y presenta una oxiclina (un rápido cambio en la concentración de oxígeno entre dos profundidades muy cercanas), entonces puede tomar una muestra que integre la capa de mezcla y otra muestra en la oxiclina.

Si el cuerpo de agua es somero y cubierto con macrófitas, utilice la pértiga telescópica, integre diferentes muestras hasta alcanzar el volumen requerido y realice los mismos pasos ya descritos.

Procedimiento para laboratorio

- **Identificación taxonómica**

La identificación de organismos grandes puede realizarse en estereomicroscopio. Sin embargo, para rotíferos y protozoarios es necesario el microscopio óptico. Para las identificaciones se requiere bibliografía especializada y realizar un catálogo de fotografías de los especímenes.

Para la identificación taxonómica se requiere de tinción, por ejemplo, Rosa de Bengala ayuda a resaltar algunas estructuras.

Se recomienda el uso de glicerina para manipular especímenes grandes y poder hacer las observaciones requeridas en las claves.

En el proceso de identificación de rotíferos separe el mastax y utilícelo para determinar las especies (lo puede separar con el uso de hipoclorito de sodio).

Para identificar los cladóceros, separe el post abdomen y realice las mediciones de las características externas, tales como rostro, forma del cuerpo, decoraciones, forma entre otros.

Para identificar copépodos, separe el quinto par de pseudopatas de especímenes hembras para Cyclopoida y machos para Calanoida, además del primer par de anténulas de especímenes machos tanto de Cyclopoida y Calanoida.

- **Recuento de organismos**

Previo al conteo se recomienda hacer un barrido o visualización de la muestra antes de iniciar el recuento, esto con el fin de obtener una lista de los taxa presentes en la muestra y tener una aproximación de la densidad general de organismos.

Utilice la cámara de conteo cámara Sedgwick- Rafter (capacidad 1mL) y un microscopio invertido con reglilla micrométrica. Utilice el objetivo de 40x.

Si la densidad es baja revise la muestra completa (íntegramente), en este caso puede utilizar una cámara de Utermöhl para realizar el conteo, previa sedimentación de los organismos. Utilice la siguiente fórmula para la estimación de la densidad de cada morfotipo:

$$\text{Individuos L}^{-1} = \left(\frac{\text{No. de organismos contados}}{\text{volumen filtrado (L)}} \right)$$

Si la densidad es alta revise al menos 5 alícuotas de 1 mL cada una, depositándolas en la cámara de conteo Sedgwick- Rafter. Utilice la siguiente fórmula para cada morfotipo:

$$\text{Individuos L}^{-1} = \left(\frac{\text{No. de organismos contados}}{\text{volumen contado (L)} * \text{volumen filtrado (L)} / \text{volumen concentrado (L)}} \right)$$

Finalmente consigne la información en el Sistema de Información Biológica (SIB), administrada por el Instituto de Investigaciones Biológicas Alexander Von Humboldt.

Perifiton

El perifiton es una comunidad acuática constituida por todos los organismos (bacterias, hongos, algas, protozoarios, rotíferos) que están adheridos a un sustrato natural o artificial (Allan & Castillo, 2007). La mayor fracción de la biomasa de esta comunidad corresponde a productores primarios por lo que también reciben el nombre de ficoperifiton o algas bénticas. Estas algas tienen un ciclo de vida corto y al estar adheridas responden rápidamente a los cambios físicos, químicos y al disturbio biológico, es así que son buenos indicadores del estado del ecosistema (Stevenson & Bahls, Periphyton Protocols., 1999).

Ficoperifiton

Dentro de los productores primarios del perifiton se encuentran diferentes especies de algas, entre ellas las diatomeas. En esta sección se presenta el protocolo para el análisis de ficoperifiton total (incluye los diferentes grupos algales), en la siguiente sección se presenta el protocolo específico para el muestreo de diatomeas.

Este protocolo de muestreo y análisis de laboratorio se realizó según las recomendaciones de: (APHA.AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION, 2015); (Universidad Nacional Mayor de San Marcos, 2014); (Elosegui & Sabater, 2009); (Lowe & Laliberte, 2006); (Cambra, Ector, & Sabater, 2005); (Stevenson & Bahls, Periphyton Protocols., 1999) y del consenso de diferentes investigadores colombianos expertos en este tema.

Selección de Puntos de Monitoreo

Para la evaluación de la calidad del agua a partir de las comunidades algales perifíticas se sugiere una evaluación multihábitat, de tal manera que se tenga una sola muestra compuesta que represente el ecosistema. Se selecciona un tramo que acorde con el ancho del canal en ríos vadeables. Algunos autores sugieren entre 30 a 40 veces el ancho del canal. Sin embargo, se debe evaluar previamente el acceso, la presencia de vertimientos y en general que represente el ecosistema.

Tenga en cuenta todos los tipos de sustratos y hábitats (pocetas, rápidos, áreas cercanas a la orilla), el muestreo debe proceder según la proporción de cada hábitat en el al tramo. Combine todas las sub-muestras en un solo frasco.

Seleccione sustratos que estén sumergidos totalmente en el agua, que no estén en total oscuridad (por ejemplo, cuevas o debajo de raíces, debajo de pilas de piedra), y que tengan estabilidad y no deriven fácilmente en el cauce. En los ríos no vadeables el muestreo del perifiton está sujeto a las zonas cercanas a la zona

riparia, donde es posible encontrar un número mayor de sustratos de colonización, observe cuidadosamente que el sustrato no esté recientemente inundado.

La selección de puntos de muestreo depende de los objetivos del proyecto. Sin embargo, en monitoreos de la comunidad de ficoperifiton se recomienda mantener el mismo punto de muestreo a largo plazo. Para la evaluación de esta comunidad algal, se requieren de diferentes métodos de colecta según el sustrato donde se desarrolle la comunidad.

Simultáneamente a la colecta de muestras de ficoperifiton se recomienda registrar los parámetros fisicoquímicos.

Frecuencia de Monitoreo

La frecuencia de monitoreo obedece a los objetivos del proyecto. Se recomienda abarcar diferentes periodos climáticos (lluvias y sequía). Si el muestreo solo se puede realizar una vez al año se recomienda la época seca, cuando las condiciones son ambientalmente extremas.

Tipos de Muestra

Muestras compuestas: corresponde a la colecta de ficoperifiton proveniente de diferentes tipos de sustrato en un tramo seleccionado y de diferentes hábitats o biotopos (corriente rápida, lenta, remansos, etc). Estas muestras representan toda la variabilidad física en el tramo de muestreo o multihabitat.

Los muestreos pueden ser cualitativos, semicuantitativos o cuantitativos. El tipo de muestreo depende de la técnica empleada para extraer la muestra, los dos primeros establecen los organismos presentes, su proporción, pero no cuantifican la biomasa. Para la cuantificación es necesario establecer un área de muestreo, que según el criterio de expertos debe ser de aproximadamente 240 cm², por muestra. La cuantificación de la biomasa permite hacer un seguimiento de los cambios

espaciales y temporales del sistema. Adicionalmente permite la aplicación de índices de bioindicación.

Equipos

En Campo

- Frascos plásticos opacos de 100 o 250 mL de boca ancha, previamente etiquetados, por fuera del frasco.
- Cepillo de cerdas suaves
- Perifitómetro o muestreador de área conocida: este se construye con dos jeringas una de 20mL y otra de 60mL, a esta última se le retira una porción de goma del embolo y este caucho se adhiere con silicona a la base de la de 20mL, la cual se debe modificar cortando la parte superior correspondiente al área de inserción de la aguja (Figura 128). La muestra se raspa con ayuda de un cepillo pequeño que también se debe construir.

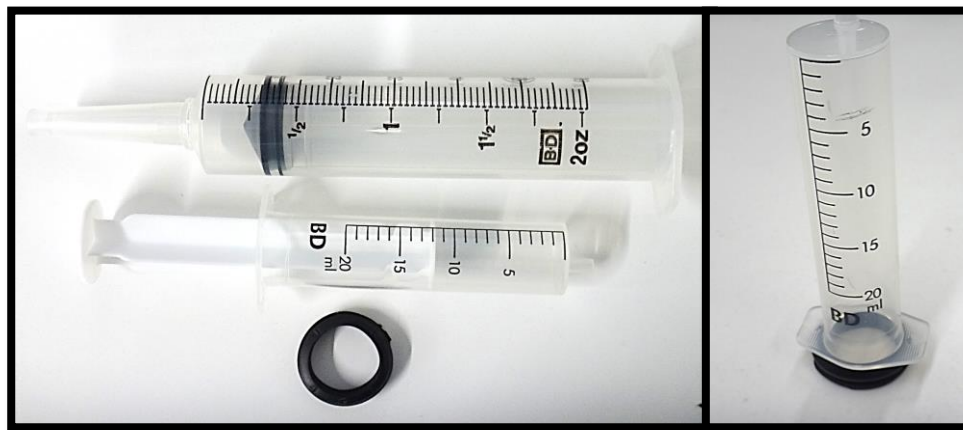


Figura 128. Elementos para la construcción de un perifitómetro. Fuente: Angela Zapata (2017)

- Pipetas plásticas
- Navaja
- Red de plancton tamaño de poro de 20 μm .
- Rastrillo de mango largo con red fina adherida, para el muestreo de sustratos verticales como estructuras de concreto de difícil acceso o paredes rocosas en el río.
- Tubo de PVC con borde de caucho, cepillo de mango largo y pipeta con pera succionadora en el caso de sustratos sumergidos y de difícil manejo.
- -Jeringa para el muestreo de sustratos blandos de 50ml sin aguja.
- Sonda multiparamétrica con al menos sensores de temperatura, oxígeno disuelto, pH y Conductividad previamente calibrado
- Aparato de localización geográfica (GPS).
- Neveras portátiles para transporte de la muestra
- Bolígrafo o rotulador permanente para etiquetar las muestras. Las etiquetas deben ser resistentes a la humedad.
- Reloj
- -Las muestras de perifiton suelen preservarse con formol al 10%, algunos autores sugieren el uso de formol tamponado para evitar la disolución de las frústulas de diatomeas a largo plazo.
- -También se puede usar solución de lugol (Ver preparación apartado fitoplancton)
- -Otro fijador menos común es Alcohol al 70% o solución Transeau la cual se prepara en una proporción de 6:3:1, correspondientes a seis partes de agua

destilada, tres partes de alcohol y una de formol, se adiciona a la muestra en proporción 1:1, es decir se debe adicionar el mismo volumen de preservante que de muestra.

- Agua destilada.

En Laboratorio

- Microscopio invertido con reglilla ocular para toma de medidas

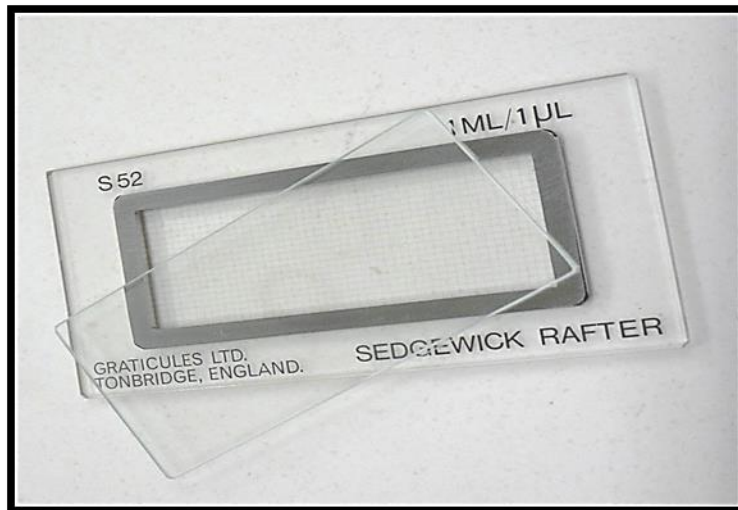


Figura 129. Celda de conteo Sedgewick – Rafter. Fuente: Ángela Zapata (2017)

- Celda Palmer Maloney (Figura 130) o versiones modificadas

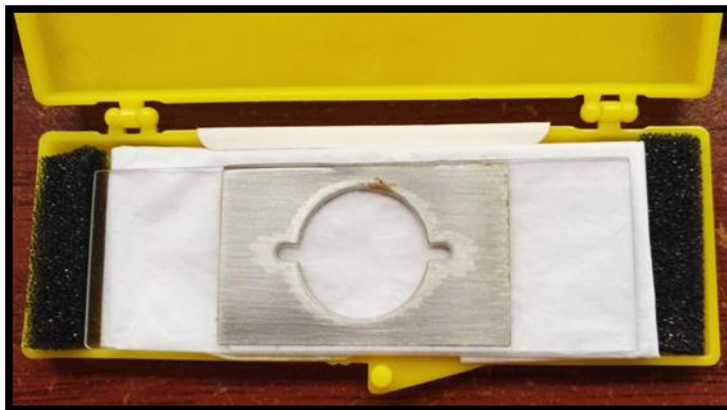


Figura 130. Celda de conteo Palmer Maloney. Fuente: Yasmin Plata (2017)

- Microscopio óptico
- Portaobjetos y cubreobjetos
- Micropipetas plásticas desechables
- -Aceite de inmersión
- -Tinta china
- -Cámara fotográfica en el microscopio
- -Claves taxonómicas especializadas en cada grupo algal

Procedimiento para la toma de muestras

Según el tipo de sustrato que se requiera muestrear existen diferentes técnicas:

En sustratos duros tales como rocas o madera sumergida (raíces, troncos): Si es posible extraiga el sustrato del agua, raspe un área conocida, por ejemplo utilizando un perifitometro (Figura 128), en caso de no tener uno, delimite el área con un cuadro plástico.

Remueva la película perifítica utilizando un cepillo de cerdas suaves y lávelo en agua destilada que ha sido almacenada previamente en el frasco de almacenaje de la muestra, agregue con la pipeta un mililitro de agua y succione rápidamente e integre este volumen a la muestra, asegúrese de haber removido todo el material, en algunos casos es necesario utilizar navaja para desprender organismos crustosos. Repita este procedimiento hasta cubrir el área de muestreo (240 cm²) aproximadamente 30 veces, en sustratos ubicados en diferentes hábitats en el tramo finalmente preserve la muestra (Figura 131).

En el caso que los sustratos no sean removibles del cauce, por ejemplo por su tamaño, demarque el área y raspe colocando una red de plancton a contracorriente, asegurando que el material removido se deposite en la red.

En el caso de sustratos verticales, por ejemplo puentes y estructuras de concreto sumergidas en el lecho, con ayuda de un mango largo con un rastrillo y red raspe el área y asegúrese que el material removido se deposite en la red, en este tipo de muestreo y en todos aquellos que no sea posible tener un área efectiva de muestreo, los resultados serán de tipo semicuantitativo, es decir se puede expresar la presencia de cada tipo de organismo en abundancia relativa, en este caso establezca un tiempo de muestreo para cada submuestra.



Figura 131. Elementos utilizados para el muestreo de algas perifíticas sobre sustratos duros.

Fuente: Ángela Zapata (2017)

En sustratos blandos como sedimento (limo, arena, arcilla): Para cuantificar el perifiton en el sedimento se puede utilizar una jeringa o pipeta de 10mL con pera de succión (Figura 132), a partir de un área conocida delimitada por ejemplo con un marco plástico, o cono acoplado a la pipeta, se succiona los primeros milímetros de sedimento correspondientes a la zona más iluminada. Esta técnica es recomendable para sitios de remanso o zonas litorales de ecosistemas lénticos con pocos centímetros de profundidad.



Figura 132 Elemento para muestrear las algas perifíticas de sustratos blandos. Fuente: Ángela Zapata (2017)

También es posible utilizar un tubo de PVC de dos pulgadas, de longitud entre 15 a 20 cm, se hunde sobre el sedimento y con ayuda de la espátula se retira una capa superficial, la cual es almacenada en el frasco y una vez cubierta el área de muestreo se preserva.

En caso que el sustrato esté compuesto de arena y en zonas corrientosas se puede evaluar la composición a partir de la remoción el sustrato superficial con los pies generando una suspensión del mismo, con la red de plancton unos centímetros aguas abajo y aprovechando la fuerza de la corriente se captura el material más fino. Sin embargo, se debe tener cuidado de no saturar la red al primer intento. Este procedimiento se debe estandarizar por tiempo en diferentes zonas del río. Una vez recoja todas las sub-muestras preserve la muestra. La evaluación será semicuantitativa expresando la ocurrencia de cada organismo en proporciones relativas.

En macrofitas, hojas sumergidas, musgos: Corte con navaja partes de las plantas y frote suavemente con el cepillo para remover las algas con agua destilada. Evite las partes sumergidas que no reciban luz directa. Almacene las porciones raspadas de la planta en una bolsa, adicione alcohol y pegue con cinta al frasco de la muestra, con el fin de cuantificar el área raspada en el laboratorio.

En caso de realizar un muestreo semicuantitativo, se puede estrujar partes sumergidas de las plantas en el frasco contenedor y se estandariza cada submuestra por tiempo (Figura 133). Una vez se complete un numero representativo de plantas la muestra se preserva.



Figura 133. Estrujamiento o Squeezing de plantas acuáticas para el muestreo de algas perifíticas.

Fuente: Ángela Zapata (2017)

En Sustratos artificiales: En ciertos ambientes es inviable realizar muestreos cuantitativos sobre sustratos naturales, por ejemplo ríos con lecho arenoso, ríos muy caudalosos y no vadeables, en estos casos es recomendable el uso de sustratos artificiales, los más utilizados son portaobjetos esmerilados o placas de cerámica. Estos sustratos se ubican en estructuras diseñadas para mantenerse en la corriente en sitios que permanezcan inundados, en zonas iluminadas. Una desventaja es que se debe dejar un tiempo de colonización previo al muestreo que puede variar entre 15 a 30 días. Esto depende del estado trófico del ecosistema.

Una vez se completa el tiempo de colonización, retire el sustrato y raspe con un cepillo de cerdas suaves o una barra de goma, el biofilm (película adherida sobre el sustrato, conformada por comunidades biológicas) deposite en un frasco y preserve la muestra hasta su análisis.

Procedimiento en Laboratorio

Para la determinación de organismos se deben realizar los siguientes pasos:

- A partir de una submuestra deje en reposo por al menos 24 horas y tome del fondo una alícuota.
- Ponga una gota en un portaobjetos y cubra con un cubreobjetos, observe en el microscopio óptico en objetivo de 40x y de 100x.
- Mediante claves especializadas identifique los organismos en el mínimo nivel taxonómico posible. Identifique los morfotipos presentes.
- Realice tinciones con tinta china o los procedimientos que las claves taxonómicas sugieren para las identificaciones.
- Tome las medidas correspondientes con la reglilla ocular previamente calibrada para la identificación de especies y de géneros.
- Realice registros fotográficos de los diferentes morfotipos.

Recuento de organismos

Para realizar el conteo de algas perifíticas:

- Agite la muestra cuantitativa que tomó en campo de manera suave y constante, invirtiendo el frasco al menos entre quince a cincuenta veces para asegurar una buena homogenización de la muestra.
- Inmediatamente con una pipeta extraiga una alícuota de la muestra y dépositela en la cámara de conteo que tenga a disposición. En el caso en que la muestra presente muy bajas densidades de células, concentre la muestra por sedimentación para agilizar el conteo. En el caso de altas

densidades de células y/o sedimentos que no permita la observación de la muestra por el microscopio, proceda a diluir la muestra.

- La cámara Sedgewick-Rafter (1mL de capacidad), no permite alta magnificación por lo cual se dificulta la observación de células pequeñas. Esta cámara se puede utilizar en microscopio invertido. También se puede realizar el conteo en otros dispositivos modificados que permitan sedimentar volúmenes semejantes de muestra.
- También se puede utilizar una cámara de conteo de nanoplancton Palmer-Maloney (10 µL) para microscopio compuesto. Realice el conteo a una magnificación total de 400X (objetivo de 40X).

Conteo con Sedgewick-Rafter:

Al contar en esta celda puede utilizar la siguiente fórmula (APHA, 2015), para el cálculo de la densidad de organismos:

$$\frac{\text{Organismos}}{\text{cm}^2} = \frac{N \times A_t \times V_t}{A_c \times n_c \times V_s \times A_s}$$

En donde,

N = Número de individuos contados

A_t = Área total de la cámara (cm²)

V_t = Volumen total de la muestra (mL)

A_c = Área del campo de observación (cm²)

n_c = Número de campos observados

V_s = Volumen sedimentado (mL)

A_s = Área del sustrato (cm²)

En caso de haber diluido o concentrado la muestra, utilice V_s como el valor de la muestra tomado antes de realizar dilución o concentración. También puede usar como V_s el valor de la cámara y después de realizar el cálculo de organismos/cm² multiplicar el resultado por el factor de dilución o concentración, según sea el caso.

Conteo con Palmer-Maloney:

Una vez homogenizada la muestra, tome una alícuota y proceda a llenar la cámara Palmer- Maloney.

Deje reposar la muestra por un periodo de 10 minutos.

Realice el conteo por campos al azar. El número de campos depende de la densidad y variedad de organismos en la muestra, así como la precisión estadística deseada. Se recomienda realizar el conteo hasta alcanzar 400 organismos en total en un rango no inferior de 20 campos hasta 40 campos.

Calcule el número de organismos por cm² utilizando la siguiente ecuación adaptada de (Lowe & Laliberte, 2006):

$$N^{\circ} \frac{Org}{cm^2} = \frac{N \times V_t}{V_c \times n_c \times A_s}$$

En donde:

N = Número de individuos contados

V_t = Volumen total de la muestra (mL)

V_c = Volumen contenido en un simple campo (mL)

n_c = Número de campos observados

A_s = Área del sustrato (cm²)

V_c se puede calcular:

$$V_c = \pi \times r^2 \times d$$

En donde,

r = radio del campo del microscopio

d = es la profundidad de la cámara (La Palmar-Maloney tiene una profundidad de 0.4mm)

Si no fuese posible realizar el conteo por campos al azar, por muy baja densidad algal y el alto contenido de material particulado en la muestra, proceda a contar toda la cámara.

En caso de realizar el conteo de toda la cámara, calcule el número de organismos por cm^2 utilizando la siguiente ecuación:

$$\text{Numero de organismos}/\text{cm}^2 = \frac{N \times V_t}{0.1 \text{ mL} \times A_s}$$

En donde:

N = Número de individuos contados

V_t = Volumen total de la muestra (mL)

A_s = Área del sustrato (cm^2)

Si en cualquiera de las formas anteriores de conteo (campos al azar o cámara completa), fue necesario concentrar o diluir la muestra, se debe obtener el factor de dilución o de concentración y multiplicar o dividir (respectivamente) el $N^\circ \text{Org/mL}$ por dicho factor.

Reporte de la densidad del ficoperifiton y formatos

Simultáneo al conteo diligencie los formatos donde se consigna el taxón y el número de veces que encuentra el organismo por área del campo visual.

Una vez terminado el conteo el conteo, haga un recorrido por toda la cámara con el fin de verificar que se registre el total de taxones (géneros, especies o morfotipos).

Los datos obtenidos, consígnelos en la base de datos del SIB Colombia (Sistema de Información Biológica).

En el caso de registrar diatomeas (Bacillariophyta) en las muestras de perifiton, únicamente contar diatomeas vivas (valvas con cloroplastos) y determinar a nivel de familia o máximo a género. La determinación a especie de diatomeas debe realizarse sólo posterior al tratamiento de oxidación de la muestra y en montajes permanentes. Con respecto a este grupo, dado su alta abundancia en el perifiton y amplia utilidad en bioindicación (método que permite estimar la calidad del agua teniendo en cuenta los organismos presentes), el IDEAM con el apoyo de un equipo de expertos, ha desarrollado un protocolo exclusivo para este grupo.

Diatomeas

Las diatomeas son microorganismos acuáticos cuya principal característica es la presencia de una pared celular de sílice. Las diatomeas bentónicas (establecidas sobre un sustrato natural o artificial), son ampliamente utilizadas como indicadores de la calidad del agua debido a que la estructura de estas comunidades es influenciada por cambios físicos, químicos y biológicos (Smucker & Vis, 2011); (Kireta, y otros, 2012); (Beyene, Awoke, & Triest, 2014); (Lavoie, Campeau, Zugic-Drakulic, Winter, , & Fortin, 2014); (Malavoi & Souchon, 2002); (Prygiel & Coste, 2000); (Coste, Boutry, Tison-Rosebery, & Delmas, 2009). Su importancia como bioindicadores radica en su abundancia, diversidad, ubicuidad, amplio rango de autoecología, sensibilidad a la contaminación, facilidad de muestreo, transporte y almacenamiento (Martín, y otros, 2010).

Selección de Puntos de Monitoreo

Es importante definir el tiempo de muestreo para que los efectos del régimen hidrológico no enmascaren las alteraciones que se pretenden estudiar (Smucker & Vis, 2011), por ejemplo, en la época de lluvias los aumentos de flujo o velocidad

puedan afectar la estructura de la comunidad de diatomeas (Bere, Benthic diatom community structure and habitat preferences along an urban pollution gradient in the Monjolinho River, 2010). Por lo tanto, determine un período hidrológico estable que permita el muestreo de una comunidad en equilibrio.

En corrientes vadeables, dependiendo de la disponibilidad de sustratos removibles, realice el muestreo dando prioridad al sustrato rocoso. Si en la estación de muestreo no hay sustrato rocoso, efectúe el muestreo sobre sustratos no naturales (ladrillos, baldosas) o sobre macrófitas enraizadas emergentes o sumergidas.

En corrientes no vadeables se puede realizar el muestreo de macrófitas enraizados emergentes o sumergidas y estructuras de concreto (muros de contención, estructuras de apoyo en puentes, muelles).

Características del lugar de muestreo

Extraiga el sustrato de un microhábitat con las siguientes características (Figura 134)

- Bien iluminado, evite lugares con sombra
- zona corriente del río, evite el muestreo en zonas de remanso
- profundidad aproximada de 10-20 cm
- lejos de posibles perturbaciones puntuales. Si el muestreo se va a realizar en un punto con descargas, estime la distancia aguas arriba y aguas abajo en que se debe realizar el muestreo



Figura 134. Quebrada Calostros. Se observan las características que se buscan para el muestreo de diatomeas en una corriente vadeable: buena iluminación, zona corriente del río, sustratos abundantes. Fotos por: Luisa Lagos, 2015

Características del sustrato de muestreo

El sustrato a muestrear debe tener las siguientes características:

- Que sea extraído dentro de la zona eufótica (porción de la columna de agua en donde llega la luz necesaria para la fotosíntesis)
- Que pueda ser extraído con facilidad
- Que tenga estabilidad para no ser arrastrado con facilidad por la corriente
- Que no hayan quedado expuestos al aire en algún momento del ciclo hidrológico
- Que tenga un biofilm pardo, evite el muestreo de sustratos con biofilm verde.
- Que no esté muy cerca a la orilla

Frecuencia de Monitoreo

Es recomendable seguir las mismas pautas sugeridas en la sección que describe el protocolo para el estudio del ficoperifiton.

Tipos de Muestras

Colecté muestras para análisis cualitativo. Más abajo se explican los detalles para una adecuada colecta de la muestra.

Equipos

Los mismos que se presentan en la sección de ficoperifiton.

Procedimiento para la toma de muestras

A continuación, se describe el procedimiento de toma de la muestra en los diferentes tipos de sustratos que se pueden encontrar en un sitio.

Seleccione el sustrato a evaluar, de acuerdo a la facilidad de acceso que haya para el muestreo.

Muestreo sobre rocas o sustratos no naturales: }

- Seleccione cantos rodados (6-25 cm), bloques (>25 cm) o sustratos no naturales (ladrillos, baldosas) de una profundidad mínima entre 10-20 cm, para garantizar que hayan estado sumergidas durante todo el ciclo hidrológico. Colecte entre 5 y 10 sustratos para obtener un área muestreada mínima de 250 cm². Luego vaya colectando los sustratos en dirección a las aguas arriba de la corriente. Enjuague los sustratos antes de retirar el biofilm, con el fin de remover los sedimentos, valvas muertas o diatomeas no

bentónicas (European Standard, Water quality—guidance standard for the routine sampling and pretreatment of benthic diatoms from rivers. EN 13946, 2003).

- Realice el cepillado de la parte superior del sustrato y enjuague sobre una vasija con ayuda de un frasco lavador. Efectué el cepillado con movimientos circulares para asegurar la total remoción del biofilm en las grietas del sustrato. Enjuague el cepillo para transferir las diatomeas removidas y con ayuda del frasco lavador termine de remover el biofilm. Utilice un cepillo de dientes por punto de muestreo. El volumen resultante del enjuague debe tener un color pardo (Figura 135).



Figura 135. Cepillado de la superficie superior del sustrato. El volumen resultante es de color pardo, se recoge en una vasija y se le adiciona la solución fijadora Fotos por: Luisa Lagos, 2015

- Transfiera la muestra a un frasco plástico debidamente rotulado y adicione la solución fijadora. Tome un registro fotográfico de los sustratos muestreados y estime el área muestreada (Figura 136).



Figura 136. Sustratos muestreados y estimación del área total muestreada. Fotos por: Luisa Lagos, 2015

Muestreo sobre macrófitas: Para este muestreo se escogen macrófitas enraizadas emergentes o sumergidas (no errantes). Colecte secciones de tallos y hojas, evitando las partes que hayan estado fuera del agua o las que se encuentren muy cerca del sedimento (Martín, y otros, 2010). Agite las partes colectadas y enjuáguelas en una bolsa plástica con etanol, con el fin de desprender las diatomeas adheridas. Retire los restos de macrófitas y el volumen resultante del enjuague y transfiera a un frasco plástico debidamente rotulado.

Muestreo sobre sustratos no removibles: En los sustratos como muelles, estructuras de contención o de apoyo en puentes, realice el muestreo con una herramienta que permita remover el biofilm. Transfiera el material colectado a un frasco plástico debidamente rotulado y adiciónale la solución fijadora. Estime el área muestreada. Para establecer la profundidad a la que se debe realizar el muestreo, tenga en cuenta los cambios de nivel del agua (por efecto del oleaje o por cambios en la profundidad de la corriente) seleccione un área que no haya quedado expuesta al aire.

Diligenciamiento del formato de muestreo: Registre los datos con las principales características del sitio de muestreo y de los sustratos muestreados en el Anexo B-3. Formato Captura de datos en campo ítem 4. Es recomendable la generación de una ficha descriptiva para cada una de las estaciones, con el registro fotográfico y la descripción detallada de la vegetación de ribera, cambios de uso del suelo, perturbaciones del ambiente (Anexo B-3 ficha descriptiva).

Procedimiento en el Laboratorio

- Evite la contaminación de las muestras, trabaje con material propio cada una de ellas, por lo tanto, las pipetas, frascos o tubos se deben marcar con el código asignado en laboratorio.
- Homogenice la muestra divídala en dos alícuotas: una de ellas, debidamente rotulada entra al inventario de muestras sin digestión y se almacénela en caso de necesitarse un análisis complementario o reproceso; con la segunda alícuota proceda a realizar la digestión de la materia orgánica.
- Antes de iniciar la digestión, realice una observación preliminar de la muestra para establecer la presencia y densidad de frústulos (Pared celular de las diatomeas compuesta de silíce, está conformado por dos valvas) vacíos, la Valva es el componente estructural del frústulo. (European Standard, 2004). Si se observa más de un 50% de frústulos vacíos, descarte la muestra y revise las condiciones del muestreo, los valores de las variables fisicoquímicas o alteraciones específicas del entorno que permitan establecer los factores que pudieran estar determinando el elevado porcentaje de mortalidad.
- Proceda a retirar la solución fijadora realice tres lavados sucesivos, centrifugando a 1000 g por 20 min (APHA, 2012) sección 10200C.3, y removiendo el sobrenadante. Observe al microscopio una alícuota de

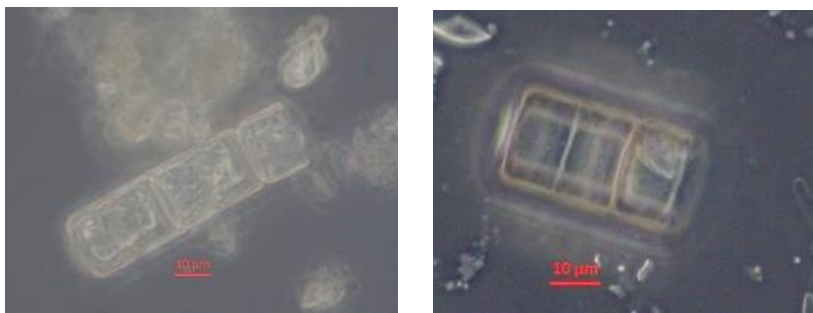
sobrenadante a ser descartado para asegurar que no se están desechando diatomeas.

Digestión de la materia orgánica

Realice la digestión de la muestra con peróxido de hidrógeno (H_2O_2) 30% bajo una cabina de extracción de vapores. El volumen de H_2O_2 , tiempo y temperatura requeridos para la digestión depende de la cantidad de materia orgánica presente en la muestra. En muestras con gran cantidad de materia orgánica la reacción puede ser fuerte, por lo tanto, inicialmente realice la digestión a temperatura ambiente, agregando un volumen de H_2O_2 a un volumen de muestra en proporción 1:1 y observe la reacción. Si la reacción no es muy fuerte, continúe con la adición de H_2O_2 hasta completar 5 volúmenes de la muestra inicial. En caso contrario de tiempo (horas a días) para que la reacción ocurra antes de adicionar más H_2O_2 .

Luego, coloque las muestras a una temperatura por debajo del punto de ebullición de la muestra (normalmente entre 50-80°C). Si la materia orgánica no se ha digerido por completo, sustituya el H_2O_2 ., retirando el sobrenadante, sedimentando por centrifugación a 1000g por 15 minutos o dejando la muestra en reposo por 24 horas.

Después, observe una alícuota en el microscopio si detecta la presencia de frústulos con materia orgánica, realice un ciclo de digestión en frío con un volumen de ácido nítrico concentrado (Figura 52). Al finalizar la digestión adicione 13 gotas de HCl 1N para eliminar el carbonato de calcio.



A

B

Figura 137. Muestra antes y después de digestión de materia orgánica. En A se observa una muestra antes de realizar la digestión de materia orgánica. En B se observa una muestra luego de la digestión de materia orgánica, con lo que se logra observar en los frústulos el detalle necesario para la determinación taxonómica. Fotos por: Luisa Lagos, 2015

Cuando se observen los frústulos sin materia orgánica, se realice tres lavados re-suspendiendo el pellet en agua destilada. Después del último lavado, re-suspenda el pellet en 5mL de agua destilada y transfiera a un frasco de almacenamiento. Esta muestra debidamente rotulada ingrésela al inventario de muestras digeridas. Observe una preparación al microscopio y si presenta alta densidad de diatomeas, diluya agregando más agua; si la preparación tiene baja densidad de diatomeas, centrifugue y se re-suspende en un volumen menor al que se tenía inicialmente. Con esta muestra proceda a realizar la preparación de láminas. Finalmente, adicione solución fijadora para conservar la muestra a largo plazo.

Preparación de láminas

Evite la presencia de partículas de gran tamaño en la preparación, homogenice la muestra y espere unos segundos para tomar la alícuota. Sobre una lámina cubreobjetos dispense una gota de muestra con una pipeta *pasteur* y distribúyala de manera homogénea.

Cuando se haya secado la muestra (la evaporación se puede acelerar con calor, máximo 50°C), verifique que la distribución de las valvas en la lámina cubreobjetos permita su conteo en un campo de 400X, es decir, que las valvas no estén superpuestas y se puedan observar con claridad sus características morfológicas.

Aliste las láminas portaobjetos marcadas con el código de la muestra, coloque sobre la placa de calefacción (máximo 130°C) y deposite sobre ellas una gota del medio de montaje. Cuando se observe la formación de burbujas en el medio de montaje, coloque la lámina cubreobjetos de tal forma que la cara que contiene la muestra quede inmersa en el medio de montaje.

Retire la lámina del calor y espere que la resina se distribuya de manera homogénea sobre toda la lámina cubreobjetos; si permanecen burbujas, elimínelas con presión suave (Figura 61). Prepare como mínimo dos láminas por muestra. Ingrese estas preparaciones debidamente rotuladas al inventario de la colección de diatomeas (diatoteca).

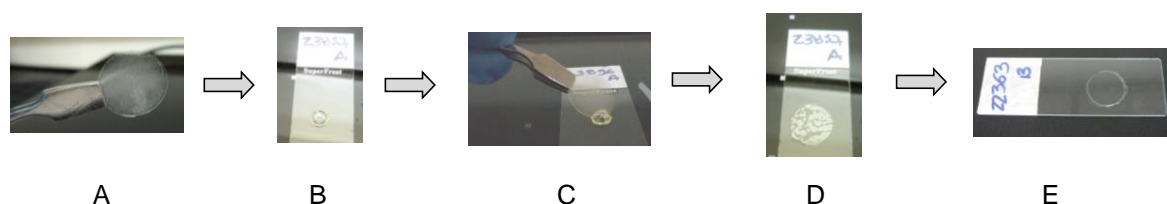


Figura 138. Sobre una lámina cubreobjetos se dispensa una gota de muestra (A). Sobre una placa de calefacción se coloca la lámina portaobjetos con una gota del medio de montaje. Cuando se observa la formación de burbujas en el medio de montaje (B), se coloca la (A).

Recuento y determinación taxonómica de diatomeas

Garantice la calibración del sistema de medición del microscopio. Establezca las reglas de conteo y el nivel taxonómico que se va a trabajar (European Standard, 2004). Los organismos deben ser determinados hasta el nivel de especie. Las características morfológicas de las valvas son importantes para la clasificación y determinación taxonómica de las diatomeas, realice el conteo de valvas a 1000X, siguiendo los siguientes criterios:

- Cuente al menos 400 valvas para tener un límite de confianza del 10%, para un nivel de significancia del 95%, (Venrick, 1978).
- La unidad natural de conteo corresponde a una valva si se presenta en vista valvar (posición en la que se observa la superficie de la valva).
- Cuente 2 unidades si en vista valvar se logra establecer la presencia de un frústulo intacto.
- Cuente 2 unidades si observa un frústulo en vista pleural (posición en la que se observa el cíngulo, bandas de sílice que unen las dos valvas que conforman el frústulo) y se logra la determinación taxonómica a nivel de especie.
- Cuente todas las valvas en el campo.
- Realice el conteo por transectos horizontales o verticales, considerando una debida separación entre ellos de tal forma que no haya superposición de las unidades que ya han sido contadas.
- Conserve siempre la misma dirección del conteo: por ejemplo, inicio en el extremo superior izquierdo con desplazamiento hacia la derecha.
- Incluya una unidad en el conteo si se observan tres cuartas partes de la valva.
- Cuente las formas anormales de manera separada a la especie que se reporta, en el caso de que pueda ser determinada Eje: *Gomphonema lagenula* y *Gomphonema lagenula* teratológica.

Macroinvertebrados Acuáticos

Los macroinvertebrados bentónicos son animales que habitan el sedimento u otros sustratos en el fondo de los ecosistemas de agua dulce, estuarianos y marinos. Durante sus ciclos de vida, estos organismos pueden construir refugios, como tubos, o redes en donde viven dentro ó pueden estar libremente sobre rocas, desechos orgánicos y otros sustratos. De acuerdo con las definiciones históricas, los macroinvertebrados son visibles a simple vista y pueden quedar retenidos en un tamiz N ° 30 de Estados Unidos (aberturas de 0,595 ó 0,600 mm) Sin embargo, algunos son difíciles de ver sin magnificación. (APHA, 2012). Pueden vivir en la superficie, en el fondo o nadar libremente, sus poblaciones están conformadas por platelmintos, insectos, moluscos y crustáceos principalmente. (Roldan-Pérez & Ramírez-Restrepo, 2008).

En los ecosistemas acuáticos los macroinvertebrados acuáticos han sido ampliamente usados como bioindicadores ya que cumplen con las siguientes características: a) son organismos ubicuos, b) no muestran patrones de migraciones extensos y tampoco son organismos sésiles, c) son sensibles a los cambios ambientales por lo cual responden de manera más rápida a estos, d) su identificación taxonómica es relativamente sencilla, e) su colecta se realiza fácilmente, así como la logística en campo, lo que hace económico el monitoreo, f) existe documentación extensa sobre los efectos de contaminantes específicos sobre las especies más comunes, g) es posible el estudio en laboratorio de las respuestas de un organismo ante un contaminante específico.

En consecuencia, estos organismos, junto con las algas, se utilizan frecuentemente en la estimación de la calidad del agua (AQEM CONSORTIUM, 2002), debido a que la estructura de esta comunidad se altera por cambios físicos y químicos generados

por diferentes tipos de impacto. (Roldán-Pérez, Bioindicación de la calidad del agua en Colombia. Uso del método BMWP/Col, 2003).

Selección de Puntos de Monitoreo

El diseño del muestreo se realiza dependiendo de los objetivos del estudio (levantamiento de información, seguimiento rutinario de la calidad biológica) y del tipo de métrica que se vaya a utilizar.

Para el estudio de la calidad biológica de las aguas superficiales se deben establecer los puntos de muestreo teniendo en cuenta la estructura de la cuenca hidrográfica y la ubicación de los centros urbanos como posibles fuentes de contaminación.

- Siempre establezca una o varias estaciones de referencia fuera de la influencia de todas las descargas de aguas residuales de interés (pero en la misma masa de agua). Debido a que la mayoría de los muestreos se realizan para determinar el daño que la contaminación causa a la vida acuática, esto será la base para comparar la biota en áreas contaminadas y no contaminadas. Preferentemente, establezcan al menos dos estaciones de referencia: una alejada de la descarga efluente y la otra cerca de la descarga, pero no sujeta a su influencia. Siempre que sea factible, utilice estaciones de referencia con características fisicoquímicas similares y con el mismo sustrato de la corriente receptora (por ejemplo, si la descarga se realizaba en un río, una estación estaría muy aguas arriba de la descarga y la otra estaría inmediatamente aguas abajo).
- Localice una estación inmediatamente aguas abajo de cada descarga o en la zona afectada en su inmediata vecindad, según corresponda.
- Si la descarga no se mezcla completamente al entrar en el cuerpo de agua, sino que se canaliza a lo largo de un lado o se dispersa en una dirección específica, entonces ubique las estaciones en la orilla izquierda (mirando

hacia arriba), el canal medio y las secciones de la orilla derecha del cuerpo de agua; en arcos concéntricos en lagos; o en cualquier otra configuración que cumpla con los objetivos del estudio.

- Establezca estaciones a varias distancias aguas abajo de la última descarga para determinar la extensión lineal del daño.
- Para permitir la comparación de las comunidades de macroinvertebrados, asegúrese de que todas las estaciones de muestreo son ecológicamente similares. Por ejemplo, seleccione estaciones con sustrato similar (por ejemplo, arena, grava, roca, lodo, contenido orgánico), profundidad, presencia de fibras y la anchura de la corriente, el gradiente, la velocidad de flujo, la cobertura de la orilla o del banco, la salinidad, la dureza, el TOC, DBO, DQO, las concentraciones de nutrientes y de DO.
- Recopile las muestras para análisis físicos, toxicológicos (si procede) y químicos, lo más cerca posible de las estaciones de muestreo biológico, para asegurar la correlación de los hallazgos; tomar esas muestras al mismo tiempo y de la misma toma cuando sea posible. Recoger muestras de sustrato para análisis físico-químicos de los pocos centímetros superiores, donde viven la mayoría de los organismos.
- Localice las estaciones de muestreo de macroinvertebrados en el mejor hábitat físico [áreas no influenciadas por condiciones atípicas (puentes, represas, etc.).]
- Para un programa de monitoreo biológico a largo plazo, considere la posibilidad de recolectar macroinvertebrados en cada estación por lo menos una vez durante cada una de las épocas de aguas altas y bajas, aunque esto no siempre sea necesario y dependerá del diseño del estudio.
- Un muestreo más frecuente puede ser necesario si los efluentes cambian de características u ocurren derrames. Tenga en cuenta las colecciones nocturnas donde los organismos de "deriva" o de alimentación nocturna son motivo de especial preocupación. En general, el período más crítico para los

macroinvertebrados en los arroyos es durante los períodos de alta temperatura y bajo flujo. Si el tiempo y los recursos financieros disponibles limitan la frecuencia de muestreo, realice al menos una medición durante la época de aguas más bajas. (APHA, 2012).

- Además de los aspectos científicos, los criterios para el muestreo seguro también deben ser considerado al seleccionar un sitio de muestreo. Nunca se debe tomar muestras solo, siempre debe ir acompañado de al menos otra persona que pueda ayudarlo.
- No se deben tomar muestras cuando las condiciones en un sitio de muestreo puedan ser peligrosas. (bancos empinados o inestables, profundidad y la estabilidad del fondo del río, ríos en condición de inundación etc.) (AQEM CONSORTIUM, 2002).

Frecuencia de Monitoreo

Los ciclos generales de producción y consumo de los ecosistemas tropicales se consideraban anteriormente como constantes a lo largo de todo el año, no obstante el régimen climático constituye el factor altamente condicionante de su estructura y productividad. (Galvis, Mojica, & Rodríguez, 1989). De este modo, la precipitación, su cantidad y distribución a lo largo del año y la temperatura estrechamente asociada a la altitud, constituyen los principales componentes que enmarcan los ecosistemas dulceacuícolas tropicales. (Ramírez-González & Viña-Vizcaíno, 1998).

Teniendo en cuenta las anteriores premisas se deben realizar al menos dos muestreos al año durante los períodos climáticos estables de alta precipitación (aguas altas) y baja precipitación (aguas bajas).

Asimismo, como en el trópico las variaciones del caudal (crecientes) son uno de los más importantes factores que intervienen en la dinámica de las poblaciones de macroinvertebrados acuáticos (Liévano, 2007), no se deben realizar muestreos

después de lluvias intensas, ya que puede haber pérdida de organismos locales o encontrarse otros arrastrados por la corriente. (Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, 2005). Después de una crecida o de una sequía se debe esperar al menos 6 semanas después de ocurrido el evento para realizar el muestreo.

Tipos de Muestras

Las muestras de macroinvertebrados acuáticos pueden ser de tipo cuantitativo o cualitativo, en el primer caso se pretende expresar la densidad de individuos por metro cuadrado m². Estos datos son muy útiles para establecer la calidad del agua.

Las muestras cualitativas permiten hacer las identificaciones de los organismos y un registro o listados de los morfotipos presentes en el cuerpo de agua. Los organismos en este caso solo se reportan como presencia-ausencia.

Equipos

Para Campo

- Cámara fotográfica.
- GPS.
- Red tipo Surber: Se utiliza para la toma de muestras cuantitativas, en corrientes de agua vadeables. Se coloca sobre el sustrato con los dos marcos abiertos en ángulo recto, uno de ellos marca el área de sustrato donde se toman las muestras y el otro soporta una red para colocar los organismos procedentes de la zona de toma de muestras. La malla es de tamaño estándar de 9 hilos/cm. Aunque una malla menor podría conseguir más cantidad de invertebrados pequeños y componentes jóvenes, también se

obturaría más fácilmente y ejercería una mayor resistencia a la corriente que la malla más grande, lo que podría dar lugar a la pérdida de organismos debido a un lavado hacia atrás desde la red de muestra. (Figura 139).



Figura 139. Red tipo Surber. Foto. Laboratorio de Calidad Ambiental IDEAM, 2017.

- Dragas: Se usan para la toma de muestras cuantitativas en cuerpos de agua no vadeables:
- La draga Ekman: es útil para tomar muestras de cieno, lodo, fango arenoso con poca corriente.
- La draga de Peterson se utiliza ampliamente para tomar muestras de fondos duros, como arena gravilla, marga y arcilla en corrientes rápidas y aguas profundas (Figura 140).



Figura 140. Draga Peterson. Foto. Laboratorio de Calidad Ambiental IDEAM, 2017.

- Acorazonador: Se utiliza en sustratos lodosos, fangosos, arenosos y mide cuantitativamente la cantidad de material colectado por volumen (Figura 141).



Figura 141. Acorazonador. Foto. Laboratorio de Calidad Ambiental IDEAM, 2017.

- Red de mano tipo D: Para muestreo cualitativo en la zona litoral en la vegetación de ribera.
- Red circular o rectangular: Para muestreo cualitativo en corrientes de agua vadeables.



Figura 142. Red Rectangular. Foto. J. Alba-Tercedor. Tomada de Metodología para el establecimiento del Estado Ecológico según la Directiva Marco del Agua. Protocolos de muestreo y análisis para Invertebrados Bentónicos. 2005

- Muestreador Hess de $\approx 400 \mu\text{m}$ de poro.
- Solución fijadora: Etanol (96%) o formalina (1% o 4%).
- Bandejas de color blanco, de mínimo 30x40x10 cm.
- Lupa.
- Pinceles suaves.
- Pinzas entomológicas.

- Recipientes de colecta: frascos plásticos de boca ancha (500-1000 mL) debidamente rotulados o bolsas plásticas de 30*40 cms.
- Recipientes plásticos para depositar los ejemplares colectados de forma aislada, debidamente rotulados.
- Recipientes plásticos para enjuague de la red.
- Balde de 10 Litros.
- Frasco lavador.
- Juego de tamices de poro desde 200 μm hasta 2000 μm .
- Formato para captura de datos en campo e instructivos, protegidos en bolsas plásticas.
- Cartografía.
- Marcador permanente (para etiquetar las muestras).
- Esfero.
- Tijeras.
- Cinta de enmascarar y transparente ancha.
- Alcohol al 95 o 70%.
- Implementos de protección personal: impermeable, pantalón pescador con botas de caucho, chaleco salvavidas, guantes de caucho extra largos (arriba del codo), elementos para la protección solar, elementos de seguridad industrial (línea de vida, flotadores, arnés)

Para Laboratorio

- Estereomicroscopio y sistema de adquisición de imágenes.
- Cajas de Petri.
- Pinceles suaves.
- Pinzas de disección de punta fina, agujas de disección y minutillos.
- Pinzas entomológicas.
- Cinta de enmascarar para marcaje.
- Tamices de ojo de malla: 75, 100, 250, 500, 1000 μm .
- Viales de plástico y/o vidrio transparente, tapa rosca hermética de 25 ml para depositar los especímenes.
- Etanol al 96% para almacenamiento de especímenes.
- Etiquetas internas con la siguiente información: código de la muestra, fecha de colecta, fecha de revisión, localidad, información taxonómica, datos de quien revisa).
- Marcador permanente para rotulado de muestras.
- Formato para captura de datos en laboratorio.
- Claves taxonómicas especializadas.
- Implementos de protección personal: Mascarilla, gafas, guantes).

Procedimiento para la toma de muestras

Para realizar un muestreo apropiado de la comunidad de macroinvertebrados acuáticos es necesario tener en cuenta el hábitat en el que se desarrollan, (hábitat se refiere a las características de los lugares en los cuales viven). Por ello es básico que cuando se realicen estudios para evaluar la calidad del agua estos deban considerar todos los posibles hábitats presentes en el área de muestreo. (Roldan-Pérez & Ramírez-Restrepo, 2008)

Los hábitats lóticos se refieren a los de aguas corrientes, como los que ofrecen ríos riachuelos y quebradas, la fauna de macroinvertebrados en una corriente es muy diferente a la que se encuentra en zonas de rápido, a la de remanso y a la de las orillas.

Los sistemas lénticos son aquellos de aguas quietas o estancadas como lagos, lagunas y embalses, regularmente en ellos se presentan tres zonas, ribera, la zona limnética y la profunda. (Roldan-Pérez & Ramírez-Restrepo, 2008). Los remansos de los ríos y quebradas se comportan en general como hábitats lénticos dependiendo de la geomorfología del cauce.

La fauna de macroinvertebrados recibe diferentes nombres de acuerdo con que vivan en el fondo y naden o floten en la superficie.

Bentos: son aquellos que viven en el fondo de lagos y ríos, están adheridos a un sustrato orgánico (plantas) o inorgánico (rocas). En este se hace dos distinciones, el bentos del sedimento o fondo y bentos asociados a macrófitas flotantes, emergentes o sumergidas. Por ejemplo debajo de rocas, troncos y residuos vegetales, es común encontrar gran variedad de efemerópteros, tricópteros, coleópteros, dípteros etc.

Neuston: Se refiere a los organismos que viven en la superficie del agua caminando, patinando o brincando. Entre este tipo de organismos se encuentran los Gérridos y Mesovélidos.

Necton: corresponde a los organismos que nadan voluntariamente entre la superficie y el fondo. Entre éstos se encuentran por ejemplo coleópteros de las familias Dytiscidae, Gyrinidae entre otros. (Roldan-Pérez & Ramírez-Restrepo, 2008).

Procedimiento para la toma de muestras en Ecosistemas Lóticos

Los métodos propuestos en este protocolo se derivan de la revisión de diferentes documentos tales como (Roldán-Pérez, Guía para el estudio de los macroinvertebrados acuáticos del Departamento de Antioquia, 1988) (Barbour, Gerritsen, Snyder, & Stribling, 1999); (AQEM CONSORTIUM, 2002); (Rueda-Delgado, 2002); (Alba-Tercedor, Pardo, Prat, & Pujante, 2005); (Barbour M. S., 2006); (Zúñiga, 2009) (CEN, C. E., 2012).

En muchos lugares los ríos varían desde gradientes altos, en donde predominan rocas y guijarros; a gradientes bajos, en donde se encuentran las arenas y los sedimentos finos, por lo tanto, se requiere un método adecuado de muestreo en estos casos.

De modo, que el objetivo principal de un programa de monitoreo no es evaluar las características locales, de un cuerpo de agua, sino obtener una mejor comprensión de la calidad ecológica de la corriente, por tanto, el sitio de muestreo seleccionado debe reflejar la naturaleza de la corriente.

Selección del sitio de muestreo

El área de muestreo es el sitio donde se van a tomar las muestras hidrobiológicas y deberá ser representativo del tramo a ser evaluado. La longitud del tramo de muestreo depende del ancho del río y la variabilidad de los hábitats. Como regla general, este no debería ser menor a 20 m de longitud y debe cubrir el ancho total

del río; en caso que el área de muestreo sea mayor a 500 metros se puede aplicar el criterio de 100 por el ancho promedio del río, siempre el de mayor longitud.

Las siguientes características deben ser tenidas en cuenta en el sitio de muestreo:

Morfología del río y composición del hábitat: el sitio debe reflejar la composición del hábitat del área de muestreo. Ejemplo, si el área de muestreo es dominada por cantos rodados, se debería evitar tomar muestras solo en arenas o sedimentos.

Hidrología: debe evitarse tomar muestras de tramos o sitios que por pulsos de inundación quedaron desconectados del canal principal.

Secuencias de rápidos y remansos: si en el sitio de muestreo se presentan estas dos condiciones, ellas deben ser muestreadas.

Vertimientos puntuales: si un punto del vertimiento afecta solo una sección corta del río, el muestreo no debe realizarse próximo al vertimiento, este debería ser realizado a una distancia donde ocurra el proceso de mezcla del agua del río y el agua del vertimiento.

Perturbación: se debe evitar monitorear sitios en donde se muestrea la comunidad de macroinvertebrados con frecuencia ya que esta se recupera lentamente.

La unidad de muestreo corresponde al material recolectado al remover el sustrato de un área determinada al frente de una red ó al desplazar la red sobre un área determinada. En el Anexo B-3 Formato Captura de datos en campo ítem 5 se presentan las indicaciones para el muestreo de los diferentes tipos de hábitat a ser muestreados. Cada hábitat puede estar presente en un ambiente lóxico (alta velocidad de la corriente) o léntico (baja velocidad de la corriente).

Se debe seleccionar el punto inicial y se realiza el muestreo en dirección aguas arriba en la corriente. El esfuerzo de muestreo puede medirse en área y/o tiempo y/o volumen, el cual se aplicará de acuerdo al dispositivo de muestreo seleccionado.

El equipo de profesionales durante la fase del diseño del muestreo debe definir el esfuerzo de muestreo con el fin de mantener la consistencia y reducir la variación en campo (Stark, 2001). Aunque no está claramente definido un valor mínimo o máximo de área de muestreo, se sugiere para ecosistemas de referencia o buen estado ecológico un área mínima de 1.0 m² (por ejemplo 16 Surber de área 25 x 25 cm) y para ecosistemas altamente impactados 0.5 m² (por ejemplo 8 Surber de área 25 x 25 cm).

Diligenciamiento del formato de muestreo: Es recomendable la generación de una ficha descriptiva para cada una de las estaciones, con el registro fotográfico y la descripción detallada de la vegetación de ribera, cambios de uso del suelo, perturbaciones del ambiente (ver Anexo B-3 Ficha descriptiva estación.pdf).

Identifique los diferentes tipos de hábitat y asigne a cada uno de ellos el porcentaje de acuerdo a su frecuencia en el tramo de muestreo. De acuerdo al porcentaje estimado para cada tipo de hábitat, se establece el número de unidades de muestreo para cada uno de ellos. Señale en el formato Captura de datos en campo (ver Anexo 1), las medidas de la red utilizada, así como la estimación del área de muestreo.

A continuación, se describen las indicaciones para el muestreo de cada uno de los diferentes tipos de hábitat, que pueden ser colonizados por la comunidad de macroinvertebrados acuáticos.

- **Micro-hábitat: Superficie del agua**

Indicaciones para el muestreo:

Consideraciones iniciales: Ninguna

Red circular o tipo D: Desplace la red sobre un área determinada para coleccionar los organismos presentes en la superficie. Este tipo de hábitat solamente se tiene en cuenta dentro del porcentaje cuando hay presencia de organismos sobre la superficie.

- **Micro-hábitat: Arenas-limos-arcillas (tamaño de partícula menor a 2mm)**

Indicaciones para el muestreo: Consideraciones iniciales: Ninguna

Red Surber: Coloque el marco de la red surber sobre el fondo y en contra de la corriente, agite vigorosamente con la mano el sustrato, hasta una profundidad entre 5 cm y 15cm, los individuos quedan atrapados en la red.

Red rectangular: Fije con ambas manos la red rectangular al sustrato y con una mano o el pie remueva el sustrato contracorriente hasta una profundidad entre 5 cm y 15 cm. En zonas de remanso o pozetas genere flujo hacia la red. El material removido se acumula en la red.

Muestreador Hess: Introduzca el dispositivo y remueva el sustrato atrapado dentro del cilindro, asegúrese de estar contracorriente.

Draga Eckman: Abra el dispositivo y envíelo al fondo, una vez sienta que toca el fondo suelte el testigo y espere que ésta se cierre. Llévela a la superficie y vacíe su contenido en un balde para su posterior limpieza.

Consideraciones finales: Deposite los sedimentos y demás partículas atrapadas en la red en un balde de 10L, enjuague suavemente con agua sobre un juego de tamices entre 2000 μm y 200 μm . Evite en lo posible llevar grandes cantidades de arena u otro tipo de sedimentos al laboratorio ya que se pueden dañar algunas estructuras determinantes para la determinación taxonómica de los organismos.

- **Micro-hábitat: Gravas-cantos rodados (tamaño de partícula entre 2-250 mm)**

Indicaciones para el muestreo: Consideraciones iniciales: Solo tenga en cuenta aquellos bloques y superficies que se encuentren totalmente sumergidas o siempre húmedas.

Lleve los cantos más grandes a un balde de 10L para retirar los organismos adheridos con pinzas entomológicas ó un pincel.

Red Surber: Abra el marco de muestreo, con una mano agite los sustratos y los cantos llévelos a la superficie y retire los organismos adheridos con unas pinzas entomológicas ó un pincel.

Red rectangular: Coloque la red y manténgala verticalmente, con el pie o la mano (dependiendo de la profundidad) remueva los sustratos calculando un área muestreo de 25 X 25 cm. Los cantos llévelos a la superficie y retire con pinza entomológica ó un pincel los organismos adheridos.

Muestreador Hess: introduzca el dispositivo y remueva el sustrato atrapado dentro del cilindro, asegúrese de estar contracorriente. Lleve los cantos rodados a la superficie y retire con pinza entomológica ó un pincel los organismos adheridos.

Draga Petersen: Utilícela cuando la profundidad del ecosistema evaluado sea mayor a 2 m y el lecho este conformado principalmente por rocas. Abra la draga y déjela caer al fondo, cierre la draga y llévela a la superficie, ábrala y deposite el contenido en un balde para su posterior limpieza.

Consideraciones finales: Al utilizar la red Surber, verifique que el barrido del material se realice el toda el área de manera uniforme, de tal forma que se frote la superficie y la base del sustrato (gravas, cantos rodados).

- **Micro-hábitat: Bloques (tamaño de partícula >250 mm)**

Indicaciones para el muestreo:

Consideraciones iniciales: **Consideraciones iniciales:** solo tenga en cuenta aquellos bloques y superficies que se encuentren totalmente sumergidas o siempre húmedas.

Red Surber y Red Rectangular: Abra el marco de muestreo, con la palma de la mano frote suavemente la superficie del bloque colocando la red contra-corriente. Si se observan organismos que están adheridos fuertemente, se remueven con ayuda de unas pinzas entomológicas o un pincel.

Colecta manual: Retire el bloque de la columna de agua manteniéndolo dentro de una red (Surber o rectangular), para evitar la pérdida de organismos. Ubique el bloque en una bandeja blanca y retire los macroinvertebrados manualmente con ayuda de pinzas entomológicas o un pincel.

Consideraciones finales: Ninguna.

- **Micro-hábitat: Sustratos artificiales (ladrillos, baldosas)**

Indicaciones para el muestreo: **Consideraciones iniciales:** Ninguna

Colecta manual: Retire el sustrato artificial manteniéndolo dentro de una red (Surber o rectangular), para evitar la pérdida de organismos. Ubique el bloque en una bandeja blanca y retire los macroinvertebrados manualmente con ayuda de pinzas entomológicas o un pincel.

Consideraciones Finales: Sumerja de nuevo el sustrato extraído.

- **Micro-hábitat: Macrófitas emergentes**

Indicaciones para el muestreo:

Consideraciones iniciales: Identifique con nombre científico o con nombre común las macrófitas y escriba estos datos en el formato de campo. Si es necesario fije aquellas que no logre identificar para su posterior identificación en laboratorio por parte del experto. Seleccione únicamente las macrófitas enraizadas, no se debe realizar el muestreo sobre macrófitas errantes.

Red Tipo D y rectangular: Apoye el marco de la red sobre el grupo de macrófitas y luego agite garantizando que los organismos que se desprendan quedan atrapados en la red. Evite que la red se colmate de material orgánico o sedimentos, vaciando su contenido cada vez en un balde para su posterior limpieza.

Consideraciones finales: Lave el material vegetal colectado en campo depositándolo en un balde de 10 L, enjuague suavemente con agua sobre un juego de tamices de entre 2000 μm y 200 μm .

- **Micro-hábitat: Macrófitas sumergidas**

Indicaciones para el muestreo:

Consideraciones iniciales: Identifique con nombre científico o con nombre común las macrófitas y escriba estos datos en el formato de campo. Si es necesario, fije aquellas que no logre identificar para su posterior identificación en laboratorio por parte del experto. Seleccione únicamente las macrófitas enraizadas, no se debe realizar el muestreo sobre macrófitas errantes.

Red Surber: Aplica en el caso que las macrófitas estén adheridas a rocas. Abra el marco de muestreo, con la mano agite vigorosamente el grupo de macrófitas en contra corriente.

Red tipo D y rectangular: Ubiqué la red aproximadamente a 10 cm del grupo de macrófitas, agítelas vigorosamente con la mano o pie generando flujo hacia la red. Arrastre la red desde el fondo hasta la superficie, de tal forma que la red remueva el material biológico que se encuentra adherido a las macrófitas. No repita el procedimiento en la misma planta.

Muestreador Hess: Introduzca el dispositivo y remueva el sustrato atrapado dentro del cilindro. Retire las macrófitas y ubíquelas sobre una bandeja blanca para retirar aquellos organismos que aún quedan adheridos a las hojas o tallos. Este método es aplicable en cuerpos de agua someros (menos de 1m) y en macrófitas de tamaño pequeño.

Consideraciones finales: Lave el material vegetal colectado en campo depositándolo en un balde de 10 L, enjuague suavemente con agua sobre un juego de tamices de entre 2000 μm y 200 μm .

- **Micro-hábitat: Vegetación Inundada**

Indicaciones para el muestreo:

Consideraciones iniciales: Identifique con nombre científico o con nombre común las especies vegetales y escriba estos datos en el formato de campo. Se debe realizar el muestreo sobre la vegetación inundada que ya ha sido colonizada por organismos. No se debe realizar el muestreo sobre vegetación terrestre que tiene poco tiempo de haber sido inundada como producto de una crecida reciente del nivel del río.

Red tipo D y rectangular: Tome firmemente el cabo, sumerja la red, ubíquela debajo de las raíces y fuertemente lleve hacia la superficie.

Consideraciones finales: Lave el material colectado en campo depositándolo en un balde de 10 L, enjuague suavemente con agua sobre un juego de tamices de entre 2000 μm y 200 μm .

- **Micro-hábitat: Restos vegetales (madera, ramas, hojarasca)**

Indicaciones para el muestreo:

Consideraciones iniciales: Escoja restos vegetales que sean propios de la estación, es decir, que lleven unas semanas en ese punto y que no hayan sido arrastrados recientemente por la corriente, para evitar el muestreo de material proveniente de aguas arriba.

Escoja solamente material vegetal con evidencia de actividad microbiana sobre este, es decir, con presencia de una biopelícula en su superficie. No tome material recién caído o sin evidencia de actividad biológica.

Red Surber: Abra el marco de muestreo, tome con la mano los restos vegetales y llévelos dentro de la red.

Red Tipo D y Rectangular: Ubique la red a 10 cm de los restos vegetales, tómelos con la mano y llévelos dentro de la red.

Consideraciones finales: en todos los casos evite tomar grandes restos de madera que pueden estropear la red.

Se puede coleccionar cerca de 1L de este material en varios puntos del tramo: hojarasca depositada en corriente rápida, lenta y pozos.

Lave el material vegetal coleccionado en campo depositándolo en un balde de 10L, enjuague suavemente con agua sobre un juego de tamices de entre 2000 μm y 200 μm .

- **Micro-hábitat: Salpicadura**

Indicaciones para el muestreo:

Realice una colecta manual de las zonas de salpicadura o zonas de *spray*, las cuales son interfaces entre el medio acuático y terrestre, ubicadas cerca a cascadas (pequeñas o grandes). Generalmente estas zonas están habitadas por organismos que no se encuentran dentro del agua. Utilice pinzas entomológicas o un pincel y haga la colecta manual por 15 minutos.



Figura 143. Toma de muestra de macroinvertebrados acuáticos con Red Surber –río Bogotá, antes de Villapinzón. Foto: Laboratorio Ambiental CAR 2017



Figura 144. Toma de muestra de macroinvertebrados acuáticos con Red Rectangular. Foto: J. Alba Tercedor. Tomada de Metodología para el establecimiento del Estado Ecológico según la Directiva Marco del Agua. Protocolos de muestreo y análisis para Invertebrados Bentónicos. 2005

- Fije las muestras inmediatamente después de la recolección con etanol al 96% o formalina (1% o 4%), para evitar la acción de los carnívoros, especialmente plecópteros, odonatos, coleópteros, megalópteros entre otros.

Ecosistemas lénticos

En este apartado se mencionaran dos metodologías comunes para la toma de muestras de macroinvertebrados bentónicos de sedimentos y asociados a macrófitas.

De acuerdo al programa de monitoreo, objeto y objetivo del estudio se debe aplicar la técnica y el dispositivo de muestreo adecuado, que permita caracterizar las comunidades arriba mencionadas.

- **Macroinvertebrados asociados a macrófitas**

La metodología de muestreo con red cuadrangular (“dipping”) es el principal método de captura de macroinvertebrados asociados a macrófitas de sistemas lénticos y consiste en realizar barridos o pasadas con la red cuadrangular sobre las macrófitas, los presentes pasos fueron tomados y modificados de (Alba-Tercedor, Pardo, Prat, & Pujante, 2005).

- Una vez seleccionado el área de muestreo, acérquese lentamente para no perturbar el área con el fin de evitar que los organismos huyan del lugar.
- Tome la red cuadrangular y realice un barrido de forma pendular ingresando desde la superficie, luego hacia fondo y retornando de nuevo a la superficie cubriendo aproximadamente metro de longitud con este movimiento.
- Golpee con la red en cada recorrido pendular el sustrato tres veces (al comienzo, en el medio y al final) con el fin de desprender y atrapar en la red los organismos.

- Realice cada barrido de manera rápida para evitar que los organismos escapen. El barrido debería completarse en aproximadamente 3 segundos.
- Al final de cada barrido o pasada lleve la red a la superficie y deposite el material atrapado en un balde limpio de 10 L. Inspeccione visualmente que no quede ningún organismo enredado en la red.
- El esfuerzo de muestreo medido en el número de barridas o pasadas de la red se establece de acuerdo a la riqueza de macrófitas y biotipo dominante. Sin embargo, se recomienda entre 10 a 20 barridas o pasadas por punto de muestreo. El esfuerzo puede dividirse el 50% en la especie o biotipo dominante y el restante 50% se puede fraccionar basado en los dos criterios mencionados.
- Anote en el formato de campo el nombre de la especie (si se conoce) o común de los cuales se tomó la muestra y el esfuerzo aplicado.
- Completado el esfuerzo de muestreo lave el material que se encuentra en el balde sobre dos tamices de 2000 μ m (primer tamiz) y 250 μ m (segundo tamiz) micras. Realice el lavado con abundante agua pero de forma cuidadosa agregue agua sobre el material situado en el primer tamiz. Visualmente inspeccione que no queden organismos atrapados en el material lavado.
- Deposite los organismos observados en el frasco o bolsa utilizada para la colecta.
- Descarte el material grueso (macrófitas o restos de estas, tallos, etc.) ya lavado e inspeccionado del primer tamiz. Retenga solo el material fino del segundo tamiz como algunas raíces y detritus.
- El material retenido del segundo tamiz vacíelo completamente en el frasco plástico o bolsa para su preservación.

- Agregue a la muestra etanol al 96% o formalina (1% o 4%) para la preservación hasta asegurarse que quede sumergida la muestra y hágalo de forma inmediata para evitar la acción de los carnívoros.
- Lave el material utilizado antes de continuar en el próximo hábitat.

- **Macroinvertebrados bentónicos de sedimentos**

En la captura de esta comunidad se utiliza generalmente la draga. En el mercado existen varios tipos de dragas y de diferentes dimensiones, la escogencia de una u otra se basa principalmente en el tipo de sustrato de fondo (blando o duro) y tamaño del ecosistema léntico.

La draga tipo Ekman es el más frecuente, vienen en diferentes dimensiones y se adapta bien para sustratos blandos (limos, arcillas, detritus y eventualmente arenas). Es un dispositivo con forma de caja. La parte superior consta de una tapa dividida en dos que permite que el agua pase a través de estas cuando se sumerge la draga. La parte inferior es un sistema de “tapa-cuchilla” curva que es aquella que se cierra para atrapar la muestra. Las dimensiones de la draga son variables, pero la muestra tomada puede expresarse en cm^3 (alto x ancho x largo).

- Una vez definidos el o los puntos de muestreo.
- Abra las dos tapas inferiores de la draga y asegúrelas, láncela al fondo del cuerpo de agua, y en el momento en que ésta toque el fondo envíe el mensajero con fuerza para cerrar el dispositivo.
- Hale hacia la superficie para obtener la muestra.
- Retire los residuos de mayor tamaño, valiéndose de los tamices y la bandeja o balde, tenga cuidado de depositar los organismos encontrados en el recipiente de la muestra. Si colecta en detritus es recomendable que lleve la muestra completa al laboratorio para su inspección.

- De ser necesario realice diferentes lances de la draga, los diferentes lances serán mezclados para obtener una única muestra compuesta. No hay un esfuerzo de muestreo establecido, pero se recomienda mínimo 3 lances. Hágalo al menos a un metro de distancia un lance del otro.
- Agregue a la muestra etanol al 96% o formalina (1% o 4%) para la preservación hasta asegurarse que quede sumergida la muestra y hágalo de forma inmediata para evitar la acción de los carnívoros.
- Lave el material utilizado antes de continuar en el próximo hábitat.

Limpieza de material y preservación en campo

Realice la limpieza de las muestras sobre bandejas blancas y de manera separada para cada tipo de hábitat. Evite que en los recipientes de colecta queden ramas, troncos, cantos rodados, gravas o grandes cantidades de arena y sedimentos, los cuales puedan dañar las estructuras claves para la determinación taxonómica. Para facilitar la identificación taxonómica en el laboratorio, separe los organismos frágiles que puedan perder estructuras claves para su identificación, por ejemplo los efemerópteros.

En lo posible, cuente en campo y se devuelva al ecosistema los organismos de tamaño grande (cangrejos, bivalvos o camarones de agua dulce), o lleve un par de individuos al laboratorio, si es dudosa su identificación.

Si utilizó formol para fijar las muestras en campo, haga la anotación en las observaciones del formato de campo, con el fin de que el personal del laboratorio utilice elementos de protección personal para el procesamiento de la muestra.

Deposite en el mismo recipiente de colecta el material colectado en las unidades de muestreo que corresponden al mismo tipo de hábitat, y agregue la solución fijadora hasta sobrepasar el volumen de la muestra. Rotule debidamente la

muestra con un marcador resistente al agua y al alcohol; agregue otro rotulo marcado con lápiz o micro punta indeleble punta fina dentro de recipiente.

Por último, embale las muestras en una nevera portátil plástica y manténgala en condiciones adecuadas de temperatura (menos de 25°C) y humedad.

Al finalizar el muestreo de una estación, lave todo el material de muestreo para evitar contaminación con organismos de otras estaciones y asegúrese que las redes hayan quedado completamente limpias.

Limpieza de material y separación de organismos en laboratorio

Con el fin de evitar un aumento de la tasa de error, no se recomienda hacer selección e identificación taxonómica en campo; la muestra completa debe ser trasferida al frasco correspondiente (Haase, 2010) para ser analizada en laboratorio.

Ensamble como mínimo dos tamices, dejando en la parte superior el tamiz de 1000 μm y en la parte inferior el de 75 μm . Lave pequeñas porciones de la muestra colocándola sobre el primer tamiz, realice el lavado con un flujo suave de agua.

Inspeccioné visualmente en el primer tamiz donde quedan retenidos los organismos más fáciles de observar, para su posterior preservación.

Examine el material obtenido de cada uno de los tamices, al estereomicroscopio para seleccionar los macroinvertebrados, los organismos pueden agruparse en cajas de *petri* a nivel de orden, para su posterior determinación taxonómica y conteo. Cuando existan muestras en las que se espera una abundancia elevada de un determinado morfogénero cuente por lo menos 250 organismos, interrumpa su separación y registre en el formato como >250.

Determinación Taxonómica y conteo

Observe los organismos en el estereomicroscopio y realice el registro fotográfico. Registre el taxón y el número de organismos en el formato de laboratorio, mediante claves especializadas determine hasta el mínimo nivel taxonómico posible, Familia Genero. Se identifican los morfotipos presentes. Para los Phylum Nematoda, Annelida, Platyhelminthes, Mollusca, Subphylum Crustacea y la Clase Arachnida, la determinación se debe realizar hasta el mínimo nivel taxonómico posible. Anote el estadio de vida de los organismos y las dificultades encontradas durante la determinación (por ej., organismos incompletos, carencia de branquias, carencia de estructuras relevantes en la determinación taxonómica, estadio juvenil).

En el caso de efemerópteros, dípteros y coleópteros, puede llegar a ser necesario el montaje de placas para microscopía, de estructuras clave para la determinación de géneros.

Deposite los organismos separados en viales de vidrio y preserve en etanol al 96%. Rotule los viales con la identificación de la muestra, fecha, nombre de la corriente y grupo taxonómico.

Separe los especímenes por taxón, fecha de colecta y micro-hábitat, previo a ser incluidos en una colección de referencia siguiendo los protocolos establecidos para colecciones biológicas del Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.

Examine el nivel de etanol de estos frascos periódicamente y llénelos nuevamente cuando sea necesario, antes que ocurra la evaporación del etanol.

Macrófitas

El término macrófitas se refiere a diferentes tipos de plantas acuáticas macroscópicas (plantas vasculares, briófitos, macroalgas) presentes en la zona litoral de humedales, lagos, lagunas, embalses o ríos, ya sea en la zona de interfase

agua-tierra, sobre la superficie del agua o totalmente sumergidas, con diferentes formas de vida: flotantes, de hojas flotantes, sumergidas, adheridas al sustrato y emergentes. Las plantas vasculares sumergidas pueden estar enraizadas o pueden encontrarse errantes en la columna de agua.

Las macrófitas, son una comunidad importante para la ecología acuática (ciclo de nutrientes, cadena trófica, alta productividad, hábitat para otras comunidades, aporte a la complejidad estructural y metabolismo). Adicionalmente, esta comunidad tiene valor para la indicación de la calidad del agua, ya que son sensibles a los cambios de calidad fisicoquímica (nutrientes, mineralización, temperatura, transparencia), al igual que las microalgas, no obstante a diferencia de éstas tienen un tiempo de respuesta mayor, o sea que son indicadores de cambios a mediano y largo plazo. La densidad de poblaciones de macrófitas acuáticas está en relación con el área de la orilla, sus condiciones topográficas y el estado del contenido de nutrientes del agua o suelo.

Los métodos propuestos en este protocolo se derivan de la revisión de diferentes documentos tales como (APHA, 2012); (Cirujano, Cambra, & Gutiérrez, 2005); (Schmidt-Mumm U. , 1998); (Richard H & Lamberti G., 2006); (Esquivel, 1997); (Braun-Blanquet, 1932) y del consenso de diferentes investigadores colombianos expertos en este tema.

Selección de Puntos de Monitoreo

Identifique estaciones de muestreo que sean representativas de la diversidad de hábitats. Idealmente, se debe contar con ortofotos recientes que complementen el trabajo en campo. Dependiendo del ecosistema y la cobertura vegetal existente, el muestreo se puede realizar con transectos, ubicados de forma perpendicular a la orilla, en el sentido de la interfase tierra-agua. El punto inicial del transecto debe estar debidamente georreferenciado, acompañado de un esquema del lugar de muestreo para evidenciar las características particulares con el fin de facilitar los muestreos posteriores. En zonas riparias de pequeños ríos o quebradas y lagos de

pendiente fuerte, ubique los transectos de forma paralela, debido a que la zona de litoral puede ser muy angosta (menor a 1 m).

Frecuencia de Monitoreo

La frecuencia de monitoreo de la comunidad debe obedecer a los objetivos del proyecto. Se recomienda abarcar diferentes periodos climáticos (lluvias y sequía) para comunidades permanentes. En ecosistemas acuáticos temporales se recomienda un muestreo al año durante la fase de inundación. En caso de realizar un solo muestreo anual escoja la fecha en que la vegetación macrofítica presente el mayor desarrollo.

Tipos de Muestra

Realice un muestreo semi-cuantitativo en el que determine el porcentaje de cobertura de cada una de las especies de macrófitas, con la ayuda de un cuadrante de 1mx1m (dividido en cuadrículas de 10cmx10cm), con el que se constituye un transecto de 1m de ancho.



Figura 145. Cuadrante para cobertura de macrófitas. Foto: C. Moreno. 2013

Equipos, reactivos y materiales

Campo

- GPS.
- Cámara fotográfica.
- Guía de Macrófitos Acuáticos y Palustres de Colombia. Mora-G, Mario Fernando. 2013. Inédito.

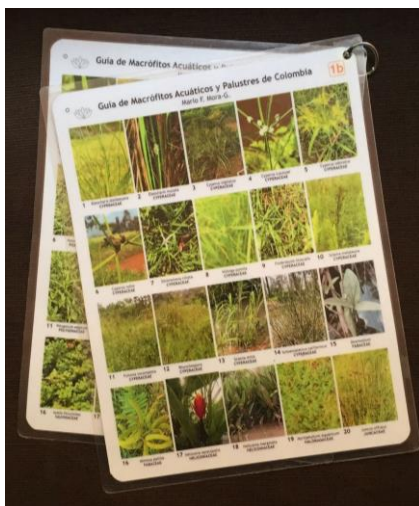


Figura 146. Guía de Macrófitos Acuáticos y Palustres de Colombia. Fuente: Mora-Goyes, Mario Fernando. 2013. Inédito.

- Binoculares
- Rastrillo
- Tijeras de jardinería
- Red de acuario
- Flexómetro
- Lupa botánica
- Navaja
- Soluciones fijadoras: alcohol etílico (75 %), formol (4%), solución FAA (formaldehído 10%-alcohol 50%-ácido acético 5%-agua 35%), solución etanol (65%)-glicerina (5%)-agua (30%).

- Cuadrante para cobertura
- Visor subacuático
- Bandeja plástica
- Bolsas plásticas rotuladas
- Frascos plásticos rotulados
- Nevera portátil para preservar muestras
- Libreta de campo
- Marcador indeleble y lápiz de cera
- Claves de indentificación y claves visuales complementarias
- Cuerdas y boyas para fijar los límites de los transectos
- Papel pergamino
- Papel periódico
- Prensa botánica
- Cartografía del área
- Fotografías aéreas
- Pantalón fontanero
- Guantes de látex largos y tapabocas
- Bote inflable, chaleco salvavidas, remos

Laboratorio

- Prensa botánica
- Papel periódico
- Estereoscopio

- Equipo de disección
- Balanza
- Horno o estufa de secado
- Alcohol etílico (75%)
- Claves Taxonómicas específicas

Procedimientos para la toma de muestras

En campo

La identificación de las especies de macrófitas en el sitio de muestreo se debe realizar únicamente cuando exista un alto grado de confianza en la determinación por parte de un experto. Para las especies no identificadas en campo, colecte ejemplares para su posterior identificación en laboratorio y colecciones de referencia en herbarios.

De manera previa, realice el diseño de muestreo teniendo en cuenta la información de coberturas existentes. En el caso de humedales con grandes extensiones de macrófitas (ciénagas o áreas inundables de grandes ríos), visualice las unidades de cobertura y seleccione los sitios de muestreo con ayuda de binoculares. Realice un inventario de las plantas presentes en el ecosistema, recolectando muestras de individuos para efectuar la determinación taxonómica y mantener registros de referencia.

En lagos profundos y ríos no vadeables, lleve a cabo el muestreo desde un bote con ayuda de un visor subacuático y un rastrillo con mango extensible para muestrear las zonas más profundas.

- **Proceso de cuantificación**

Cuantifique de macrófitas emergentes mediante evaluación visual. La cuantificación de macrófitas sumergidas realícela con un visor subacuático o por inmersión del observador.

Estime los porcentajes de cobertura por medio de las cuadrículas del cuadrante, asignando un valor en la escala que relaciona la abundancia relativa de cada especie presente. Se propone usar la siguiente escala de coberturas (modificada de Braun-Blanquet, 1932):

Tabla 25. Evaluación visual y por medio de una escala de cinco niveles

Escala	Porcentaje de cobertura
1	< 5%
2	6% -25%
3	26% -50%
4	51%-75%
5	76% -100%



Figura 147. Toma de muestra de macrófitas con cuadrante para cobertura. Foto: C. Moreno. 2013

Si no puede realizar la determinación taxonómica en campo, designe los ejemplares con un código de campo compuesto por dos iniciales del primer nombre y dos del apellido del colector y el número consecutivo de colección; de esta forma se asigna al material una identificación única para evitar confusiones en etapas posteriores de análisis.

Con la ayuda de una lupa botánica, identifique en campo los caracteres diagnósticos no observables a simple vista (estructuras florales ranunculáceas, pontederiáceas, elatináceas, alismatáceas, entre otras), debido a que muchos caracteres diagnósticos se pueden afectar después de ser procesados en laboratorio.

En el formato de campo En el Anexo B-3 Formato Captura de datos en campo ítem 7 anote las características de la cobertura vegetal, morfología de las orillas y coordenadas de los transectos.

En la libreta de campo registre anotaciones específicas del muestreo de cada transecto con respecto a:

- Porcentaje de cobertura para cada una de las especies presentes por cuadrante.
- Descripción de caracteres que pueden perderse en el procesamiento del material y que son relevantes tanto para la determinación taxonómica como para la elaboración de etiquetas para ingreso a colecciones de referencia en herbarios: coloración de hojas, flores o frutos, aroma, exudados, asociaciones con otras especies.
- Descripción del hábito, altura, forma de vida, abundancia, aspectos fenológicos, condición general de la vegetación (estado fitosanitario, fisiológico).
- Esquema con la representación del perfil de vegetación del transecto muestreado. Registre la presencia de parches normalmente enraizados que se observan errantes en la corriente.

- Haga una descripción del hábitat específico del lugar de colecta: tipo de ecosistema, tipo de sustrato (gravas, arenas, limos, arcillas), exposición solar, flujo del agua, profundidad.
 - Efectué una valoración de la cobertura de especies invasoras o potencialmente invasoras con respecto a las especies nativas. Esta valoración realícela en términos de magnitud de la invasión: muy abundante, abundante, frecuente, poco frecuente, rara.
- **Proceso de colecta y fijación**
 - Corte con tijeras los ejemplares a ser colectados, manteniendo la mayor cantidad de partes de la planta: raíz, flores, fruto. Lave el área radicular para eliminar el sedimento antes de ser colectado. En algunos casos, la colecta de ejemplares se realiza por fuera de los sitios de muestreo, ya que se requiere material fértil (individuos con flores y frutos), que es necesario buscar en los alrededores del lugar de muestreo.
 - Para coleccionar algunos especímenes de raíces delicadas como juncagináceas o podostemáceas, utilice una navaja para facilitar su extracción del sustrato.
 - Las macrófitas grandes deposítelas en una bolsa plástica hermética, debidamente etiquetada. Para el caso de *Nymphaea* o *Victoria*, se requiere partir los frutos por la mitad.
 - Las macrófitas pequeñas, tales como las errantes emergentes (*Azolla*, *Salvinia*, *Lemna*) o errantes sumergidas (*Riccia*, *Wolffiella*, *Wolffia*) colecciona en frascos plásticos debidamente etiquetados. Para facilitar el montaje por flotación de macrófitas con estructuras débiles (algas macroscópicas, pontederiaceas, potamogetonáceas, cabombáceas, entre otras), siga el

método de flotación en bandeja sobre papel secante para logra un mejor prensado.

- Las plantas sumergidas de estructuras delicadas (Characeae), colectelas debajo del agua sobre papel pergamino arreglando las estructuras de la planta sobre el papel; posteriormente, saque el ejemplar del agua de tal manera que la planta quede lista para ser prensada o secada.
- Generalmente los ejemplares se fijan en alcohol etílico (75%). Se recomienda usar la solución FAA (90mL de alcohol 70%, 5 mL de ácido acético y 5 mL de formol al 4%) cuando se fijan colectas especiales como algas macroscópicas o para el caso de orquídeas acuáticas, para las que se requieren conservar sus flores.
- Para preservar especímenes de Podostemáceas se recomienda usar alcohol 70% o formol al 4%.

En laboratorio

- Prese las macrófitas entre papel secante y papel periódico durante 5 días, cambiando el papel secante cada dos días hasta que la planta quede completamente deshidratada. Dependiendo del tipo de planta, el secado se puede realizar también en un horno a 70°C durante 2 o 3 días.
- Seque los briofitos al ambiente en bolsas de papel por una semana.
- Realice la determinación taxonómica de los ejemplares, mediante claves especializadas hasta el mínimo nivel taxonómico posible. Identifique los morfotipos presentes. Cuente con la ayuda de un estereoscopio para la determinación taxonómica de los ejemplares, sin este equipo es imposible observar ciertas características de estructuras reproductivas como

aquenios en cyperáceas, donde se requiere conocer la forma, el tamaño o el tipo de superficie.

- Monte cada ejemplar y asegúrelo sobre una cartulina blanca con su respectiva etiqueta, registre en ella información sobre: lugar y fecha de muestreo, datos taxonómicos, nombre de colector, nombre de experto que realiza la determinación, descripción de caracteres que se pierden al secado, coordenadas geográficas de ubicación de colecta, altitud, número de colección y referencia de la ubicación del registro fotográfico. Monte los ejemplares pequeños en sobres.
- Una vez montados los ejemplares deposítelos en una colección de referencia de un herbario.
- Presente los resultados en mapas de coberturas por especies o asociaciones, en perfiles de vegetación o en términos de composición y estructura con el fin de estimar valores de diversidad. Los listados de las especies en lo posible, deben ir acompañados de datos referentes al estado de conservación, amenaza o endemismo.
- Finalmente, consigne la información en el Sistema de Información Biológica (SIB), administrada por el Instituto de Investigaciones Biológicas Alexander Von Humboldt. <https://www.sibcolombia.net/>.

7.2.4. Monitoreo Isotópico

En aguas superficiales, el monitoreo isotópico se realiza para tener conocimiento acerca de la interacción del agua con la roca, velocidad de flujo, tiempo de residencia, interacción del agua de un río o un lago con agua subterránea o con la precipitación o la nieve, transporte de material disuelto o particulado, las pérdidas de agua de lagos, entre otros.

Los estudios con isótopos ambientales en aguas superficiales, se realizan en ríos grandes, o ríos pequeños, ya sea en la parte alta o baja de la cuenca, y es muy común evaluar los isótopos más significativos del agua como son el ^2H (deuterio), el ^3H (tritio) y el ^{18}O (oxígeno 18) debido a su particular potencial para el cálculo del balance de agua, la dinámica del agua y sus relaciones entre el agua superficial y el agua subterránea de los ríos y sus cuencas. (Rozanski, Froehlich, & Mook, 2014).

Algunos de los resultados obtenidos en los monitoreos isotópicos, son evaluados con modelos conceptuales hidrológicos, que incluyen el tiempo de tránsito medio como parámetro del modelo. (Maloszewski, Rauert, Stichler, & Herrmann, 1983)

En Colombia son muy pocos los que llevan a cabo el monitoreo isotópico en aguas superficiales, entre ellos algunas autoridades ambientales e investigadores, es por esto que a continuación se presentan algunas consideraciones basadas en las metodologías que se presenta en el libro “Isótopos **Ambientales en el Ciclo Hidrológico: Principios y Aplicaciones**”, Serie: Guías y Manuales, nº 1 traducción al castellano y adaptación realizada por el Instituto Geológico y Minero de España, en el año 2002.

Selección de Puntos de Monitoreo

Es importante que el punto que se seleccione esté debidamente georeferenciado, y describa el entorno que rodea el punto de toma de muestra.

El punto que se seleccione, para toma de muestra tanto en ríos o lagos, debe ser de fácil acceso, en diferentes épocas del año, ya que la muestra se toma en el centro del río o del lago.

Uno de los factores importante en la selección del punto de monitoreo, y de acuerdo al objetivo del monitoreo, es la altitud, ya que la composición isotópica puede cambiar.

Frecuencia de Monitoreo

Para ríos, lo recomendado es realizar tres muestreos en el año; en la época seca, en época de transición y época de lluvias. Si la toma de muestra se hace para una investigación, lo recomendado es hacer estas mismas tomas en las diferentes épocas, pero en periodos más cortos, de acuerdo a la programación del proyecto.

En lagos o embalses, normalmente son suficientes dos campañas de muestreo: una durante la época seca y otra durante la estación de lluvias. Aunque para algunas variables la frecuencia de monitoreo es más continua. En la sección de procedimiento se encontrará la frecuencia de monitoreo dependiendo de la variable.

Tipos de Medición

Dependiendo del tipo de investigación o estudio, se pueden realizar varios métodos de medición, entre los que se encuentran:

En Ríos

Siendo uno de los objetivos del monitoreo isotópico superficial, determinar el origen del agua que es transportada, los ríos son unos de los principales sitios para hacer un muestreo significativo, considerando que estos pueden estar alimentados por la precipitación, la escorrentía superficial directa, los manantiales, filtraciones

subterráneas y el agua que proviene los glaciares, además que sufren pérdidas por infiltración y recarga a acuíferos, y en particular por evaporación.

Los isotopos del agua, ^2H y ^{18}O , son muy comunes en este tipo de mediciones, debido a su comportamiento conservativo en el agua y a la gran variabilidad en sus relaciones isotópicas $^2\text{H}/^1\text{H}$ y $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$. Sin embargo es muy útil el uso de ^{13}C y Sr para estudios en ríos.

^3H de los Ríos

El contenido de ^3H del agua de los ríos representa, el contenido de la precipitación, sin embargo, el agua puede estar sujeta a un tiempo de residencia relativamente largo en la región, en forma de agua subterránea o agua superficial (lagos). Además, el agua se puede transportar a lo largo de grandes distancias desde una región con un contenido elevado o bajo de ^3H , lo cual permite estimar el tiempo de tránsito.

El ^3H se puede utilizar, para estudiar el hidrograma de la escorrentía, de forma similar a la aplicación de la escorrentía como trazador del ^{18}O .

En comparación con el ^{18}O , la desventaja ahora es que las fluctuaciones en la actividad del ^3H de la precipitación son menores y generalmente no están correlacionadas con la intensidad de la precipitación. Sólo se puede hacer una comparación de la lluvia y la intensidad de la escorrentía en aquellos casos en los que los ríos sean relativamente grandes y para periodos de tiempo más largos.

^{13}C de los ríos

Entre los isótopos del carbono, el ^{13}C es el que más se ha aplicado en los estudios de los ríos.

Se estima que las contribuciones del Carbono inorgánico disuelto y del Carbono inorgánico particulado, respecto del flujo de carbono total que llevan los ríos es del 45% y del 15% respectivamente, el resto es materia orgánica.

Como generalmente el contenido de Carbono Inorgánico Disuelto de los ríos no se encuentra en equilibrio isotópico con la atmósfera, la identificación isotópica de los sedimentos en suspensión puede llegar a distinguir entre el Carbonato que precipita en el río y el Carbonato detrítico que se origina a partir de la meteorización y la erosión en la cuenca.

Normalmente los valores de ^{13}C de la materia tanto inorgánica como orgánica de los ríos es muy útil para restringir las posibles fuentes de Carbono y los procesos que intervienen en el ciclo del Carbono ribereño.

Sr en los ríos

La geología de una cuenca, es la que controla la composición isotópica del estroncio del agua de los ríos. El isótopo estable de estroncio, ^{87}Sr , es un producto de la desintegración del radionucleido fundamental, ^{87}Rb (periodo= $4,8 \cdot 10^{10}$ años, abundancia natural media del elemento estroncio = 27,83%). Así, cuanto más antiguas sean las rocas en la cuenca fluvial y cuanto mayor sea la proporción del silicato enriquecido en Rb de las rocas, mayores serán las relaciones $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ del agua que interacciona con las rocas. De hecho, los estudios sobre el isótopo del Sr de los ríos demuestran que las variaciones en la relación $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ y en la concentración de Sr se originan fundamentalmente por la mezcla de aguas de varios orígenes con diferentes relaciones $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ y contenidos de Sr que resulta de la interacción agua-roca con diferentes tipos de roca.

Lo anterior es aplicable en los estudios hidrológicos, hidroquímicos y de los procesos medioambientales de los ríos. En las tablas Tabla 26 y Tabla 27 se observa los principales campos de aplicación de algunos isotopos estables y radioactivos,

Tabla 26. Abundancia natural de los isótopos estables que se usan en los estudios de los ríos.

Isótopo	Relación Isotópica de interés	Abundancia natural media	Aplicación
^2H	$^2\text{H}/^1\text{H}$	$1,55 \cdot 10^{-4}$	Balance de agua y dinámica en las cuencas fluviales, embalses y estuarios; relación agua superficial, agua subterránea.
^{13}C	$^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$	$1,11 \cdot 10^{-2}$	Ciclo del carbono en las riberas; procesos de meteorización; procesos biológicos.
^{15}N	$^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$	$3,66 \cdot 10^{-3}$	Contaminación; procesos biológicos
^{18}O	$^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$	$2,04 \cdot 10^{-3}$	Balance de agua y dinámica en las cuencas fluviales, embalses y estuarios; relación agua superficial-agua subterránea.
^{34}S	$^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$	$4,22 \cdot 10^{-2}$	Contaminación; procesos de deposición de sales.
^{87}Sr	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	0.709939	Meteorización de las rocas y los terrenos; perturbaciones antrópicas (polución) influencia desde los afluentes en la química y la contaminación de los ríos.

Fuente: (Rozanski, Froehlich, & Mook, 2014)

Tabla 27. Abundancia natural de los isótopos estables que se usan en los estudios de los ríos.

Nucleído	Periodo radioactivo, (años)	Actividad específica	Aplicación
^3H	12.33	$1.55 \cdot 10^{-4}$	Balance de agua y dinámica en las cuencas fluviales, embalses y estuarios, relación agua superficial, agua subterránea.
^{14}C	5730	$1.11 \cdot 10^{-3}$	Ciclo del carbono en las riberas, datación de sedimentos, datación de inundaciones.

Nucleído	Periodo radioactivo, (años)	Actividad específica	Aplicación
²³⁸ U ²³⁴ U	2.5*10 ³ 2.45*10 ⁵	4*10 ⁻⁴	Meteorización, erosión y sedimentación; procesos en los estuarios; sedimentación.

Fuente: (Rozanski, Froehlich, & Mook, 2014)

En lagos y embalses

La realización de estudios isotópicos más completos y mejor planteados tiene como objetivo cuantificar el balance de agua de los lagos o de los reservorios superficiales. Para ello se necesitan estrategias de muestreo diseñadas cuidadosamente, que tengan en cuenta la información ya disponible, condiciones locales, costos previstos, etc.

Los lagos son complejos sistemas dinámicos que interactúan con el ambiente local y están conectados al ciclo del agua a través de flujos de entrada y salida superficiales y subterráneos, y por medio de flujos de precipitación / evaporación. En la interacción con el ambiente local también se incorporan constituyentes químicos y fases minerales que se transportan desde el área de captación hacia el lago por medio de los flujos de entrada, superficiales y subterráneos, como se observa en la Figura 148.

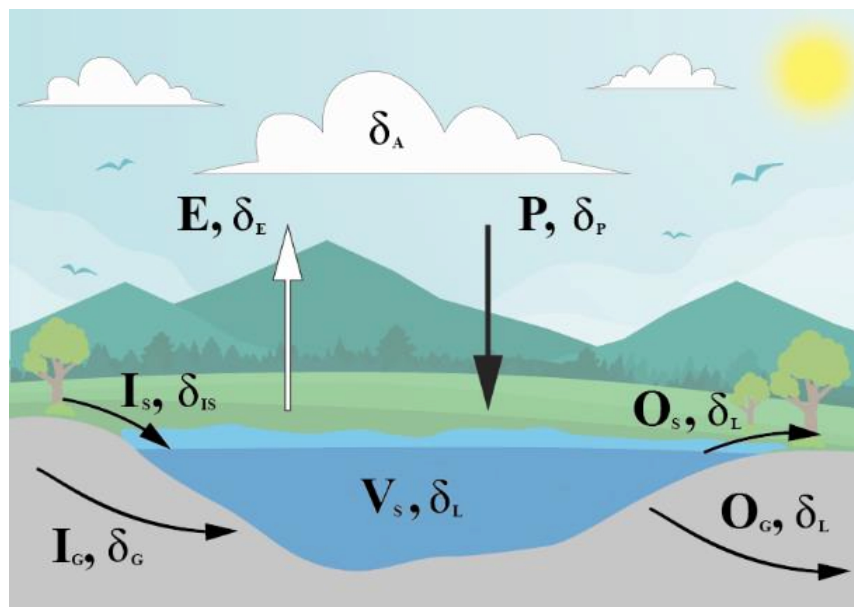


Figura 148. Esquema que describe los componentes del balance hidrológico e isotópico de un sistema lacustre. Los flujos de agua están representados con letras mayúsculas, mientras que su composición isotópica se describe mediante los valores δ correspondientes. Fuente. (Rozanski, Froehlich, & Mook, 2014)

El balance del agua del lago se basa en la ley de conservación de la masa y presenta la forma de una ecuación de balance:

$$\frac{dV_L}{dt} = I_S + I_G + P - O_S - O_G - E$$

Donde V_L es el volumen del lago, I_S , I_G , O_S y O_G representan, respectivamente, los flujos volumétricos de entrada y salida, superficial y subterránea, P representa la precipitación sobre el lago y E es la evaporación del lago.

Los isótopos ambientales más utilizados para mediciones isotópicas en lagos son:

^2H y ^{18}O en lagos

Los isótopos estables del agua, ^2H y ^{18}O , son los trazadores más útiles para establecer el balance de agua en un lago (en particular los relacionados con los componentes sub-superficiales). El método de isótopos estables para determinar el

balance de agua en un lago se basa en un proceso de evaporación, que provoca un incremento cuantificable de ^2H y ^{18}O del agua del lago. Las variables meteorológicas, tales como la humedad relativa sobre el lago y la temperatura del agua que hay en la superficie controlan el grado de enriquecimiento causado por el proceso de evaporación y está correlacionado con el balance del agua del lago.

Otros Trazadores isotópicos para lagos.

En el monitoreo de lagos y embalses, la aplicación de isótopos ambientales y sustancias traza se relaciona con la dinámica de los lagos. En la Tabla 28, se resumen y caracterizan brevemente los trazadores que se utilizan en el monitoreo de lagos o embalses.

Tabla 28. Trazadores isotópicos y químicos que se utilizan en el estudio de la dinámica de los lagos.

Trazador	Características	Tipos de problemas que se estudian	Estado
^2H , ^{18}O	Isótopos estables del hidrógeno y del oxígeno. Forman parte de la molécula de agua.	Cuantificación del balance de agua Interacción con el campo de agua subterránea adyacente.	Se usan muy a menudo, principalmente para obtener caudales de entrada y salida de agua subterránea.
$^3\text{H}/^3\text{He}$	Isótopos radiactivos del hidrógeno (^3H) y su descendiente, ^3He (gas noble)	“datación” del agua de lagos. Intensidad de la mezcla vertical.	Aplicabilidad probada. Requiere espectrómetros de masas sofisticados.
CFCs: Freón-11 Freón-12	Gases traza presentes en la atmósfera que son algo solubles en el agua.	“datación” del agua de lagos. Intensidad de la mezcla vertical.	Aplicabilidad probada Medido mediante cromatografía de gases.
SF_6	Gas inerte inyectado artificialmente en un lago	Cuantificación de la mezcla vertical y horizontal.	Aplicabilidad probada Medido mediante cromatografía de gases.

Trazador	Características	Tipos de problemas que se estudian	Estado
Colorantes	Sustancias inyectadas en los cursos de agua superficiales hacia los lagos (ríos, canales)	Delineación de los penachos de contaminación. Identificación de las zonas estancadas y los caminos preferentes de los lagos	Aplicabilidad probada.

Fuente: (Rozanski, Froehlich, & Mook, 2014)

En alta montaña

En Colombia se está implementando una red específica experimental de muestreo isotópico de aguas superficiales y meteóricas en la alta montaña por encima de los 2700 metros de altitud en jurisdicción de los Parques Nacionales Naturales, Los Nevados y El Cocuy. Se trata de puntos de muestreo distribuidos altitudinalmente cada 200 metros de altitud aproximadamente en corrientes superficiales que conectan y drenan agua de escorrentía proveniente de glaciares, páramos y bosques altoandinos.

El objetivo es comprender mejor los aportes e interconexiones de los tres sistemas altoandinos desde el punto de vista de los flujos, permanencias, orígenes y tránsito del sistema hidrológico en la alta montaña.



Figura 149. Izquierda: Muestreo de agua en drenaje de páramo Derecha: Muestreo de agua en drenaje de superpáramo

Siendo uno de los objetivos del monitoreo isotópico, obtener información de todos los tipos de agua presentes en las zonas de estudio con el objeto de caracterizarlas y plantear posibles mezclas y aportes, se recomienda también además de considerar las mediciones anteriores, realizar unas mediciones in situ de calidad de agua (pH, Temperatura alcalinidad y Conductividad Eléctrica oxígeno disuelto).

Materiales y Equipos

Para el monitoreo isotópico, los materiales y equipos a utilizar son: Botellas, libreta de campo, lápices, marcadores, cinta, rótulos para marcar botellas, guantes, tapabocas, casco, chaleco salvavidas, botas, GPS, equipo multiparametro.

Características de las botellas

En la toma de muestras para análisis isotópico, se requieren las siguientes botellas:

Si se requiere almacenar la muestra por varios años, se debe utilizar, botella de cristal, preferiblemente de vidrio borosilicatado (color ámbar), con tapa de rosca en PE-HD (polietileno de alta densidad) y con tapón, para tener seguro el almacenamiento de la muestra, y que de esta manera la evaporación sea mínima.

Si la muestra se almacena solo por algunos meses, se debe utilizar botella PE-HD (polietileno de alta densidad). Si se utiliza botellas de baja densidad, el agua y el dióxido de carbono se difunden fácilmente.

Procedimientos para la toma de muestras

De acuerdo al objetivo de estudio, en ríos, la toma de muestra se hace teniendo en cuenta:

El objetivo del estudio, (en parte alta (cabecera de los ríos) en la parte media o en la parte baja de la cuenca) en ríos grandes o ríos pequeños.

En el monitoreo isotópico en ríos, primero se mide la profundidad donde se va a tomar la muestra, se observa las condiciones del pluviómetro que se encuentre cerca de la zona de muestreo, se mide el caudal, y luego, se toma la muestra isotópica en el centro del río, donde el caudal sea representativo y haya una buena homogenización. Se debe de evitar tomar agua de las márgenes del río ya que allí el agua no está perfectamente mezclada y puede haber sufrido efectos de evaporación o de contaminación.

En el monitoreo isotópico en lagos y embalses, primero se mide la profundidad donde se va a tomar la muestra, se observa las condiciones del pluviómetro, se toma el nivel del lago, se describen las condiciones atmosféricas y luego, se toma la muestra isotópica tanto de la superficie como del fondo.

Para el muestreo en alta montaña, del mismo modo se mide la profundidad donde se va a tomar la muestra, se mide el caudal y se toma la muestra lo más cerca que se pueda del centro del cauce. Es común que este tipo de mediciones estén

acompañados de un pluviómetro al que se le mide el agua que se encuentra totalizada y se recolecta también muestras de agua lluvia para análisis isotópico.

Se debe tener mucho cuidado cuando se tomen muestras en las zonas de confluencia. A una cierta distancia aguas abajo de la confluencia, se puede seguir teniendo composiciones isotópicas variables como consecuencia de la mezcla incompleta de dos corrientes de agua diferentes. Esta distancia puede ser de unos cuantos kilómetros cuando se trate de corrientes grandes.

Las botellas donde vaya la muestra, se debe llenar completamente, siempre que el agua no tenga posibilidad de congelarse durante el transporte aéreo (en ese caso se llenaran las dos terceras partes de las botellas). Las botellas deben estar marcadas individualmente con lápices o marcadores indelebles (el código del proyecto, coordenadas, la fecha, el número de la muestra, el nombre del recolector, el tipo de análisis que se requiere); la información ha de tener una referencia común entre la libreta de campo y las hojas para la colección de muestras.

Prácticas Generales para muestreo de ^2H , ^{18}O y ^3H :

- Se requiere botellas plásticas de alta densidad de 50 mL con doble tapa (500 mL para tritio).
- Se purga una vez el frasco con el agua a muestrear.
- Se procede a coleccionar la muestra llenando completamente la botella, para no dejar burbujas de aire. (En caso de que las muestras sean enviadas por vía aérea es conveniente llenar solamente 2/3 de las botellas).
- Al mismo tiempo se debe registrar en la libreta de campo información completa de la muestra para tener un respaldo.
- Se parámetros físico-químicos in situ de pH, la temperatura y conductividad (y la alcalinidad y oxígeno disuelto si se tienen los aparatos necesarios). La información de estos parámetros, debe ir registrado en la libreta de campo, para luego hacer el análisis integrado de los resultados.

- Las muestras se almacenan en un lugar fresco y oscuro hasta el momento de su envío al laboratorio.

Prácticas Generales para muestreo de ^{13}C en Carbonatos Disueltos:

- Se debe conocer la composición química de carbonatos, bicarbonatos y sulfatos presentes en el agua a ser muestreada.
- Se requiere de un frasco plástico de 2 litros de boca ancha y con tapa doble.
- Generalmente se utilizan 2 litros de agua y se ajusta el pH a 11 con una solución de NaOH ^6N libre de carbonatos.
- Se agrega la cantidad previamente requerida de BaCl_2 , calculada de acuerdo a las concentraciones de carbonatos y sulfatos presentes, donde precipitarán ambos compuestos como sulfatos y carbonatos de bario.
- Se agita la muestra y se tapa de tal forma que quede herméticamente cerrada.
- Se rotula el frasco con una etiqueta autoadhesiva indicando: fecha, hora, nombre, lugar y coordenadas de muestreo.
- Se deben mantener las botellas en un lugar fresco, hasta su análisis.
- Si las muestras son enviadas a otro laboratorio para su análisis, se dejan decantar y cuidadosamente se elimina el líquido sobrenadante y se envía sólo el precipitado.

Prácticas Generales para Muestreo de ^{15}N Y ^{18}O :

- Se requiere botellas plásticas de un litro con doble tapa
- El volumen de muestra a tomar dependerá de la concentración química de nitratos del agua.
- Se requiere del orden 4 - 5 mg/l de nitratos presentes en el agua para el análisis. Si ésta concentración es menor, se debe tomar un mayor volumen de muestra, del orden de 2 a 5 litros.

- Se rotula el frasco con una etiqueta autoadhesiva indicando: fecha, hora, fuente de agua, lugar de muestreo, coordenadas y otra información útil (aguas muy saladas, acidificadas, con aceite).
- Las muestras se almacenan en un lugar fresco y oscuro hasta su análisis.

En lagos o embalses

Para el monitoreo en lagos o embalses, generalmente se realizan observaciones regulares, al menos durante un año completo, para cuantificar la variabilidad estacional de los parámetros que se necesitan para completar los cálculos del balance de masas isotópico.

En las variables para el balance de masa isotópico en lagos de debe tener en cuenta:

Precipitación

Para realizar los cálculos del balance de masas isotópico se necesitan medidas mensuales de la precipitación y de la composición isotópica del lago estudiado. Si nos es posible tener las muestras mensuales, se recomienda obtener la información de una estación meteorológica más cercana al lago.

Flujos de entrada y salida superficiales

La aproximación del balance de masas isotópico requiere un conocimiento adecuado tanto del caudal de agua que entra y sale del lago como de la composición isotópica. Para ello se deben realizar mediciones sistemáticas de ambas cantidades para los flujos de entrada/salida más importante. Para los flujos de entrada (ríos) con caudales que varían estacionalmente las medidas de las descargas y las medidas isotópicas se deben realizar cada mes o al menos durante las condiciones de caudal alto y bajo.

Composición isotópica del agua del lago

La aproximación del balance de masas isotópico supone que el lago está bien mezclado. Este supuesto se ha de evaluar minuciosamente. Se debe comprobar también la homogeneidad isotópica del sistema, horizontal y verticalmente. El proceso de muestreo debe incluir un reconocimiento del agua, tanto superficial como profunda, en zonas representativas del lago.

Composición isotópica del flujo de entrada subterráneo

Se deben investigar los piezómetros y los pozos excavados situados en el sentido más probable del flujo de agua subterránea en las proximidades del lago. Como la composición isotópica del agua subterránea poco profunda no revela normalmente una variabilidad significativa a corto plazo, no es necesario realizar observaciones mensuales sistemáticas de todas las regiones accesibles. Normalmente es suficiente llevar a cabo dos campañas de muestreo en estaciones con condiciones extremas (por ejemplo, en un periodo seco y uno húmedo, respectivamente) para caracterizar la composición isotópica de la componente del agua subterránea del flujo de entrada total, del lago. Cuando se examinan los pozos excavados se ha de comprobar que todos los pozos están en explotación y que las muestras de agua no están sometidas a evaporación.

Flujo de evaporación

Para evaluar los caudales de entrada / salida de agua subterránea a partir de las hipótesis del balance de masas isotópico, se debe de conocer la tasa de evaporación del lago (E). Para lo anterior, se debe aplicar los diferentes métodos para estimar la evaporación mediante un depósito de agua abierto.

Preservación de la muestra

Las muestras isotópicas se han de almacenar en botellas de cristal, en lugares oscuros, preferiblemente a bajas temperaturas, y se debe de adicionar I₂+KI o HgCl₂.

Las soluciones inhibidoras son:

Solución de I₂+KI: se prepara mediante la disolución de 15 mg de I₂ y 30 mg de KI por mL de agua (ultra)pura; el agua queda inhibida añadiendo 0,5 mL de esta solución por Litro de muestra

Solución de HgCl₂: se prepara mediante la disolución de 70 mg HgCl₂ por mL de agua (ultra)pura; al agua se le añade 3 mL de esta solución por L de muestra de agua.

7.3. Monitoreo de Aguas Subterráneas

El presente capítulo, presenta los conceptos y prácticas básicas para evaluar los recursos de las aguas subterráneas, necesarios para soportar la estrategia y políticas de protección y conservación del recurso hídrico subterráneo con miras a su posterior aprovechamiento.

Esta evaluación de los recursos de las aguas subterráneas consta de varios componentes esenciales (OMM, Guía de prácticas hidrológicas, 2011):

- a) la determinación de los tipos de acuíferos y de su distribución en el área investigada;
- b) la evaluación de las variaciones espaciales y temporales de los niveles de agua subterránea (superficies piezométricas) para cada acuífero por efecto de procesos naturales y artificiales.
- c) la evaluación de la magnitud y distribución de las propiedades hidráulicas (por ejemplo, porosidad o permeabilidad) para cada acuífero, siendo un requisito obligatorio para cualquier tipo de evaluación cuantitativa;
- d) el conocimiento de los procesos que facilitan o afectan la recarga o descarga de cada acuífero, a saber: la cantidad efectiva de precipitación que llega al nivel freático, los efectos en éste de la evapotranspiración, la naturaleza de la interacción entre el agua subterránea y el agua superficial, y la ubicación y cantidad de la descarga proveniente de manantiales y pozos de bombeo; y
- e) la integración de los datos de agua subterránea, con el fin de corroborar la información de varias fuentes, comprender la importancia relativa de los diversos procesos en el sistema de aguas subterráneas, y evaluar la capacidad estática o dinámica de un sistema de aguas subterráneas para alcanzar objetivos generales o específicos (habitualmente, abastecimiento de agua).

La mejor manera de contar con dicha información es la instalación de una red de monitoreo de niveles y calidad del agua subterránea, cuyo diseño dependerá del propósito que se establezca al inicio del programa de monitoreo, y la cual podrá irse adaptando a medida que se avance en la recolección de información. Estas redes pueden constituir sistemas primarios, las cuales sirven para detectar cambios generales en el flujo del agua subterránea y sus tendencias de calidad, con objeto de aportar el conocimiento científico necesario para entender el recurso de agua subterránea; y sistemas secundarios y terciarios, los cuales permiten evaluar y controlar el impacto de riesgos específicos del agua subterránea (Tuinhof, Foster, & Kemper, 2006).

Antes de iniciar cualquier tipo de programa, es necesario un buen conocimiento hidrogeológico del área de estudio, lo que permitirá evaluar aspectos importantes del agua subterránea en su condición básica inicial, para así definir no solo los sitios de muestreo, sino la frecuencia. Es preciso determinar el modelo hidrogeológico conceptual, el cual se realiza con base a la recolección de datos, análisis e interpretación de información geológica, hidrológica, hidráulica, hidroquímica e isotópica, permitiendo tener una visión del comportamiento de los acuíferos o sistemas acuíferos de un área dada a la escala deseada (IDEAM, 2014b).

En la **Figura 150**, se presentan los componentes que se deben considerar para la elaboración de un modelo hidrogeológico conceptual, fundamentales para poder sintetizar las condiciones básicas del estado y dinámica de las aguas subterránea en el subsuelo y sus relaciones con los cuerpos de agua superficial y los aportes atmosféricos (IDEAM, 2014b).

Marco geológico, geofísico y estructural que permitan conocer la distribución horizontal y variación de los espesores de los estratos.

Descripción de los acuíferos, en cuanto a litología (granular, fracturado, granular y fracturado, cavidades de disolución) condiciones de flujo (confinado, libre o semiconfinado), mineralogía, definición de zonas de recarga, tránsito y descarga.

Descripción del basamento hidrogeológico, límites topográficos (extensión lateral y vertical de los acuíferos y estratos confinantes), mineralogía e importancia de las fracturas.

Modelo hidrológico con datos de Precipitación, Evapotranspiración, Intrusión

Relaciones río-acuífero, direcciones de flujo, parámetros hidráulicos, usos del agua, características de las captaciones, características hidrogeológicas naturales

Vulnerabilidad y las fuentes potenciales puntuales y/o difusas de contaminación

Figura 150. Componentes de un modelo hidrogeológico conceptual. Fuente: (IDEAM, 2002)

Se recomienda realizar un inventario de puntos de agua con el propósito es tener un mejor conocimiento de la situación actual, tanto de las condiciones de los acuíferos como del aprovechamiento de las aguas subterráneas. Este inventario debe realizarse utilizando el Formulario Único Nacional de Aguas Subterráneas (FUNIAS)¹⁰, en donde se registran tanto pozos, aljibes y manantiales, con su respectiva localización geográfica, datos del propietario, uso del pozo, profundidad del nivel estático, profundidad del nivel dinámico, caudal de producción, tiempo de bombeo, características del pozo (profundidad, diámetro, profundidad de los filtros, columna litológica) y conductividad eléctrica del agua. Se recomienda dedicar el máximo esfuerzo a esta actividad, tanto en personal con gran experiencia como en recursos económicos, debido a que un buen inventario permitirá tener un mejor

¹⁰ Formulario Único Nacional de Aguas Subterráneas (FUNIAS), disponible en: <http://www.ideam.gov.co/documents/14691/15028/Formulario+de+Inventario+Puntos+de+aguas+subterranas.pdf/cd704e1b-c03a-418f-9448-08af6755a2c8>

conocimiento hidrogeológico del área de estudio y la vez contribuye a optimizar las otras actividades.

En esta actividad es muy recomendable no intentar ahorrar dinero en la calidad de los datos obtenidos o en su elaboración. Casi siempre no será posible, ni conveniente, realizar el inventario de todos los pozos existentes, sino solamente de los más característicos. Dependiendo de las condiciones del área, donde se considere un fácil acceso, el rendimiento de un técnico al hacer un inventario puede ser de 60 a 120 puntos por mes recolectando la mayor información posible en campo; si es necesario se deberá considerar el tiempo que requiera para completar la información que no se obtuvo en campo a partir de información secundaria como carpetas de las concesiones de las Autoridades Ambientales Competentes. En el caso de un estudio en detalle, donde se tiene que cuantificar el balance de las aguas subterráneas, será necesario inventariar el mayor número posible de pozos y manantiales, que permitan conocer los volúmenes de descarga artificial y natural de las aguas subterráneas (EPAM S.A ESP, MAVDT, IDEAM, 2011b).

Con una línea base establecida, se procede a plantear un programa de monitoreo de aguas subterráneas, considerando las etapas de planificación presentadas en el *Capítulo 7- PROCEDIMIENTO GENERAL PARA EL MONITOREO DEL AGUA*, donde se indica el procedimiento metodológico que se debe seguir para cualquier tipo de monitoreo.

En función de los propósitos establecidos en la planificación, un monitoreo ya sea de cantidad o de calidad, puede considerar un muestreo a pozos de monitoreo-piezómetros, o pozos de producción (**Figura 151**), además de un monitoreo de aljibes-barrenos o manantiales (**Figura 152**). También es una práctica común el muestrear cuerpos de agua superficial y de lluvias para establecer relaciones entre aguas superficiales y aguas subterráneas, permitiendo así una integración de aportaciones al caudal base o relaciones entre la química del agua. Si el objetivo es estimar la recarga de acuíferos, se puede realizar monitoreo en la zona vadosa o zona no saturada.



Figura 151. Toma de niveles en pozos profundos. Fuente: Izquierda: Coralina; derecha: Corpocesar.

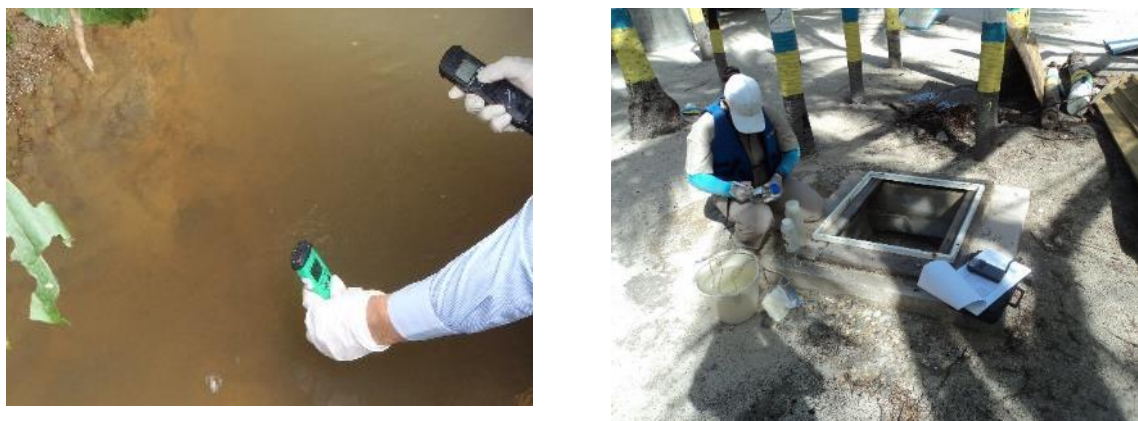
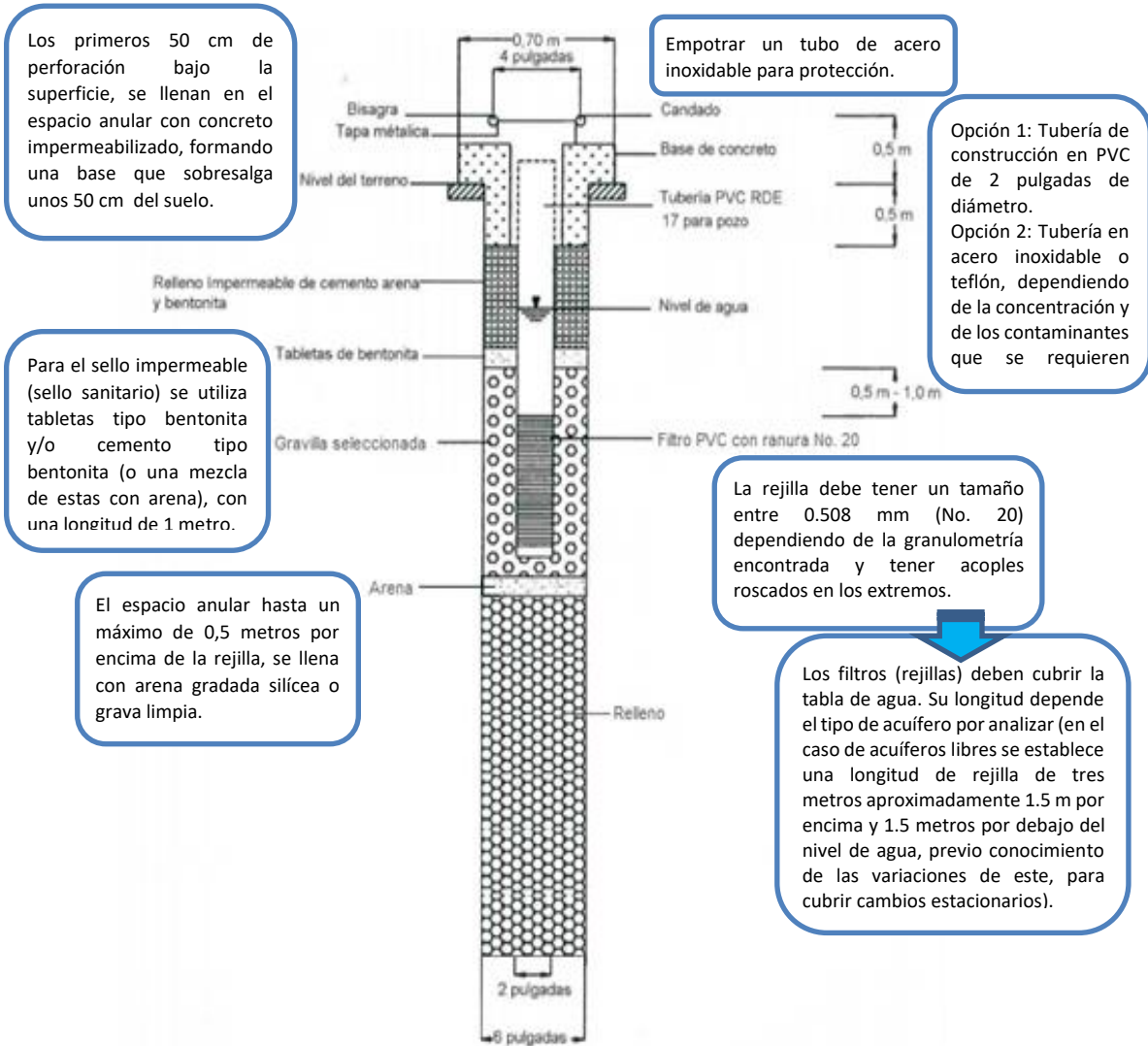


Figura 152. Determinaciones de parámetros in situ. Izquierda: muestreo de manantiales. Fuente: s.f. Derecha: Muestreo de aljibes. Fuente: Coralina

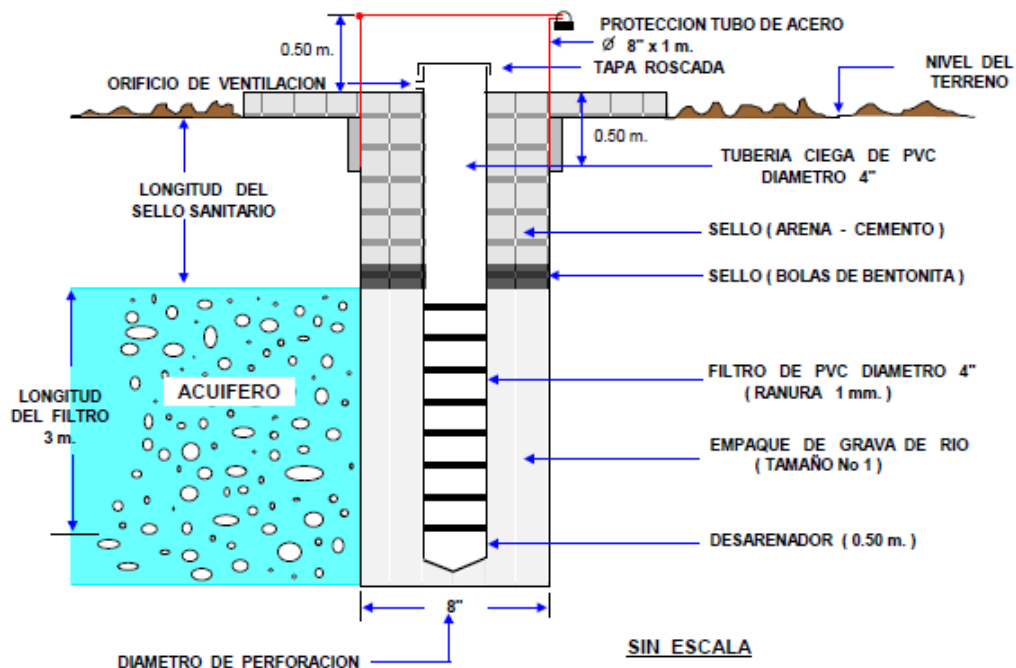
Los **piezómetros** constituyen pozos de pequeño diámetro con longitudes de filtro cortas (2-5m) dedicados exclusivamente al monitoreo. Existen tres tipos de piezómetros: sencillos, dobles y múltiples (piezómetros anidados), los cuales se instalan dependiendo del tipo de acuífero a evaluar. Para su perforación e instalación, se requieren procedimientos adecuados, los cuales se encuentran disponibles en la Norma Técnica Colombiana-ICONTEC, NTC 3948 (ICONTEC, 1996a), la cual detalla las metodologías para la construcción, métodos de perforación, materiales y procesos de limpieza y desarrollo.

Algunas especificaciones técnicas de la norma se presentan a continuación (**Figura 153**), sin embargo hay que considerar que los materiales y las dimensiones de los piezómetros que se utilizan como pozos de monitoreo, pueden variar de acuerdo a las situaciones particulares de cada caso (**Figura 154**).



Una vez instalado el piezómetro se debe proceder a su desarrollo o purga mediante muestreador (bailer). Esta acción se extiende hasta cuando el agua se haya clarificado o hasta que se haya removido un volumen de agua tal que se asegure que el agua afectada por la perforación y las actividades de instalación ha sido totalmente purgada. Una vez finalizado el desarrollo se efectúan pruebas de bombeo o slug test para conocer las propiedades hidráulicas del acuífero.

Figura 153. Consideraciones técnicas para la construcción de piezómetros Norma ICONTEC NTC-3948. Fuente: (ICONTEC, 1996a).



- NOTAS : 1. La tapa del pozo debe quedar como máximo a 30 cm. sobre el nivel del terreno.
2. La longitud del sello sanitario se establecerá una vez se realice la perforación de sondeo.

Figura 154. Pozo de monitoreo convencional. Fuente: CVC, 2004, en (EPAM S.A ESP, MAVDT, IDEAM, 2011b).

La OMM, en su documento Guía de prácticas hidrológicas, 2011, capítulo 6, presenta algunas consideraciones en la instalación de pozos de observación¹¹.

Es importante que el diseño de los pozos de monitoreo, no solo cumpla con los requisitos para el desarrollo del muestreo, sino que cuente con las especificaciones para evitar la contaminación y perturbación del acuífero. En lo posible se debe evitar el uso de desengrasantes, lubricantes, lodos, aceites y bentonita durante la perforación, cuando se busca realizar un monitoreo de compuesto orgánicos (ICONTEC, 1996b).

¹¹ OMM. (2011). Guía de Prácticas Hidrológicas. Ginebra, Suiza: Organización Meteorológica Mundial, N°168. Disponible en: http://www.whycos.org/chy/guide/168_Vol_I_es.pdf

Los **pozos de producción** son aquellos que han sido construidos para abastecimiento de agua subterránea y los cuales son utilizados a la par para el monitoreo. Cuando estos pozos se encuentren abandonados, pueden ser adecuados para el monitoreo, siempre y cuando cumplan con las especificaciones mínimas como, el reconocimiento de su diseño y disposiciones sanitarias que impidan el acceso de contaminantes desde la superficie.

Estos pozos pueden estar captando el agua subterránea de una sola o de varias unidades acuíferas, por lo que hay que considerar que dependiendo de los objetivos se puede monitorear el agua subterránea de un acuífero o un sistema acuífero.

Requisitos mínimos deben cumplir los pozos de monitoreo

En todos los casos, los pozos de monitoreo (piezómetros, pozos de producción y hasta aljibes-barrenos), deben cumplir con las especificaciones técnicas de monitoreo como:

- Estar georeferenciados y nivelados a un BM único o una red de puntos del IGAC referenciados al datum nacional, siendo recomendable su medición con precisión centimétrica.
- Captar una única unidad hidrogeológica, acorde a la priorización del sistema acuífero. Sin embargo, si se considera mediciones hidrogeoquímicas o de niveles, se recomienda que estos pozos solo capten el acuífero objeto de monitoreo, ya que una recolección de “mezcla de agua subterránea”, puede presentar grandes diferencias en origen (en términos de área y época de recarga), evolución hidrogeoquímica (en términos de la modificación a través de la interacción acuífero-agua y la atenuación natural de contaminantes) y en el ciclo de abatimiento-recuperación (Foster S. , Hirata, Gomes, D’Elia, & Paris, 2002), (Tuinhof, Foster, & Kemper, 2006). Si se trata de monitoreo de calidad del agua subterránea para un determinado uso (abastecimiento doméstico, uso agrícola o industrial), se debe monitorear exactamente el agua que se capta, sin importar que sean aguas mezcladas.

- En el caso de pozos que estén actualmente en funcionamiento, es necesario que solo sean medidos en un estado estático y tener una purga adecuada.
- Los puntos deben ser probados hidráulicamente para asegurarse si conexión con el acuífero de interés.
- Permitir el libre paso de una sonda para medición de niveles y permitir el libre acceso de un equipo de recolección de muestras para monitoreo de calidad.
- Cumplir con las disposiciones sanitarias como cerramiento, tapa de seguridad y sello sanitario.
- Tener zonas de protección definidas.
- Tener una ficha de levantamiento que incluya codificación, fotografía del pozo, características de diseño, fecha de instalación, propiedades hidráulicas del acuífero y del pozo obtenidas a partir de pruebas de bombeo, opcionalmente descripción del sistema de recepción y transmisión de datos, fechas de limpieza, desarrollo y mantenimiento. Esta ficha puede ser desarrollada por cada usuario o el usuario puede desarrollar un formato que se adecue a sus necesidades.

7.3.1. Cantidad

Cuando se realiza un monitoreo de cantidad, lo que se busca es la adquisición de información acerca de los niveles de aguas subterráneas (presiones hidráulicas); la dirección y la cantidad de los flujos de agua subterránea, incluyendo áreas de recarga y descarga, y balances de aguas subterráneas (Uil, Geer, Gehrels, & Kloosterman, 1999).

Los parámetros que en este caso se consideran para ser medidos son:

- ✓ Niveles de agua dentro de un pozo de observación;
- ✓ Descarga por puntos de abstracción y por manantiales; se considera en este punto el abatimiento del nivel freático del acuífero en cualquier punto cuando se está extrayendo agua y los caudales de explotación.
- ✓ Índices de recarga y descarga naturales;
- ✓ Recarga inducida (disposición de efluentes, infiltración de las aguas superficiales para purificación y almacenamiento de agua potable, etc.);
- ✓ Filtración de los sistemas de distribución y alcantarillado.

Se presenta a continuación como debe ser medidos estos parámetros, lo cual debe considerar los siguientes aspectos:

Selección de los puntos de monitoreo

Existen diferentes criterios para determinar qué puntos se deberán muestrear para un monitoreo de cantidad; según Livni, Avisar, & Mamane, (2015) y la (WMO, 1989), los puntos deben tener:

- ❖ Una distribución espacial y profundidad permitiendo una representación razonable dentro del acuífero. Es recomendable solo muestrear una sola unidad acuífera.
- ❖ Una distribución espacial que permitan el desarrollo de las secciones transversales paralelas y perpendiculares a las trayectorias del flujo regional de aguas subterráneas.
- ❖ Una distribución espacial que permita muestrear tanto acuíferos libres como confinados.

- ❖ Una distribución que represente heterogeneidad y anisotropía: los puntos deben estar muestreando unidades acuíferas que tengan características similares, en la hidrodinámica y la hidroquímica, como en el régimen de las aguas subterráneas.
- ❖ Una distribución que permita describir la recarga, la naturaleza y alcance de la interacción de agua subterránea/superficie. Por lo tanto, los puntos pueden seleccionarse sobre la base de estar cerca de sitios de agua superficial (como arroyos, lagos, humedales y esteros) o estar próximos a fuentes de recarga.
- ❖ Una distribución que permita una representatividad del uso del agua subterránea, en el área, incluyendo riego, ganadería y suministro de agua doméstico y urbano.

Cuando se seleccionan puntos de monitoreo para abastecimiento de agua, se recomienda el monitoreo algunos pozos alejados del sitio de extracción, para evaluar el efecto del bombeo sobre las características dinámicas del acuífero.

- ❖ Una distribución que permita un buen desarrollo de situaciones logísticas, tales como funcionamiento, condición y acceso del punto.

Un método práctico que permite identificar los mejores sitios para perforar pozos de observación o identificar las trayectorias de flujo regional, es la elaboración previa de mapas de profundidad de nivel de agua, mapas de superficie piezométrica, mapas de nivel freático y secciones transversales piezométricas, siempre y cuando se cuenten con datos históricos de profundidades del nivel de agua (OMM, Guía de prácticas hidrológicas, 2011).

Los mapas de profundidad del nivel de agua proporcionan una indicación de la profundidad a la que se habrá de perforar para encontrar agua, además de las

variaciones zonales de las fluctuaciones estacionales de los niveles de agua, cuando se cuenta con diferencias de profundidad de niveles entre dos periodos de tiempo. Por otro lado, los mapas piezómetros los cuales están basados en la elevación del nivel de agua en un pozo respecto a una referencia común, como el nivel del mar, y los mapas de niveles freáticos que representan el nivel de un acuífero superficial, permitirán deducir la dirección del flujo de agua subterránea (OMM, Guía de prácticas hidrológicas, 2011).

Con respecto a las secciones transversales, útiles para determinar la dirección vertical del flujo de agua subterránea, la OMM, 2011, expone que estas secciones se pueden obtener con datos de superficie piezométrica obtenidos de múltiples acuíferos o datos de profundidad obtenidos en todos los emplazamientos de una red de pozos de observación o en muchos de ellos.

Frecuencia de monitoreo

La frecuencia de mediciones en cantidad depende de los objetivos planteados, el uso previsto para la información y del nivel de análisis requerido de los datos (Taylor & Alley, 2001). Al momento de especificar una frecuencia en las mediciones, lo que se busca es definir y registrar los cambios en el tiempo que pueda presentar el agua subterránea, ya sea a largo plazo causadas por cambios estacionales en la recarga natural y el bombeo persistente, o las fluctuaciones a corto plazo, causadas por los efectos de períodos breves de bombeo intermitente, cambios barométricos y por efecto de la marea, en caso de ubicación cercana al mar.

La frecuencia debe ajustarse al proceso y varias mediciones deben llevarse a cabo dentro del período en el que cambio de la variable ocurre (Uil, Geer, Gehrels, & Kloosterman, 1999). Según el Advisory Committee on Water Information, (ACWI, 2009), se deben considerar también factores como el tipo de acuífero, el flujo de agua subterránea, las tasas de recarga, los descensos de niveles y los cambios

climáticos. La Figura 155 ilustra los factores que debe ser considerados en la determinación de la frecuencia de medición de cantidad de agua subterránea.

También se puede tener en cuenta técnicas estadísticas las cuales ofrecen posibilidades para extrapolar una óptima frecuencia, siempre y cuando se cuenten con series de medición (Uil, Geer, Gehrels, & Kloosterman, 1999).

La Tabla 29, presenta un ejemplo de como la frecuencia puede ser ajustada dependiendo del tipo de monitoreo que se busque desarrollar. En este caso se considera un monitoreo de primario y un monitoreo de vigilancia. En el caso que se esté desarrollando una línea base de cualquier tipo de acuífero, se recomienda un ciclo de muestreo con una alta frecuencia de monitoreo similar al del monitoreo de tendencias, pudiendo ser reducido cuando se complete la información de la línea base (ACWI, 2009).

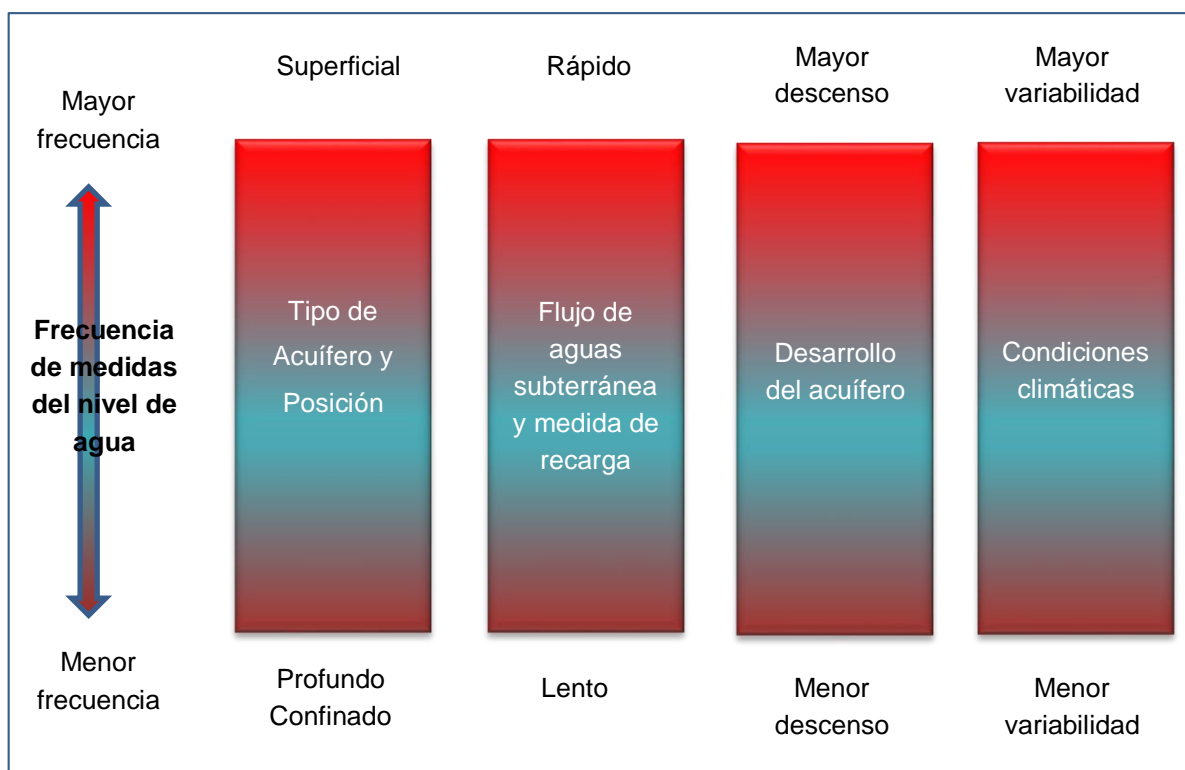


Figura 155. Factores para determinar la frecuencia de monitoreo de niveles de agua subterránea (Taylor y Alley, 2001). Tomado y modificado de (ACWI, 2009).

Tabla 29. Ejemplo de frecuencia de monitoreo de niveles de agua subterránea teniendo en cuenta factores ambientales.

Categoría de monitoreo	Tipo de acuífero	Descensos de acuíferos cercanos a largo tiempo		
		Descensos pequeños	Descensos moderados	Descensos grandes
Monitoreo de tendencias	Libre			
	Baja recarga (< 5 pulg/año)	Una vez por trimestre	Una vez por trimestre	Una vez por mes
	Alta recarga (> 5 pulg/año)	Una vez por trimestre	Una vez por mes	Una vez por día
	Confinado			
	Baja conductividad hidráulica (< 200 pies/día)	Una vez por trimestre	Una vez por trimestre	Una vez por mes
	Alta conductividad hidráulica (> 200 pies/día)	Una vez por trimestre	Una vez por mes	Una vez por día
Monitoreo de vigilancia	Libre			
	Baja recarga (< 5 pulg/año)	Cada tres años	Una vez al año	Dos veces al año
	Alta recarga (> 5 pulg/año)	Cada tres años	Dos veces al año	trimestre
	Confinado			
	Baja conductividad hidráulica (< 200 pies/día)	Cada tres años	Cada dos años	Una vez al año
	Alta conductividad hidráulica (> 200 pies/día)	Cada tres años	Cada dos años	Una vez al año

Fuente: (ACWI, 2009)

IGRAC, (2008), presenta algunas consideraciones:

- En regiones áridas, donde las fluctuaciones son prácticamente ausentes, se recomienda una frecuencia de observación muy baja, una o dos veces al año.
- En climas húmedos y regiones semiáridas es posible que la frecuencia aumente a cuatro veces al año.

Hay que considerar que en el país se observan tres tipos de regímenes de precipitación que influyen en la elección de la frecuencia de monitoreo: la zona interandina y la llanura del Caribe con un régimen bimodal, es decir, dos períodos de lluvia intercalados con dos períodos secos; las llanuras orientales con un régimen

típicamente monomodal, es decir, un gran período de lluvias seguido de un período seco; y un régimen poco contrastado, correspondiente a la llanura del Pacífico. Se busca que las mediciones correspondan a los regímenes de precipitación que se presentan en cada área; es decir que cada lectura se haga en el mes más seco y más húmedo en cada sitio, de acuerdo con los registros de precipitación.

De la misma manera, cuando se definen las frecuencias de monitoreo, se debe tener en cuenta la duración que éstas deben tener, dependiendo del uso previsto de los datos de nivel de agua. En el caso necesitar un mapa de la superficie de una acuífero, los datos deben ser colectados en el menor tiempo posible, de manera que se midan las cabezas hidráulicas en el acuífero bajo las mismas condiciones hidrogeológicas; se debe buscar que los datos de nivel de agua destinados para este propósito duren un periodo de días o semanas, dependiendo de la logística para tomar mediciones en varios puntos de observación.

La Tabla 30, presenta la frecuencia de medición de niveles de agua dependiendo de uso previsto para el programa. Datos a corto plazo son colectados en periodos de días, semanas o meses, mientras que información recolectada para largos periodos de tiempo abarcan medidas anuales o décadas.

Tabla 30. Longitud típica de recolección de datos de nivel de agua en función del uso previsto.

Uso previsto de datos de nivel de agua	Longitud típica de registros hidrológicos requeridos			
	Días/semanas	Meses	Años	Décadas
Para determinación de propiedades hidráulicas de un acuífero (pruebas de bombeo)	X	O		
Mapeo de la altura de la tabla de agua o superficie potenciométrica	X	O		
Monitoreo de los cambios a corto plazo en recarga y almacenamiento	X	X	O	
Monitoreo de los cambios a largo plazo en recarga y almacenamiento			X	X

Uso previsto de datos de nivel de agua	Longitud típica de registros hidrológicos requeridos			
	Días/semanas	Meses	Años	Décadas
Monitoreo de los efectos de la variabilidad climática			X	X
Monitoreo de los efectos regionales de desarrollo de aguas subterráneas			X	X
Análisis estadístico de las tendencias de los niveles de agua			X	X
Monitoreo de los cambios de dirección de flujo de las aguas subterráneas	O	X	X	X
Monitoreo de las aguas subterráneas y la interacción con el agua superficial	X	X	X	X
Modelación numérica del flujo y/o transporte de contaminantes del agua subterránea	O	X	X	X

Nota: (X) Más aplicable para uso previsto, (O) A veces aplicable para el uso previsto. Tomado de (Taylor & Alley, 2001).

Tipo de mediciones

El monitoreo de niveles de agua subterránea puede involucrar mediciones tanto “continuas” como “periódicas”. Las mediciones continuas son aquellas que se programan en tiempos específicos, requiriendo la instalación de sensores automáticos, que recolectan la información a una frecuencia determinada, proporcionando datos con una muy alta resolución. Para el caso de las mediciones periódicas, son las realizadas en intervalos programados (semanas, meses o años) y actualmente son las más utilizadas para el monitoreo ya que los costos de desarrollo son más bajos en comparación con la instalación de equipos automáticos.

Es recomendable que algunos puntos donde las respuestas hidráulicas del acuífero sean rápidas, cuenten con equipos que permitan mediciones continuas, ya que si emplean mediciones periódicas para este caso, mucha información se puede perder o puede ser sesgada. Tal es el caso de estar monitoreando acuíferos cársticos, sujetos a respuestas rápidas a episodios de lluvia, áreas de difícil acceso o pozos

de irrigación o suministro de agua (Sánchez y Varela, 1996, en Uil, Geer, Gehrels, & Kloosterman, 1999).

Este tipo de mediciones involucra el nivel piezométrico, y variables hidráulicas, las cuales son tomadas directamente en los puntos de observación ya sea manualmente o mediante instrumentos de registro automáticos.

Medición de niveles

Los niveles de agua en muchos acuíferos siguen un patrón cíclico natural de fluctuación estacional; normalmente los niveles aumentan durante la época de lluvias, debido a la recarga del sistema por mayores precipitaciones, y descienden durante el verano debido a una menor recarga y una mayor evapotranspiración (Taylor & Alley, 2001).

Para poder detectar estos cambios en el régimen del flujo del agua subterránea, se realiza una medición de niveles del nivel freático. Existen dos tipos de niveles; estático y dinámico. El primero hace referencia al nivel estacionario del pozo y el dinámico corresponde al nivel cuando el pozo se encuentra en bombeo o en recuperación.

La toma de niveles requiere que los **pozos se encuentren nivelados a una cota de referencia**, y además que el sitio de medida en la boca del pozo esté claramente establecida.

Es recomendable en este tipo de medición, tener una referencia de las tendencias de los niveles piezométricos para poder validar la información que se recolecta en campo. Si se cuenta con datos existentes de nivel piezométrico para el punto, se pueden hacer gráficos de nivel vs tiempo, para identificar tendencias y así cuando se tome el registro del nivel se pueda tener el criterio para decir si es un dato certero ó no. En el caso de que el dato no concuerde con la tendencia, se tendrá la oportunidad de investigar ese mismo día cuales fueron las causas probables del desfase.

- Medición de parámetros hidráulicos

La evaluación de parámetros hidrogeológicos como permeabilidad, transiividad, porosidad, coeficiente de almacenamiento, etc., es una de las tareas básicas en cualquier estudio hidrogeológico, los cuales se vuelven la base para definir el tipo de acuífero, filtraciones entre acuíferos o desde la superficie del terreno, comunicación del pozo con otras captaciones próximas, caudales óptimos de bombeo, tiempos de tránsito de contaminantes, existencia de bordes impermeables y zonas de recarga, conexión con cuerpos de agua superficiales, entre otros.

Lo más útil y fiable para este tipo de evaluación es realizar ensayos de bombeo que permiten obtener conocimientos de las variables hidrogeológicas, así como también tener control de los caudales de explotación. Estos ensayos consisten en bombear el pozo, a caudal constante o caudal variable, y analizar el descenso de los niveles piezómetros tanto en el pozo de bombeo como en los pozos o piezómetros circundantes, hasta alcanzar un estado de equilibrio, para luego apagar el equipo de bombeo y medir la recuperación del nivel, también a diversos intervalos de tiempo. También se pueden hacer pruebas de bombeo en aljibes, sin embargo estas requieren de una atención especial debido a su gran diámetro, en los cuales se genera un almacenamiento de agua que afecta la interpretación de los datos por métodos tradicionales (Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2011) .

Existen dos tipos básicos de métodos de ensayo; ensayos de bombeo en régimen permanente y ensayos de bombeo en régimen transitorio o variable (**Figura 156**). Para pozos de pequeño diámetro se utilizan pruebas denominadas slug test que cumplen con los mismos objetivos de las pruebas de bombeo.

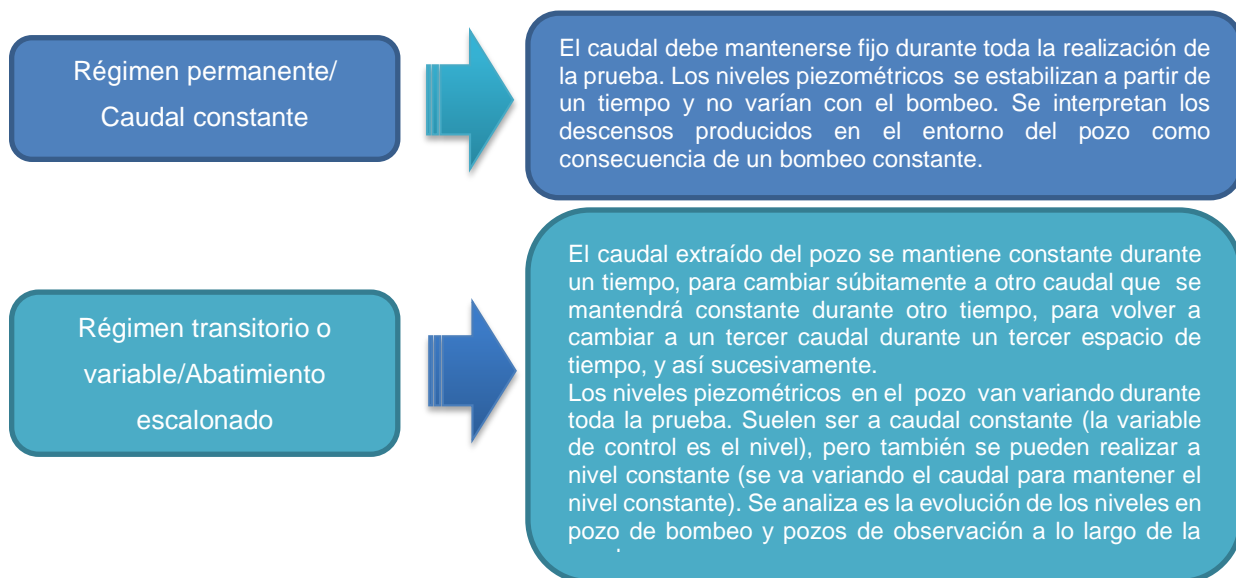


Figura 156. Tipos de pruebas de bombeo.

La **Figura 157**, es un diagrama esquemático de la instalación de un ensayo típico en un acuífero confinado de espesor, b , con tres pozos de observación, denominados A, B y C, los cuales están situados a distancias variables (r en el caso del pozo B) del pozo bombeado. La localización de los pozos de observación con respecto de los de control, dependerá de la precisión que se necesite según sea el caso del programa de monitoreo.

Cuando se pone en marcha la bomba, el nivel de agua desciende, creando un cono de depresión en la superficie piezométrica del acuífero e induciendo un descenso de nivel, s , medido en el pozo B, que es la diferencia entre la altura piezométrica inicial, h_0 , y la altura piezométrica de bombeo, h (OMM, Guía de prácticas hidrológicas, 2011).

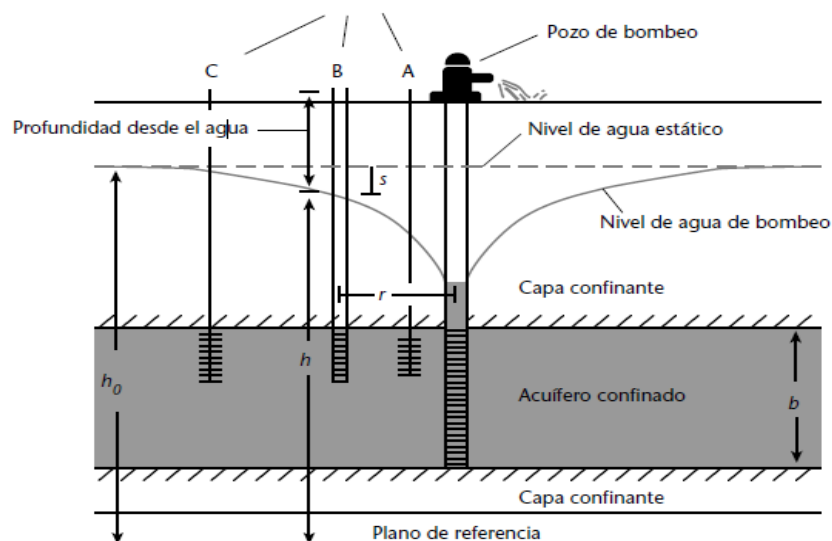


Figura 157. Diagrama esquemático de un ensayo de bombeo típico en el que aparecen indicadas las diversas mediciones. (Tomado de Heath, 1983 en (OMM, Guía de prácticas hidrológicas, 2011).

Los ensayos de bombeo suelen durar desde 8 horas hasta un mes o más, dependiendo del tiempo necesario para lograr un nivel estable de agua durante el bombeo. Cuando se inicia el bombeo, se observa un descenso del nivel, disminuyendo este de manera no lineal con la distancia al pozo bombeado y aumentando, también de manera no lineal, con el tiempo. Los valores observados son las variaciones del descenso de nivel a lo largo del tiempo (Ibin).

- **Medición de caudal y flujos de corriente subterránea**

Considerando que el caudal de un pozo o aljibe de bombeo varía en función de los cambios de nivel de agua subterránea, es necesario efectuar mediciones repetidas para determinar el ritmo de variación (OMM, Guía de prácticas hidrológicas, 2011).

Los métodos de medición más comunes incluyen el llenado temporizado de un volumen calibrado, caudalímetros y mediciones del caudal del orificio (American

Society for Testing and Materials International, 2000), en (OMM, Guía de prácticas hidrológicas, 2011).

Según la OMM, el volumen calibrado consiste en medir el tiempo necesario para llenar un volumen calibrado con el agua que es bombeada del punto de observación. La exactitud en la medición dependerá de cuan preciso sea en la medición del tiempo y de las operaciones de llenado. Estas operaciones pueden variar dependiendo de los niveles de bombeo, ya que cuando se presentan niveles muy bajos, estas mediciones pueden hacerse mediante el uso de alguna cubeta o bidón graduados, mientras que cuando los caudales son altos, se puede pensar en redirigir los flujos a un depósito o recipiente de mayor envergadura para realizar las mediciones.

Con respecto a los caudalímetros, corresponden a medidores mecánicos, eléctricos y electrónicos que miden el flujo en el interior de un tubo y que proporcionan ya sea una lectura instantánea del caudal o una lectura totalizada.

El método de medición de caudal mediante orificio, consiste en un montaje que incluye un orificio, que se fija con una brida, al extremo de una tubería de descarga horizontal. Al ser el diámetro del orificio menor a la tubería de descarga, se crea una contrapresión proporcional al caudal, la cual se mide mediante un tubo manómetro situado a unos tres diámetros de tubería del orificio, corriente arriba, en el centro de la conducción. La presión medida, el diámetro de la tubería de descarga y el diámetro del orificio se utilizan para crear una “tabla de valores” y determinar el caudal. Estas tablas pueden ser consultadas en la Norma 5167-2 (ISO, 2003b).

Si es de interés conocer la dirección y velocidad de flujo de las aguas subterráneas, es posible el uso de mediciones continuas como es el uso de trazadores químicos (tinturas, microbiológicos o trazadores radiactivos). El método consiste en introducir en un pozo o piezómetro un trazador adecuado y observar la disminución de su concentración en función del tiempo. La variación de la concentración depende principalmente de cualquier tipo de flujo que exista dentro del pozo y en menor escala de la difusión del trazador (Rodríguez, 1974).

También para el cálculo de velocidad es posible el uso técnicas ultrasónicas o electromagnéticas.

Materiales y equipos

En el monitoreo de cantidad de aguas subterráneas, se pueden realizar mediciones directas en los puntos de observación como son los pozos, aljibes o manantiales, con instrumentos de operación manual o con instrumentos automáticos de registro continuo. Se presentan algunas descripciones de algunos de los instrumentos más empleados.

- Medición de niveles

La medición directa de los niveles de agua subterránea puede realizarse con instrumentos de operación manual o con ayuda de instrumentos automáticos de registro continuo (EPAM S.A ESP, MAVDT, IDEAM, 2011b).

Existe una amplia gama de medidores disponibles en el mercado; a continuación se presenta descripción para alguno de ellos:

Instrumentos de medición manual

Son conocidos como sondas de nivel, las cuales constan de una cinta muy resistente marcadas con intervalos de un mm con longitudes hasta de 1000 metros dispuestas en carretes balanceados con manija para transportarlo y freno (**Figura 158**). Poseen un sensor que cuando entra en contacto con un líquido conductor, se emite una señal acústica y luminosa clara.



Figura 158. Izquierda: sonda eléctrica con señal acústica y luminosa para medición de profundidad del agua. Derecha: Sonda multiparamétrica que mide niveles y parámetros como pH, redox, conductividad, temperatura, entre otros. Fuente: (Maser, *Productos de agua subterránea*, 2015)

Existen algunos modelos con cintas que no se adhieren a superficies mojadas al interior de los pozos, y con carretes motorizados, además de algunos que incorporan sensores de conductividad eléctrica y temperatura, o diferentes sensores dependiendo de las necesidades del usuario. Para este último tipo de sensores, se operan mediante un teclado integrado con pantalla LCD. La unidad reacciona al contacto del agua con un piloto y una señal sonora. Si se pulsa el botón, el sonido se apaga y la pantalla LCD muestra los valores de los parámetros de calidad medidos (**Figura 158**).

Algunas de estas sondas, pueden contar con un sensor de fondo para la medición de profundidad del sondeo, que consiste en un cilindro metálico con el fondo cóncavo que va atado al final de un cable o cuerda; al chocar el cilindro en su bajada con la superficie del agua, se oye un claro sonido (“pop”) (**Figura 159**).



Figura 159. Tipo de sondas con sensor de fondo. Fuente: (HYDROTECHNIK, s.f)

Se pueden instalar dentro del pozo, un flotador unido a un contrapeso mediante un cable que pasa por una polea que puede incorporar una escala de lectura directa. Las variaciones de nivel de agua vendrán indicadas por los cambios de nivel del contrapeso o en las marcas del cable (OMM, Guía de prácticas hidrológicas, 2011).

Si se necesitan medir pozos artesianos, se debe instalar un sello hermético en la boca del pozo. La superficie de presión (o el nivel de agua equivalente) se puede medir con un manómetro, ya sea haciendo observaciones visuales o acoplado a un sistema de registro (OMM, Guía de prácticas hidrológicas, 2011).

Instrumentos de registro continuo

Este tipo de instrumentos pueden trabajar de manera analógica, en el caso de los limnógrafos, y también digitalmente mediante registradores automáticos o dataloggers. Estos últimos se han impuesto sobre los primeros para el monitoreo, debido a sus grandes ventajas, aunque la adopción de un sistema dependerá en gran medida de factores económicos y las necesidades del programa.

Los **limnógrafos** transmiten el movimiento de un flotador y su contrapeso, mediante un sistema de poleas y engranajes, a una plumilla que imprime las oscilaciones del nivel del agua en un papel enrollado entorno a un tambor giratorio (Ramas Ayala, 2003) (**Figura 160**).

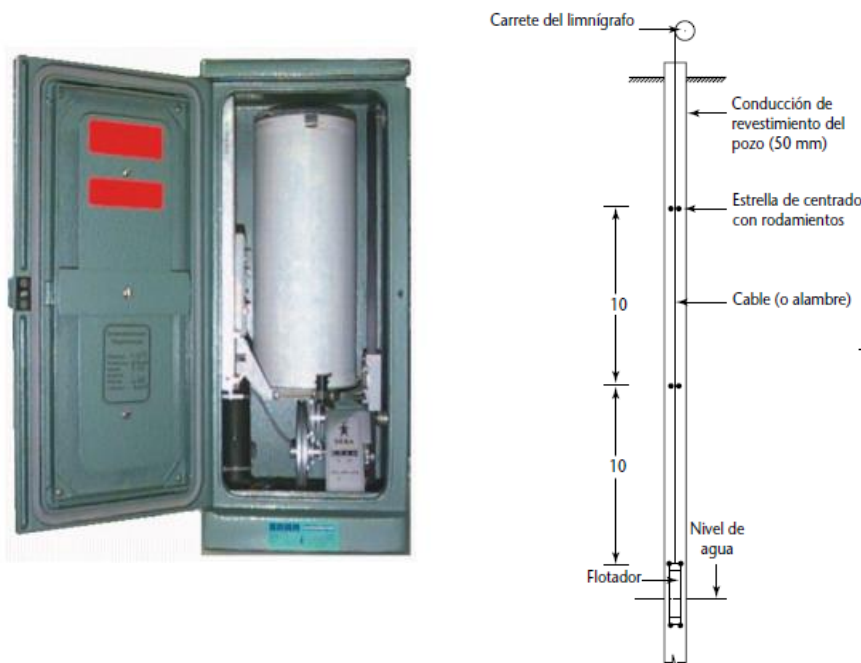


Figura 160. Izquierda: Limnógrafo vertical Fuente: (Ramas Ayala, 2003). Derecha: Mecanismo de funcionamiento para un limnógrafo. Fuente: (OMM, *Guía de prácticas hidrológicas*, 2011).

La escala de registro o reducción de alturas es variable en función del recorrido del cable a través de las poleas, del tamaño del tambor y de la velocidad de rotación del mismo, variable mediante un mecanismo de reloj. La precisión depende a su vez del diámetro del flotador que debe moverse libremente, de la reducción de alturas y de si tiene o no indicador de inversión. Es posible obtener precisiones de hasta 1 cm y una operatividad en tiempo que oscila entre 32 días con relojes mecánicos y 500 días con relojes de cuarzo. No obstante, los registros están limitados por la gráfica. Cuanto menor sea el tiempo de registro, más efectiva será la interpretación en su gráfica (Ramas Ayala, 2003).

La fuerza impulsora proviene en general de un mecanismo, accionado de cuerda o eléctricamente, y ubicado en el equipo de superficie. El pequeño flotador está suspendido en el pozo por un cable enrollado a un tambor accionado a motor y vinculado a la polea del registrador de nivel. En la posición de equilibrio, el motor es

desconectado. Si el nivel del agua baja en el pozo, el flotador queda en la misma posición y al agregarse un peso adicional al cable (o alambre) se produce el movimiento del tambor que acciona un contacto eléctrico que pone en marcha el pequeño motor. El tambor puesto en funcionamiento por el motor libera el cable hasta que alcance un nuevo equilibrio y se desconecta el motor. Cuando el nivel del agua del pozo sube, el cable se enrolla en el tambor hasta que se alcanza la nueva posición de equilibrio. El movimiento de subida y bajada del cable hace que se active la pluma del aparato, registrando las variaciones del nivel del agua. Este motor es activado a partir de una sonda eléctrica ubicada en el flotador; las fluctuaciones en el nivel del agua del pozo causan un cambio de presión que es transmitida a través de una membrana al interruptor de presión colocado en la sonda que hace que la sonda sea levantada o descendida (OMM, Guía de prácticas hidrológicas, 2011) (*Figura 160*).

Este tipo de instrumentos se han venido adaptando como es el caso de limnígrafos accionados mediante sistemas de burbujeo, limnígrafos que además registran curvas de temperatura, entre otros.

Igualmente se encuentran en el mercado los registradores automáticos como son los **dataloggers**, que no solo miden niveles de agua, sino pueden contar con sensores de temperatura y conductividad (Figura 161). Estos instrumentos presentan una alta capacidad de memoria, un funcionamiento definido por el usuario que permite muestreo lineal y muestreo basado en eventos y un diseño sellado hace que el mantenimiento y la limpieza sean rápidos. También son útiles para cualquier región con cualquier condición climática y para todo tipo de pozos o aljibes, ya que ofrecen protección a sobrecargas eléctricas causadas por las bombas o los rayos.



Figura 161. Dataloggers para medición de niveles de agua subterránea. Fuente: (Solinst, 2017b)

Se presenta los **divers** que permiten la medición y registro de niveles y temperaturas, algunos miden conductividad y presión (**Figura 162**). Estos instrumentos consisten de un sensor de presión diseñado para medir la presión del agua, de un sensor de temperatura, de memoria para almacenar las mediciones y de una batería. Las mediciones se almacenan en la memoria interna del Diver. Su funcionamiento opera con un computador portátil o cualquier otro equipo de campo como celular o pocket, por medio de conexión óptica; puede ser programado por el usuario según las necesidades de trabajo (Schlumberger Water Services, 2014). Permite una recopilación de datos más eficiente ya que permite una alta precisión, su uso es práctico y permite una gestión, análisis y visualización de información fácil y eficiente con muchos formatos de salida.

Los dispositivos cuentan con una longitud entre 90 mm y 135 mm y un diámetro de 22 mm (18 mm para el MicroDiver), dependiendo del modelo, y pueden emplearse en casi cualquier tipo de tubo de sondeo. Algunos de estos ideales para ensayos de bombeo ya que tienen la posibilidad de fijar su propia frecuencia. Otros pueden ser utilizados en ambientes bastante corrosivos y son ideales para determinar intrusión salina, filtraciones de aguas residuales y aguas residuales contaminadas por

químicos o vertederos. Estos instrumentos establecen la altura de una columna de agua, midiendo la presión del agua con el sensor de presión integrado. Algunos, miden la presión atmosférica como si fuera un barómetro y una vez que se sumerge el Diver, esto se complementa con la medición de la presión del agua.



Figura 162. Sensores automáticos para medición de niveles- Diver. Fuente: (Maser, *Productos de agua subterránea*, 2015); (Schlumberger Water Services, 2014).

También pueden ser utilizados sensores o medidores de niveles por **radar** o **ultrasonido** pero su uso es menos extensivo.

En general, esos instrumentos necesitan un manejo cuidadoso y un mantenimiento, ya que un mal funcionamiento o un uso indebido puede disminuir su eficacia.

- **Medición de parámetros hidráulicos**

Para medición de caudales, el equipo básico es una bomba que permita bombear agua del pozo y medir luego el volumen extraído, el tiempo de bombeo y el abatimiento del nivel de agua en el pozo. Es importante que la bomba permita bombear a caudal constante y que sea adaptable para tubos de pequeño diámetro, por lo que es necesario conocer el caudal requerido y la altura dinámica total del sistema.

Se pueden emplear bombas con turbina, diseñada principalmente para descargar altos caudales (mayores de 30 lt/seg) y producir altas presiones o bombas sumergibles diseñada para caudales más bien pequeños y altas presiones (caudales hasta de 30 litros por segundo y motores hasta de 100 caballos de fuerza (HP) es lo más usual (SENA, 1999) (**Figura 163**). En caso de que ello no sea posible, se puede utilizar un compresor con manguera de extracción, aunque en tal caso es difícil lograr caudal constante. En general, para seleccionar el tipo y la capacidad de la bomba hay que considerar las caracterizas de producción potencial y profundidad del pozo, de acuerdo con la información disponible sobre el acuífero (modelo conceptual).



Figura 163. Bomba sumergible utilizada en pruebas de bombeo. Fuente: (Valencia Cuesta, s.f)

En la medición de caudales se pueden utilizar dispositivos tales como: vertederos calibrados, orificio libre, descarga libre en tubería, canaleta Parshall, contadores

- **Medición de caudal**

Como se nombró anteriormente, la forma más sencilla de calcular los caudales es la medición directa del tiempo que se tarda en llenar un recipiente de volumen conocido. La corriente que genere el bombeo del pozo o aljibe, o la corriente natural del manantial, se desvía hacia un recipiente graduado adecuado o un espacio de volumen conocido y el tiempo que demora su llenado se mide por medio de un cronómetro. El tiempo que se tarda en llenarlo se medirá con precisión, especialmente cuando sea de sólo unos pocos segundos. Con la información se calcula el caudal a partir de la siguiente ecuación:

$$Q = v/t$$

Dónde:

Q = Caudal en litros por segundo, L/s

V = Volumen en litros, L

T = Tiempo en segundos, s

Otro método de medición, es el de vertedero y canaleta que consiste en una obstrucción hecha en el canal para que el líquido retroceda un poco atrás de ella y fluya sobre o a través de ella. Si se mide la altura de la superficie líquida corriente arriba es posible determinar el flujo. Para el caso de manantiales se debe muestrear su flujo en una sección uniforme del mismo, donde se desvía el flujo hacia una cañería el flujo de manera que descargue a presión, permitiendo calcular el caudal a partir de mediciones de chorro.

Con respecto a los caudalímetros, se pueden utilizar ya sea los que arrojan mediciones instantáneas o mediciones totalizadas; lo más importante es que siempre se tengan en cuenta las instrucciones del fabricante, ya que las lecturas de estos instrumentos están condicionadas a la presencia de turbulencias en el flujo. Las instrucciones de uso podrían estipular que el medidor esté precedido de una

cierta longitud de tubería recta para reducir los efectos de las turbulencias (OMM, Guía de prácticas hidrológicas, 2011).



Figura 165. Izquierda: medición de caudales por métodos volumétricos de afloro y medidor de corriente Fuente: (Valencia Cuesta, s.f). Derecha: aforo de caudales pequeños. Fuente: <https://www.youtube.com/watch?v=KqMdrmMu6Yo>

Procedimiento para la toma de datos

- Toma de niveles

Para las mediciones de cantidad, es necesario medir la profundidad de la tabla de agua, para lo cual se usa la sonda acústica, que debe ser introducida al piezómetro pozo o aljibe, por medio de la manivela; cuando el sensor entra en contacto con el agua se enciende una señal luminosa o acústica (opcional) en la unidad; se sube y baja la cuerda unos pocos centímetros, repitiendo el movimiento unas cuantas veces, tomando la medida de la longitud de la cuerda teniendo como referencia

algún punto del borde del pozo (IGRAC I. G., 2006) (**Figura 166, Figura 167**). Se deberá restar la altura de la tapa sobre el nivel del terreno de la medición.

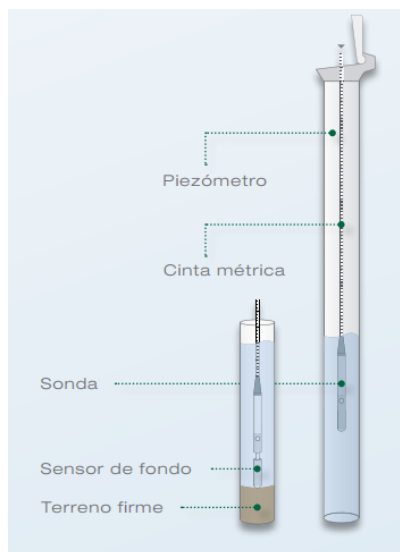


Figura 166. Izquierda: Monitoreo de niveles realizado en el Municipio de Puerto Gaitán. Fuente: (Cormacarena; SIAM S.A, 2016). Derecha: Esquema que ilustra la medición de niveles con el uso de una sonda manual (HYDROTECHNIK, s.f).



Figura 167. Medición de nivel piezométrico. Izquierda: Tolú, sucre. (Fotografía cedida por Carsucre, 2012); Derecha: Finca Las Delicias, Riohacha (Fotografía cedida por Corpoguajira, de campañas de monitoreo de enero de 2017)

En el caso que se esté haciendo el monitoreo a un pozo de producción, antes de llevar a cabo la medición se deberá concertar con el propietario del pozo para que se detenga el bombeo por determinado tiempo (dependerá de las condiciones del acuífero), con el fin de poder tomar el nivel estático del acuífero de interés.

Se debe llevar un formato de registro de mediciones de niveles, el cual puede ser desarrollado por el usuario y en donde se registren las coordenadas y altura del punto, un código de identificación, datos como usuario o dirección del predio, la fecha de toma del dato y profundidad del nivel de agua en metros. El usuario puede incluir más información en el formato si lo considera necesario. Para registrar el nivel de agua en relación con la superficie del terreno, se debe restar la distancia medida entre el punto de medición (dato dado por la cinta métrica de la sonda) y el dato de la cota del terreno.

Al terminar la medición la sonda debe ser lavada cuidadosamente con agua destilada antes de utilizarlo en una siguiente medición para evitar la contaminación.

En el caso de utilizar divers, estos deben suspenderse del pozo de monitoreo por debajo del nivel de agua, como lo presenta la **Figura 168**. La profundidad a la que se puede suspender un Diver depende del rango de medición del instrumento. Se debe determinar la longitud del cable de suspensión no extensible en función del nivel freático más bajo. Posteriormente se debe estipular la longitud adicional que se necesita para sujetar el cable al Diver y la longitud de la argolla de suspensión en el extremo superior al cortar el cable. Se deben utilizar los ganchos de alambre para sujetar los extremos del cable a la cubierta del extremo del pozo de monitoreo y a la argolla de suspensión del Diver, respectivamente. Los divers pueden estar suspendidos de un cable de acero o pueden también ser instalados con un cable de datos DDC, el cual le permite leer el Diver en la parte superior del pozo mediante un cable de interface de USB (Schlumberger Water Services, 2014).

Los divers deben ser lavados y secados después de cada medición con agua destilada.



Figura 168. Medición de los niveles de agua subterránea utilizando un Diver. Izquierda, Fuente: (Schlumberger Water Services, 2014) ; Derecha, Fuente: (IDEAM, 2015).

- Toma de parámetros hidráulicos

Antes de iniciar el bombeo, se toman datos del nivel de agua en todos los pozos de observación, incluido el de bombeo, con el fin de determinar el nivel de agua estático antes del ensayo. Si el pozo es de producción es necesario detener el bombeo del pozo como mínimo 12 horas antes de la prueba.

Al poner en marcha la bomba, se deben tomar los datos del nivel en los pozos de observación y en el de control, durante todo el ensayo, además de medir el caudal de la bomba (OMM, Guía de prácticas hidrológicas, 2011). El período de observación antes de comenzar la prueba (anterior a $t=0$), deberá ser, como regla general, al menos del doble del tiempo que dure la prueba de bombeo. Durante la prueba, la profundidad hasta el agua en cada pozo, debe medirse con frecuencia

suficiente para que se pueda contar con un buen número de observaciones en cada ciclo logarítmico (alrededor de 8 a 10, por ejemplo). Esto puede lograrse, por ejemplo, si se ejecuta mediciones del nivel en los tiempos $t=1, 1,5, 2, 3, 4, 5, 6, 8$ y 10 min y en todos los múltiplos de 10 de esos tiempos en los ciclos siguientes. Durante las 2 o 3 primeras horas a partir de la hora en que se inicia la prueba ($t=0$) es preferible que haya un observador en cada uno de los pozos de observación y en el de control. Después de 5 horas las mediciones se harán con espacios de tiempo de 100 minutos o más entre sí; en ese caso, podrá utilizarse un solo observador para tomar toda la información, ya que le resultará relativamente fácil trasladarse a los distintos lugares en un tiempo relativamente corto; eso sí, las mediciones deberá hacerlas siempre siguiendo una misma secuencia (EPAM S.A ESP, MAVDT, IDEAM, 2011b).



Figura 169. Prueba de Bombeo a Caudal Constante Pozo SGC Riohacha 2 (N: 1 765 265, E: 1 132 644). Fuente: (SGC, 2016).

Esta información debe ser representada por medio de graficas log-log o semi-log de la distancia y del descenso de nivel, o del tiempo y del descenso de nivel. En la gráfica de distancia y descenso de nivel se representan los datos de todos los pozos en un determinado momento, mientras que en la gráfica de tiempo y descenso de nivel se representan todos los datos obtenidos en un pozo. Estos datos son analizados mediante un método gráfico o manual; en el mercado se pueden utilizar

varios programas que permiten ampliar el análisis y presentación de las prueba de bombeo, como lo es *Aquífer test* el cual es el más utilizado, y otros en que su uso depende de los recursos financieros disponibles (Figura 170).

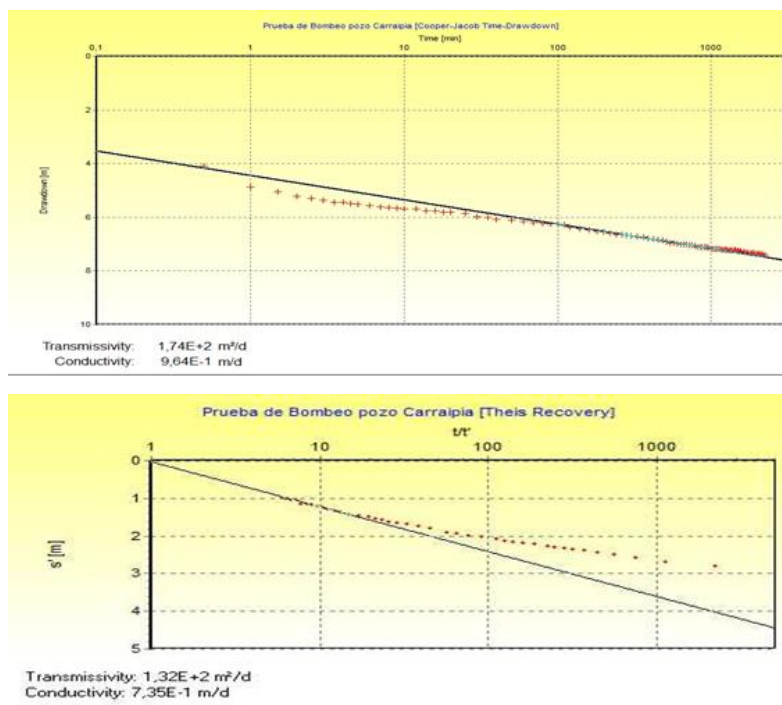


Figura 170. Arriba: Interpretación método Cooper-Jacob fase de bombeo pozo SGC Carraipía. Abajo: Interpretación método Theis fase de recuperación pozo SGC Carraipía. Fuente: (SGC, 2016).

Para cada tipo de acuífero (libre, semiconfinado o confinado) se han construido desarrollos matemáticos simples y modelos interpretativos (como son el *Método de Thiem para acuífero confinado*, *Método de Dupuit para acuífero libre*, *Método de De Glee para acuífero semiconfinado*) que pueden ser consultados en cualquier texto de hidrogeología o en textos especializados en este tema.

7.3.2. Calidad

La composición química de las aguas subterráneas puede aportar información muy valiosa sobre el comportamiento hidrogeológico regional, principalmente acerca del flujo subterráneo. Los datos químicos ayudan de manera eficaz a establecer áreas de recarga y recarga, tiempos de permanencia en el terreno, etc.

En este sentido, el monitoreo de calidad de aguas subterráneas juega un papel muy importante al momento de cualquier programa de protección, conservación y aprovechamiento del recurso hídrico subterráneo, permitiendo según (Vrba J. , 1998, pág. 35):

- Obtener datos de calidad del estado actual de las aguas subterráneas, que permitan
- La evaluación de vulnerabilidad y riesgos a contaminación de sistemas acuíferos por actividades industriales, agrícolas, minero energéticas, humanas o por salinización.
- La definición de estrategias de administración del recurso, en cuanto a protección y prevención.
- La evaluación de calidad para diferentes propósitos (agua para consumo humano, industrial, irrigación, etc.).
- El planteamiento o redefinición de normas técnicas de calidad del agua.

El muestreo debe ser representativo, lo cual significa que los *resultados reflejen exactamente la condición de las aguas subterráneas en el acuífero o en punto específico* (Vargas & Bobadilla, s.f), siempre que la muestra no sea alterada o contaminada durante el muestreo. En esto son relevantes los detalles del tipo de muestreador, condición de la captación, manejo, preservación y transporte de la muestra. La representatividad de la muestra se garantiza desde el mismo momento de la purga del pozo que debe extenderse hasta cuando la conductividad permanezca constante.

Por estas razones, es pertinente describir los métodos y procedimientos utilizados en el monitoreo de aguas subterráneas desde la etapa previa al campo.

Selección de los puntos de monitoreo

Para el caso de monitoreo de la calidad del agua subterránea la selección de puntos de muestreo óptimos es más difícil, y está condicionada por el propósito del muestreo, además de las características particulares del acuífero que se está muestreando (por ejemplo, la naturaleza del flujo de agua subterránea (si es intergranular o por fraccionamiento), el gradiente hidráulico y la dirección del flujo).

Además de considerar los criterios expuestos en la selección de puntos para un monitoreo de cantidad (**Selección de los puntos de monitoreo**), se debe tener en cuenta que los puntos representen el uso de las tierras cubriendo grandes áreas para agricultura, los varios tipos de cultivos y sus prácticas de irrigación y las áreas industriales o urbanas. El muestreo debe realizarse para indicar la potencial contaminación de las aguas subterráneas (Livni, Avisar, & Mamane, 2015).

Al seleccionar puntos de monitoreo para abastecimiento de agua, es recomendable monitorear algunos pozos alejados del sitio de extracción, para examinar las características fisicoquímicas y bacteriológicas del acuífero (ICONTEC, 1996b). Si el objetivo es alertar sobre plumas de contaminación que puedan amenazar los campos de bombeo de agua potable o manantiales, se localizan pozos de monitoreo gradiente arriba que sean capaces de detectar a tiempo alguna aproximación en el agua contaminada y así tomar las acciones de remediación necesarias (Foster S. , Hirata, Gomes, D'Elia, & Paris, 2002) (**Figura 171**).

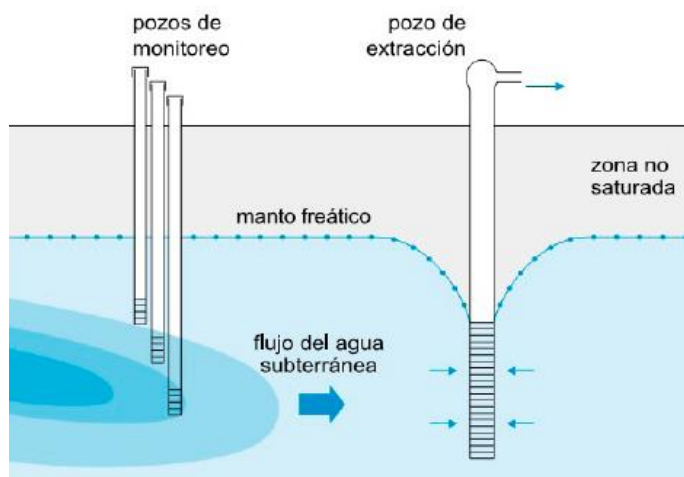


Figura 171. Ubicación de pozos de monitoreo para fuentes de abastecimiento de agua subterránea. Fuente: (Foster S. , Hirata, Gomes, D'Elia, & Paris, 2002).

En el caso de monitoreo puntos de contaminación difusa de aguas subterráneas, se deben escoger pozos ubicados en el área de interés, además de que estos representen las diferentes condiciones hidrogeológicas y de uso de la tierra consideradas como particularmente vulnerables a contaminación; se recomienda monitorear en pozos de gran capacidad de producción o extracción, ya que pueden proveer muestras integradas de un gran volumen del acuífero. Sin embargo, en casos de contaminación de baja intensidad o contaminación localizada, el uso de este tipo de pozos puede reducir la contaminación a niveles por debajo del límite de detección analítica: en estos casos se recomienda el uso de pozos de menor capacidad de extracción (ICONTEC, 1996b).

Para un monitoreo de fuentes puntuales, es preciso considerar la ubicación del sitio de contaminación en relación con la dirección de flujo del agua subterránea. Se recomienda instalar pozo para monitorear la calidad de agua directamente bajo la fuente de contaminación (**Figura 172**), además de al menos un pozo de monitoreo con filtros en un intervalo estrecho de profundidad, inmediatamente encima de la tabla de agua, de forma que los contaminantes que son menos densos que el agua

se puedan detectar más fácilmente (Foster S. , Hirata, Gomes, D'Elia, & Paris, 2002).

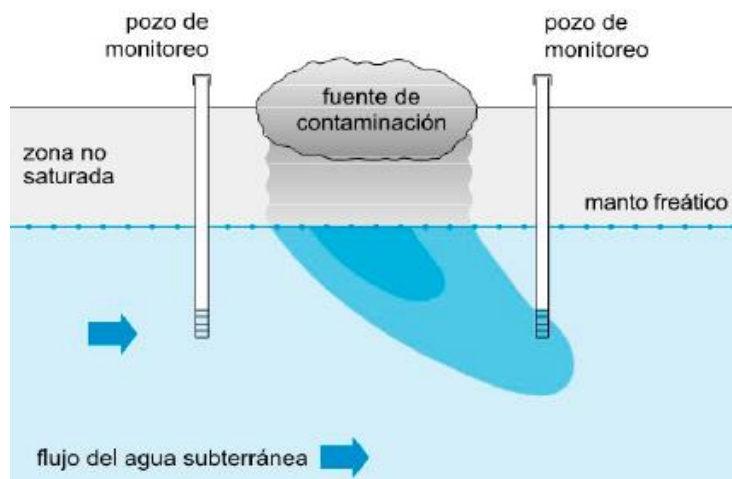


Figura 172. Ubicación de pozos de monitoreo para fuentes de contaminación puntuales. Fuente: (Foster S. , Hirata, Gomes, D'Elia, & Paris, 2002).

Se deben colocar puntos de muestreo adicionales a distancias progresivas hacia abajo del gradiente hidráulico de la fuente de contaminación y deben tomarse precauciones para tomar muestras en un intervalo amplio de profundidades. También se debe considerar la colocación de uno o dos pozos de monitoreo hacia arriba del gradiente hidráulico de la fuente de contaminación, para poder identificar la extensión del área de influencia de la contaminación (**Figura 173**). Estos pozos de monitoreo también pueden servir para estudios de control de calidad, porque mediante el procedimiento de muestreo, dan información sobre el alcance de la contaminación potencial, en especial donde el análisis de trazas de material, es importante (Foster S. , Hirata, Gomes, D'Elia, & Paris, 2002).

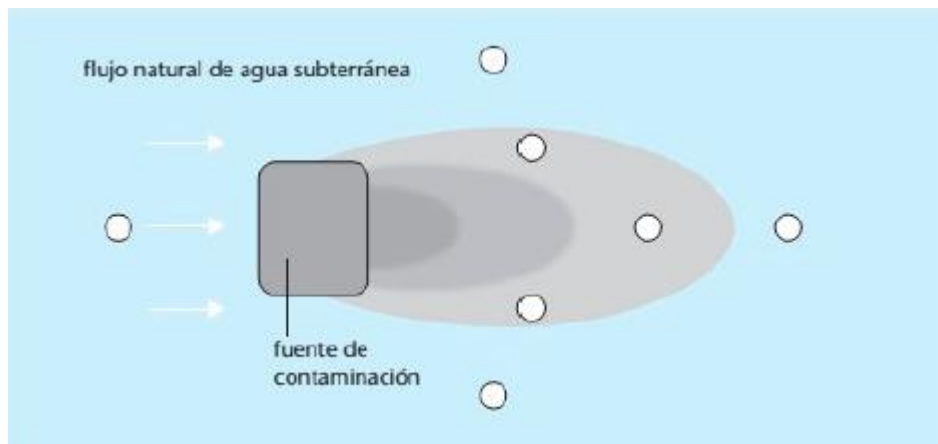


Figura 173. Ubicación de pozos de monitoreo para fuentes de contaminación puntuales. Fuente: (Foster S. , Hirata, Gomes, D'Elia, & Paris, 2002).

Frecuencia de monitoreo

Para determinar la frecuencia de monitoreo de calidad se debe tener en cuenta el objetivo del monitoreo; si lo que se busca es monitorear patrones de calidad del agua a largo tiempo, se puede sugerir una frecuencia mínima de monitoreo de una vez al año. Si es el caso de monitoreos de vigilancia, en donde se espera tener una distribución de las características químicas, la frecuencia puede estar en un muestreo trimestral cuando sean redes pequeñas a cada cinco años para monitoreos mas regionales (ACWI, 2009).

Sin embargo estos valores no son fijos, estos pueden variar considerando que factores como el tipo de acuífero, flujos del agua subterránea, tasas de recarga, descenso en los niveles de agua subterránea, cambios en el uso de tierras y cambios climáticos pueden afectar la frecuencia de monitoreo de calidad (ACWI, 2009).

(Auge, 2006), recomienda que los muestreos se hagan al finalizar el período de exceso en el balance hídrico y al finalizar el período de déficit. También, si la región que se muestrea por el uso del suelo en actividades agrícolas, el muestreo se debe hacer en época de riego y otro en época de secano, para establecer si existen

variaciones en la posición de la superficie freática y en la composición química del agua subterránea, derivada esta última, de la aplicación de fertilizantes y plaguicidas.

La siguiente tabla sugiere algunas frecuencias para el monitoreo de calidad del agua subterránea cuando se esté desarrollando monitoreo primario o de vigilancia, y cuando se cuente con un conocimiento previo del acuífero de interés. Estas frecuencias representan un punto de partida o recomendación y no deben ser consideradas como obligatorias, ya que dependiendo de los objetivos del monitoreo de calidad, pueden adoptarse frecuencias alternativas que permitan un mejor entendimiento.

Tabla 31. Frecuencias para el monitoreo de calidad del agua subterránea cuando se esté desarrollando monitoreo primario o de vigilancia. Fuente: (ACWI, 2009)

Categoría de monitoreo	Tipo de acuífero	Características de flujo			
		Porosidad Media	Porosidad Media	Roca fracturada	Kast
		Pozo profundo	Pozo somero	Todos los pozos	Todos los pozos
Monitoreo de tendencia	Todo tipo de acuíferos, en toda la gama de conductividad hidráulica	Recomendado: anual	Recomendado: anual	Recomendado: anual	Recomendado: anual
Monitoreo de vigilancia	Libre				
	Baja recarga (< 5 pulg/año)	Recomendado: anual, o por diseño del estudio	Recomendado: anual, o por diseño del estudio	Recomendado: anual, o por diseño del estudio	Recomendado: anual, o por diseño del estudio
	Alta recarga (> 5 pulg/año)	Recomendado: anual, o por diseño del estudio	Recomendado: anual, o por diseño del estudio	Recomendado: anual, o por diseño del estudio	Dos veces por año
	Confinado				
	Baja conductividad hidráulica (< 200 pies/día)	Cada cinco años	Cada cinco años	Cada cinco años	Cada cinco años
Alta conductividad	Cada dos años	Cada dos años	Cada dos años	Cada dos años	

Categoría de monitoreo	Tipo de acuífero	Características de flujo			
		Porosidad Media	Porosidad Media	Roca fracturada	Kast
		Pozo profundo	Pozo somero	Todos los pozos	Todos los pozos
	hidráulica (> 200 pies/día)				

Según (ICONTEC, 1996b), sugiere un muestro mensual o quizás menos frecuente, cuando se está evaluando la calidad de las fuentes de agua potable, o para cualquier otro uso. En el caso de que se esté utilizando aguas subterráneas sin tratamiento, es necesario un muestreo más frecuente. Para Auge, (2006), el muestreo de parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos debería efectuarse al menos *1 vez al mes*. Para el caso de plantas industriales generadoras de altas cargas contaminantes como curtiembres, papeleras, refinerías de hidrocarburos, textiles, lácteas, fincas con desarrollo pecuario, medicinales, agroquímicas, metalúrgicas, alimenticias, etc., las frecuencias son determinadas por el responsable de monitoreo.

En algunos casos particulares, el monitoreo temporal puede requerir una frecuencia diaria, horaria, de minutos y aún de segundos, aplicado a los casos en que es necesario establecer la incidencia del bombeo en la salinidad o en la composición bacteriológica del agua subterránea, en mediciones para verificar el funcionamiento hidráulico de la perforación y en la detección de trazadores para determinar la velocidad de flujo (Foster S. , Hirata, Gomes, D'Elia, & Paris, 2002).

Si se escoge una frecuencia al inicio del programa de monitoreo, esta puede variar en el progreso del mismo, si se observan un aumento o disminución de la velocidad de los cambios en la calidad, para lo que debe ampliar o reducir la frecuencia de monitoreo.

Tipo de muestreo

Existen dos métodos de muestreo que pueden emplearse para obtener una muestra representativa de aguas subterráneas: muestreo por bombeo y el muestreo a profundidad (IDEAM, 2013).

- Muestreo por bombeo: consiste en extraer la muestra del pozo, utilizando una bomba. Este método puede ser utilizado cuando se requiere muestras de una sola unidad acuífera que darán una calidad de agua subterránea uniforme y cuando se necesite una muestra vertical compuesta, de composición promedio, como puede ser el caso de muestras extraídas de un pozo para consumo potable.

Las muestras no se deben recoger de pozos de bombeo hasta que haya pasado el tiempo suficiente para retirar la columna de agua remanente del pozo y garantizar que el agua se esté sacando directamente del acuífero.

- Muestreo a profundidad: Consiste en hacer bajar un dispositivo de muestreo por el interior del pozo, dejando que se llene con agua a una profundidad conocida, y recuperando la muestra para transferirla a un recipiente apropiado, cuando sea necesario. Este método normalmente es adecuado sólo para uso en pozos de monitoreo que no se bombean (pozos de monitoreo como piezómetros), aunque las muestras de profundidad se pueden recoger de los pozos durante el bombeo, si hay acceso libre por la bomba, con un tubo instalado para este propósito.
- Otros métodos de muestreo: cuando los métodos anteriores no se puedan utilizar, se recomienda tomar muestras de puntos discretos en el acuífero mediante diferentes dispositivos de muestreo en el sitio. Estos incluyen copas porosas o piezómetros puntuales de los cuales se extrae agua por vacío o desplazamiento de gas. Se pueden instalar varios instrumentos en un solo pozo de monitoreo y algunos son adecuados para uso en zonas insaturadas. Se pueden también tomar muestras de profundidades específicas para el

muestreo de agua intersticial. Este método comprende extracción de agua (usualmente por centrifugación) de muestras de suelo o de roca obtenidas mediante métodos especiales de perforación. Este es el medio más efectivo para cuantificar las variaciones verticales en la calidad y también es un método muy efectivo para el muestreo de zonas insaturadas.

Sin embargo, para monitoreo periódico, tiene la desventaja de requerir perforación repetida y por esto es costoso. Además se puede estar liberando agua que normalmente no se puede retirar del acuífero en condiciones naturales, por lo tanto, esta técnica sólo debe utilizarse cuando la recomiende un especialista en hidrogeología.

- Mediciones in-situ

Es necesario la medición de parámetros in situ, la cual debe realizarse antes o inmediatamente después de la toma de muestras (DINAMA, 2004).

- pH, Potencial Redox, oxígeno disuelto, conductividad eléctrica y temperatura.
- Alcalinidad: en la mayoría de los casos la alcalinidad es controlada por los carbonatos y bicarbonatos. El agua subterránea puede presentar fuertes valores de alcalinidad por la presencia de aniones como hidroxilos, silicatos, boratos, amonios y sulfuros, sin embargo cuando el agua subterránea presenta una contaminación antrópica, puede presentar considerable cantidad de alcalinidad no carbonosa debido a compuestos orgánicos.

Para este tipo de mediciones, se recomienda que el pozo sea bombeado hasta que se renueve el agua almacenada en su entorno. Como no hay un volumen específico de agua bombeada que asegure la representatividad de la muestra extraída, en muchos casos, será aconsejable apoyarse en mediciones continuas hasta que los

parámetros sean estables, lo que indica que se ha renovado el agua almacenada tanto en el pozo como en sus inmediaciones.

- Parámetros físico-químicos y bacteriológicos

Para una selección de parámetros asociados a la calidad, se debe considerar la finalidad de la red y la economía que se desarrolle en el programa de monitoreo. Normalmente la selección de los parámetros a analizar estará impuesta por la interacción entre (Foster & Gomes, 1989):

- (a) El uso principal de las aguas subterráneas.
- (b) La posibilidad que los parámetros se encuentren presentes en concentraciones problemáticas como resultado del régimen hidrogeoquímico natural y/o el carácter de cualquier carga contaminante que está siendo descargada al subsuelo.

En la mayoría de los casos, el análisis se concentra en las principales especies de iones. Según (Uil, Geer, Gehrels, & Kloosterman, 1999), los metales pesados y sustancias orgánicas son importantes en programas de monitoreo sobre la contaminación de puntos como vertederos y sitios contaminados. Por otro lado, los metales pesados y pesticidas son más importantes para la contaminación difusa por la agricultura.

A continuación se presenta la lista de parámetros sugeridos para una red de monitoreo de calidad de aguas subterráneas:

Tabla 32. Lista de parámetros sugeridos requerido para una red de monitoreo de calidad del agua subterránea. Fuente: (Uil, Geer, Gehrels, & Kloosterman, 1999).

Grupo	Parámetro
Parámetros descriptivos	Temperatura, pH, OD, CE

Grupo	Parámetro
Iones mayoritarios	Ca, Mg, Na, K, HCO ₃ , Cl, SO ₄ , PO ₄ , NH ₄ , NO ₃ , NO ₂ , Carbono orgánico total
Parámetros adicionales	La elección depende particularmente de la fuente de contaminación local identificada
Metales pesados	Hg, Cd, Pb, Zn, Cu, Cr. La elección depende particularmente de la fuente de contaminación local identificada
Sustancias orgánicas	Hidrocarburos totales, hidrocarburos aromáticos, hidrocarburos halogenados, fenoles, clorofenoles. La elección depende particularmente de la fuente de contaminación local identificada
Pesticidas	La elección depende de las costumbres locales, el uso del suelo y las ocurrencias observadas en el agua subterránea
Microbiológico	Coliformes totales, coliformes fecales

Materiales y equipos

- Mediciones in-situ

Para la medición de parámetros in situ como pH, potencial Redox, oxígeno disuelto, temperatura y conductividad eléctrica, se debe utilizar un instrumento que se introduzca dentro del pozo o dentro de una celda de flujo continuo colocada en la línea de conducción, de forma que el agua no entre en contacto con el aire previo al pasaje a través de los sensores. Estos equipos son conocidos como sensores multiparámetros que con un visualizador digital de datos (LCD) que permiten ver las lecturas al instante (**Figura 174**). Usualmente son de operación sencilla, dependiendo la marca y modelo pueden programarse y obtener datos con un PC o laptop a través de una interface infrarroja digital. Varía también la capacidad de memoria y operatividad del software.



Figura 174. Izquierda: Medidor multiparámetros de bolsillo de pH, conductividad, TDS, salinidad y temperatura. Fuente: (Maser, *Productos de agua subterránea*, 2015). Derecha: Medidor multiparamétrico de pH, conductividad, oxígeno disuelto y temperatura. (Hanna Instruments, 2017).

Para parámetros como la alcalinidad deberá determinarse en sitio, con el método de la titulación volumétrica con bureta o la potenciométrica. Algunos de los medidores multiparamétricos miden la alcalinidad.

- Mediciones de parámetros físico-químicos y bacteriológicos

Para la medición de parámetros físico-químicos y bacteriológicos es necesario la extracción de agua en pozos de observación, para lo cual pueden emplearse dos métodos de muestreo: el primero es utilizando bombas que extraen el agua representativa del acuífero a través del revestimiento para ser recolectadas en envases previamente condicionados para el muestreo; el segundo es coleccionar una muestra directamente de la perforación por medio de instrumentos como desagües-bailers, cuando no es posible realizar un bombeo.

A continuación se describen algunos de los instrumentos utilizados para el muestreo de calidad de aguas subterráneas; el uso de algunos de estos dependerá de los objetos y de los costos planteados en el programa de monitoreo.

Bombas de succión

Existen en el mercado varios modelos de bombas de succión, sin embargo se presentan algunos instrumentos como lo son: bombas peristálticas, bombas eléctricas sumergibles o bombas tipo-bladder (vejiga) las cuales son usualmente utilizadas para muestreos de aguas subterráneas.

Bombas peristálticas: están diseñadas para uso en terreno con un diseño liviano y compacto, son ideales para remoción de muestras en pozo poco profundos (4 a 10 m). Estas bombas operan por succión permitiendo un bombeo al vacío o recuperación de líquidos o gases por presión; su operación mecánica utiliza rodillos de rotación, creando un vacío que desplaza la columna de agua o gas en la dirección deseada (velocidad variable y reversible) permitiendo que la muestra solo entre contacto con la manguera, lo que permite una integridad de la muestra (**Figura 175**, **Figura 176**). Algunas permiten una fácil conexión a casi cualquier fuente de poder; su uso es bastante práctico.



Figura 175. Bomba peristáltica Fuente: (Instrumentosdelsur S.A, 2017), (Solinst, 2017c)

Estas bombas pueden presentar una limitación ya que no pueden subir el agua desde ciertas profundidades, o si el objetivo es examinar el contenido de gases

disueltos en el agua subterránea, su uso no es recomendado (ICONTEC, 1996b). Un bombeo excesivo puede ocasionar descenso pronunciados, con un flujo turbulento, no permitiendo muestras representativas ya que pueden originarse volatilización, oxidación o precipitación de contaminantes, además de ocasionar que se extraiga agua turbia y que se pueda alterar la dirección del movimiento del algún contaminante en caso de presentarse.



Figura 176. Ejemplo de uso de una bomba peristáltica Fuente: (Solinst, 2017c)

Bombas eléctricas sumergibles: su uso es el más recomendado; son útiles cuando se requiere de un purgado de alto caudal y muestreo de bajo caudal. Son muy confiables y proporcionan tasas de muestreo continuas en periodos de tiempo extendidos (Geotech, 2015). Tienen una capacidad para muestrear a profundidades de 85 metros (280 pies) o más y son suficientemente resistentes para muestreo a largo plazo (Instrumentosdelsur S.A, 2017). La bomba se alimenta a bajo voltaje, haciéndola muy segura de usar.



Figura 177. Bomba eléctrica sumergible. Fuente: (Geotech, 2015).

Se pueden encontrar una gama de bombas de plástico (Figura 178) y bombas en acero inoxidable, con una amplia gama de diámetros, que cuentan con un cable eléctrico para medida de bombeo máximo y de doble conector batería (algunas pueden ser conectadas al vehículo), además de contar con un regulado de caudal.



Figura 178. Bomba eléctrica sumergible de plástico. Fuente: (Envirotecnicos Global Service, 2012b)

Bombas tipo-bladder (vejiga): útiles en algunos cuando las muestras se deben tomar de pozos de poco diámetro, donde es imposible el uso de bombas sumergibles. Son bombas con membrana que se sumergen dentro del agua hasta el nivel de muestreo, y por medio de una presión hidrostática permite que el agua de formación ingrese a la cámara central de teflón (la vejiga) a través del filtro de admisión y llene hasta el nivel estático (Figura 179). En la superficie un panel de

control mide los ciclos de presión y depresión, los cuales son ajustables.



Figura 179. Bomba de muestreo de vejiga-baldder. Fuente: (Envirotecnicos Global Service, 2012a)

Su funcionamiento se rige, cuando se aplica aire o gas comprimido a la línea de impulsión, presuriza el espacio alrededor de la vejiga, haciendo que colapse y empuje el agua hacia arriba dentro de la línea de muestra. Las válvulas de retención aseguran que el agua no vuelva a fluir a través de la bomba o dentro de la formación. Estos ciclos se repiten proporcionando un flujo de agua constante hacia arriba de la línea de muestra sin quitar los compuestos volátiles de la muestra (Figura 180).

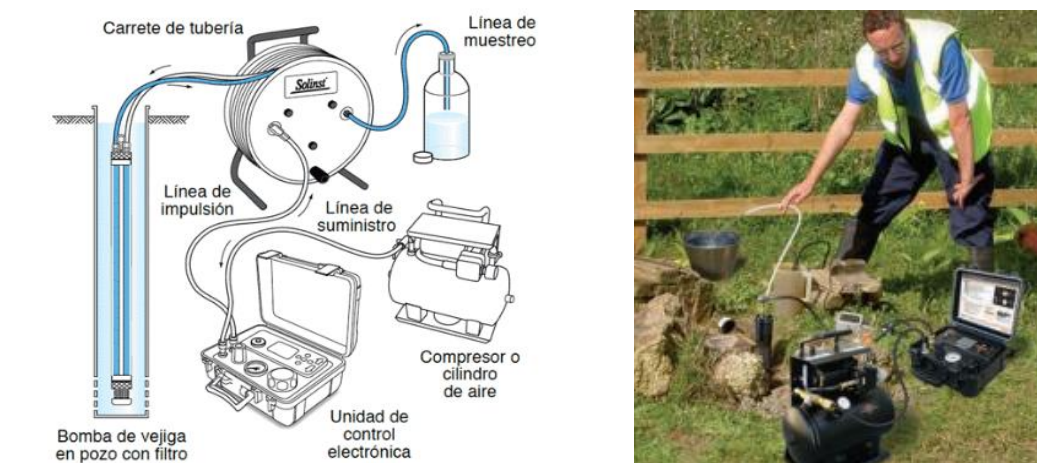


Figura 180. Funcionamiento de la bomba vejiga Fuente: (Solinst, 2017b)

Bombas inerciales: son también muy utilizadas ya que son adecuadas para el purgado y muestreo. Son simples y confiables y ofrecen una opción efectiva de bajo

costo. La bomba consiste de una manguera con una válvula de piso atornillada en la parte inferior. Se opera fácilmente de manera manual a profundidades someras o con dispositivo para bombear, la cual al ser bajada dentro del pozo, entra un volumen de agua en la manguera y ésta se retiene al cerrarse la válvula cuando se vuelve a subir nuevamente la manguera y válvula. Esta operación permite que eventualmente el agua suba por la manguera hasta llegar a superficie (Solinst, 2017f) (**Figura 181**).

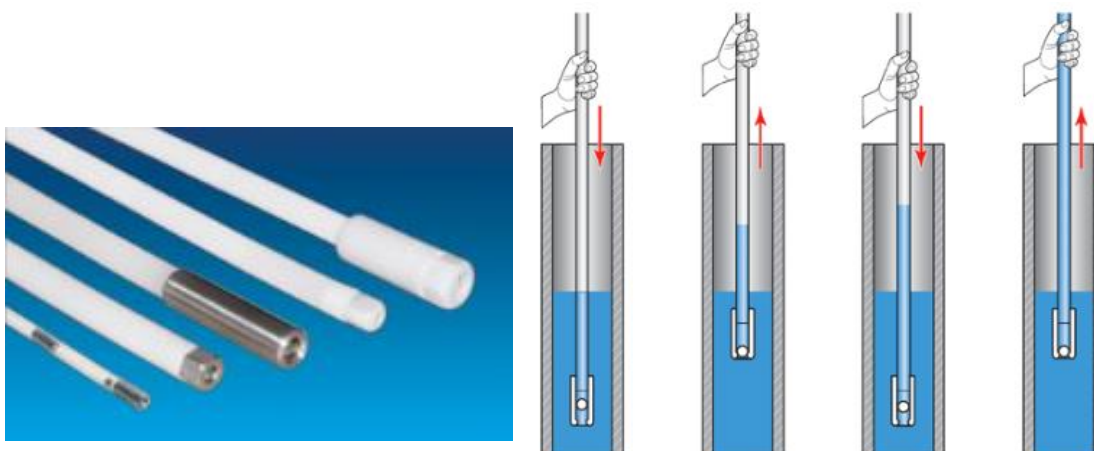


Figura 181. Izquierda: Bomba inercial, Derecha: Mecanismo de operación de la bomba inercial.

Bailers: son una solución eficiente, rápida y conveniente para muestreos manuales sin perjudicar la calidad y representatividad de la muestra. Estos muestreadores fabricados ya sea en acero inoxidable o en plásticos (algunos biodegradables) (Figura 182), pueden recoger la muestra directamente de la perforación, cuando no es posible realizar un bombeo.

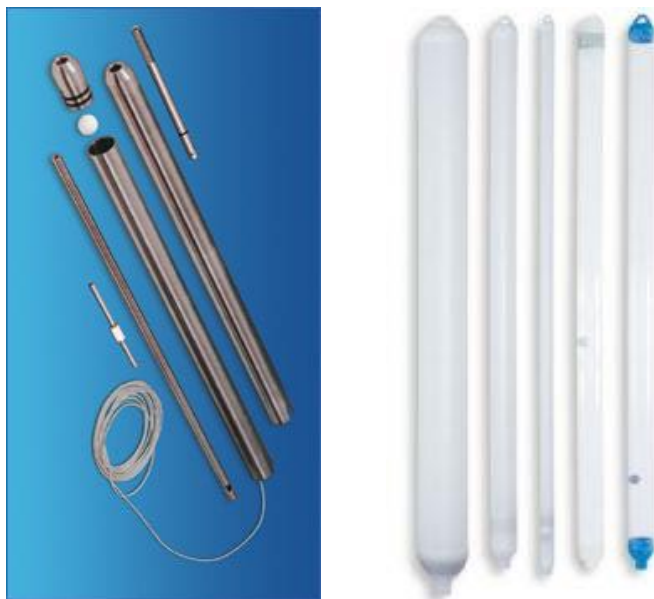


Figura 182. Tipos de baides para muestreo de agua subterránea. Izquierda: Bailers en acero inoxidable. Fuente: (Solinst, 2017d). Derecha: Bailers en plástico. Fuente: (Yacutec, 2017)

El muestreador actúa como una botella pesada (contenedor abierto) con una válvula de retención en la parte inferior y un asa en la parte superior, que es bajado por el pozo para tomar la muestra.

Para recuperar una muestra de agua de un pozo se hace por medio de un cable de anclaje conectado a la manija en la parte superior del desagüe, el cual permite que este sea bajado en el pozo donde hace contacto con el agua subterránea (**Figura 183**). Posee unas válvulas de control que evitan que el agua a diferentes profundidades se mezcle con la muestra durante la recuperación. El peso del desagüe hace que este comience a sumergirse en el líquido; la presión hidrostática del fluido empuja para arriba la válvula de retención (generalmente una válvula de bola) haciendo que la válvula abra y el agua fluya en el tubo; el agua que entra en un desagüe buscará su propio nivel, por lo que un desagüe parcialmente sumergido será parcialmente llenado y un desagüe completamente sumergido será completamente llenado. Cuando el desagüe ha llenado su nivel sumergido, la válvula se cierra evitando que el agua escape.



Figura 183. Muestreo en pozos profundos utilizando un bañilero. Información cedida por Corpoguajira de muestreo del pozo profundo Internado Aremasain- Riohacha, en campañas de muestreo de enero de 2017.

Muestreadores discretos: permiten obtener muestras por debajo de napas flotantes, sin necesidad de purgar (*Figura 184*). El muestreador se presuriza con una bomba manual antes de ingresar al pozo. Al estar el sistema presurizado no fluye agua a través del muestreador cuando se dirige hacia abajo en el pozo. Cuando se alcanza el punto de muestreo, se libera la presión y el muestreador se llena con agua directamente de la zona de muestra (Solinst, 2017e).



Figura 184. Tipos de muestreadores discretos de agua subterránea. (Solinst, 2017e)

Otros instrumentos son considerados los cuales no son regularmente utilizados, pero que son representativos a la hora de para muestreo de calidad tanto en zonas saturadas como no saturadas, estos son:

Copas de Succión para Muestreo de Agua del Suelo – Lisímetros: permiten obtener información de calidad a diferentes profundidades ya sea de la zona saturada como la no saturada del acuífero a partir de muestreo intersticial ya sea extrayendo el agua de muestras de roca de perforación por centrifugación o compresión por presión o por extracción de agua por vacío o desplazamiento de gas con el uso de copas porosas-lisímetros o piezómetros puntuales (**Figura 185**).



Figura 185. Copas de Succión para Muestreo de Agua del Suelo – Lisímetros. Izquierda: Copas de Succión (lisímetros) para el muestreo de agua del suelo para análisis químicos. Derecha: Muestreador de agua del suelo con almacenamiento del agua en el vástago.

Fuente: (Instrumentosdelsur S.A, 2017).

Estos lisímetros consisten en un sistema de vacío que permiten el muestreo de agua del suelo de la zona no saturada sobrepasando el potencial agua del suelo. Se genera un sistema de vacío controlado mediante tensiómetros al suelo.



Figura 186. Sistemas de Vacío para Muestreo de Agua del Suelo – Lisímetros. Fuente: (Instrumentosdelsur S.A, 2017)

Muestreadores multinivel: son utilizados para muestrear los perfiles químicos de las aguas subterráneas, niveles de agua y gases tanto en zonas saturadas como no saturadas (Figura 187). Estos permiten obtener datos en intervalos discretos aislados en varias profundidades de una única perforación. Son bastante fáciles de usar y son de bajo costo, con una instalación múltiple; con una flexibilidad de diseño en el campo permite que el número de puertos de monitoreo, la ubicación de cada puerto y la estrategia de monitoreo sean definidas justo en el sitio (Solinst, 2017b).



Figura 187. Muestreadores multinivel que permite el monitoreo de varias zonas en un sistema. Fuente: (Solinst, 2017b).

Piezómetros para hincar: permiten la recolección de muestras y mediciones de agua subterránea o gases desde múltiples puntos, monitoreo de tanques de almacenamiento subterráneo y como puntos de aspersión, en una sola perforación,

además proporciona rápidamente datos de alta resolución, generando perfiles verticales detallados. Son ideales para las investigaciones preliminares del sitio, proveyendo un método de bajo costo y con mínima alteración para determinar la existencia de contaminantes en perforaciones temporales. La punta del perfilador se conecta a la bomba peristáltica que enjuaga la punta del perfilador con agua desionizada durante la impulsión para evitar la contaminación cruzada y se revierte para obtener una muestra representativa. Esto permite una delineación detallada, rápida y económica de la pluma de contaminantes. Se pueden hincar con martillo manual en terrenos blandos, o con martillo vibrador o con plataforma de perforación para profundidades mayores o terrenos más firmes (Solinst, 2017b).



Figura 188. Tipos de piezómetros para hincar. Procedimiento de hincado de los piezómetros y toma de muestras. Fuente: (Solinst, 2017b).

Procedimiento para la toma de datos

- Alistamiento

En la etapa previa a la salida de campo, se prepara la documentación necesaria (listas de chequeo, libretas y formularios de campo, protocolos de muestreo, mapas y manuales de uso y calibración de equipos). A la vez debe acopiarse la información de muestreos antecedentes y la correspondiente a las características relevantes para el muestreo tanto del pozo como del acuífero.

Se debe asegurar que los equipos se encuentren en buen estado y calibrados con anterioridad en caso de requerirse. Estas calibraciones deben hacerse periódicas con soluciones adecuadas, y en toda ocasión deben ser guardados en las soluciones recomendadas por el fabricante para preservar la integridad de los sensores y la calibración realizada. Toda actividad de calibración de los equipos debe ser documentada.

En la Tabla 33, se indican las características recomendables para medidores, soluciones de calibración, periodicidad de calibración y puntos de lectura.

Tabla 33. Condiciones de calibración y uso de equipos portátiles. Fuente: (DINAMA, 2004).

Parámetro a medir	Periodicidad de calibración	Precisión de medidores y soluciones de calibración	Puntos de calibración
Oxígeno disuelto	-Previo a cada campaña, en cada cambio de membrana, luego de 10 mediciones o ante un cambio brusco en valores. -Al final de la campaña se debe medir nuevamente un testigo de calibración	< 0,1 mg/l	1
Cond. Eléctrica	-Previo a cada campaña, en cada cambio de membrana, luego de 10 mediciones o ante un cambio brusco en valores. -Al final de la campaña se debe medir nuevamente un testigo de calibración	< 1 mhos/cm	1
pH	-Previo a cada campaña, en cada cambio de membrana, luego de 10 mediciones o ante un cambio brusco en valores. -Al final de la campaña se debe medir nuevamente un testigo de calibración	0,1 a 0,01 unidades de pH	2 o 3

Eh (Potencial ReDox)	<p>-Previo a cada campaña, en cada cambio de membrana, luego de 10 mediciones o ante un cambio brusco en valores.</p> <p>-Al final de la campaña se debe medir nuevamente un testigo de calibración</p>	< 1 mV	1
----------------------	---	--------	---

Se debe tener presente los requerimientos de cada muestra para el laboratorio y se debe conocer las normas de seguridad.

Finalmente se debe preparar todos los elementos requeridos como:

- Medidores portátiles (pH, temperatura, conductividad eléctrica, potencia redox y oxígeno disuelto).
- Celdas de circulación continua
- Soluciones de calibración de equipos, agua destilada, reactivos, etc.
- Equipos de extracción y conducción de agua
- Dispositivos de toma de muestras.
- Instrumental para filtrado
- Elementos para medición de alcalinidad en campo
- Envases para las muestras
- GPS
- Medidores de nivel piezométrico
- Equipos para lavado y descontaminación del instrumental.
- Material de seguridad e higiene (guantes, lentes, cinta adhesiva, bolsas de plástico, cinta adhesiva, etc.).

- Recipientes

Los recipientes utilizados deben ser de un material que no reaccione con la muestra; generalmente son de polietileno, polipropileno, policarbonato y vidrio, los cuales son

los más recomendados. Los recipientes deben contar con tapa y/o contratapa que permitan un cierre hermético y su capacidad se deberá definir en función de los requerimientos del laboratorio.

Para muestreo biológico se recomienda el uso de recipientes de vidrio opacos que eviten penetración de luz y no generen cambios en la composición fisicoquímica del agua.

Si se desea medir gases disueltos, se debe utilizar botellas de cuello ancho con tapón esmerilado y biselado para poder cerrar sin dejar ninguna burbuja de aire (Custodio & Llamas, 1983).

Cuando se realiza un muestreo para determinar compuestos orgánicos, se debe considerar que el material empleado en la construcción del pozo y en el equipo de muestreo sea en vidrio, acero inoxidable u otro material que no permita la contaminación de la muestra con compuesto orgánico (ICONTEC, 1996b).

- Toma de muestras

Cuando se muestrea en pozos o aljibes, estos deben estar adecuadamente identificados y ubicados con coordenadas y cota. En el pozo, se debe determinar el diámetro de la boca de pozo y la altura (respecto del punto de referencia), además de ser necesario el conocer los detalles de construcción, para así saber la profundidad del acuífero o nivel del que se debe extraer la muestra (DINAMA, 2004).

Antes de adelantar el muestreo, se debe registrar la **profundidad del nivel de agua** y seguidamente la **profundidad a la cual se toma la muestra**.

Posteriormente se debe **realizar una purga del pozo**, lo cual elimina el agua estancada dentro de la perforación; el agua por sobre la zona ranurada se mantiene casi estancada, siendo alterada por fenómenos fisicoquímicos o bioquímicos diferentes a los que ocurren en el acuífero, los cuales son generados por la presencia de aire sobre la columna de agua (que genera un gradiente de concentración de oxígeno y CO₂ disuelto), la pérdida de gases por la tubería, la

lixiviación desde la superficie y cambios químicos producidos por el sello de arcillas o el material del filtro y prefiltro (DINAMA, 2004).

El caudal de purga debe ser inferior al utilizado durante el desarrollo de la perforación del pozo o piezómetro (DINAMA, 2004).

Se debe realizar un bombeo continuo y medir parámetros como el pH, conductividad eléctrica y temperatura hasta que estos se estabilicen, lo que indica el final de la purga. En estos casos, las muestras no se deben tomar hasta que dejen de observarse variaciones significativas ($< \pm 10\%$ en términos de calidad (masa/unidad de volumen) o $\pm 0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ en términos de temperatura). Sin embargo, se debe anotar que, además de medir la temperatura o la conductividad eléctrica, puede ser necesario medir variables de interés directo, como compuestos orgánicos complejos en casos de contaminación del agua subterránea (ICONTEC, 1996b).

Para (DINAMA, 2004), los criterios para definir el final de la purga están dados por el orden de estabilización como pH, temperatura y conductividad eléctrica, seguidos por potencial redox, oxígeno disuelto y turbiedad. La **Tabla 34**, presenta los rangos de estabilización para cada parámetro, cuando en al menos se han realizado tres lecturas consecutivas con más de dos minutos de separación o por la mitad del volumen almacenado en el pozo.

Tabla 34. Criterios usuales para definir el final de la purga por el método de estabilización de parámetros. Fuente: Karklins, 1996, tomado de (DINAMA, 2004).

Parámetro a medir	Criterio de finalización de purga
Oxígeno disuelto	+/- 0,2 mg/l
Conductividad eléctrica	+/- 5,0 $\mu\text{mhos/cm}$ si los valores son inferiores a 1000 $\mu\text{mhos/cm}$ +/- 10,0 $\mu\text{mhos/cm}$ si los valores son superiores a 1000 $\mu\text{mhos/cm}$
PH	+/-0,1 unidad de Ph
Temperatura	+/-0,1 $^{\circ}\text{C}$
Turbiedad	< 5 NTU (Unidades Nefelométricas de turbiedad). (Requerido para metales en muestras sin filtrar; Recomendado para compuestos adsorbidos: Opcional para otros compuestos o elementos)
Eh (Potencial Redox)	+/- 30 mV

Se recomienda que deben eliminarse por lo menos tres volúmenes de la cubierta de agua antes de muestreo. A menudo, la estabilidad se alcanza antes de la purga del pozo de los tres volúmenes, reduciendo así el volumen de residuos a ser eliminados. Si, por el contrario, después de que se han retirado los tres volúmenes del pozo, los parámetros químicos han no se han estabilizado según los criterios anteriores, deberán eliminarse volúmenes adicionales. Si los parámetros no se han estabilizado en cinco volúmenes, es a discreción del líder del proyecto el no recoger una muestra o continuar purgando (Livni, Avisar, & Mamane, 2015).

Sin embargo, cuando el pozo presenta un caudal bajo, la extracción de volúmenes acumulados es no es posible sin general un descenso en los niveles. En estos es recomendable extraer el volumen almacenado por encima de la zona filtrante y esperar la recuperación del pozo al menos una vez antes del muestreo (DINAMA, 2004).

Hay que considerar que al extraer el agua, esta puede contener partículas en suspensión que aumentan la turbiedad y concentración de algunos elementos, por lo que se recomienda que el bombeo provoque pequeños descensos del nivel del agua para que se generen las mínimas alteraciones en el flujo subterráneo (DINAMA, 2004).

Durante la purga, las mediciones de nivel de agua pueden tomarse regularmente a intervalos de 15 a 30 segundos, los cuales pueden utilizarse para calcular la transmisividad del acuífero y otras características hidráulicas (Livni, Avisar, & Mamane, 2015). Todos los datos deben ser documentados en fichas de monitoreo.

Medición de parámetros in situ

La medición de parámetros in situ debe realizarse antes o inmediatamente después de la toma de muestra. La muestra de agua debe ser colada en un recipiente, el cual previamente debe ser lavado, e inmediatamente después introducir el medidor

multiparamétrico para el registro de los parámetros pH, Temperatura, Conductividad y Total de Sólidos Disueltos TDS (*Figura 189*).

Una vez registrado los parámetros la muestra, los datos deben ser consignados en el formato correspondiente al punto de observación.



Figura 189. Medición in situ con un medidor multiparámetro en un pozo profundo de extracción.

Fuente: (CORMACARENA & A, 2016).

Tras cada medida se lavan los electrodos con agua desionizada, guardándolos convenientemente cerrados y apagados hasta nueva medida.

Recolección de la muestra

Una vez se ha completado la purga y se han preparado los recipientes limpios de laboratorio para las muestras, se puede **proceder al muestreo** en función de los elementos o parámetros a determinar.

La escogencia del método de muestreo depende de diseño que se desarrolle en la etapa de planificación del monitoreo, en donde se debe tener en cuenta el tipo de pozo, nivel estático del agua, características físicas del pozo, química del agua subterránea y los parámetros que desea estudiar; lo importante es poder tomar una

muestra representativa que tipifique las características del agua de interés (Figura 190).

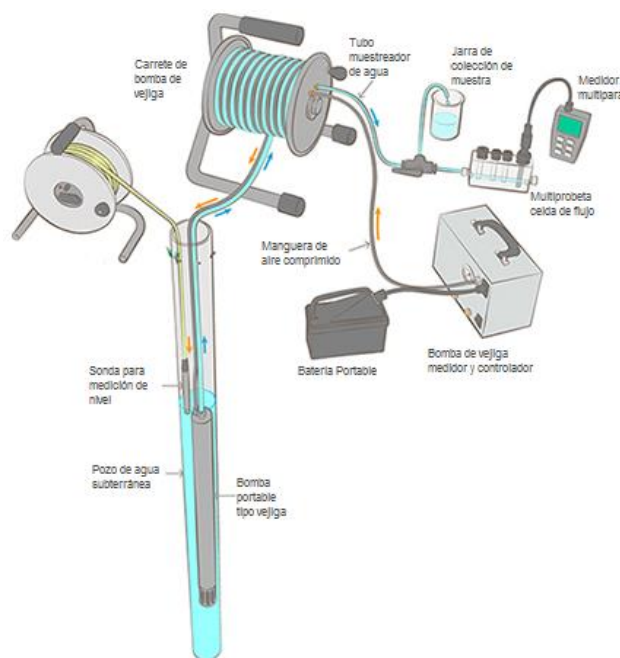


Figura 190. Ejemplo de un muestreo portable. Fuente: (Geotech Environmental Equipment, 2015)

La muestra puede ser tomada en un muestreador que toma el agua directamente del pozo o aljibe (Figura 191), o a partir de una bomba de succión que permitirá una captación del agua a un recipiente o balde. Para cada caso, se recomienda:

- Uso de muestreador: no tomar las muestras en los intervalos con tubería lisa, ya que en este punto el agua no es representativa de la profundidad a la que se activa el dispositivo de muestreo. Tampoco en la sección de filtros, debido a que los flujos naturales o inducidos dentro de la perforación pueden dar origen a muestras inciertas (ICONTEC, 1996b).
- Uso de una bomba de succión: la bomba deberá colocarse próxima a la parte ranurada, o frente a la zona de aporte con el objetivo de minimizar la re-

suspensión de los sedimentos que se encuentran en el fondo del pozo (DINAMA, 2004).



Figura 191. Muestreo en pozos profundos utilizando un bailler. Información cedida por Coralina de campañas de muestreo realizadas en el 2016.

Si la captación está equipada y no es posible el muestreo en la boca del sondeo, ni la introducción de un sistema toma-muestras, el agua se recoge del grifo más cercano al sondeo, antes de pasar por cualquier sistema de cloración. La muestra es por tanto representativa del agua extraída de la captación, pero no necesariamente de la perteneciente a un determinado nivel o profundidad de toma. Si la bomba no está en funcionamiento cuando se va a tomar la muestra, basta con dejar correr el agua para desplazar la contenida en la tubería, tras su puesta en marcha (Maestro, 2016).

En el caso de que el muestreo de calidad este dirigido para consumo humano se debe muestrear bajo exigencias sanitarias y ambientales que en esta materia tiene el país.

Para usos con otros propósitos, se puede muestrear directamente de un grifo conectado al bombeo principal. El grifo no debe tener accesorios y debe ser estilizado antes de recolectar la muestra mediante una llama. El material del tubo se debe seleccionar adecuadamente en relación con los requisitos de ensayo; por

ejemplo un tubo de cobre puede conducir a un incremento en la concentración de cobre en el agua y a una disminución en el conteo bacteriano.

También es posible tomar muestras de un grifo ajustadas a una tubería principal, tan cerca como sea posible de la fuente de suministro de agua subterránea. Es necesario que los diversos sistemas de distribución estén claramente identificados que no permitan una incertidumbre en el muestreo (ICONTEC, 1995).

Las muestras recolectadas podrán ser filtradas para separar las partículas suspendidas que pueden venir con el flujo, sin embargo la decisión de utilizar el filtrado depende de los objetivos del muestreo, sin ser tomada como una operación fija en el programa, ya que el uso de filtros podría quitar cualquier elemento o especie que se encuentre naturalmente en el flujo del agua. Para la medición de cationes y aniones (AIEA, 2014), recomienda que las muestras deben ser filtradas al momento de ser recolectadas. El filtro debe ser un filtro de membrana de 0.45 micras (o más pequeño), que está disponible en muchas configuraciones convenientes (por ejemplo, filtros de jeringa, vacío, barril, filtros de cartucho). En el caso de muestrear aguas muy turbias, se debe hacer uso de un prefiltro de (100-300 μm) que evitaría que se taponara el filtro de 0,45 μm .

DINAMA, (2004), recomienda el uso de membranas preferiblemente de difluoruro de polivinilideno (DVDF), poliamida o acetado sobre porta filtro de policarbonato, las cuales deben ser enjuagadas previamente con agua destilada y ser cambiadas entre cada muestreo.

En la Tabla 35, se presentan algunas consideraciones para tener en cuenta al momento de realizar un muestreo de parámetros de calidad del agua subterránea.

Tabla 35. Procedimientos de muestreo para muestreo de parámetros de calidad del agua subterránea. Tomado de Tomado de (Tuinhof, Foster, & Kemper, 2006).

Parámetros	Procedimiento de muestreo
iones mayores Cl, SO ₄ , f, Na, K	<ul style="list-style-type: none"> Solamente filtro de 0.45 μm

Parámetros	Procedimiento de muestreo
	<ul style="list-style-type: none"> No acidificar
Metales traza Fe, Mn, Asm Cu, Zib, Pb, Cr, Cd, ...	<ul style="list-style-type: none"> Filtro sellado de 0.45 µm Acidificar (pH <2) (agregar unas gotas de ácido nítrico concentrado). Evitar aireación por salpicado o por no llenar completamente el frasco de muestreo.
Especies de N NO ₃ , NH ₄ (NO ₂)	<ul style="list-style-type: none"> Filtro sellado de 0.45 µm
Microbiológicos TC, FC, FS	<ul style="list-style-type: none"> Condiciones estériles Muestra no filtrada
Equilibrio de Carbonatos pH, HCO ₃ , Ca, Mg	<ul style="list-style-type: none"> Muestra no filtrada Ca/Mg muestra acidificada
Estado del Oxígeno Pe (EH), OD, T	<ul style="list-style-type: none"> En celda de medición Evitar aireación Muestra no filtrada
Orgánicos COP, COV, HC, CIHC, ...	<ul style="list-style-type: none"> Muestra no filtrada Evitar la volatilización De preferencia absorción directa en cartuchos.

- Consideraciones en el llenado de muestras

Para una recolección de muestras de agua subterránea se deben considerar las siguientes recomendaciones:

- Se debe etiquetar y referenciar las botellas antes de la toma de muestras, preferentemente con rotulador resistente al agua, colocando un Código sencillo, Nombre del recolector, Fecha y hora de muestreo, Lugar y dirección del sitio de muestreo, Técnica de preservación realizada, Análisis requerido.
- Se recomienda rotular también el tapón de la botella, repitiendo el código utilizado para la identificación del punto de muestreo.
- Purgar cada botella antes de tomar la muestra. Se deberá usar solamente el tipo de frasco recomendado para cada grupo o tipo de parámetros.
- La parte interna de los frascos de muestreo y tapas no deben ser tocados directamente con la mano. Para el muestreo se debe utilizar guantes de látex.
- Las botellas de muestras y réplicas se llenan hasta el cuello. Si se indica en la etiqueta de la botella, adicione el preservante indicado según lo recomendado por el laboratorio. En algunos casos las botellas ya traen contenido el preservante.
- Las botellas para adiconados se llenan inicialmente con aproximadamente la tercera parte de la capacidad o según recomendaciones del laboratorio, para luego agregar el adiconado, referenciado en la etiqueta y llenar la botella hasta el nivel del cuello.
- Tapar firmemente cada botella.
- Se recomienda para una validación del procedimiento de recolección, se manejen análisis de blancos, muestras adiconadas con niveles conocidos de analíticos.

- Si el laboratorio proporciona recipientes que contienen ya los componentes necesarios para la preservación de la muestra, basta con llenarlos, sin enjuague previo y rotularlos debidamente.
- Cada muestra deberá ser registrada en el formato de cadena de custodia.

- Limpieza del material

Todo el instrumental deberá ser lavado con agua destilada o deionizada tras su uso en cada sitio. En todos los casos la limpieza y descontaminación se realizará de acuerdo a las condiciones dadas por el fabricante.

Según (DINAMA, 2004), la operativa para el lavado o descontaminación del equipo utilizado puede realizarse de acuerdo a los siguientes métodos:

Cationes mayoritarios, aniones y elementos traza (antes y después del uso):

- Lavado con ácido nítrico o clorhídrico, diluido al 30%
- Enjuagado 3 o 4 veces con agua destilada o deionizada.

Microbiológico

Antes de usar:

- El recipiente a utilizar (que deberá ser estéril) se mantendrá cerrado hasta el muestreo y NO se realizará enjuague previo a la toma.

Después de usado:

- Lavado con agua potable (dos veces).
- Lavado con alcohol 95%, o con metanol (dos veces).
- Enjuagado con agua potable (tres veces) y agua deionizada (dos veces).

Para el caso de estar muestreando contaminantes orgánicos se recomienda el documento *ASTM D5088 (90)- Standard Practice for Decontamination of Field Equipment Used at Nonradioactive Waste Sites*, que abarca las técnicas de descontaminación de equipos utilizados en el muestreo de suelos, gases del suelo, lodos, aguas superficiales y aguas subterráneas en sitios donde se muestrea desperdicios químicos (orgánicos e inorgánicos).

Con respecto a los frascos que serán utilizados para guardar la muestra que será enviada para análisis, algunas recomendaciones en su preparación antes de ser llenados son:

- ❖ Estos deben ser lavados (incluida la tapa) con agua que contenga detergente, para remover el polvo y los residuos de los materiales de empaque, seguido por enjuague completo (dos veces) con agua de una calidad apropiada, preferiblemente agua destilada.
- ❖ Se puede utilizar el detergente ALCONOX el cual ha sido formulado especialmente para ser "libre de enjuague" virtualmente sin deposición de materiales removidos (y no deseados).

- **Estabilización, almacenamiento y transporte de las muestras**

- Las muestras deben ser analizadas lo antes posible, tomando precauciones en que no se alteren ciertas características. Conviene evitar cambios en la temperatura y agitaciones o vibraciones.
- Las muestras deben ser preservadas según el análisis que se vaya a realizar, hasta que sean entregadas al laboratorio. La Tabla 36, describe el las técnicas de preservación dependiendo del tipo de preservante, el volumen requerido y el tiempo máximo que pueden durar almacenadas hasta el análisis.

Tabla 36. Volumen requerido, recipientes, técnicas de conservación recomendadas y tiempo máximo hasta el análisis para muestras de agua subterránea colectada. Tomada y adaptada de (Vargas & Bobadilla, s.f).

Análisis	Preservante	Tipo de envase	Muestra ml	Tiempo max. de preserv/
Alcalinidad (acidez)	Refrigeración	Vid/Plast	200	24 Hr
Cloruros	Refrigeración	Vid /Pías	250	
Colis Fecales/Totales	Refrigeración	Estéril		
Color	Refrigeración	Vid /Plast	100	48 Hr
Conductividad	Refrigeración	Vid /Plast	100	28 d
Dureza	Ac. Nítrico pH<2	Vid/Plast	100	6 m
Fenoles	H ₂ SO ₄ 2ml. refrig	Plástico	500	28 d
Fluoruro	No requiere	Plástico	100	28 d
Fósforo	HCl conc, refrig			
Fósforo disuelto	Filtrac. Refrig	Vidrio	100	48 Hr
Metales disueltos	Filtrac. HN ₃ PH<2	Vid/Plast	100	6 m
N. Amoniacal	Ac.Sulfúrico pH<2	Vid /Plast	500	7 d
N Total	Ac. Sulfúrico, pH<2	Vidrio	200	48 Hr
Nitrato/Nitrito	HsSO ₄ PH<2, refrigerar	Vid/Plast	200	
Nitratos	Refrigeración	Vid / Pías	100	48 Hr
Nitritos	Refrigeración	Vid/pasticc	100	48 Hr
Oxígeno disuelto	Inmediato , H+	Vidrio	300	0,5 Hr
Grasas y aceites	Ac. Sulfúrico. pH.2	Vidrio	1000	28 d
HC	Refrigeración	Vidrio	1000	1 mes
Metales disueltos	Filtrac, HN ₃ PH<2	Vid/Plast	100	6 m
N. Amoniacal/N total	Ac.Sulfúrico pH<2	Vid /Plast	500/200	7 d
Nitrato/Nitrito	HsSO ₄ PH<2, refrigerar	Vid/Plast	200	
Nitratos	Refrigeración	Vid / Pías	100	48 Hr
Nitritos	Refrigeración	Vid/pasticc	100	48 Hr
pH	Refrigeración	Vid /Plast	100	0.5 a 2 Hr
Sílice	Refrigeración	Plástico	200	28 d
Sólidos	Refrigeración	Vid/Plast	200	7 d
Sólidos totales	Refrigeración	Vid /Plast	500	7 d
Sulfatos	Refrigeración	Vid /Plast	100	28 d
Sulfuros	NaOH5%. 10 ml/100 ml	Piástico	100	
Turbiedad	Refrigeración	Vid /Plast	100	24 Hr

Varios laboratorios acreditados por el IDEAM¹², proporciona recipientes que contienen ya los componentes necesarios para la preservación de la muestra, basta con llenarlos y rotularlos debidamente. Sin embargo, si se requiere de la adición de preservativos químicos, estos deben agregarse previamente al llenado de la botella, durante él, o inmediatamente después, según recomendaciones del laboratorio para prevenir alguna alteración en el contenido de la muestra. Hay que asegurarse que estos preservativos se preparen y suministre con exactitud.

- Se debe poner suficiente hielo para refrigerar las muestras de tal manera que se logre una temperatura de 4°C (para períodos más largos, se recomienda congelar a -20 °C), evitando en todo caso que se rompa la cadena de frío (se debe evitar el uso de hielo seco ya que puede alterar el pH de las muestras, además de que las congela y puede causar la ruptura de los recipientes de vidrio).
- Se recomienda que las muestras sean refrigeradas en una nevera portátil acomodándolas verticalmente, separando las botellas de vidrio entre sí para evitar la ruptura de las mismas.
- Las muestras deben ser enviadas al laboratorio, asegurándose durante el envío y hasta completar la recepción en el laboratorio, se mantengan las condiciones de almacenamiento y refrigeración.

¹² Lista de laboratorios acreditados por el IDEAM, Corte a 31 de Diciembre de 2016. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/documents/51310/596001/6.+Listado+completo+laboratorios+Acreditados+a+31+de+marzo+de+2016.pdf/9947cade-e885-490a-9b53-7ff8b8409c4a>



Figura 192. Muestreo de calidad para control de acuífero, Proyecto CVC en áreas de aplicación de vinazas- Valle del Cauca. Fuente: (IDEAM, 2015).

- Identificación de las muestras

Los recipientes de muestras deben estar marcados en forma clara y sin la menor ambigüedad. Es conveniente registrar todos los detalles pertinentes a la muestra en fichas o informe de muestreo, con la siguiente información, la cual debe ser recolectada al momento de recoger la muestra (IDEAM, 2013).

La información básica que se debe incluir es la siguiente:

- Código de la muestra;
- Identificación del punto: lugar de muestreo y sus coordenadas.
- Fecha y hora en que se recogió la muestra;

- Nombre (o iniciales) de la persona que recogió la muestra.
- Naturaleza del acuífero y nivel medido de agua;
- Tipo de punto de muestreo; piezómetro, pozo, aljibe, manantial.
- Cualquier información descriptiva pertinente;
- Método de recolección de la muestra;
- Profundidad de muestreo;
- Apariencia de la muestra en el momento de la recolección (por ejemplo, color, claridad y olor);
- Resultados del análisis en el sitio (pH, Conductividad, Temperatura);
- Detalle de cualquier técnica de preservación empleada;
- Detalles de cualquier filtro que se haya utilizado en el sitio (por ejemplo, tamaño de los poros del filtro);
- Detalles de cualquier método de almacenamiento de las muestras que se haya empleado o requerido;

Cada entidad o usuario, debe diseñar una ficha para el control de la cadena de custodia de las muestras que se envíen al laboratorio, en el cual se identifique la información anteriormente descrita (Anexo C).

- **Precauciones de seguridad**

Se recomienda desarrollar un plan de seguridad en donde se tengan en cuenta los riesgos que se puedan presentar en las labores del monitoreo. Debe haber al menos dos miembros de un equipo de muestreo para prestar atención a su pareja, su paradero, condición física, etc. y estar listos para ayudar si es necesario (Livni, Avisar, & Mamane, 2015).

Al momento de muestrear se puede estar en contacto con sustancias peligrosas como químicos descontaminantes, sustancias tóxicas utilizadas para la reservación de muestras, a inhalación de gases contenidos en las tuberías de perforación, por lo que se recomienda el uso de guantes de látex, lentes de seguridad, mascarilla y botas, durante el muestreo. En caso de estar expuesto a algunos de las sustancias toxicas, debe lavarse la piel o ropa inmediatamente se entre en contacto con estas. De igual forma hay que ser cuidadoso con los frascos de vidrio.

Se debe contar con impermeables para los muestreadores en caso de que haya probabilidad de lluvia, protección para el sol en caso de fuerte exposición al sol y un equipo integral de primeros auxilios. El personal debe asegurarse de que se tengan en cuenta los requisitos de las reglamentación de seguridad pertinentes y que el personal de muestreo este informado de las precauciones de que se debe tener en dichas operaciones (ICONTEC, 1995).

7.3.3. Isótopos estables y radiactivos

Cuando se habla de monitoreo isotópico en aguas subterráneas, se está haciendo referencia al uso de los isótopos del agua, tanto estables como radiactivos, para obtener información sobre la renovación de las aguas en los acuíferos (recarga), identificación de aguas antiguas (origen y edad del agua), interconexiones hidráulicas entre varios acuíferos, mezcla de aguas de origen diferente, hidrodinámica de los acuíferos (flujos y edad), intrusión de aguas marinas en acuíferos costeros, vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación, etc.

En la actualidad, constituye una herramienta que complementa los análisis hidroquímicos, siendo indispensable para cualquier estudio hidrogeológico.

Los isótopos ambientales de mayor interés en el monitoreo de las aguas subterráneas, son los isótopos estables deuterio (hidrógeno-2), carbono-13, oxígeno-18 y los isótopos radiactivos tritio (hidrógeno-3) y carbono-14. Los isótopos del hidrógeno y del oxígeno constituyen trazadores geoquímicos ideales de las

aguas, pues sus concentraciones no suelen alterarse por interacción con los materiales de los acuíferos. En cambio, los compuestos del carbono en las aguas subterráneas pueden tener interacciones con dichos materiales, lo que complica una mayor atención en la interpretación de los datos obtenidos con el carbon-14.

La utilización de los isótopos estables del agua, como deuterio (^2H) y oxígeno-18 (^{18}O), son muy útiles para identificar las diferentes fuentes de recarga de agua subterráneas y distinguir aguas con una composición química similar, ya que son trazadores ideales porque son parte de la molécula de agua y no reaccionan como otros elementos disueltos en el agua (Dickinson, y otros, 2006). Éstos también pueden determinar el origen del agua, el modo de recarga del agua subterránea, el cálculo de la edad (a corto plazo debido a la variación estacional y a largo plazo si se desea diferenciar paleo- aguas) (Geyh & Stichler, 2000).

Otros isótopos estables utilizados son los isótopos del carbono, el ^{13}C y el ^{12}C , los cuales son trazadores relevantes en la cuantificación de las interacciones agua-roca, además de identificar la proporción de CO_2 biogénico y de los carbonatos en el agua, y determinar los ambientes geológicos iniciales de la recarga de agua subterránea (Geyh & Stichler, 2000).

Se consideran los isótopos de nitrógeno, como el ^{15}N y el ^{14}N , los cuales se comportan como trazadores antrópicos que permiten determinar la fuente de contaminación de aguas subterráneas. Así mismo, los isótopos del azufre, el ^{32}S y el ^{34}S , que permiten diferenciar entre las fuentes marinas, las evaporíticas y las volcánicas del sulfato disuelto en el agua subterránea (Krouse 1980, en Geyh & Stichler, 2000).

Con respecto a los isótopos radiactivos, su principal campo de aplicación es la datación isotópica. El método más representativo de este tipo de aplicaciones con este tipo de trazadores, es el del ^{14}C , el cual proporciona una edad del agua subterránea antigua a partir de la datación del contenido de carbono inorgánico disuelto. El agua subterránea más antigua de las cuencas más extensas se data con los isótopos ^{36}Cl , ^{81}Kr y ^{129}I (Geyh & Stichler, 2000). Los isótopos del uranio

son relevantes en los estudios de mezclas y proporcionan también buenos resultados en la datación del agua subterránea. En cualquier caso se recomienda hacer estudios multiisotópicos complementados con análisis hidroquímicos. Existen también isótopos antrópicos como el ^3H , el $^3\text{H}/^3\text{He}$, el ^{14}C y el ^{36}Cl , que se generan en los ensayos de armamento nuclear y que pueden definir la edad del agua si es anterior o posterior a los ensayos nucleares (Soler, Otero, Rosell, Carrey, & Domènech, 2017).

Considerando lo anterior, en esta sección se presentan una explicación de algunas prácticas de campo estos isótopos estables y radiactivos, válidos para cualquier objetivo de monitoreo en las aguas subterráneas.

Selección de los puntos de monitoreo

Para lograr una ubicación adecuada de los puntos, se necesitan datos suficientes sobre el diseño del pozo y una hipótesis de trabajo conceptual sobre la hidrodinámica de las aguas subterráneas.

Teniendo en cuenta que la composición isotópica varía con la evaporación y la condensación, ya que tanto el hidrógeno como el oxígeno, contienen principalmente isótopos ligeros

Tanto el hidrógeno como el oxígeno, que son los elementos constitutivos del agua, contienen principalmente isótopos ligeros. Cuando el agua de los océanos se evapora, los isótopos más pesados se condensan primero y caen en forma de lluvia antes que los más ligeros. Es en los océanos donde se genera la mayor parte del vapor de agua en la atmósfera. Por consiguiente, mientras más alejada de la costa sea la precipitación, menor será la cantidad de isótopos pesados que contenga.

Según **Fuente especificada no válida**. se debe considerar:

- La distribución altitudinal en función de la variabilidad isotópica que puede presentar la lluvia con a altitud, además de tener encuentra la distribución espacial de la precipitación de la zona de estudio (cantidad de precipitación).

Frecuencia de monitoreo

Una práctica común es tomar muestras justo antes y al final de la temporada de recarga de agua subterránea principal (AIEA & UNESCO, 2000).

Tipo de mediciones

Se pueden adelantar estudios isotópicos en la zona no saturada y en la zona saturada con mediciones directas ya sean en pozos de observación o pozos de producción, y aljibes o manantiales, siempre y cuando se precise caracteriza la situación hidrogeológica de estos puntos de observación.

Estas mediciones directas se pueden adelantar directamente en la toma de salida o rápidas y baratas. Las muestras se pueden hacer extrayendo directamente el agua del acuífero o del flujo.

- El bombeo continuo de una muestra a través de una celda de flujo da
- los mejores resultados

Comúnmente se realiza un muestreo de aguas subterráneas

bombeando desde pozos de producción.

Equipos

El muestreo de isótopos en las aguas subterráneas se puede realizar utilizando dispositivos mecánicos eléctricos o manuales, y por succión. Este último se refiere a bombas de succión que existen actualmente en el mercado a muy bajo precio y que pueden ser utilizadas en pozos con un diámetro de filtro mínimo de 40 mm y que pueden empujar una columna de agua a una altura máxima de 60 m. Se pueden escoger bombas peristálticas, bombas eléctricas sumergibles o bombas tipo-bladder (vejiga), versátiles para el muestreo y la purga de pozos. En el Apartado de *Mediciones de parámetros físico-químicos y bacteriológicos, Materiales y equipos, Monitoreo de Calidad de Aguas Subterráneas* se presenta una descripción de estos instrumentos.

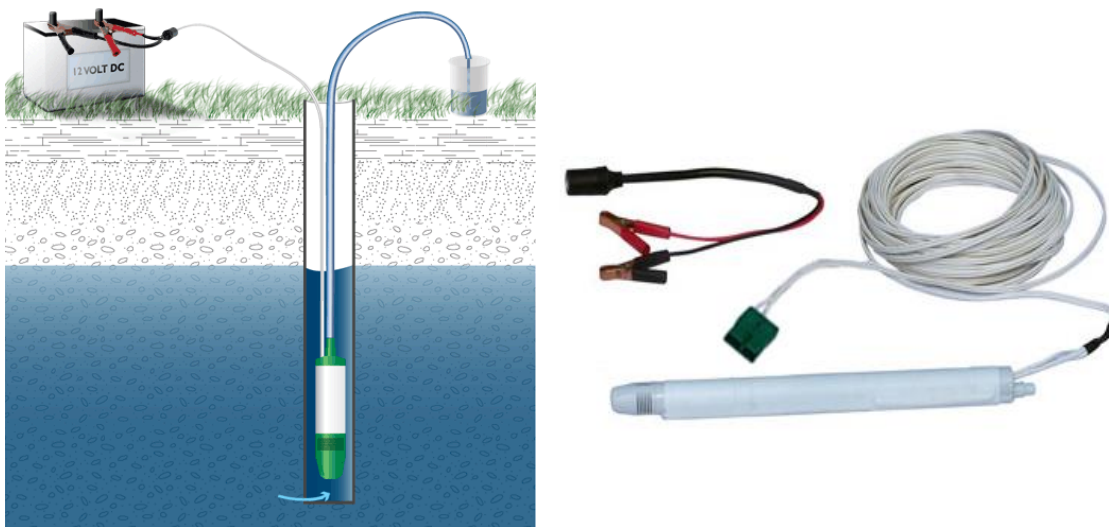


Figura 193. Funcionamiento de bomba eléctrica sumergible. Fuente: (Waterra Pumps Limited, 2016)

También se encuentran en el mercado los bailes, para muestrear manualmente en el pozo o aljibe, sin modificar la calidad y la representatividad de la muestra. Pueden ser de acero inoxidable o de plástico y su funcionamiento se basa en recuperar la muestra a cierta profundidad por medio de un cable que desciende en el pozo. El

instrumento se empieza a sumergir en el agua, debido al peso del desagüe; cuando entra en contacto con el agua, la presión hidrostática del fluido empuja hacia arriba la válvula haciendo que el líquido entre dentro del tubo. Cuando el desagüe ha llenado su nivel sumergido, la válvula se cierra evitando que el agua escape (Figura 182).



Figura 194. Muestreo de aguas subterráneas. Tomado de (CVC, 2009)

Para mediciones in situ de parámetros como pH, potenciales Redox, oxígeno disuelto, temperatura y conductividad eléctrica, se pueden utilizar sensores multiparámetros. En este caso, la muestra se puede verter en un vaso de precipitados e introducir el dispositivo, o usar un flujo continuo de celdas con electrodos de registro. También existen dispositivos que miden estos parámetros directamente dentro del pozo.

Específicamente para alcalinidad, se utiliza la valoración colorimétrica química utilizando kits de campo de alcalinidad comercialmente disponibles. El oxígeno disuelto (OD) se mide utilizando una membrana comercial o sensor óptico, o por titulación de Winkler (AIEA, 2014).

Muestreo

Cuando se realice el muestreo, se debe evitar el fraccionamiento isotópico a través de la evaporación o de pérdidas difusivas del vapor de agua, y/o el intercambio isotópico con los alrededores y con el material del envase.

Se presentan algunas recomendaciones para que el muestreo sea exitoso, sin embargo, estas deberán ser complementadas con las instrucciones específicas que proporcione el laboratorio que realice el análisis de las muestras. Esta información se ha tenido en cuenta de las guías de la (OIEA / Manual para la Dirección de un Laboratorio de Hidrología Isotópica) y de (Clark & Fritz, 1997) en (Mook, 2000).

- Toma de muestras

Se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones cuando se recolecta las muestras de pozos, aljibes o manantiales.

- Los puntos de muestreo, deben ser identificados y ubicados con coordenadas y cota, para la cual se recomienda estar nivelados con precisión centimétrica. La cota debe estar nivelada a un BM base.
- Se deben registrar las condiciones del punto y las condiciones atmosféricas presentes en la región. Si se cuenta con algún pluviómetro cerca, se debe registrar la precipitación media mensual y la temperatura promedio de la zona.
- Se debe medir la profundidad del nivel del nivel piezométrico y la profundidad de muestreo.
- Antes de iniciar el equipo de medición debe ser descontaminado.
- En el caso de muestrear pozos o aljibes, el punto debe ser purgado para asegurar la eliminación del agua estancada dentro de la perforación, para lo

cual se recomienda que este sea bombeado lo suficiente para eliminar el agua estancada, utilizando una de las bombas sumergibles, peristálticas o bombas de membrana descritas en el *Apartado de Monitoreo de Calidad de Aguas Subterráneas, Mediciones de parámetros físico-químicos y bacteriológicos, Materiales y equipos*.

Se debe eliminar por lo menos tres volúmenes de la cubierta del agua o hasta que el las variables como el pH, Conductividad eléctrica y la Temperatura se hayan estabilizado (AIEA, 2014). La **Tabla 34**, presenta los criterios para definir el final de la purga por el método de estabilización de parámetros.

- Después de la purga, se deben tomar y registrar parámetros geoquímicos in situ, como Los datos temperatura del agua, el pH, la alcalinidad, la conductividad eléctrica, y oxígeno disuelto (AIEA, 2014).
- Una vez se ha completado la purga y se han preparado los recipientes limpios de laboratorio para las muestras, se procede al muestreo. El muestreo puede realizarse con cualquiera de los instrumentos mencionados en el *Apartado de Monitoreo de Calidad de Aguas Subterráneas, Mediciones de parámetros físico-químicos y bacteriológicos, Materiales y equipos*.
- En el caso de muestrear ^{14}C y ^{13}C para el análisis de espectrometría de masas, se deberá recoger el agua usando botellas de plástico sumergido en un contenedor que desborde (AIEA, 2014).

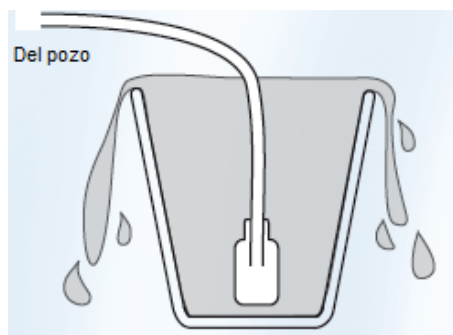


Figura 195. Colección de agua subterránea para análisis de carbono -14.

- Recipientes

Los envases para el muestreo debe estar diseñados de un material adecuado que evite la pérdida de evaporación y difusión o el intercambio de agua con otros alrededores. Se recomienda que sean envases que no haya sido usado con anterioridad.

Los envases más seguros para el almacenamiento son las botellas de cristal, las cuales permiten el almacenamiento durante al menos una década, siempre y cuando el cierre no se rompa. También se pueden utilizar envases de polietilenos de alta densidad (PE-AD), ya que si se utilizan otros de baja densidad, el agua y el dióxido de carbono se difunden fácilmente a través de estos.

Se recomienda que estos envases tengan cuellos estrechos y tapas con cierres positivos, además de tapones o arandelas de plástico, neopreno, etc., para evitar la evaporación.

Con respecto a los volúmenes de las botellas, se recomienda para el muestreo de ^2H (deuterio) y ^{18}O (oxígeno) botellas de capacidad de 30 o 50 ml y de 500 o 1000 ml para ^3H (tritio). Para los análisis combinados del ^2H y del ^{18}O debería ser normalmente de 50 ml, 50 L para la datación estándar del ^{14}C y 250 ml para la datación en espectrómetro de masas del ^{14}C .

Si el almacenamiento ha de ser superior a un par de meses, entonces es preferible recoger un gran volumen y almacenar las muestras en botellas de cristal (de esta manera la relativa influencia de la evaporación será mínima).

- Consideraciones en el llenado de muestras

Las botellas deben llenarse hasta la parte superior sin dejar espacio, siempre y cuando el agua no tenga posibilidad de congelarse durante el transporte. Para el caso de transporte aéreo donde las muestras pueden presentar congelamiento, se recomienda llenar las dos terceras partes de la botella.

Se debe rotular cada frasco antes de llenarlo, preferentemente con rotulador resistente al agua, colocando un código sencillo de identificación, lugar de muestreo y sus coordenadas, fecha y hora de recolección; colocar los valores de precipitación máxima medida y temperatura promedio; profundidad de muestreo y el tratamiento de preservación realizado. Se recomienda rotular también el tapón de la botella, repitiendo el código utilizado para la identificación del punto de muestreo.

Toda la información debe ir referenciada en una libreta de campo y en hojas para recolección de muestras. Se deben reportar la apariencia de la muestra en el momento de la recolección (por ejemplo, color, claridad y olor); resultados del análisis en el sitio (pH, Conductividad, Temperatura y nombre (o iniciales) de la persona que recogió la muestra.

- **Estabilización, almacenamiento y transporte de las muestras**

Para el caso de cálculos de fracciones de carbono inorgánicouelto (CID) en el agua y sus respectivas mediciones del contenido de ^{14}C o el cociente $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$, se deberá discutir con el laboratorio encargado de los análisis la mejor forma de recolección de las muestras ya que estos requieren de técnicas de estabilización antes de ser analizadas.

Según (Vargas & Bobadilla, s.f), (AIEA, 2014) y (Tecnología y Recursos de la Tierra, S.A.L, 1991), hay que tener en cuenta:

Para el caso de muestreo de $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ y ^{14}C en carbonatos disueltos se debe conocer la composición química de carbonatos, bicarbonatos y sulfatos presentes en el agua a ser muestreada. Se deben hacer mediciones de campo de temperatura, pH, alcalinidad, oxígeno disuelto y potencial Redox, las cuales son esenciales para la interpretación. Para el caso de utilizar el método de recuento de centelleo líquido convencional, hay que coleccionar un volumen de muestra de 40-60 L. Se debe llenar el contenedor hasta la parte superior, y sobre este volumen se debe ajustar el pH a 11 con una solución de NaOH libre de

carbonatos, evitando al máximo la exposición a la atmósfera para que el dióxido de carbono atmosférico no contamine la muestra.

Posteriormente se debe agregar la cantidad previamente requerida de BaCl_2 , calculada de acuerdo a las concentraciones de carbonatos y sulfatos presentes, donde precipitarán ambos compuestos como sulfatos y carbonatos de bario. También se puede agregar aproximadamente 5 g de sulfato de hierro a la muestra para facilitar la formación del precipitado de carbonato. Se agita la muestra y se tapa de tal forma que quede herméticamente cerrada. Si las muestras son enviadas a otro laboratorio para su análisis, se dejan decantar y cuidadosamente se elimina el líquido sobrante y se envía sólo el precipitado.

Si se recolectan muestras de $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ y ^{14}C para el análisis de espectrometría de masas, se requieren 100-500 ml de agua filtrada. Éstas deben conservarse para eliminar actividad microbiana agregando 5 gotas de $\text{I}_2\text{-KI}$ solución por 100 ml de muestra. Esta solución $\text{I}_2\text{-KI}$ se puede preparar disolviendo 1,5 g de I_2 y 3 g de KI en 100 ml de agua desmineralizada. Otra posibilidad es agregar de 2 a 3 gotas de solución saturada de HgCl_2 . Las muestras de agua no conservadas deben refrigerarse preferiblemente y debe analizarse dentro de los 30 días.

Para ^{13}C del carbono inorgánico disuelto, se debe muestrear 250 ml de agua subterránea. Para su preservación se debe agregar una solución $\text{I}_2\text{-KI}$ o cloruro de mercurio (II) (HgCl_2) para eliminar la actividad microbiana.

Para recolección de muestreo de ^{15}N , el volumen de muestra a tomar dependerá de la concentración química de nitratos del agua. Se requiere del orden 4 - 5 mg/l de nitratos presentes en el agua para el análisis. Si ésta concentración es menor, se debe tomar un mayor volumen de muestra, del orden de 2 a 5 litros.

Con respecto a análisis de ^{36}Cl , se deberá de disponer de unos 30 mg de cloro. Puesto que la mayor parte del agua potable tiene entre 10 y 100 mg/l de cloro disuelto, una muestra de unos pocos litros es suficiente. Se mezcla nitrato de plata con el agua de la muestra y se forma AgCl , que precipita. El precipitado

se coloca con una botella fuera del alcance de la luz solar y del calor excesivo, hasta que se haya completado el análisis.

Cuando se trata de isótopos estables, las muestras no requieren filtración o preservación, sin embargo estas se deben conservar de tal forma que no exista fraccionamiento isotópico con anterioridad al análisis, por lo que siempre las botellas deberán contar con tapón impermeable a la fase de vapor.

Las muestras deben ser almacenadas en un lugar fresco hasta su análisis para evitar su evaporación. Para lugares donde las condiciones de humedad y temperatura sean altas, se recomienda que las muestras sean refrigeradas en el tiempo que se demore su envío.

Al momento de ser enviadas al laboratorio, las muestras deben ser empacadas adecuadamente para prevenir que se rompan durante el envío.

7.4. Monitoreo Marino-Costero

El monitoreo marino – costero comprende una alta variedad de técnicas de muestreo asociadas al objetivo del monitoreo y al ecosistema estratégico a caracterizar. Para efectos de este protocolo, se presentarán las metodologías implementadas en la Unidad de Laboratorios Ambientales de Calidad Ambiental Marina – LABCAM del Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras INVEMAR que son aplicadas por la Red de Monitoreo de Calidad Ambiental Marina REDCAM.

7.4.1. Calidad de aguas

- Selección de los puntos de monitoreo

La selección de los puntos para el monitoreo de la calidad de las aguas y sedimentos está estrechamente relacionado con el objetivo del muestreo, las condiciones físicas del lugar, la presencia de ecosistemas estratégicos como manglares, corales, playas, pastos marinos, estuarios, lagunas costeras y la presencia de tensores ambientales que puedan alterar las condiciones fisicoquímicas y ser agentes de entrada de contaminantes como lo son actividades económicas que se desarrollan en los municipios costeros (actividad portuaria, descarga de vertimientos, turismo, agricultura, minería, entre otros), la pesca artesanal e industrial, la desembocadura de tributarios, entre otros.

- Frecuencia de monitoreo

Para determinar la frecuencia y el momento del muestreo es conveniente considerar dos aspectos relevantes: el régimen pluviométrico de la zona y la dinámica de las mareas. En el caso de la región Caribe, la presencia de temporadas secas y lluviosas son determinantes para la entrada de contaminantes a las aguas marinas y costeras debido a efectos de escorrentía superficial y descarga de tributarios, por

lo que se recomienda realizar muestreos que caractericen estos regímenes de lluvia, considerando los períodos de transición, es decir mínimo entre 3 y 4 veces en el año, dependiendo de su carácter unimodal o bimodal.

Para la región Pacífico las temporadas pluviométricas no son marcadas, pero es determinante la dinámica de mareas que dependen de factores gravitacionales relacionados con el movimiento oscilatorio de la tierra y su cercanía a la Luna (IDEAM, 2017). La presencia de pleamares (marea alta) y bajamares (marea baja) influye directamente en la concentración de los contaminantes en la franja marino - costera, por lo cual se recomienda caracterizar la calidad de las aguas en estas dos condiciones de marea.

En el marco del Programa Nacional de Monitoreo de la calidad de las aguas marinas y costeras - REDCAM, se realizan dos muestreos en cada uno de los departamentos costeros del país.

- **Tipo de mediciones**

Las mediciones se realizan de manera puntual, en el agua pueden realizarse en superficie (a 25 -30 cm de profundidad) o a lo largo de la columna del agua, según el objetivo de la medición. Para cada variable se contemplan metodologías y equipos que serán descritos más adelante.

- **Equipos**

Para la toma de muestras en la columna de agua se utilizan botellas capaces de tomar muestras a la profundidad requerida, en la Tabla 37, Figura 196 y Figura 197, se presentan algunas características de las botellas existentes para muestrear la columna de agua.

Tabla 37. Equipos utilizados para el muestreo de aguas¹³

Equipo	Aplicación	Material de construcción y de contacto con la muestra	Ventajas	Desventajas
Botella Nansen	Colecta de fitoplancton, Compuestos químicos (*)	Metal/ recubierto con capa de teflón	Se puede usar en serie	Colecta poco volumen de muestra
Botellas Niskin	Compuestos químicos(*) Bacteriología Fitoplancton Zooplancton	PVC/ Acrílico	No genera contaminación metálica, son las más comunes.	No son adecuadas para análisis de compuestos orgánicos
Botella Kemmerer	Compuestos químicos (*) Zooplancton Bacteriología	PVC Acrílico / plástico Latón / bronce	No genera contaminación metálica. No requieren mensajero,	No son adecuadas para grandes profundidades (>20m). Toxicidad debido al metal
Botellas Van Dorn	Compuestos químicos (*) Bacteriología Fitoplancton Zooplancton	PVC	No generan contaminación metálica	Capacidad fija, existen de 2 a 30 litros
Botellas comunes	Compuestos químicos (*) y Bacteriología	Vidrio	Bajo costo	No puede controlarse la profundidad del muestreo
Bombas extractoras	Compuestos químicos (*)	Acero inoxidable	Puede coleccionar grandes volúmenes en forma continua, muestra la columna en sentido vertical	Existe la posibilidad de contaminación metálica y puede generar daño a los microorganismos

¹³ Tomado del US. EPA. 1982. Handbook for Sampling and Sample Preservation of Water and Wastewater

(*) Los compuestos contaminantes tipo plaguicidas, tóxicos metálicos y orgánicos prioritarios deben ser colectados con muestreadores que posean materiales de contacto tales como teflón, vidrio u otros que no contaminen la muestra.

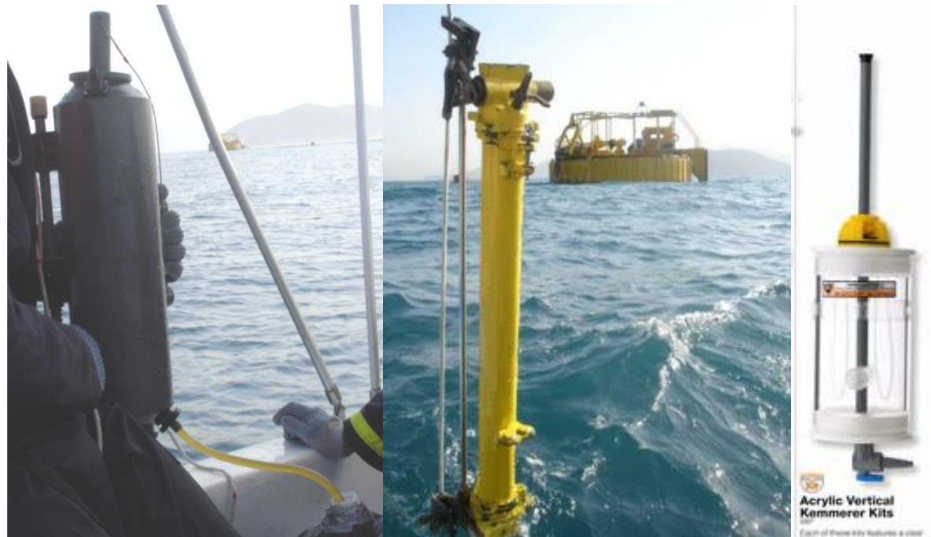


Figura 196. Botellas oceanográficas, Niskin (a) y Nansen (b) Kemmerer (c) usadas para la extracción de muestras de agua, operadas desde una embarcación menor.

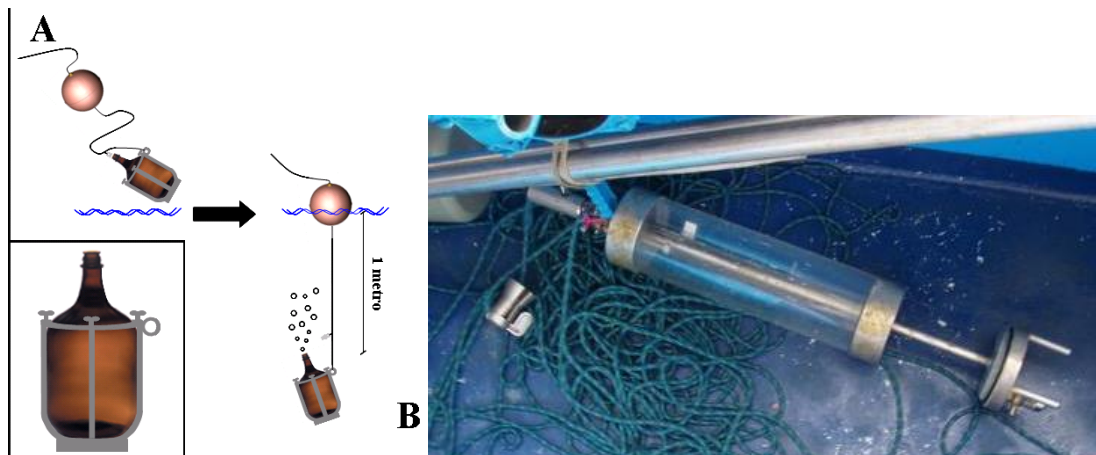


Figura 197. Dispositivo para muestreo de compuestos orgánicos (hidrocarburos y plaguicidas) (A) y botella Ruttner (B).

- Procedimientos para la toma de muestras

A continuación, se presentan las recomendaciones para el alistamiento de materiales, la medición de parámetros *in situ* y la toma de muestras a diferentes profundidades en ambientes marino costeros.

Preparación del material y equipos de campo:

Antes de iniciar una salida de campo, se deben tener en cuenta las siguientes recomendaciones:

- Los recipientes para la recolección de muestras, deben ser lavados o esterilizados de acuerdo al tipo de muestra y variables a analizar. Para garantizar que los recipientes sean adecuados para el muestreo, se recomienda realizar controles para el lavado de material.
- Tener una lista de chequeo para verificar los materiales, equipos y reactivos requeridos para la toma y preservación de muestras.
- Verificar los equipos y dejar los respectivos registros en las cartas de control y uso de equipos.
- Alistar la cantidad de formatos, etiquetas y procedimientos de muestreo requeridos para la recolección de muestras.



Figura 198. Alistamiento de recipientes para el muestreo. Fotos: Archivo INVEMAR

Medición de Parámetros *in-situ*

La medición de pH, conductividad, salinidad, temperatura, oxígeno disuelto, en el agua superficial, se realiza directamente en el cuerpo de agua si el instrumento de medida lo permite, de lo contrario se debe tomar la muestra de agua en recipiente de plástico previamente jugado con la misma agua que se va a medir y analizar inmediatamente, debido a que estas variables se alteran por los cambios de temperatura (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). Para el caso de oxígeno disuelto, se debe evitar contacto prolongado con el aire. La sonda de medición se introduce en el recipiente plástico y una vez se estabilice el resultado en el medidor, los datos deben ser registrados en el formato de datos de campo.



Figura 199. Toma de datos in situ en el departamento de Córdoba. Fotos: Archivo INVEMAR.

La profundidad en las estaciones marinas debe ser medida con un profundímetro o ecosonda.

Toma de muestras

Para la toma de muestras en campo, se recomienda realizar las siguientes acciones:

- Verificar los equipos en campo, con el fin de evidenciar que durante el transporte no se afectaron los instrumentos (Figura 200).

- Registrar en la casilla de observaciones cualquier variabilidad climática o de cualquier índole que ocurra antes y durante la toma de muestra que pueda servir como suministro para la evaluación de los resultados.
- Recopilar los datos de campo en un formato para su custodia y posterior sistematización en la base de datos. Se recomienda diligenciar un formato con este fin y una cadena de custodia para muestras de agua.
- Si se trata de una estación nueva, se deben recolectar datos que permitan su descripción (coordenadas geográficas, descripción del área, datos *in situ* del primer monitoreo, entre otros).



Figura 200. Verificación de equipos en campo. Foto: Archivo INVEMAR.

Toma de muestra superficial

Las muestras superficiales pueden ser tomadas directamente en la botella introduciendo el recipiente de muestreo aproximadamente 25 - 30 cm (medio brazo) por bajo de la superficie para evitar la adhesión de películas de aceite o materiales flotante y orientando la boca de la botella en contra de la corriente, manteniendo la mano alejada del flujo. Excepto las muestras para análisis de grasas y aceite que se toman de la capa superficial de agua (Figura 201).



Figura 201. Toma de muestra superficial en el departamento de Nariño. Foto Archivo INVEMAR.

Cuando las muestras son tomadas en embarcaciones, la introducción del brazo en el agua se dificulta, al igual cuando se requieren muestras de profundidad. En estos casos se hace indispensable el uso botellas de muestreo (Ver Tabla 37) o extensores para botellas.

Toma de muestra a profundidad

Para obtener muestras de agua a profundidades determinadas, se emplean botellas colectoras dotadas de mecanismos de cierre para confinar la masa de agua que se encuentra a la profundidad de interés. Entre las botellas más comunes están las botellas Nansen o Niskin (Figura 196). En el caso de muestreo para análisis de Hidrocarburos del Petróleo Disueltos y Dispersos (HPDD) se debe emplear un dispositivo que consiste en una base en acero inoxidable en la cual se pone la botella se ata a un flotador de 1 metro de distancia y se lanza al agua y por acción del mismo peso la tapa se desprende y se llena (Figura 197).

En estudios oceanográficos, se emplean normalmente botellas Nansen para el análisis de los parámetros fisicoquímicos, pH, salinidad, oxígeno disuelto y nutriente inorgánicos. Las botellas Van Dorn y Niskin, por tener capacidad de mayor volumen,

son ideales para la obtención de muestras en el análisis de pigmentos fotosintéticos y contaminantes (pesticidas, metales pesados, etc).

Las botellas de cierre horizontal son adecuadas para muestreos en cuerpos de agua con corriente (como ríos) ya que permite el paso del flujo de agua, o para coleccionar muestras de fondo en cuerpos de agua muy someros, siendo muy apropiada para estudios de estratificación vertical.

En el caso de requerir muestra para el análisis de microbiológicos y oxígeno disuelto, estas deben ser las primeras muestras que se toman de la botella, dejando fluir una porción de agua (100 a 200 mL) que se desechan, luego se destapan y se llenan los frascos esterilizados. En el caso de medir el oxígeno por el método de Winkler, al extremo de la llave de salida de la botella debe unirse una manguera flexible, la cual se introduce hasta el fondo de la botella Winkler para evitar la formación de burbujas.

En el caso de muestras para la determinación de parámetros fisicoquímicos, una precaución sencilla que, sin embargo, no es adecuada en todos los casos*, es llenar los frascos completamente y taparlos de tal forma que no haya aire sobre la muestra. Esto limita la interacción con la fase gaseosa y la agitación durante el transporte evitando así, las modificaciones en el contenido de CO₂, y por consiguiente, variaciones en el pH, el hierro tiene menos tendencia a ser oxidado limitando así variaciones de color, etc.

Si las muestras van a ser congeladas, los frascos se llenan, pero no completamente; el congelamiento a temperatura de -20°C permite en general un incremento en el período de almacenamiento. No obstante, es necesario controlar la técnica de congelamiento y deshelado, para retornar la muestra a su equilibrio inicial; en este caso es muy recomendable usar recipientes plásticos.

* No se recomienda llenar completamente los frascos cuando las muestras van a ser sometidas a congelamiento, porque la dilatación puede provocar la ruptura del envase.

Preservación de las muestras

La preservación y el almacenamiento de las muestras son parte del análisis que asegura la integridad de las muestras una vez que se recolecta en su fuente. Por lo general, los resultados analíticos son confiables en proporción al tiempo transcurrido entre su colecta y análisis.

Para garantizar la integridad de las muestras hay que asegurarse que los envases estén bien sellados y protegidos de los efectos de la luz o el calor. Los métodos de preservación y almacenamiento incluyen una o varias de las siguientes operaciones: refrigeración desde su colecta, control del pH, filtración, adición de reactivos específicos (p.e. HNO_3 para metales), etc. Según las variables a analizar, se realiza la preservación en campo o si es posible se preserva en el laboratorio. En el Anexo D se especifican los métodos de preservación para muestras de agua recomendados para los parámetros que se realizan en el laboratorio, el tipo de recipiente sugerido y el tiempo máximo de almacenamiento recomendado.



Figura 202. Preservación de muestras de agua en campo. Foto. Archivo INVEMAR.

Almacenamiento y transporte de muestras.

Las muestras deben ser transportadas con todos los registros de campo que aseguren su trazabilidad. Se debe evitar que el hielo empleado para preservar las muestras se descongele e inunde las muestras. También se recomienda cubrir las botellas con protectores plásticos para prevenir que se rompan por contacto entre las botellas.

Se sugiere no emplear CO₂ en estado sólido debido a que el pH de las muestras podría variar o cuando se recolectan las muestras en recipientes de vidrio, estos recipientes se pueden romper.

Consideraciones a tener en cuenta antes y durante el muestreo:

- ✓ Construir un plan de muestreo donde se especifique los parámetros a medir, las estaciones a caracterizar y los responsables del muestreo.
- ✓ El sitio de recolección de la muestra debe ser representativo del sector a estudiar o acorde a los objetivos del estudio a realizar.
- ✓ Cuando la aproximación a la estación se realice en lancha, hacerse de forma lenta para no perturbar las condiciones de la estación antes de muestrear, sobre todo en sitios de poca profundidad o muy confinados.
- ✓ En general si el sitio es poco profundo; hay que tener especial cuidado no perturbar los sedimentos del fondo para evitar re-suspender los sedimentos en la columna de agua, sea cual fuere el medio de transporte.
- ✓ La toma de muestras tomadas desde una lancha se debe realizar en la proa para evitar la influencia del motor.
- ✓ Cuando la toma de muestra se realiza en sitios con corriente, el proceso de muestreo se realizara en contra de la misma, para evitar la turbulencia provocada por las piernas del técnico, es decir, el agua no debe pasar por las piernas del investigador en dirección al recipiente de muestreo.
- ✓ Previamente a la recolección se purga el recipiente con agua del sitio, a excepción de las muestras para análisis microbiológico cuyos frascos vienen

previamente esterilizados y para las muestras de grasas y aceites, hidrocarburos aromáticos policíclicos y plaguicidas.

- ✓ En el caso de muestras de compuestos orgánicos (por ejemplo hidrocarburos) se debe evitar la emanación de humos desde el motor de la embarcación.
- ✓ Si el muestreo se realiza en lancha, asegurar en lo posible, que la lancha se mueva muy poco durante la recolección de las muestras.
- ✓ Para análisis microbiológicos el volumen mínimo de muestra requerido es de 100 mL; las muestras deben ser protegidas de los rayos ultravioleta y de las altas temperaturas.
- ✓ El transporte de las muestras para análisis microbiológico al laboratorio se realiza en el menor tiempo posible, manteniéndolas refrigeradas entre 2 a 6°C y bajo condiciones higiénicas para evitar contaminación cruzada. Estas muestras deben ser procesadas en un máximo de 6 horas, en ninguno de los casos deben superar las 24 horas de almacenamiento. ((APHA, 2012)).
- ✓ Las muestras de agua para análisis microbiológico no se realizan de manera compuesta, ni integrada, estas deben ser puntuales de acuerdo con el tipo de agua, tener en cuenta los siguientes requisitos:

7.4.2. Calidad de Sedimentos

- Selección de los puntos de monitoreo

Al igual que para la selección y ubicación de puntos de monitoreo de calidad de aguas, para determinar la calidad en sedimentos marino costeros, se contempla el objetivo del muestreo, la presencia de ecosistemas estratégicos y los tensores ambientales. Adicionalmente, se considera la profundidad del punto, el tipo de sustrato a muestrear (arenas, lodos, restos biológicos) y la presencia de corrientes, características que pueden ser condicionantes en el muestreo.

- Frecuencia de monitoreo

Para determinar la frecuencia y el momento del muestreo es importante tener en cuenta factores como la tasa de sedimentación del área de estudio relacionada con la presencia de descargas de tributarios, el régimen pluviométrico y la presencia de fuentes terrestres de contaminación. En el marco de la REDCAM, el monitoreo de calidad de sedimentos se realiza mínimo dos veces al año.

- Tipo de mediciones

En sedimentos marinos las mediciones se realizan de manera puntual, las muestras pueden tomarse en el sedimento superficial y a varias profundidades que dependen del instrumento utilizado.

- Equipos

Existe una gran variedad de instrumentos de muestreo de sedimentos, tanto comerciales como de elaboración propia. Algunos son de utilización manual y otros están total o parcialmente automatizados. El uso de uno u otro instrumento de muestreo está definido en función de la profundidad del agua donde se realiza el muestreo, espesor de capa de sedimento y la cantidad que se necesite recolectar para realizar las determinaciones (NTC 5667/19).

El uso de equipos para la recolección de sedimentos se basa en el objetivo requerido del estudio, para garantizar la integridad de la muestra o estructura del perfil sedimentario. Dentro de los instrumentos y equipos más comunes se nombran los siguientes:

- **Palas:**

Dependiendo del tipo de muestreo (superficial o profundidad) y parámetros a medir se pueden emplear diferentes tipos de palas (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). Las palas manuales sirven para la toma de sedimentos superficiales, no presentan un área definida y son de bajo costo. Las palas tipo

draga como la Ekman y Van Veen tienen un área de muestreo entre $0,01 \text{ m}^2$ a $0,2 \text{ m}^2$ y son utilizadas para sedimentos de profundidad en ambientes costeros.

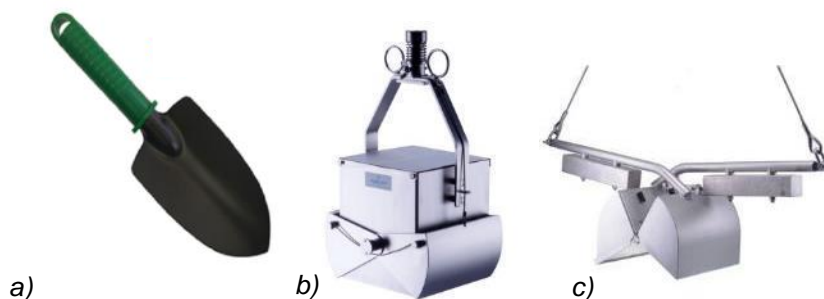


Figura 203. Tipo de palas. a) Pala manual b): Pala tipo draga Ekman y c) Van Veen..

- **Muestreador de Plataforma**

Los muestreadores de plataforma, usualmente tienen un área de muestreo entre $0,025 \text{ m}^2$ a $0,25 \text{ m}^2$ de la superficie del sedimento. Están contruidos de manera que la superficie del sedimento permanezca intacta durante el muestreo y se puedan tomar submuestras del mismo muestreador de plataforma. Los muestreadores de plataforma trabajan eficientemente siempre y cuando las tapas estén bien cerradas herméticamente para izado, permitiendo el flujo libre durante el descenso para reducir la onda de presión en el frente del muestreador. Dentro de los muestreadores más comunes se encuentran la Box Corer.

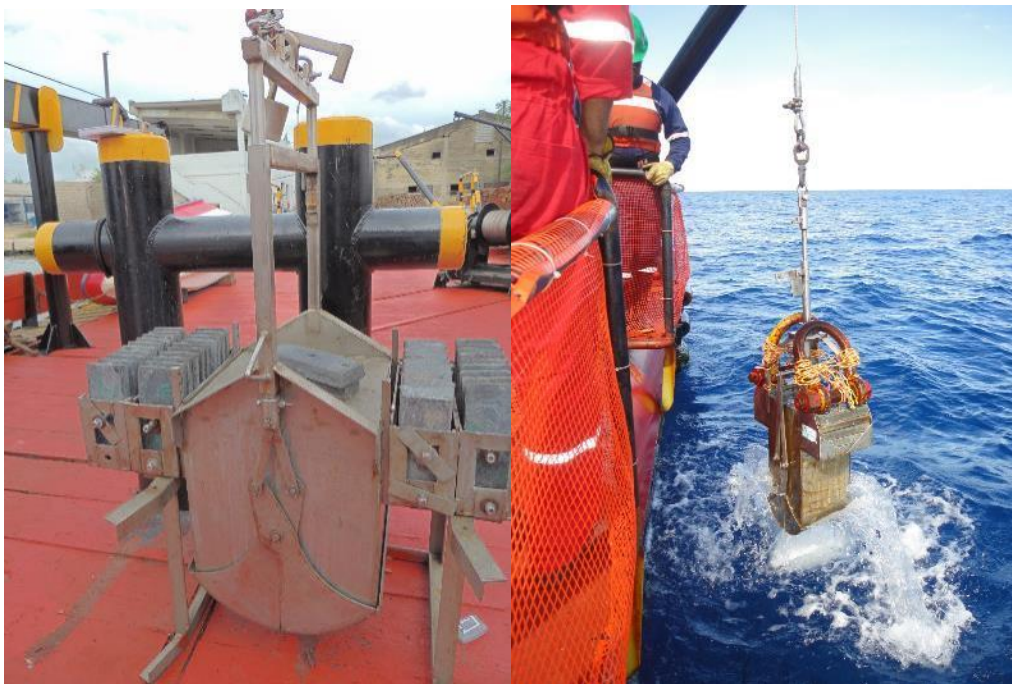


Figura 204. Box Corer. Fotos: Archivo INVEMAR

- **Muestreador de gravedad**

Los muestreadores de gravedad son ampliamente usados para estudios ambientales, se encuentran en una gran variedad de modelos, con diversas longitudes y diámetros de tubos y diferentes mecanismos de cierre. La mayoría de los muestreadores de gravedad tienen equipo de seccionamiento que permite que los núcleos sean seccionados en los intervalos de profundidad deseada (entre capas de 1 a 2 cm), inmediatamente después de realizado el muestreo. De esta manera, se puede analizar la distribución vertical de contaminante u otros compuestos, obteniendo un panorama histórico de la contaminación. Entre los muestreadores de gravedad se han introducido muestreadores múltiples que tiene de 2 a 12 tubos nucleadores, cada tubo de 10 cm de diámetro o más (Figura 205). Esto permite tomar varias muestras paralelas y tener suficiente material.



Figura 205. Multimuestreador de gravedad (Multicore Imagen tomada de UWITEC, 2017)

- Procedimientos para la toma de muestras

La recolección del sedimento se realiza después de la toma de las muestras de agua, para evitar alterar la columna de agua por la resuspensión del sedimento.

Para la toma de muestra superficial en playas, manglares o de sedimentos marinos con equipo de buceo, se debe asegurar que el área de toma de muestra se encuentre sin material que pueda alterar la misma, como por ejemplo conchas, ramas, residuos plásticos u otros materiales.

Para la toma en área superficial, se debe usar una pala pequeña, tomar la cantidad requerida y considerar las siguientes recomendaciones de acuerdo a los análisis solicitados:

- **Análisis de contaminantes orgánicos (hidrocarburos, plaguicidas organoclorados y organofosforados, grasas y aceites, entre otros):** recolectar con pala de acero inoxidable aproximadamente 100 g de sedimento de la capa superficial en un recipiente de vidrio o sobre una película de aluminio. En caso de usar botellas de vidrio, llenar máximo hasta 2/3 partes de la capacidad del recipiente, para permitir la expansión sin rotura durante su congelamiento.

Todo el material empleado debe ser previamente lavado con solvente (diclorometano, hexano).

- **Granulometría:** recolectar aproximadamente 200 g y colocarlos en una bolsa tipo “Ziploc”. No congelar la muestra.
- **Análisis de metales:** recolectar aproximadamente 100 g de muestra con palas de teflón y depositar en botellas plásticas de boca ancha o en bolsas plásticas tipo “Ziploc”. Todo el material empleado debe ser previamente purgado con HNO₃.
- **Análisis microbiológico:** las muestras se deben recolectar con una pala estéril, y se debe depositar en bolsas resellables o Whirl-pak. Una vez tomada las muestras deben ser analizadas dentro de las dos horas siguientes, en caso que no se analicen de inmediato se deben mantener bajo refrigeración (2 a 6 °C) por un tiempo máximo de 24 horas.

En el caso de sedimentos de profundidad los muestreos se realizan con dragas Ekman o Van Vienn (Figura 203), o con muestreadores de plataforma. Dependiendo de los parámetros solicitados y el volumen de la draga, se deben realizar los lances necesarios para cumplir con las cantidades requeridas por el laboratorio, por lo que sugiere homogenizar las submuestras antes de repartir para los diferentes parámetros. Adicionalmente se recomienda lo siguiente:

- Primero tomar las muestras para contaminantes orgánicos que serán integradas de 2 submuestras (en lo posible iguales) obtenidas de dos lances diferentes teniendo en cuenta las precauciones del caso.
- Para las muestras de metales, no se debe tomar el sedimento que se encuentra en contacto con las paredes de la draga.
- Las muestras de hidrocarburos o plaguicidas se recolectan con espátulas o cucharas metálicas.

- Las muestras para análisis de nutrientes y carbono orgánico total, se toman con palas plásticas o metálicas en el caso de las dragas. Para la Box Corer se recomienda integrar 2 submuestras (en lo posible iguales) obtenidas de dos diferentes lances.
- La muestra restante contenida en la draga se puede mezclar para obtener la muestra de granulometría.
- En el caso de Cores verticales, se debe tomar una muestra entre 300 – 500 g de cada fracción del sedimento.

7.4.5. Hidrobiológicos marinos (corales, pastos marinos, mangle, fitoplancton, zooplancton, ictioplancton)

Así como se contempla establecer el estado de la calidad del agua para los recursos hidrobiológicos de agua dulce, es necesario determinar la calidad del agua marina para los organismos marinos y estuarinos, ya que está en contacto directo con las actividades antropogénicas y dependiendo de su calidad puede haber impactos sobre la supervivencia de los organismos que allí habitan. A continuación se presentan algunas sugerencias para el desarrollo e implementación del monitoreo de parámetros de calidad del agua que son específicos para diferentes grupos de organismos marinos:

Entre los parámetros ambientales comunes a todos los organismos están los nutrientes inorgánicos (mínimo los nitritos, nitratos, amonio, fosfatos), los cuales determinan los cambios en la actividad alimentaria, fecundidad, biomasa, abundancia y composición de las especies; la salinidad, temperatura, pH y oxígeno disuelto, los cuales deben medirse en puntos exactos sobre los que se colectan las muestras biológicas.

Para las mediciones de variables in situ (salinidad, temperatura, pH y oxígeno disuelto), existen sondas multiparamétricas, las cuales deben estar previamente calibradas antes de la medición; CTD oceanográficos que contienen sondas de conductividad, temperatura y profundidad, diseñados para elaborar perfiles de estas

variables en la columna de agua; y equipos de lectura específica *in situ* entre los que se encuentran los data loggers de temperatura.

Otras variables que permiten determinar las condiciones medioambientales que son importantes para determinar el estado de las poblaciones son, la turbidez y la tasas de sedimentación, la cual determinará la presencia, distribución, migración vertical y la disponibilidad de alimento de los organismos; la concentración de dióxido de carbono CO₂, el cual determina los cambios en los ciclos reproductivos y procesos de calcificación; y los contaminantes (metales pesados, grasas, aceites e hidrocarburos, entre otros), cuya determinación dependerá específicamente de las actividades antrópogénicas que se desarrollen en el área de estudio.

La periodicidad de toma de datos estará determinada por los objetivos específicos que determinan los estudios, pero es preponderante que entre más variedad en la información se obtenga (periodicidad de toma de datos) se obtendrán mejores resultados en la caracterización del ambiente y su relación con los organismos que lo habitan.

En relación a la metodología para la caracterización y seguimiento de cada uno de los ensambles hidrobiológicos considerados en la evaluación de impactos ambientales (plancton, necton, fondos blandos, fanerógamas, entre otros), se puede consultar en el *Manual de métodos de ecosistemas marinos y costeros con miras a establecer impactos ambientales* (Baez-Polo, 2013.)

Fuente. Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia - CTA y Universidad Católica de Oriente. Grupo de Limnología y Recursos Hídricos

DE GESTIÓN
MENTAL

GESTIÓN DE DATOS E INFORMACIÓN

8. GESTIÓN DE DATOS E INFORMACIÓN

La Gestión de datos e Información es el manejo eficiente y adecuado de los datos y la información a través del desarrollo de estrategias para mejorar la planeación, la producción, la preservación, la integración, el acceso y la difusión de estos, con el fin de garantizar a usuarios y productores la calidad, confiabilidad, interoperabilidad, uso y acceso de la misma¹⁴.

El dato es el registro de una variable y/o atributo, que al ser procesado y complementado con otros datos como resultado se convierte en información. Los datos generados en las campañas de monitoreo, lecturas y mediciones, entre otros, son valiosos, ya que su obtención requiere esfuerzo, cantidad de tiempo y de dinero.

Para que un conjunto de datos ofrezca información, es necesario que cumpla con unas características, que hacen que el dato sea de buena calidad, acompañado de una planificación para su obtención, teniendo en cuenta un antes (programas de monitoreo y protocolos de monitoreo) y un después (registro, documentación (metadato), validación, preparación y almacenamiento en la base de datos), que permite a través de los instrumentos de acopio (sistemas de información) que el dato sea confiable para que exprese un resultado, sea oficializado. Siendo los sistemas de información, los elementos de apoyo en la generación de conocimiento, a la toma de decisiones y a la gestión del recurso hídrico encaminada al desarrollo sostenible¹⁵. Se propone un esquema metodológico que se presenta en la Figura 206.

¹⁴ IDEAM <http://www.ideam.gov.co/web/ecosistemas/gestion-datos-informacion>, recuperado 23/06/2017.

¹⁵ Tomado de <http://siam.invemar.org.co/>. Recuperado 2/10/2017

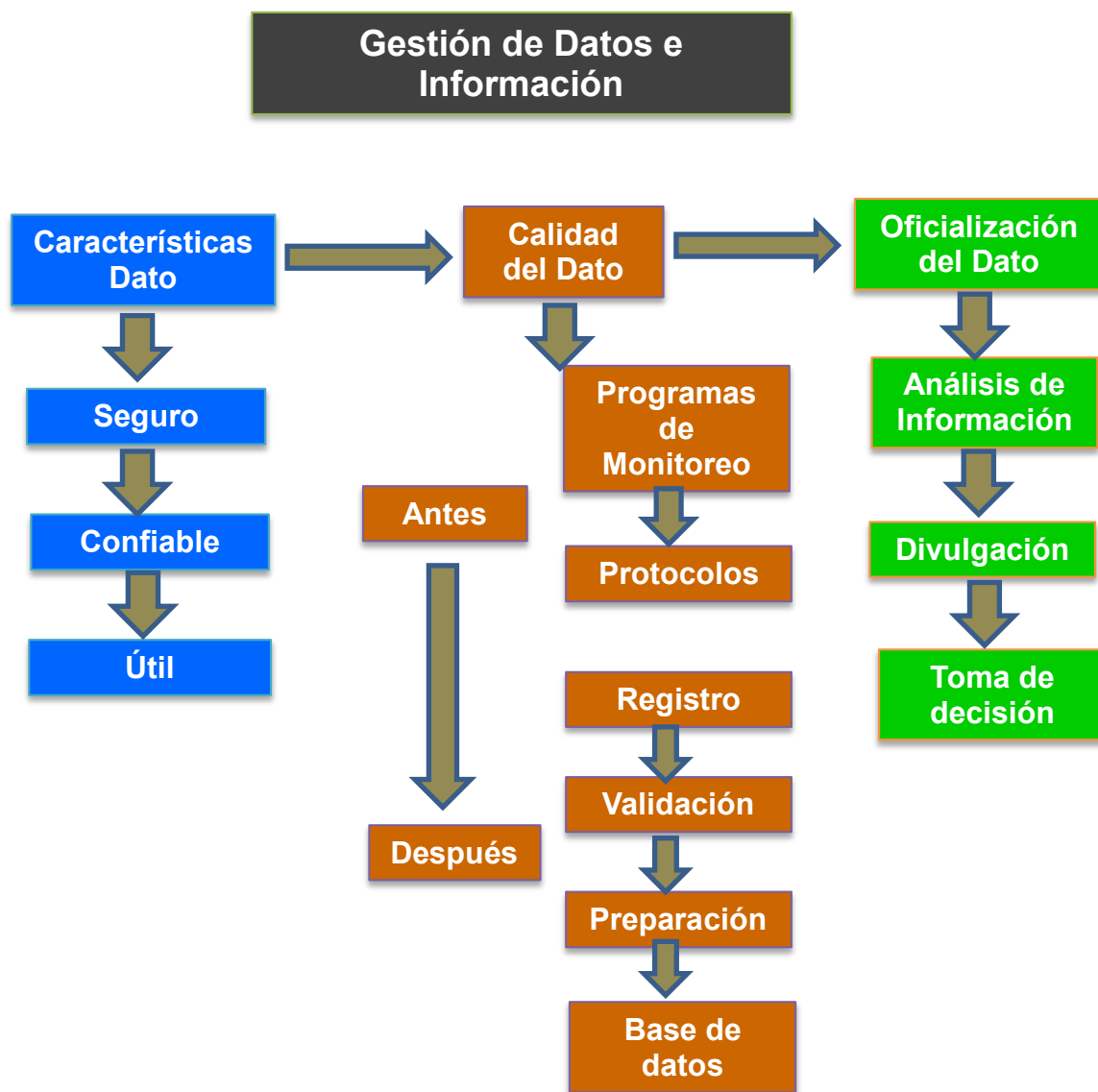


Figura 206. Gestión de Datos en Información. fuente IDEAM, 2017

Su gestión es, por consiguiente, una tarea importante que se ha de llevar a cabo con eficacia para aprovechar al máximo los resultados, de una campaña de monitoreo y/o de una medición.

8.1. Características del dato

Un dato seguro, es un dato que se registra con la certeza de que los procesos y procedimientos para su toma, análisis de laboratorio y lectura, son correctos y validados, haciendo que sea confiable y por tanto útil, para que haga parte del conjunto de microdatos y por tanto ofrezca información; brindando a los productores y usuarios calidad, confiabilidad, interoperabilidad, uso y acceso de los mismos¹⁶.

8.2. Calidad de datos

La calidad de los datos va desde la planificación y programación para su obtención, hasta el proceso analítico de laboratorio, su documentación (metadato), el registro, la validación y la preparación para que haga parte de una base de datos o reservorio de la información constituido, que se encuentra debidamente documentada con metadato.

Para que un dato tenga una buena calidad, es importante tener en cuenta un programa de monitoreo que fije unos objetivos, alcance, estrategias, costos, entre otros, de las campañas y mediciones que se van a realizar, y un protocolo que le indique al usuario los métodos, materiales y procedimientos para las toma y preservación de muestras y mediciones estandarizadas, con el objetivo de que el dato emitido luego de una costosa y larga campaña de monitoreo no sea erróneo, ya que la identificación de donde se ha cometido el error va ser más complicada que la medición o toma de muestra nuevamente.

Para garantizar la calidad de los datos, es importante tener en cuenta:

- Revisión de instrumentos de medición
- Capacitación del personal que toma los datos relacionados.
- Vinculación de personal idóneo

¹⁶ IDEAM <http://www.ideam.gov.co/web/ecosistemas/gestion-datos-informacion>, recuperado 23/06/2017.

- Verificación de procedimientos en la digitación conversión y migración de variables en bases de datos.
- Corrección de datos, donde se documente el ajuste efectuado.
- Generación de copias de seguridad de la información medida y corregida.
- Principios de la calidad de los datos.
- Captura, digitalización, almacenamiento, análisis, presentación y uso

La calidad debe aplicarse en todo el proceso de gestión de datos (registro, digitalización, almacenamiento, análisis, presentación y uso). Hay dos acciones clave para mejorar la calidad de los mismos: la **prevención de errores** y **corrección**. Prevención se refiere a las acciones de validación realizadas durante las tareas de recopilación y registro de la información en bases de datos. La corrección está enfocada a los procesos de limpieza permiten identificar las causas de los errores incorporados a la base de datos y debería dar lugar a procedimientos que garanticen que esos errores no se repitan. Sin embargo, prevenir errores se considera más eficiente que realizar la detección de errores, ya que la detección es a menudo costosa y nunca se puede garantizar al 100% de éxito (Dalcin 2004).

La Figura 207, resume las recomendaciones del SIRH para la implementación de la calidad de los datos una entidad:

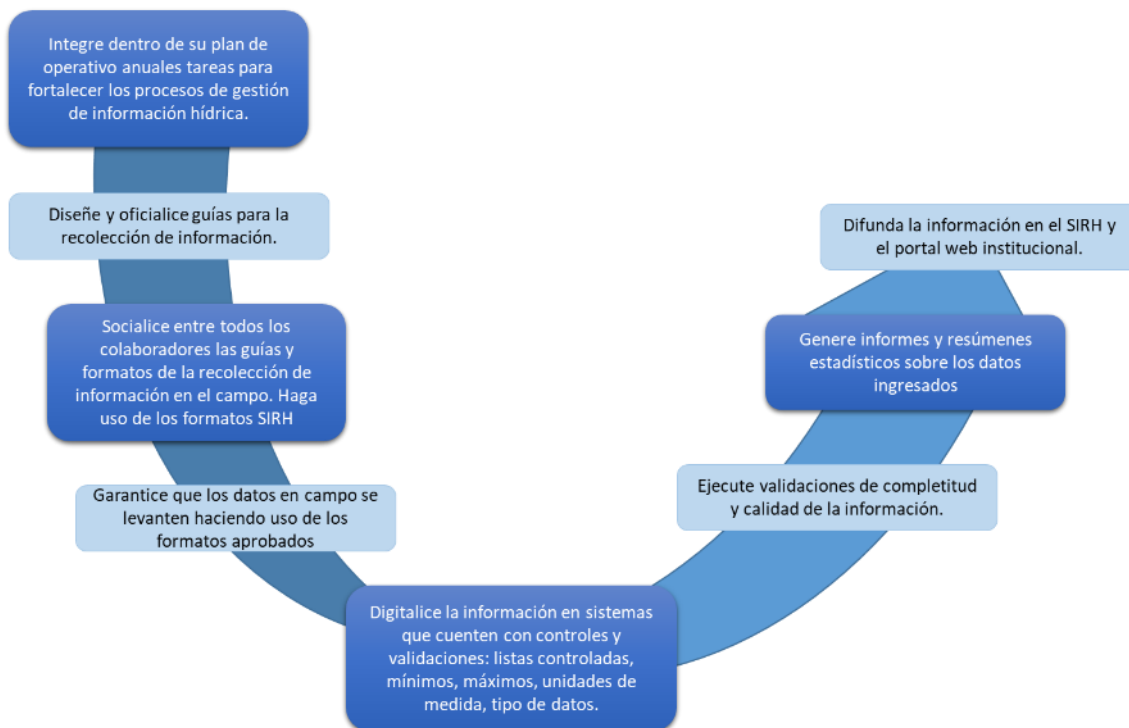


Figura 207. Pasos para mejorar la calidad de los datos. Fuente. (IDEAM, 2014)

El registro de un dato con su correcta unidad de medida y ubicación de los decimales, en el momento de la toma, la lectura, el análisis y la medición, hace parte de la calidad del dato, la correcta observación, el cumplimiento del protocolo, teniendo en cuenta los estándares indicados, permiten dar inicio correcto en la obtención del mismo.

Teniendo en cuenta que los datos son obtenidos y registrados de diversas maneras, desde la lectura in situ (manual) de medidores simples con posteriores análisis de laboratorio, hasta toda una diversidad de sistemas automatizados de recopilación, transmisión y archivado de datos. Al ritmo actual de la tecnología, es importante que los sistemas de proceso y control de calidad de los datos estén bien organizados y sean adecuadamente comprendidos por quienes se encargan de su recopilación y de su utilización (OMM, 2011).

El proceso de **validación**, es otro factor importante en de la calidad del dato, permite corroborar que el registro realizado, este acorde con los decimales, unidades, entre otros, para que haga parte de una base de datos, para consulta del usuario.

Para la validación de los datos, existen herramientas como gráficas, que ayudan a observar el dato atípico.

En la Figura 208, se observa un ejemplo de error, como saltos de nivel, datos inventados por el observador y errores de lectura o de digitación.

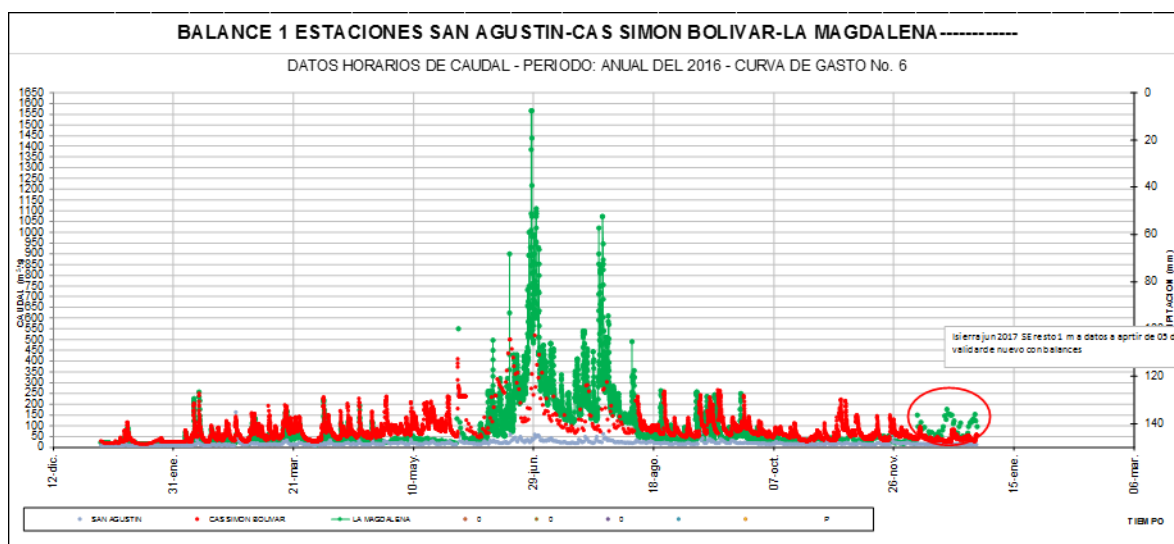


Figura 208. Errores identificados mediante comparación por grupos de balances. Fuente, IDEAM 2017

Uno de los procesos de validación es la revisión de los datos raros, son datos que no tienen un comportamiento igual a la mayoría de los datos que se han obtenido, son datos que se encuentran muy alejados de los datos promedio de la serie.

Revisar la presencia de valores atípicos (geográfico, estadístico y ambiental) los cuales pueden considerarse como errores o son completamente válidos, pero atienden cambios de regímenes climáticos, remanentes de actividades humanas.

Independientemente del tipo de datos que se esté procesando o el camino que su procesamiento tome, un requerimiento básico es el de mantener un estándar de

operaciones que no degrade la calidad de los datos. El sistema debe estar estructurado de forma que garantice controles específicos en cada etapa del trabajo.

En el Anexo E, se encuentra el proceso de cálculo y tratamiento que se hace a las variables básicas de aguas superficiales, para obtener información hidrológica.

- Niveles
- Cálculos y procesamiento de curvas de calibración: curvas de gastos
- Extrapolación de curvas de gastos para niveles altos
- Extrapolación de niveles mínimos para curvas de gastos. Determinación del “Ho”
- Procesos cálculo de caudales
- Calculo y procedimiento de datos de sedimentos en suspensión

Entre los diferentes métodos utilizados para la extrapolación de curvas de gastos para niveles altos figuran los siguientes:

- Manning
- Stevens
- Extensión logarítmica

Algunos de los métodos más conocidos para la determinación del Ho son los siguientes:

- Logarítmico
- Running
- Jonson

Base de datos

Luego de contar con datos registrados y validados, estos son preparados para ingresar a una base de datos, con el objetivo de mantener consolidados el conjunto de datos que ofrecen información, para el análisis y gestión, de acuerdo a los objetivos de los diferentes estudios e investigaciones.

La base de datos se construye de acuerdo a los datos registrados, teniendo en cuenta ciertos atributos de organización, cumpliendo con especificaciones técnicas y normativas que hagan más fácil su consulta, por tanto, es importante que dicha base se encuentra documentada (con cada una de las definiciones de sus atributos), y actualizada permitiendo la comprensión de su estructura para la facilidad de entendimiento de acuerdo a las necesidades.

Un tipo de información producto de un conjunto de datos es la información geográfica, la cual posee un componente geométrico o espacial, que describe la localización de los objetos en el espacio y las relaciones espaciales entre ellos. (IDEAM, 2013)

“En una Infraestructura de Datos Espaciales, los estándares representan los lineamientos básicos para desarrollar datos geográficos documentados con calidad y dispuestos al intercambio fácil y eficaz” (IGAC, 2010a).

Los estándares son necesarios porque:

- Ayudan a crear “datos útiles” al incrementar su consistencia y mejorar su validez.
- Facilitan el uso de los datos y permiten que sean compartidos.
- Promueven un lenguaje común.
- Facilitan la comunicación entre entidades del Gobierno.
- Mejoran las decisiones de gestión al simplificar la tarea de integración de datos de diferentes fuentes.
- Permiten la interoperabilidad entre sistemas.

- Facilitan el desarrollo de bases de datos, al tiempo que maximizan sus aplicaciones y utilización.

Para el análisis de la información geográfica (Figura 209), es importante tener en cuenta los datos de referencia, los cuales representan la información temática de un territorio. En la Infraestructura Colombiana de Datos Espaciales “ICDE”, se han identificado oficialmente ocho capas como fundamentales: control geodésico, ortoimágenes digitales, elevación, transporte, hidrografía, límites político-administrativos, catastro, nombres geográficos.

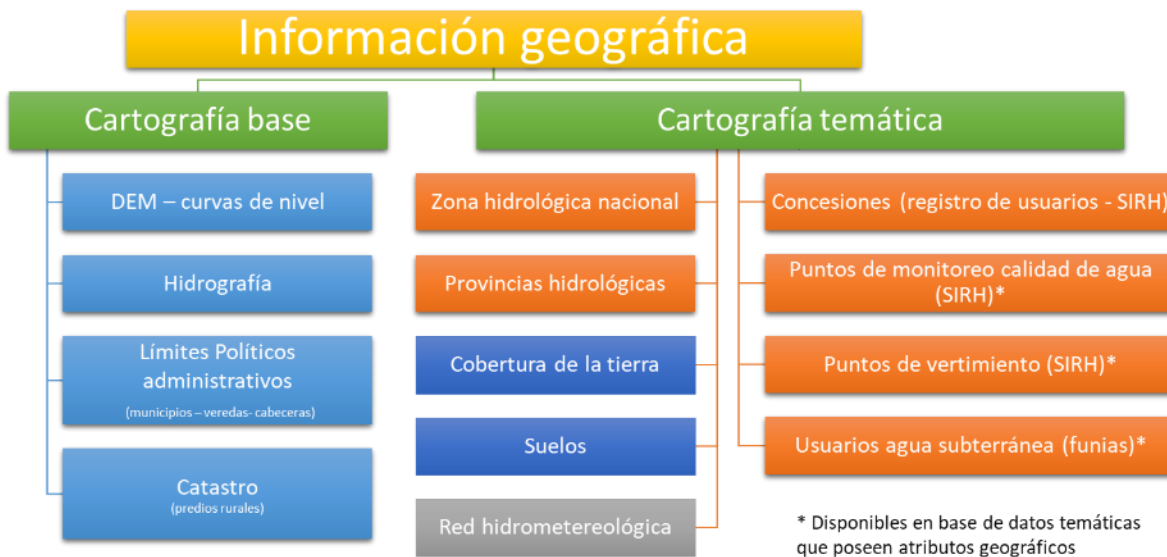


Figura 209. Requerimientos información geográfica ERAs. Fuente. (IDEAM, 2013)

Además de esto es recomendable contar con:

Modelo Digital del Terreno (MDT) o Modelo de Elevación Digital (DEM): es la representación tridimensional de un área, mostrando la conformación del terreno modelado a escala horizontal para ilustrar con toda realidad las características artificiales y físicas naturales.

Zonificación hidrográfica nacional: en sus tres niveles: áreas, zonas y subzonas hidrográficas. Este último nivel es la base de partida para la definición de las áreas de estudio de las ERA que adelantan las autoridades ambientales.

Provincias hidrogeológicas: corresponden a las 16 provincias hidrogeológicas identificadas en la zonificación del IDEAM (IDEAM, 2010a).

Escenarios de cambio climático: estudios realizados por el IDEAM para detectar las evidencias del cambio climático en Colombia y condiciones probables que se presentarían en los próximos decenios.

Es importante tener en cuenta que dependiendo al procesamiento que se le dé a los datos para el análisis, hay que construir un metadato, el cual es un conjunto de atributos organizados en un modelo de datos, que “proporciona información acerca de identificación, calidad, representación espacial, sistema de referencia espacial, contenido de los datos, catálogo de símbolos y distribución, para un conjunto cualquiera de datos geográficos” (IGAC, 2010b).

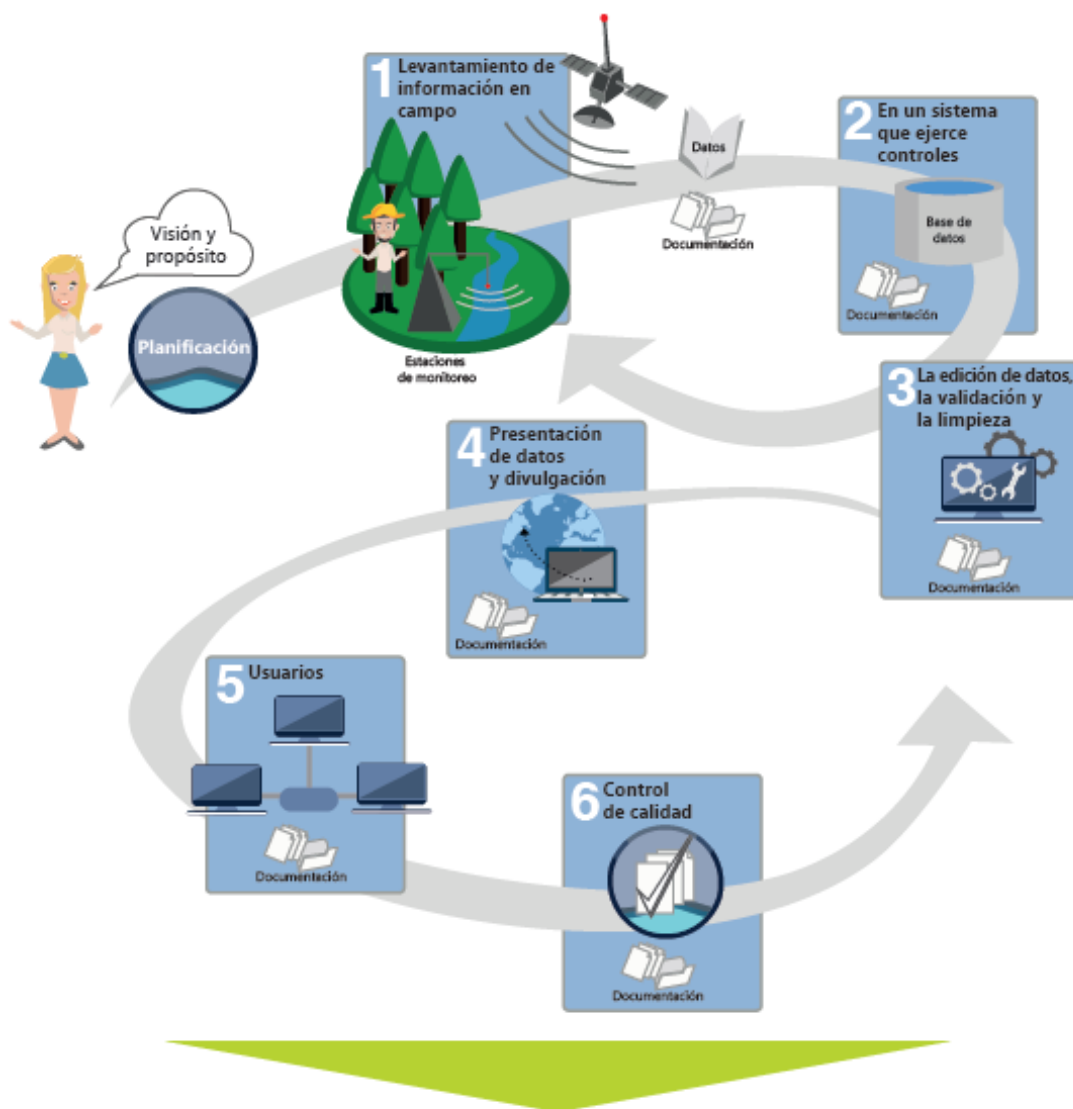
De otra parte, con el objetivo de fortalecer y obtener intercambio de información, es importante tener en cuenta, el uso del Catálogo Nacional de Estaciones, el cual deberá fortalecerse para permitir consolidar un inventario de estaciones de las Redes públicas y privadas, y de ámbito nacional y regional, que permite identificar cuencas y las aguas marino-costeras que cuentan con instrumentos de monitoreo, y aquellas donde existen vacíos, atributos mínimos sobre identificación de la estación, estado de sus datos y de los valores de las mediciones. En tal sentido, cuando una entidad realice la recolección de mediciones sus atributos deben ser nombrados de acuerdo a los estándares nacionales, para que actores interesados en una zona puedan agregar fácilmente información de una misma variable.

En el Anexo E, se encontrará se presentan los atributos para el registro e inscripción en el Catálogo Nacional de estaciones.

Sistemas de información

Los sistemas de información constituyen un aporte efectivo en la implementación de prácticas de gestión de información, donde a partir de la consolidación de datos e integración de transformaciones permiten construir conocimiento. (IDEAM, 2014)

En la Figura 210, se observa el flujo de datos dentro del SIRH y las acciones para su gestión



Gestión de información: Cultura de calidad de los datos

Figura 210. Flujo de datos dentro de un sistema de información del recurso hídrico. Fuente. (IDEAM, 2014)

Observe que el proceso inicia con la orientación de un equipo de personas que planifican la recolección de datos para atender a un visión o propósito, posteriormente se realiza la recolección de información, la cual puede provenir de sensores remotos, variables meteorológicas, estaciones hidro meteorológicas (niveles, precipitación, temperatura, datos de calidad, etc), Oceanográficos, levantamiento de información en campo (datos de usuarios del agua, datos de calidad, aforos), para proceder al ingreso de datos de un sistema, el cual a su vez se apoya en una o varias bases de datos. Seguidamente es posible disponer la información a manera de reportes o informes y facilitar mecanismos de consulta por diferentes filtros (IDEAM, 2014).

8.3. Oficialización del dato

Luego de realizar la gestión de dato e información, se da inicio a la interpretación y análisis de la información, divulgación con el objetivo de ofrecer información para la toma de decisiones.

La oficialización de los datos se refiere a la etapa en la cual se hace una evaluación del cumplimiento de requerimientos mínimos según lineamientos y normas vigentes. Es decir, una verificación temática para determinar si los cumplió y para establecer que la información se pueda considerar oficial y se entregue a manera de registro para ser usada por distintos usuarios. Y también una verificación técnica que permita establecer si el producto cumplió con los estándares de calidad, de alcance, de documentación del metadato y si es “suficiente”, por haber cumplido con la expectativa de “lo planeado versus lo producido”. Así mismo, deberán haber consideraciones de la entidad que produce la información respecto a la propiedad intelectual: derechos personales o morales, patrimoniales, definición de autorías y reconocimientos, entre otras.

Durante este proceso de verificación puede suceder que la autoridad que hizo la verificación técnica o temática encuentre que aún el producto o el conjunto de datos

no cumplen con los requerimientos mínimos para oficializarlos o publicarlos y es cuando los remite de vuelta para su ajuste hasta que haya cumplimiento.

Actualmente y de acuerdo a las Evaluaciones Regionales del Agua, existen algunos instrumentos técnicos que permiten capturar y oficializar información, y por tanto mantienen un proceso permanente de actualización. Alguno de los instrumentos son:

8.3.1. Registro de Usuarios del Recurso Hídrico

El registro de usuarios es un instrumento diseñado para consolidar la información de concesiones de agua y permisos de vertimiento, estandarizando la información básica requerida para el otorgamiento de los mismos en las autoridades ambientales, en el marco de los decretos 1324 de 2007 y 303 de 2012, ofreciendo la información que soporta la asignación de los mismos y que cumpla con algunas de las premisas de un registro administrativo (IDEAM & MAVDT, 2011a).

8.3.2. Formulario Único de Inventario de Aguas Subterráneas (FUNIAS)

A nivel nacional el IDEAM en coordinación con las Autoridades ambientales diseñaron el formulario único nacional de inventario de puntos de agua subterránea - FUNIAS, con el fin de consolidar información técnica que especifica el detalle del punto en sus componentes de localización, identificación, geología y geomorfología, construcción y diseño, geofísica, explotación, diagnóstico sanitario, registro de niveles, caudales, pruebas de bombeo, entre otros. El gráfico a continuación indica que para contribuir a la red de monitoreo de agua subterránea en una región, se debe contar con información exhaustiva de las características y condiciones de los puntos. A partir de ello, se debe definir un plan de seguimiento al punto en donde se consolide información de la variación de sus niveles, hidroquímica, y caudales para así identificar zonas en las cuales existen vacíos de información y programar nuevas actividades de inventario y monitoreo.

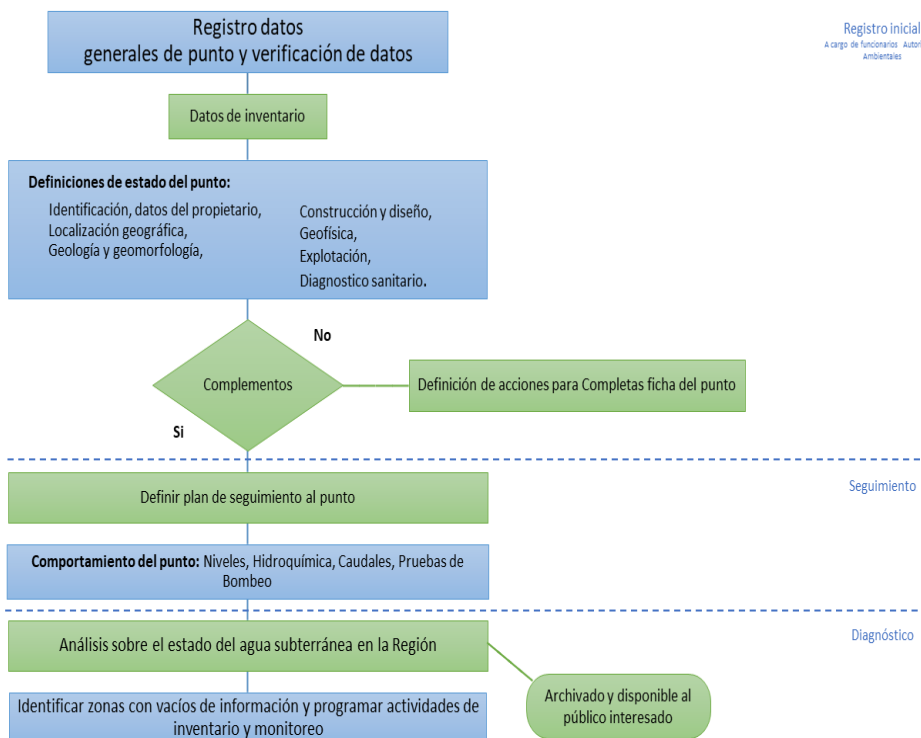


Figura 211. Información asociada al inventario de puntos de agua Subterránea. Fuente. (IDEAM, Implementación del Sistema de Información del Recurso Hídrico SIRH en Colombia, 2014; IDEAM, 2014).

8.3.3. Guía para la gestión Integrada del Recurso Hídrico

Desde el MADS se prevé la publicación y reglamentación de guías relacionadas con la planificación, ordenamiento y manejo del recurso hídrico que en términos generales corresponden a:

- Guía Técnico-científica para la Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas.
- Guía para los Planes de Ordenación del Recurso Hídrico (PORH).
- Guía Nacional de Modelación del Recurso Hídrico.
- Guía para la elaboración de planes de manejo ambiental de acuíferos.
- Guía para la elaboración de planes de manejo de microcuencas.

8.4. Acceso abierto

El Acceso abierto es el suministro de acceso gratuito a información. Ello requiere que el propietario de los derechos entregue el derecho irrevocable y global a copiar, usar, distribuir, transmitir y hacer trabajos derivados en cualquier formato para cualquier actividad legal, con el reconocimiento apropiado del autor original.¹⁷

El Acceso abierto usa las tecnologías de la información y la comunicación (TICs) para incrementar y mejorar la visibilidad y el impacto de los resultados de investigación. Disponer datos de forma abierta conlleva a que el prestigio de los investigadores y de las entidades aumente; pues aportan a la transparencia y ganan más visibilidad al permitir que su información sea analizada y empleada por más usuarios para ayudar a dar forma a las estrategias y políticas. Existen muchos mecanismos para disponer información: a través de archivos descargables desde internet o servidores FTP, a través de webservices basados en tecnologías SOAP o REST, y el uso de geoservicios WMS “Web Map Service”, WFS “Web Feature Service”, o WCS “Web Coverage Service”.

Un Web Service es un componente de software que se comunica con otras aplicaciones transfiriendo datos a través de protocolos de Internet tales como el Hypertext Transfer Protocol (HTTP). El consorcio W3C define los Servicios Web como sistemas software diseñados para soportar una interacción interoperable máquina a máquina sobre una red. Un webservice se acompaña de un “contrato” o WSDL¹⁸ que permiten conocer los servicios que ofrece, su forma de acceso, los datos de entrada de cada una de las funcionalidades y los datos de salida.

En el contexto del agua, disponer webservices de datos hidrológicos permite que sistemas de información nacionales y regionales puedan acceder en línea a datos

¹⁷ Organización de las Naciones Unidas para Educación, la Ciencia y la Cultura 7, Place de Fontenoy, 75352 Paris 07 SP, France,

http://www.unesco.org/fileadmin/MULTIMEDIA/HQ/CI/CI/pdf/publications/policy_guidelines_oa_sp_reduced.pdf

¹⁸ Web Services Description Language

de redes oficiales y complementarias, pudiéndolos articular para construir una mejor visión de un territorio.

8.5. Análisis de información

A partir de la base de datos consolidada y validada, una manera de realizar el análisis de información es a través de los indicadores.

Un indicador es la medida cuantitativa o la observación cualitativa que permite identificar cambios en el tiempo y cuyo propósito es determinar qué tan bien está funcionando un sistema, dando la voz de alerta sobre la existencia de un problema y permitiendo tomar medidas para solucionarlo, una vez se tenga claridad sobre las causas que lo generaron (OECD, 2001). Un indicador es un dato, variable o parámetro, ya sea sencillo o compuesto, que más allá de lo que dice en si misma, permite describir un espectro de información adicional y permite deducir un conocimiento sobre el conjunto. (España, 2000).

Los datos que se recopilan mediante las campañas de su red de monitoreo deben tener la visión para consolidarse al menos de 15 años. El IDEAM (ERA 2013) recomienda que para el cálculo de diferentes tipos de indicadores, la serie debe ser de estas características, pues las condiciones de una región no pueden determinarse con mediciones puntuales. La propuesta de un sistema de indicadores pertinentes, coherentes y asequibles en el contexto nacional y regional debe obedecer una lógica de procesos, relaciones e interdependencia entre las lecturas del nivel nacional, regional y coherencia con lo internacional. Como no todos los indicadores que se aplican a nivel nacional tienen una aplicación a nivel regional, la aproximación y definición de indicadores debe ser jerarquizada e instrumentada para cada uno de los niveles y para la interrelación. (IDEAM, 2009).

Existen los indicadores relacionados con el sistema hídrico natural y los relacionados con la intervención antrópica. Se identifican 13 indicadores representativos los cuales pretender responder a preguntas básicas sobre que se

debe saber del agua, de interés para la toma de decisiones e información pública en general. Figura 212

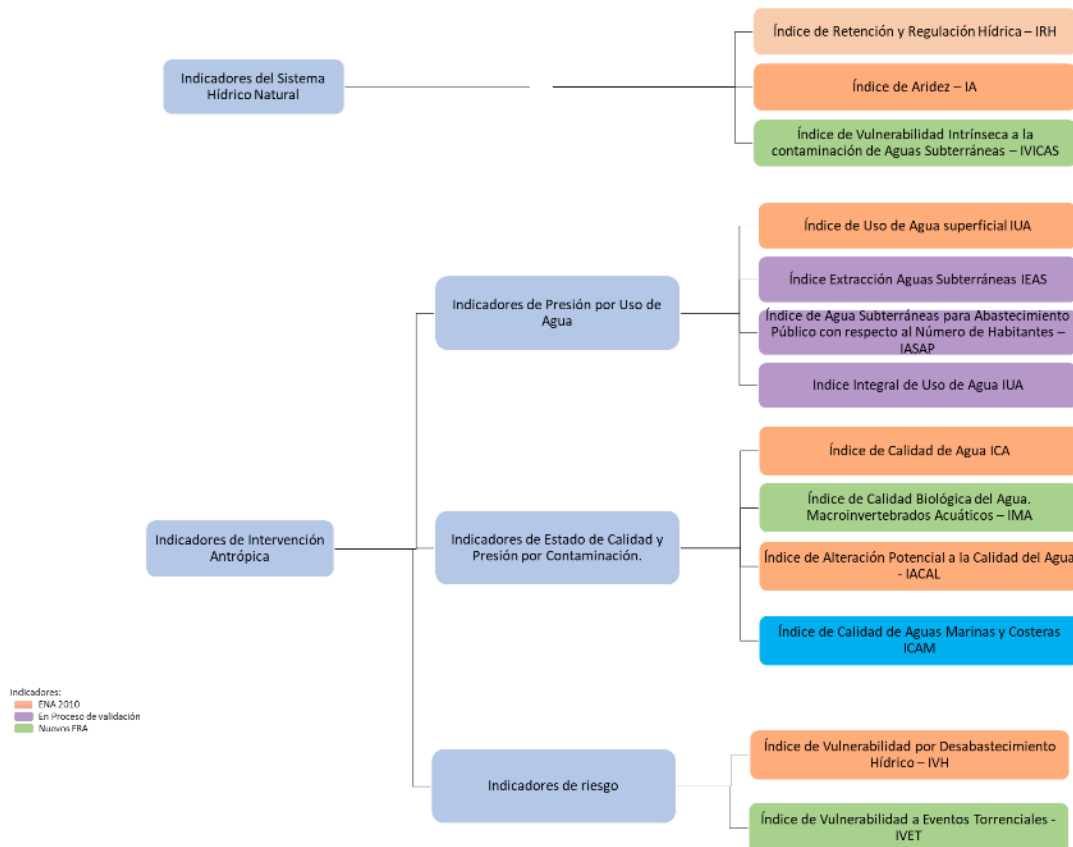


Figura 212. Sistema de Indicadores Hídricos. Modificado de las Evaluaciones Regionales del Agua. Fuente. (IDEAM, 2013)

La caracterización de variables de oferta, demanda y calidad, y las correspondientes a alteraciones del régimen natural, permiten construir un sistema de indicadores hídricos que reflejan el estado de las situaciones que, en un enfoque sistémico con visión integral, son determinantes para la toma de decisiones en el marco de la Gestión Integral de Recursos Hídricos (GIRH)¹ adoptado en la “Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico en Colombia” (MAVDT, 2010a).

8.5.1. Procesos de análisis de información para realizar Evaluaciones Regionales del Agua

La principal fuente de información de las ERA son las series históricas de las principales variables hidrológicas, meteorológicas y de calidad de agua monitoreadas en las redes nacional, regional y local de observación y medición. Es necesario complementar y consolidar las bases regionales que soporten la toma de decisiones sobre el agua.

Es decir, se emplea información básica e información secundaria de fuentes externas de información entre las que se destacan: DANE, MINAGRICULTURA, INVEMAR, UPME, Superintendencia de Servicios Públicos, INGEOMINAS, Agencia Nacional de Hidrocarburos, Autoridades Ambientales Competentes-AAC, entre otras.

A nivel regional estas fuentes son de índole diversa para los componentes de demanda y calidad pero ellas deben ser validadas atendiendo criterios técnicos que garanticen la confiabilidad de la información. Estos criterios tienen que dar cuenta de la relevancia, alcance, autoridad - credibilidad, actualidad, objetividad y exactitud.

8.5.2. Difusión de datos es información

A partir de las recomendaciones anteriores, se garantiza la obtención de información confiable, estandarizada y por tanto de utilidad, con el objetivo de que haga parte de los sistemas de información, en caso de el recurso hídrico, el SIRH y así al Sistema de Información de Colombia SIAC como se observa en la Figura 213.



Figura 213. Sistema de Información Ambiental de Colombia, Fuente IDEAM 2015.

Teniendo en cuenta todo lo anterior es importante saber que de acuerdo a la ley 1712, por la cual se crea la ley de transparencia y del derecho al acceso a la información pública nacional y se dictan otras disposiciones, tiene como objetivo regular el derecho de acceso a la información pública, los procedimientos para el ejercicio y la garantía del derecho y las excepciones a la publicidad de información. (Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones., 2014). Toda la información que se produce es publica y que por ende de buena calidad.

8.6. Información como insumo a toma de decisiones

El manejo coherente y organizado de la información en una valiosa herramienta para contribuir a la toma de mejores decisiones. En este sentido, contar con un proceso de gestión de información constituye en el soporte de procesos de ordenación y manejo y facilita la toma de decisiones bajo unos criterios claros y sistemáticos. Es por ello, que se requiere la adopción de nuevas tecnologías como

Big Data e Inteligencia de negocios que faciliten la obtención de conocimiento práctico del territorio, proporcionando análisis sencillos de las condiciones actuales y su evolución a futuro, detectando patrones de comportamiento y escenarios que permitan análisis de los riesgos y oportunidades.

En el país existen altas expectativas sobre información de manejo integrado del recurso hídrico, que se basen en análisis que vayan más allá del cálculo estadístico básico para comprobar el cumplimiento de valores límite y objetivos de calidad y disponibilidad, que además aprovechen las ventajas que ofrece la tecnología para correlacionar variables, tener la posibilidad de estudiar evoluciones, hacer previsiones, analizar escenarios y detectar fuentes de emisión. Dentro de los aspectos más relevantes se encuentran:

Información para la gestión de la demanda

- Realizando la cuantificación del uso del agua por las diferentes actividades económicas, y contar con insumos para controlar la demanda hídrica del país, dando prioridad a los usos definidos.
- Identificar los sistemas de acuíferos en Colombia con sus respectivos puntos de explotación y conocer la posible oferta del recurso subterráneo.
- Aprobar el desarrollo de actividades productivas.

Información para el conocimiento

- Identificar las fuentes hídricas superficiales y subterráneas identificando su estado y comportamiento, que permita establecer la oferta hídrica total y disponible de las corrientes de agua a nivel nacional y regional.
- Evaluar los servicios ecosistémicos que prestan los recursos hídricos sobre una unidad de interés.

- Evaluar las condiciones de calidad del recurso hídrico para el abastecimiento de agua potable a poblaciones.
- Evaluar y hacer seguimiento de la calidad de las aguas y sedimentos marino-costeras, para la gestión en las zonas costeras.
- Identificar los factores naturales y antropogénicos que se pueden presentar y generar algún impacto social y ambiental.
- Identificar los aspectos físicos, bióticos, económicos y de gobernanza de los mares y océanos de interés para Colombia.
- • Determinar la influencia de fenómeno Niña y Niño y sus alteraciones sobre las fuentes hídricas.
- Generar proyecciones y modelar eventos extremos en torno al recurso hídrico.
- Formular estudios de tipo académico y de investigación en el sector de agua y saneamiento.
- Generar escenarios y proyecciones sobre cambios en el uso del suelo y variables relacionadas con el cambio climático.

Información para la educación

- Generar mayor interés a las acciones de conservación, planificación y protección del recurso hídrico.
- Implementar medidas de conciencia y educación ambiental en las comunidades.
- Generar conciencia entre los sectores y a los ciudadanos en general, sobre la importancia de ahorrar agua en el desarrollo de sus actividades.

Información para la preservación de los recursos

- Identificar las necesidades de sostenibilidad ambiental y supervivencia de los seres vivos dentro de su hábitat.
- Determinar los caudales ambientales que permiten mantener el funcionamiento, composición y estructura de los ecosistemas fluviales.
- Diagnosticar el estado de la calidad de las aguas con fines de preservación de los recursos marinos.

Información para la gestión

- Establecer las medidas de planificación para la solución de conflictos por uso del agua, dada su disponibilidad y calidad.
- Seguimiento y toma de decisiones para el manejo integrado y aprovechamiento sostenible del recurso hídrico marino y la biota asociada.
- Zonificar y priorizar portafolios de inversión en actividades de conservación, restauración y prácticas silvopastoriles sostenibles.
- Permitir el desarrollo de actividades turísticas y deportivas, a nivel náutico.
- Controlar actividades de transporte fluvial sobre los puertos marítimos, costeros y litorales.
- Establecer medidas de contingencia por sequía e inundación.
- Vigilar la construcción de asentamientos de población en zonas específicas y aledañas a las fuentes hídricas.

- Establecer las condiciones de prohibición de vertimientos en puntos específicos de la corriente de agua, de acuerdo al aporte contaminante que realiza algún sector particular.
- Orientar el desarrollo de infraestructura u obras civiles (espolones, box couvert, sistemas de alcantarillado, acueducto, manejo de aguas lluvias, entre otros), para solventar situaciones de inundación, riesgo, vulnerabilidad, sedimentación y erosión que puedan llegar a generar afectaciones en el entorno.
- Realizar análisis sobre el nivel de cumplimiento a los objetivos de calidad y metas de carga contaminante definido para un cuerpo de agua, de acuerdo a los vertimientos realizados en la zona de influencia.
- Mejorar las condiciones de implementación de los instrumentos económicos realizados por las Autoridades Ambientales Competentes.

Teniendo en cuenta las expectativas de información que el país espera del recurso hídrico es importante resaltar aspectos que requieren de procesos de gestión de información, que permitan:

- Proporcionar la información hidrológica para orientar la toma de decisiones en materia de políticas, regulación, gestión, planificación e investigación.
- Consolidar un inventario y caracterización del estado y comportamiento del recurso hídrico en términos de calidad y cantidad.
- Constituir la base de seguimiento de los resultados de las acciones de control de la contaminación y asignación de concesiones, con base en reportes de las autoridades ambientales.
- Contar con información para evaluar la disponibilidad del recurso hídrico.

- Promover estudios hidrológicos, hidrogeológicos en las cuencas hidrográficas, acuíferos y zonas costeras insulares y marinas.
- Facilitar los procesos de planificación y ordenación del recurso hídrico.
- Constituir la base para el monitoreo y seguimiento a la gestión integral del recurso hídrico.
- Aportar información que permita el análisis y la gestión de los riesgos asociados al recurso hídrico.

Para las Autoridades ambientales no debe ser suficiente contar geodatabases y visores con capas sobre los recursos naturales y sus usos. Adicional a ello, es preciso avanzar en la definición de tipos de análisis que permitan saber dónde se encuentran los recursos naturales, cómo se encuentran, e identificar presiones por uso y contaminación o afectaciones. Como ejemplo, a continuación, se presenta un tipo posible de salidas de información geográficas para el agua, que parte del Mapa de Índice de uso del Agua generado por el IDEAM (Figura 214), el cual se contrasta con las captaciones reportadas por las Autoridades ambientales en el SIRH.

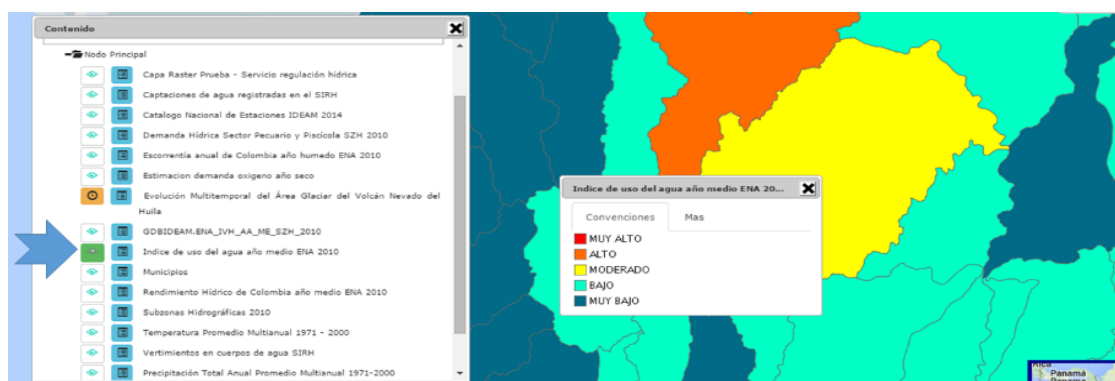


Figura 214. Posibles salidas de información geográficas para el agua. Fuente, <http://visor.ideam.gov.co:8530/geovisor/#!/profiles/3>. IDEAM 2017

Observe que, para las zonas de color amarillo y naranja, que indica que la presión de la demanda es alta con respecto a la oferta disponible. Y en tal sentido la zona debería reordenarse o restringir el uso del agua.

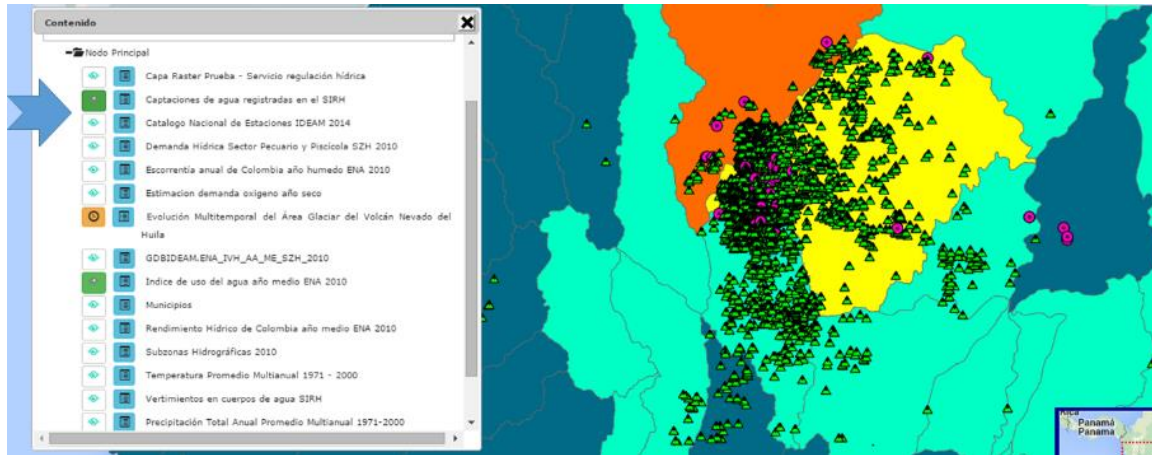


Figura 215. Índice de Uso del Agua por Subzona Hidrográfica. Fuente <http://visor.ideam.gov.co:8530/geovisor/#!/profiles/3>. IDEAM

Adicional a ello podría agregarse información sobre calidad de las fuentes hídricas, a partir de las mediciones registradas en puntos de monitoreo circundantes a la zona de interés, en el cual también se den orientaciones sobre los principales parámetros que están afectando la disponibilidad el agua.

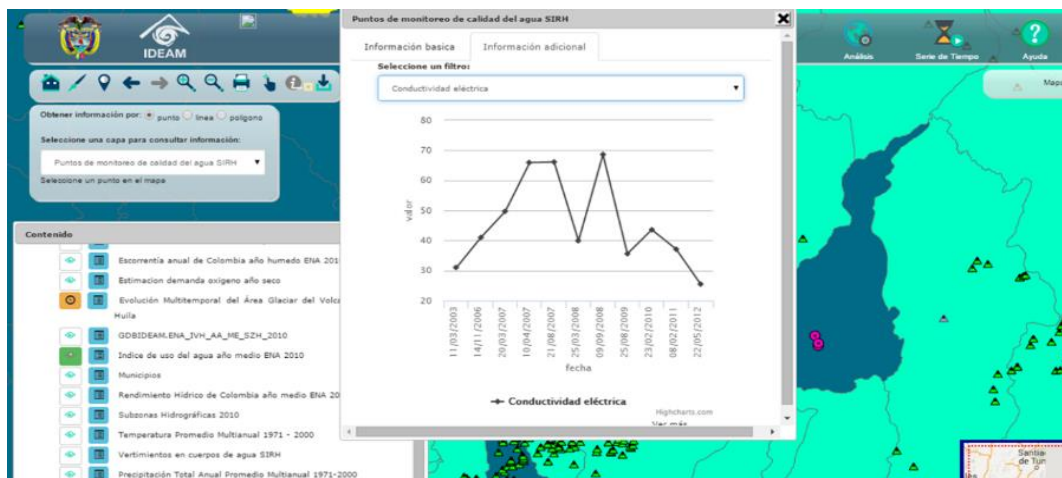


Figura 216. Calidad de las Fuentes Hídricas. Fuente. <http://visor.ideam.gov.co:8530/geovisor/#!/profiles/4>. IDEAM 2017.

BIBLIOGRAFÍA

- ACWI, A. C. (2009). *A National Framework for Ground- Water Monitoring in the United States*. United States: Advisory Committee on Water Information.
- Agromatic S.A. (2016). *Herramientas metereológicas, repuestos y soporte técnico*. Recuperado el 04 de 09 de 2017, de <http://agromatic.com.pe/producto/61-tanque-evaporimetro-clase-a-con-gancho-graduado>
- AIEA. (2012). *Procedimiento técnico para las estaciones de la Red Global de Isótopos en la precipitación (GNIP)*. Viena, Austria: Organismo Internacional de Energía Atómica.
- AIEA. (2014). *Groundwater Sampling Procedures for Isotope Hydrology*. Water Resources Programme, Viena.
- AIEA. (s.f). Global Network of Isotopes in Precipitation. *Schematic representation of the water cycle*. (I. H.-I. Agency, Ed.) Vienna, Austria.
- AIEA, & UNESCO. (2000). *Environmental Isotopes in the Hydrological Cycle. Principles and Applications* (Vol. 5). (W. R. Programme, Ed.) Neuherberg,, Germany .
- Alba-Tercedor, J., Pardo, I., Prat, N., & Pujante, A. (2005). *Metodología para el establecimiento el Estado Ecológico según la Directiva Marco del Agua. Protocolos de muestreo y análisis para Invertebrados Bentonicos*. Confederación Hidrográfica del Ebro.
- Allan, J. D., & Castillo, M. M. (2007). *Stream Ecology, structure and function of running waters*. The Netherlands.
- APHA, A. W. (2012). *Standard Methods for the examination of water and wastewater*. Washington D.C.: American Public Health Association, American water and waterworks Association and Water Environment federation .

- APHA.AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. (2015). *Standard methods for the examination of water and wastewater.Washington, DC 20001-3710. Section 9215 A- 5. Sample Preparation y ed. Section 10200B.* Washisngton.
- AQEM CONSORTIUM. (2002). *Manual for the application of the AQEM system. A comprehensive method to assess european streams using Benthic Macroinvertebrates, developed for the purpose of the Water Framework Directive.* AQEM CONSORTIUM.
- AQUEM. (2002). *Manual for the application of the AQEM system. A comprehensive method to assess.*
- Aranguren, N. (2002). *Métodos para el estudio del Zooplancton de sistemas epicontinentales. Manual de Métodos en Limnología. Asociación Colombiana de Limnología.* Bogotá: Rueda - Delgado G.
- Aranguren, N. (2002). *Métodos para el estudio del Zooplancton de sistemas epicontinentales. Manual de Métodos en Limnología. Asociación Colombiana de Limnología.* En A. C. Limnología, *Manual de métodos de Limnología.* Bogotá: Rueda - Delgado G.
- Área Metropolitana del Valle de Aburrá. (2011). *Red de Monitoreo Ambiental en la Cuenca Hidrográfica del Río Aburrá en Jurisdiccion del Area Metropolitana. Fase III.* Antioquia, Universidad de; Bolivarina, Universidad Pontificia; Medellín, Universidad de; Colombia, Universidad Nacional de. Medellín, Colombia: Subdireccion Ambiental Metropolitana del Valle de Aburrá.
- Asociación Colombiana de Limnología. (2002). *Manual de métodos en limnología.* Bogotá: Rueda G.
- Asociación Colombiana de Limnología. (2002). *Manual de métodos en limnología.* Bogotá: Rueda Guillermo.
- Auge, M. (2006). *Métodos y técnicas para el monitoreo de acuíferos.* Universidad de Buenos Aires, La Plata, Argentina.

- Baez-Polo, A. (2013.). *Manual de métodos de ecosistemas marinos y costeros con miras a establecer impactos ambientales*. Santa Marta, D.T.C.H.: Convenio para fortalecimiento de los métodos de investigación marina para actividades costa afuera por parte del sector de hidrocarburos. Invemar-ANH. 212 p + Anexos.
- Barbour, M. G. (1999). *Rapid Bioassessment Protocols for Use in Streams and Wadeable Rivers: Periphyton, Benthic Macroinvertebrates and Fish*.
- Barbour, M. S. (2006). The Multihabitat Approach of USEPA's Rapid Bioassessment Protocols: Benthic Macroinvertebrates. *Limnetica*, 839-850.
- Barbour, M., Gerritsen, J., Snyder, B. D., & Stribling, J. B. (1999). *Rapid Bioassessment Protocols for Use in Streams and Wadeable Rivers: Periphyton, Benthic Macroinvertebrates and Fish*. Washington: U.S. Environmental Protection Agency, Office of water - USEPA 841-B-99-002.
- Bellinger, E. &. (2015). *Freshwater Algae: Identification, Enumeration and Use as Bioindicators*. USA: Wiley Blackwell.
- Bellinger, E., & Sigeo, D. (2015). *Freshwater Algae: Identification, Enumeration and Use as Bioindicators*. USA: Wiley Blackwell.
- Bere, T. (2010). Benthic diatom community structure and habitat preferences along an urban pollution gradient in the Monjolinho River. *Acta Limnologica Brasiliensia*, 80-92.
- Bere, T. (2010). Benthic diatom community structure and habitat preferences along an urban pollution gradient in the Monjolinho River. *Acta Limnologica Brasiliensia*, 80-92.
- Beyene, A. A. (2014). Validation of a quantitative method for estimating the indicatorpower of, diatoms for ecoregional river water quality assessment. *Ecological Indicators* , 58-66.

- Beyene, A., Awoke, A., & Triest, L. (2014). Validation of a quantitative method for estimating the indicator power of diatoms for ecoregional river water quality assessment. *Ecological Indicators*, 58-66.
- Blog del Agua. (2013). *La ecorregionalización de los acuíferos: una cuestión recurrente en la evaluación del estado ecológico de las aguas subterráneas*. Recuperado el 30 de 06 de 2017, de <http://blogdelagua.com/actualidad/internacional/la-ecorregionalizacion-de-los-acuiferos-una-cuestion-recurrente-en-la-evaluacion-del-estado-ecologico-de-las-aguas-subterraneas/>
- Bradford, R. B. (1998). Background monitoring for groundwater quantity. En H. A. Lanen, *Monitoring for groundwater management in (semi-) arid regions* (pág. 227). Paris, Francia: UNESCO.
- Braun-Blanquet, J. (1932). *Plant Sociology: The study of Plant Communities*. New York, NY.: 7. Braun-Blanquet, J. 1932. *Plant So* Translated by G. D. Fuller and H. S. Conard, McGraw Hill Book Co. .
- Bridgewater, L., W. Rice, E., B. Baird, R., D. Eaton, A., & S. Clesceri, L. (2012). *Standard Methods For the Examination of Water and Wastewater*. Washington, DC: American Public Health Association 800 I streer, NW.
- Cambra, J. E. (2005). *Metodología para el establecimiento del Estado Ecológico según la Directiva Marco del Agua. Protocolo de muestreo y análisis para fitobentos (Microalgas bentónicas)*. Ministerio del Medio Ambiente. Confederación Hidrográfica del Ebro.
- Cambra, J., Ector, L., & Sabater, S. (2005). *Metodología para el establecimiento del Estado Ecológico según la Directiva Marco del Agua. Protocolo de muestreo y análisis para fitobentos (Microalgas bentónicas)*. España: Ministerio del Medio Ambiente. Confederación Hidrográfica del Ebro.

- CARDIQUE. (2012). Formato de Prueba de Bombeo. Cartagena de Indias, Bolivar, Colombia: Gestion Ambiental. Version 01.
- Ceballos Liévano, J. L. (2015). *Protocolo Básico para el seguimiento a la dinámica glacial en Colombia*. Informe Interno, IDEAM, Bogotá.
- CEN, C. E. (2012). *Water-quality-Guidance on pro-rata Multi- Habitat sampling of benthic macro-invertebrates from wadeable rivers. En 16150*. Brussels: CEN.
- Cirujano, S., Cambra, J., & Gutiérrez, C. (2005). *Metodología para el establecimiento del Estado Ecológico según la Directiva Marco del agua en la Confederación Hidrográfica del Ebro*. Barcelona - España: Confederación Hidrográfica del Ebro, URS, Universidad de Barcelona, Centre de Recherche Public Gabriel Lippmann, Universidad de Girona. Ministerio de Medio ambiente,.
- Clark, I. D., & Fritz, P. (1997). *Environmental Isotopes in Hydrogeology*. New, York: Lewis Publishers.
- Comisión Europea. (2000). *Directiva 2000/60/Ce del Parlamento Europeo y del Consejo*. Obtenido de <http://data.europa.eu/eli/dir/2000/60/2009-06-25>
- CONPES, C. N. (s.f). *Estrategia Institucional y Financiera de la Red Hidrológica, Meteorológica y Oceanográfica del País*. Bogotá.
- CORMACARENA, & A, S. S. (2016). *ADELANTAR ACTIVIDADES PARA LA IMPLEMENTACIÓN DEL PROGRAMA NACIONAL DE MONITOREO DEL RECURSO HÍDRICO, EN SU COMPONENTE DE AGUA SUBTERRÁNEA, EN RELACION CON EL INVENTARIO DE PUNTOS DE AGUA SUBTERRÁNEA EN PUERTO GAITÁN, META*. Bogotá: CORMACARENA-SIMA S.A.
- Cormacarena; SIAM S.A. (2016). *Adelantar las actividades para la Implementación del Programa Nacioanl de Monitoreo del Recurso Hidrico en su componente de agua subterránea, en relación con el inventario de puntos de agua*

- subterránea en Puerto Gaita, Meta- Informe Final. Informe Final. Contrato NO. 264-2016 , Bogotá, Colombia.*
- Coste, M., Boutry, S., Tison-Rosebery, J., & Delmas, F. (2009). Improvements of the Biological Diatom Index (BDI): Description and efficiency of the new version (BDI-2006). *Ecological Indicators* 9:621-650. *Ecological Indicators*(9), 621-650.
- Custodio, E., & Llamas, M. R. (1983). *Hidrología Subterránea* (Segunda Corregida ed., Vol. Tomo I). Barcelona, España: Ediciones Omega, S.A.
- CVC. (2000). *Caracterización del río Cauca. tramo Salvajina - La Virginia. Capítulo 7. Sedimentología. Informe técnico convenio interadministrativo entre la CVC (N. 011) y la Universidad del Valle*. Cali: Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca .
- CVC. (2009). Plan de manejo para la protección de las aguas subterráneas en el Departamento del Valle del Cauca. *Taller Plan de Manejo Aguas Subterráneas*, (pág. 40). Bogotá. Obtenido de <http://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/acuiferos/Plan-de-Manejo-de-Aguas-Subterraneas-en-valle-del-cauca.pdf>
- Díaz, C. &.-R. (2004). Diatomeas de pequeños ríos andinos y su utilización como indicadores de condiciones ambientales. *Caldasia*, 381-394.
- Díaz-Quiróz, C., & Rivera-Rondón, C. A. (2004). Diatomeas de pequeños ríos andinos y su utilización como indicadores de condiciones ambientales. *Caldasia*, 381-394.
- Dickinson, J. E., Land, M., Faunt, C. C., Leake, S., Reichard, E. G., Fleming, J. B., & Pool, D. (2006). *Hydrogeologic Framework Refinement, Ground-Water Flow and Storage, Water-Chemistry Analyses, and Water-Budget Components of the Yuma Area, Southwestern Arizona and Southeastern California*. U.S. Department of the Interior; U.S. Geological Survey, Bureau of

- Reclamation, U.S. Department of the Interior. Virginia: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2006–5135.
- Diez, J. (11 de 05 de 2012). Evaporación, transpiración y evapotranspiración. *Curso de Grado para 3er Año de la Licenciatura en Tecnología Ambiental*. Buenos Aires, Argentina. Obtenido de http://users.exa.unicen.edu.ar/~jdiez/files/cstierra_pn/apuntes/unidad8.pdf
- DINAMA. (2004). *Guía para la toma, conservación y transporte de muestras de agua subterránea*. Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente. Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente, Uruguay.
- Direct Industry. (2017). *Productos. Mediciones de la Temperatura y Humedad*. Recuperado el 23 de 08 de 2017, de <http://www.directindustry.es/prod/step-logistica-control-sl/product-116087-1592301.html>
- Dodds, W. K. (2010). *Freshwater Ecology. Concepts and Environmental Applications of Limnology*. Academic Press.
- Dodds, W. K., & Whiles, M. R. (2010). *Freshwater Ecology. Concepts and Environmental Applications of Limnology*. Academic Press.
- Dolédec, S. &. (2010). Responses of freshwater biota to human disturbances: contribution of J-NABS to developments in ecological integrity assessments. *Journal of the North American Benthological Society* , 286-311.
- Dolédec, S., & Statzner, B. (2010). Responses of freshwater biota to human disturbances: contribution of J-NABS to developments in ecological integrity assessments. *Journal of the North American Benthological Society*, 286-311.
- Donato Rondón, J. C. (2002). Métodos para el estudio del Fitoplancton en sistemas lénticos. En A. C. Limnología, *Manual de métodos en Limnología* (págs. 23-28). Bogotá.

- Dumont H. J., G. J. (1994). *Studies on the Ecology of Tropical Zooplankton. Hydrobiologia*. Kluwer Academic Publishers.
- Dumont, H. J., Green, J., & Masundire, H. (1994). *Studies on the Ecology of Tropical Zooplankton. Hydrobiologia*. Kluwer Academic Publishers.
- Elosegui, A. &. (2009). *Conceptos y técnicas en ecología fluvial*. Fundación BBVA.
- Elosegui, A., & Sabater, S. (2009). *Conceptos y técnicas en ecología fluvial*. Fundación BBVA.
- Enciclopedia Características. (2017). *Ciclo del agua*. Recuperado el 09 de 10 de 2017, de <https://www.caracteristicas.co/ciclo-del-agua/>
- Enciclopedia de Características. (2017). *Ciclo del agua*. Recuperado el 09 de 10 de 2017, de <https://www.caracteristicas.co/ciclo-del-agua/>
- Envirotecnicos Global Service. (2012a). *Sistema de muestreo BLADDER (vejiga)*. Recuperado el 30 de 06 de 2017, de <http://es.envirotecnicos.com/catalogo/muestreo-y-bombeo-de-aguas-subterranas/sistema-de-muestreo-bladder-vejiga/>
- Envirotecnicos Global Service. (2012b). *Bomba sumergible 12v*. (Envirotecnicos Global Service S.L.) Recuperado el 30 de 06 de 2017, de <http://es.envirotecnicos.com/catalogo/muestreo-y-bombeo-de-aguas-subterranas/bomba-sumergible-12v/>
- EPAM. (2011). *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. Contrato 214 de 2010*. Bogotá: MADS-IDEAM.
- EPAM. (2011). *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. Contrato 214 de 2010 (MADS-IDEAM. Bogotá, D.C., Colombia: Sin publicar.

EPAM S.A ESP. (2011). *Protocolos de Monitoreo del Recurso Hídrico*. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Sostenible-MAVDT, IDEAM. Bogotá: s.p.

EPAM S.A ESP, MAVDT, IDEAM. (2011b). *Protocolos y Procedimientos de Monitoreo de Aguas Subterráneas*. Bogotá, Colombia.

Esquivel, H. E. (1997). *Herbarios en los Jardines Botánicos*. Ibagué: Ministerio del Medio Ambiente, Red Nacional de Jardines Botánicos. Ibagué. <https://kmo7.files.wordpress.com/2010/09/herbariosjb.pdf>.

European Standard. (2003). *Water quality—guidance standard for the identification, enumeration and interpretation of benthic diatom samples from running waters. EN 13946*. Brussels: European Committee for Standardization.

European Standard. (2003). *Water quality—guidance standard for the routine sampling and pretreatment of benthic diatoms from rivers. EN 13946*. Brussels: European Committee for Standardization. EN 13946.

European Standard. (2004). *Water quality—guidance standard for the identification, enumeration and interpretation of benthic diatom samples from running waters. EN 14407*. Brussels: European Committee for Standardization.

FAO. (2006). *Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. Roma, Italia: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación-FAO. Obtenido de <ftp://ftp.fao.org/agl/aglw/docs/idp56s.pdf>

Foster, S., & Gomes, D. C. (1989). *Monitoreo de la calidad de las aguas subterráneas: una evaluación de métodos y costos*. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS), Organización Mundial de la Salud, Organización Panamericana de la Salud . CEPIS / OPS / OMS.

- Foster, S., Hirata, R., Gomes, D., D'Elia, M., & Paris, M. (2002). *Protección de la calidad del agua subterránea*. Washington D.C: Banco Mundial-Groundwater manangement.
- Foster, S., Hirata, R., Gomes, D., D'Elia, M., & Paris, M. (2002). *Protección de la calidad del agua subterránea*. Washington D.C, Estados Unidos: Banco Munidal-Groundwater manangement.
- Francou, B., & Pouyaud, B. (2004). *Métodos de observación de glaciares en los Andes Tropicales*. Observatoire de Recherche pour l'Environnement.
- Galbraith, M. &. (2000). *Sampling zooplankton in lakes. Manual of fisheries survey methods II: with periodic updates*. Michigan: Michigan Department of Natural Resources, Fisheries Special Report 25, Ann Arbor.
- Galbraith, M., & Schneider , J. C. (2000). *Sampling zooplankton in lakes. Manual of fisheries survey methods II: with periodic updates*. Michigan: Michigan Department of Natural Resources, Fisheries Special Report 25, Ann Arbor.
- Galecio Valdes, J. E. (2007). *Métodos de Aforo para la Estimación de la Recarga de Acuíferos*. Santiago de Chile: Universidad de Chile.
- Galvis, G., Mojica, J. I., & Rodríguez, F. (1989). *Estudio ecológico de una laguna de desborde del río Metica, Orinoquia Colombiana*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia - Fondo FEN-Colombia.
- Garay, J et al. (2004). *Programa Nacional de Investigación, Evaluación, Prevención, Reducción y Control de Fuentes Terrestres y Marinas de Contaminación al Mar - PNICM*. Santa Marta: Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras "José Benito Vives De Andrés" - INVEMAR.
- García Gutierrez, L. (2012). *Teoría de la medición de caudales y volúmenes de agua e instrumental necesario disponible en el mercado*. Madrid, España: Medida y evaluación de las extracciones de agua subterránea. ITGE.

Geotech Environmental Equipment. (2015). (I. Geotech Environmental Equipment, Productor) Recuperado el 30 de 06 de 2017, de http://spanish.geotechenv.com/water_sampling.html

Geotech, E. E. (2015). *Bombas Eléctricas Sumergibles para Muestreo*. Recuperado el 28 de 06 de 2017, de http://spanish.geotechenv.com/electrical_submersible_pumps.html

Geyh, M., & Stichler, W. (2000). *Isótopos ambientales en el ciclo hidrológico. Principios y aplicaciones. Sección IV Agua Subterránea Zona Saturada y no saturada*. Instituto Geológico de la Baja Sajonia, GSF-Instituto de Hidrología, Hannover.

Gómez Blanco, J. A. (2017). *Actualización de la variable Evapotranspiración Potencial (ETP) o de Referencia (ETo) para Colombia*. Contrato 249 de 2017- IDEAM, Bogotá.

Gonfiantini, R., & Hut, G. (1987). *Hidrología y Ciencias de la Tierra: Isótopos en el Terreno*. Viena: Boletín OIEA, 2/1987.

Gray, J. R., Laronne, J. B., & Marr, J. D. (2010). *Bedload-Surrogate Monitoring Technologies. Scientific Investigations Report 2010–5091*. Virginia: U.S. Geological Survey, Reston, Virginia. U.S. Department of the Interior. U.S. Geological Survey.

GRDC, G. R. (2017). *Global Runoff Data Centre*. Recuperado el 20 de 06 de 2017, de http://www.bafg.de/GRDC/EN/Home/homepage_node.html

Gröning, M., Lutz, H., Roller-Lutz, Z., Kralik, M., Gourcy, L., & Pölsenstein, L. (2012). A simple rain collector preventing water re-evaporation dedicated for 18O and 2H analysis of cumulative precipitation samples. *Journal of Hydrology*(448-449 (2012)), 195-200. Obtenido de www.elsevier.com/locate/jhydrol

Haase, P. P. (2010). First audit of macroinvertebrate samples from an EU Water Framework Directive monitoring program: human error greatly lowers

- precision of assessment results. *Journal of the North American Benthological Society*, 1279-1291.
- Hanna Instruments. (2017). *Hanna Instruments Colombia- Instrumentos de medicion y control*. Recuperado el 24 de 06 de 2017, de <http://www.hannacolombia.com/productos/multiparametro/multiparametros-portatiles/1591-medidor-multiparametrico-de-phorpceodpresiontemperatura>
- Hillebrand, H. D.-D. (1999). Biovolume calculation for pelagic and benthic microalgae. *Journal of Phycology*, 403-424.
- Hillebrand, H., Dürselen, C. D., Kirschtel, D., Pollinger, U., & Zohary, T. (1999). Biovolume calculation for pelagic and benthic microalgae. *Journal of Phycology*, 403-424.
- Hong Kong Observatory. (2003). *Weather Hong Kong*. Recuperado el 04 de 09 de 2017, de http://www.weather.gov.hk/wxinfo/aws/evap_pan.htm#
- Hurtado Moreno, G. (2000). *La Evapotranspiracion Potencial en Colombia*. Bogotá: IDEAM.
- HYDROTECHNIK. (s.f). *Sondas de nivel portátiles para medicion manual de niveles en pozos y aguas subterráneas*. Madrid, España: GWE PESA Engineering. Obtenido de http://www.pesawellengineering.es/files/pdf/Sondas_nivel.pdf
- ICONTEC. (1995). *Calidad del Agua- Muestreo: Directrices para el diseño de programas de monitoreo. NTC-ISO 5657-1*. Bogotá, Colombia: Instituto Colombiano de Normas Tecnicas y Certificación (ICONTEC).
- ICONTEC. (1996a). *Especificaciones Técnicas para la Construcción de un pozo de monitoreo para aguas subterráneas NTC 3948*. Bogotá, Colombia: Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación.

- ICONTEC. (1996b). *Gestión Ambiental. Calidad del Agua. Muestreo: Guía para el muestreo de aguas subterráneas NTC-ISO 5657-11*. Bogotá, Colombia: Instituto Colombiano de Normas Técnicas.
- ICONTEC. (2005.). *NTC-ISO 5667-19. Calidad del agua. Muestreo. Parte 19: Guía para el muestreo de sedimentos marinos*.
- ICONTEC, N. T. (1996a). *Especificaciones Técnicas para la Construcción de un pozo de monitoreo paa aguas subterráneas NTC 3948*. Bogotá, Colombia.
- IDEAM. (2001). *Manual del Observador Metereológico*. Informe Interno Ideam, Medellín.
- IDEAM. (2002). *Guía para el Monitoreo de Vertimientos, Aguas Superficiales y Aguas Subterráneas*. Bogotá, Colombia: Intituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM.
- IDEAM. (2002). *Protocolo para el monitoreo de los vertimientos en aguas superficiales y subterráneas*. Bogotá D.C.
- IDEAM. (2004). *Guía para el Monitoreo y Seguimiento del Agua*. Bogotá: Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales.
- IDEAM. (2004). *Guía para monitoreo y seguimiento del agua*. Bogotá D.C.
- IDEAM. (2006). *Guía y proptocolos del monitoreo y seguimiento del agua. Informe final Contrato de servicios de Consultoría C-0427-05, SancheZ F*. Bogotá: Sin publicar.
- IDEAM. (2007). *Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento del Agua*. Bogotá: Instituto de hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales .
- IDEAM. (2012). *Glaciares de Colombia, más que montañas con hielo*. Bogotá, D.C.
- IDEAM. (2013). *Lineamientos Conceptuales y metodológicos para la evaluación regional del agua* . Bogotá, D.C.

- IDEAM. (2013). *Protocolo: Toma de muestras de aguas subterráneas- Bifenilos policolorados (PCB)*. Bogotá, Colombia: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- IDEAM. (2014). *Implementación del Sistema de Información de REcurso Hídrico- SIRH*. Bogotá D.C.
- IDEAM. (2014). *Implementación del Sistema de Información del Recurso Hídrico SIRH en Colombia*. Bogotá, Colombia: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales- IDEAM.
- IDEAM. (2014b). *Modelos Hidrogeológicos conceptuales*. Recuperado el 25 de 06 de 2017, de Aguas Subterráneas: <http://www.ideam.gov.co/web/agua/modelacion-hidrogeologica>
- IDEAM. (2015). Seminario Actualización en Diseño de Monitoreo de Aguas Subterráneas. Bogotá, Colombia.
- IDEAM. (2015). Seminario Actualización en Diseño de Monitoreo de Aguas Subterráneas. Bogotá.
- IDEAM. (2016). *Programa Nacional de Monitoreo del Recurso Hídrico*. Bogotá D.C.: Sin publicar.
- IDEAM. (2017). *CARTILLA DE PRONÓSTICOS DE PLEAMARES Y BAJAMARES DEL PACIFICO COLOMBIANO*. Bogotá D.C.
- IDEAM, Pabón y Garcia. (1996). *Modelo Conceptual de los componentes Hidrológico, Oceanográfico, Meteorológico y Climatólogico del Sistema de Información Ambiental*. Bogotá: Nota Técnica del IDEAM.
- IDEAM, Sánchez, F.D. (2006). *Guía y Protocolo del Monitoreo y Seguimiento del Agua*. Bogotá.

- IGRAC. (2008). *Guideline on: Groundwater monitoring for general reference purposes*. Utrecht, Holanda: International Groundwater Resources Assessment Centre (IGRAC).
- IGRAC, I. G. (2006). *Guideline on: Groundwater monitoring for general reference purposes*. International Groundwater Resources Assessment Centre IGRAC.
- IMTA. (15 de Octubre de 2015). <https://www.gob.mx/imta>. Obtenido de http://www.imta.gob.mx/tyca/revistadigital198237645imta_comunicacion/revistas-2015/rev-02-2015/files/assets/basic-html/page2.html
- Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. (2005). *METODOLOGÍA PARA LA UTILIZACIÓN DE LOS MACROINVERTEBRADOS ACUÁTICOS COMO INDICADORES DE LA CALIDAD DEL AGUA*. Bogotá: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Instrumentosdelsur S.A. (2017). *Instrumentos del Sur S.A.* . Recuperado el 26 de 06 de 2017, de <http://www.idelsur.com/?cat=229>
- INVEMAR. (2013). *Aportes al diagnóstico del estado de las redes oceanográficas y meteorológicas marina en Colombia- Documento Preliminar*. Santa Marta, Colombia.
- INVEMAR. (08 de 06 de 2017). *INVEMAR*. Recuperado el 08 de 2017 de 2017, de INVEMAR: <http://siam.invemar.org.co/siam/redcam/index.jsp>
- INVEMAR, M. C., Martínez Campo, M., Córdoba Meza, T., Obando Madera, P., Rios Marmol, M., Contreras Guerrero, A., . . . Sánchez Rodríguez, D. (2016). *Diagnóstico y Evaluación de la Calidad de las Aguas Marinas y Costeras del Caribe y Pacífico Colombianos. Informatécnico 2015*. Santa Marta: Serie de Publicaciones Periódicas del Invemar No.4.
- IOC - Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO. (2010). *Microscopic and molecular methods for quantitative phytoplankton analysis*.

- Paris, UNESCO. (IOC Manuals and Guides, no. 55.) (IOC/2010/MG/55) 110 p. Paris: Karlson, B., Cusack, C. and Bresnan, E.
- John, D. M., Whitton, B. A., & Brook, A. J. (2011). *The Freshwater Algal Flora of the Isles: An Identification guided to Freshwater and Terrestrial Algae*. Cambridge: Cambridge University Press.
- John, D. M., Whitton, B. A., & Brook, A. J. (2011). *The Freshwater Algal Flora of the Isles: An Identification guided to Freshwater and Terrestrial Algae*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Kireta, A. R. (2012). Planktonic and periphytic diatoms as indicators of stress on great rivers of the United States: Testing water quality and disturbance models. *Ecological Indicators*, 222-231.
- Kireta, A., Reavie, E., Sgrob, G., Angradi, T., Bolgrien, H., & Jicha, T. (2012). Planktonic and periphytic diatoms as indicators of stress on great rivers of the United States: Testing water quality and disturbance models. *Ecological Indicators*, 222-231.
- Lampert, W. &. (2007). *Limnoecology*. Oxford: Oxford University Press.
- Lampert, W., & Sommer, U. (2007). *Limnoecology*. Oxford: Oxford University Press.
- Lavoie, I. C.-D. (2014). Using diatoms to monitor stream biological integrity in Eastern Canada: An overview of 10 years of index development and ongoing challenges. *Science of the Total Environment*, 187-200.
- Lavoie, I., Campeau, E., Zugic-Drakulic, N., Winter, J., & Fortin, C. (Marzo de 2014). Using diatoms to monitor stream biological integrity in Eastern Canada: An overview of 10 years of index development and ongoing challenges. *Science of the Total Environment*(475), 187-200.
- Li, L., Zheng, B., & Liu, L. (2010). Biomonitoring and bioindicators used for River Ecosystems. *Procedia Environmental Sciences*, 1510-1524.

- Liévano, A. O. (2007). *Guía ilustrada de los macroinvertebrados acuáticos del río Bahamón*. Bogotá: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Livni, N., Avisar, D., & Mamane, H. (2015). *Manual de muestreo, técnicas de medición de parámetros in situ, y estrategias de monitoreo para la vigilancia del agua subterránea*. Tel Aviv, Israel: Tel Aviv University.
- López-Rey, D. (2017). *Pluviómetros y pluviógrafos: Un afán histórico por medir la lluvia*. Recuperado el 24 de 08 de 2017, de <https://www.tutiempo.net/meteorologia/articulos/pluviometro-y-pluviografo.html>
- Lowe, R. &. (2006). *Benthic stream algae: Distribution and structure*. En Hauer, R. & Lamberti, G. (Eds) *Methods in stream ecology*. Amsterdam: Elsevier.
- Lowe, R., & Laliberte, G. (2006). Benthic stream algae: Distribution and structure. En Hauer, R. & Lamberti, G. (Eds) *Methods in stream ecology*. En R. Hauer, & G. Lamberti, *Methods en stream ecology* (págs. 327-356). Amsterdam: Academic Press, Elsevier.
- Maestro, S. M. (2016). *Aspectos básicos de hidroquímica. Composición química del agua*. Madrid, España: III Curso sobre Hidrogeología Aplicada.
- Malavoi, J., & Souchon, Y. (2002). Description standardisée des principaux facies d'écoulement observables en rivière: clé de détermination qualitative et mesures physiques. *Bull. Fr. Pêche Piscic*(365), 357-372.
- Maloszewski, P., Rauert, W., Stichler, W., & Herrmann, A. (1983). Application of flow models in an Alpine catchment. *Journal of Hydrology* , 319-330.
- Martín, G. T. (2010). Application of diatom biotic indices in the Guadalquivir River Basin, a Mediterranean basin. Which one is the most appropriated? *Environ Monit Assess*, 519-534.

- Martín, G., Toja, J., Sala, S., Fernández, M., Reyes, I., & Casco, M. A. (2010). Application of diatom biotic indices in the Guadalquivir River Basin, a Mediterranean basin. Which one is the most appropriated? *Environ Monit Assess*, 519-534.
- Martínez, L. (11 de 12 de 2012). *Instrumentos para medir la evaporación y precipitación*. (U. N.-O. Ayacucho", Ed.) Obtenido de <https://es.scribd.com/doc/116430552/Instrumentos-para-medir-evaporacion-y-precipitacion>
- Maser, I. p. (2015). *Productos de agua subterránea*. Recuperado el 24 de 06 de 2017, de <http://www.maser.com.co/categorias/Agua/Aguas%20Subterr%C3%A1neas>
- Maser, I. p. (2015). *Productos de agua subterránea*. Recuperado el 24 de 06 de 2017, de <http://www.maser.com.co/categorias/Agua/Aguas%20Subterr%C3%A1neas>
- Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. (2013). *Protocolo de muestreo de fitoplancton en lagos y embalses*. Código M-LE-FP-2013. España.
- Ministerio de Medio Ambiente. (2000). *Política nacional ambiental para el desarrollo sostenible de los espacios oceánicos y las zonas costeras e insulares de Colombia*. Bogotá D.C.
- Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones. (6 de marzo de 2014). *Ley 1712/6 de marzo de 2014*. Recuperado el 20 de Junio de 2017, de www.mintic.gov.co: http://www.mintic.gov.co/portal/604/articulos-7147_documento.pdf

- Ministerios de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación de Argentina. (2017). *Acuerdos Internacionales Sistema de Naciones Unidas Organización Meteorológica Mundial*. Recuperado el 20 de 06 de 2017, de <http://www2.medioambiente.gov.ar/acuerdos/organismos/onu/onuomm.htm>
- Montoya, J. J., & Contreras, C. (2015). Capítulo 7, Sedimentos. En IDEAM, *Estudio Nacional del Agua 2014* (págs. 282-325). Bogotá: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- Mook, W. G. (2000). *Isótopos Ambientales en el Ciclo Hidrológico. Sección I. Introducción Teoría, Métodos y Correcciones*. Centro de Investigación Isotópica . Groningen, Países Bajos: IGME.
- OAS, O. o. (2017). *Programa UNESCO/OEA ISARM-Américas Acuíferos Transfronterizos de las Américas*. Recuperado el 20 de 06 de 2017, de Department of Sustainable Development: http://www.oas.org/dsd/WaterResources/projects/ISARMAmericas_esp.asp
- Ochoa, B. (10-14 de 06 de 2013). Curso Internacional “Hidrología y Monitoreo Hidrológico en Ecosistemas Andinos” . Lima, Perú.
- OIEA. (s.f). *Gestión de los recursos hídricos mediante la hidrología isotópica*. Organismo Internacional de Energía Atómica, Viena. Obtenido de http://blogdelagua.com/wp-content/uploads/2013/07/water_sp.pdf
- OIEA/GNIP. (2014). *Guía de muestreo de precipitación*. Organismo Internacional de Energía Atómica- Global Network of Global Network of Isotopes.
- OMM. (2008). *Guía de Instrumentos y Métodos de Observación Meteorológicos* (OMM-Nº 8 ed.). Génève, Suiza: Organización Meteorológica Mundial.
- OMM. (2011). *Guía de prácticas hidrológicas* (Sexta ed., Vol. I). Ginebra, Suiza: Organización Meteorológica Mundial.

- OMM. (2011). *Guía de prácticas hidrológicas* (Sexta ed., Vol. I). Ginebra, Suiza: Organización Meteorológica Mundial.
- OMM. (2011). *Guía de Prácticas Hidrológicas*. Ginebra, Suiza: Organización Meteorológica Mundial, N°168.
- Organismo Internacional de Energía Atómica. (s.f.). *Papel esencial de los isótopos en los estudios de los recursos hídricos. Boletín-volumen 19 n°1*. Viena: Organismo Internacional de Energía Atómica.
- OTT Hydromet. (2017). *Instrucciones de funcionamiento Sonda manométrica OTT PLS*. (O. Hydromet, Ed.) Recuperado el 23 de 07 de 2017, de <http://www.ott.com/es-la/productos/nivel-de-agua-86/ott-pls-284/>
- OTT Hydromet. (2017). *Productos- Nivel de agua*. (O. Hydromet, Editor) Recuperado el 23 de 07 de 2017, de <http://www.ott.com/es-la/productos/nivel-de-agua-168/>
- Pabón, J. D., Rojas, P. J., Montealegre, J. E., Robertson, K., Ceballos, J. L., Martínez, N., & Ñañez, E. (2001). El Océano. En M. y.-I. Instituto de Hidrología, *El medio ambiente en Colombia*. Bogotá D.C: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM.
- Pelayo Arce, J. L. (30 de 11 de 2011). *Meteorología para todos*. Recuperado el 04 de 09 de 2017, de <http://ojaizmet.blogspot.com.co/2011/11/>
- Pérez, R. M. (2005). *Manual de Prácticas de Laboratorio de Hidráulica*. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Facultad de Minas. Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos, Medellín.
- Pinilla, G. (2010). An index of limnological conditions for urban wetlands of Bogota city, Colombia. *Ecological Indicators*, 848-856.
- Pinilla, G. (2010). An index of limnological conditions for urban wetlands of Bogota city, Colombia. *Ecological Indicators*, 848-856.

- PNUMA. (1994). *Guía operativa GEMS/AGUA. Tercera Edición*. Burlington: Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente.
- Prygiel, J., & Coste, M. (2000). *Guide méthodologique pour la mise en oeuvre de l'Indice Biologique Diatomées NF T 90-354*. Bordeaux - Francia: Bordeaux: Agence de l'Eau Artois-Picardie, Cemagref.
- Raig Instrumentos Metereología- Optica-Precisión. (18 de 03 de 2017). *Todo sobre pluviómetros*. Recuperado el 23 de 08 de 2017, de <https://www.raig.com/noticias/todo-sobre-pluviometros>
- Ramas Ayala, J. (2003). *Selección, instalación y mantenimiento de redes para la monitorización de aguas subterráneas*. IGME. Madrid, España: ISBN: 84-7840-485-6.
- Ramírez-González, A., & Viña-Vizcaíno, G. (1998). *Limnología Colombiana Aportes a su conocimiento y estadísticas de análisis*. Bogotá: Fundación Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano .
- Reynolds, C. S. (2006). *Ecology of phytoplankton. Ecology, Biodiversity and conservation*. Cambridge : Cambridge University Press.
- Reynolds, C. S. (2006). *Ecology of phytoplankton. Ecology, Biodiversity and conservation*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Richard H, F. y. (2006). *Methods in stream ecology. Macrófitos y Briofitos*. San Diego California: Academic Press/Elsevier.
- Richard H, F., & Lamberti G., A. (2006). *Methods in stream ecology. Macrófitos y Briofitos*. San Diego California: Academic Press/Elsevier.
- RIRH, R. I. (2017). *Red Interamericana de Recursos Hídricos*. Recuperado el 20 de 06 de 2017, de Una Red del Agua para Todos- Red Interamericana de Recursos Hídricos: <http://www.iwrn.org/index.php?lang=es>

- Riss, W. O. (2002). Establecimiento de valores de Bioindicación para macroinvertebrados acuáticos de la Sabana de Bogotá. *Caldasia*, 135-156.
- Riss, W., Ospina, R., & Rodríguez, J. D. (2002). Establecimiento de valores de Bioindicación para macroinvertebrados acuáticos de la Sabana de Bogotá. *Caldasia*, 135-156.
- Rivera, R. C. (2009). *Criterios generales para la recolección, preservación, manejo de muestras y monitoreo de ecosistemas acuáticos epicontinentales*. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana.
- Rivera-Rondón, C. A., & Zapata-Anzola, A. M. (2009). *Criterios generales para la recolección, preservación, manejo de muestras y monitoreo de ecosistemas acuáticos epicontinentales*. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana.
- Rodríguez, C. O. (1974). *Determinación de la velocidad y dirección del agua subterránea en la Isla de San Andres utilizando radiotrazadores*. Instituto de Asuntos Nucleares, Sección de Hidrología, Bogotá.
- Roldán, G. (2003). *Bioindicación de la calidad del agua en Colombia*. Medellín: Universidad de Antioquía.
- Roldán, G. (2016). Los macroinvertebrados como bioindicadores de la calidad del agua: cuatro décadas de desarrollo en Colombia y Latinoamérica. *Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat*, 254-274.
- Roldan, G. R. (2008). *Fundamentos de Limnología Neotropical*. Medellín: Universidad de Antioquía.
- Roldán-Pérez, G. A. (1988). *Guía para el estudio de los macroinvertebrados acuáticos del Departamento de Antioquia*. Bogotá: Presencia Ltda.
- Roldán-Pérez, G. A. (2003). *Bioindicación de la calidad del agua en Colombia. Uso del método BMWP/Col*. Medellín: Universidad de Antioquia.

- Roldan-Pérez, G. A., & Ramírez-Restrepo, J. J. (2008). *Fundamentos de Limnología Neotropical*. Medellín: Universidad de Antioquía.
- Rozanski, K., Froehlich, K., & Mook, W. G. (2014). *ISÓTOPOS AMBIENTALES en el CICLO HIDROLÓGICO. Sección III, Agua Superficial*. Groningen: Centro de Investigación Isotópica Groningen, Países Bajos.
- Rueda-Delgado, G. (2002). Método para el estudio de comunidades bénticas fluviales. En A. C. Limnología, *Manual de Métodos de Limnología* (págs. 47-57). Bogotá: Rueda Guillermo.
- Ruiz Romera, E., & Martínez Santos, M. (2015). *Hidrología Aplicada: Evaporación y transpiración*. (U. d. Vasco, Ed.) Recuperado el 27 de 09 de 2017, de <https://ocw.ehu.eus/course/view.php?id=353>
- Sanchez Lancheros, F. D. (2006). *Contrato de Servicios de Consultoría No. C-0427-05. Guía y Protocolos del Monitoreo y Seguimiento del Agua*. Bogotá: INGETEC.
- Sanchez Martínez, M. I. (2001). Métodos de estimación de evapotranspiración utilizados en Chile. (I. d. Chile, Ed.) *Revista de Geografía Norte Grande*, 8. Obtenido de http://revistanortegrande.cl/archivos/28/01_28_2001.pdf
- Schlumberger Water Services. (2014). *Manual de Diver*. Países Bajos.
- Schmidt-Mumm, U. (1998). *Vegetación acuática y palustre de la sabana de Bogotá y plano del río Ubaté*. Bogotá: Tesis de grado para optar al título de magister, Universidad Nacional de Colombia.
- Schmidt-Mumm, U. (1998). *Vegetación acuática y palustre de la sabana de Bogotá y plano del río Ubaté. Tesis de grado para optar al título de magister*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Schmidt-Mumm, U. (2002). *Métodos para el estudio taxonómico de macrófitos acuáticos y palustres*. Bogotá: Asociación Colombiana de Limnología.

- SCMH. (1971). *Apuntes de Clase para el curso de hidrología practica, (PARTE I)*. Bogotá.
- SENA. (1999). *Operación y Mantenimiento de Pozos profundos para acueductos*. SENA. Bogotá, Colombia: Servicio Nacional de Aprendizaje.
- SGC. (2016). *Modelo Hidrogeológico del Departamento de la Guajira*. Bogotá, D.C.
- Sierra Ramirez, C. A. (2011). *Calidad del agua, evaluación y diagnóstico*. Medellín: Universidad de Medellín.
- Smucker, N. V. (2011). Diatom biomonitoring of streams: Reliability of reference sites and the response of metrics to environmental variations across temporal scales. *Ecological Indicators* , 1647-1657.
- Smucker, N., & Vis, M. (2011). Diatom biomonitoring of streams: Reliability of reference sites and the response of metrics to environmental variations across temporal scales. *Ecological Indicators*, 1647-1657.
- Soler, A., Otero, N., Rosell, M., Carrey, R., & Domènech, C. (2017). Aplicaciones en medioambiente. *El uso de los isótopos en la resolución de problemas de contaminación ambiental*. Barcelona: Grup de Mineralogia Aplicada i Geoquímica de Fluids Dep. Cristal·lografia, Mineralogia i Dipòsits Minerals, Facultat de Geologia, Universitat de Barcelona.
- Solinst. (2017a). *Como funcionan las Bombas de vejiga*. Recuperado el 30 de 06 de 2017, de <https://www.solinst.com/espanol/productos/muestreadores-y-bombas-neumaticas/407-bomba-de-vejiga/datasheet/04-como-funcionan-las-bombas-de-vejiga.php>
- Solinst. (2017b). *Instrumentación de alta calidad para monitoreo de aguas subterráneas y de superficie*. Ontario, Canada: Solinst Canada Ltd. Recuperado el 30 de 06 de 2017, de <https://www.solinst.com/espanol/productos/muestreadores-y-bombas-neumaticas/407-bomba-de-vejiga/instrucciones/407-166-instrucciones-de>

funcionamiento-de-la-bomba-de-la-vejiga/01-instrucciones-de-
funcionamiento-de-las-bombas-de-vejiga-de-solinst.php

Solinst. (2017c). *Bomba Peristáltica*. (S. C. Ltd., Productor) Recuperado el 30 de 06 de 2017, de <https://www.solinst.com/espanol/productos/muestreadores-y-bombas-neumaticas/410-bomba-peristaltica/ficha-tecnica/>

Solinst. (2017d). *Bailer de afuente puntual*. Recuperado el 30 de 06 de 2017, de Muestreadores de aguas Subterráneas: <https://www.solinst.com/espanol/productos/muestreadores-y-bombas-neumaticas/429-bailer-de-fuente-puntual/datasheet/01-bailer-de-fuente-puntual.php>

Solinst. (2017e). *Muestreador discreto de intervalos*. Recuperado el 30 de 06 de 2017, de <https://www.solinst.com/espanol/productos/ds/425-muestreador-discreto-de-intervalos.php>

Solinst. (2017f). *Bomba Inercial*. (S. C. Ltd., Productor) Recuperado el 30 de 06 de 2017, de https://www.solinst.com/espanol/productos/muestreadores-y-bombas-neumaticas/404-bomba-inercial/ficha-tecnica/?sc_cid=Spanish-404DS-moreinfo

Sors. (1987). *Citado por Instituto Nacional de Ecología. 2010. Monitoreo Ambiental*. México: Disponible en <http://www2.ine.gob.mx/publicaciones/libros/105/8.html>.

Stark, J. D. (2001). *Protocols for sampling macroinvertebrates in wadeable streams. New Zeland Macroinvertebrate Working Group report No. 1.*

Stevenson, R. a. (1999). *Rapid Bioassessment Protocols for Use in Streams and Wadeable Rivers: Periphyton, Benthic Macroinvertebrates, and Fish, EPA 841-B-99-002*. Washington, D.C.: Environmental Protection Agency, Office of Water.

- Stevenson, R. J., & Bahls, L. L. (1999). Periphyton Protocols. En M. Barbour, J. Gerritsen, B. D. Snyder, & J. B. Stribling, *Rapid Bioassessment Protocols for Use in Streams and Wadeable Rivers: Periphyton, Benthic Macroinvertebrates and Fish*. (págs. 104-126). Washington D.C.: U.S. Environmental Protection Agency, Office of water - USEPA 841-B-99-002.
- Stevenson, R. J., Pan, Y., & van Dam, H. (2010). *Assessing environmental conditions in rivers and streams with diatoms*. En: Smol J.P., Stoermer E.F., 2010. *The diatoms: applications for the environmental and Earth Sciences*. Cambridge University Press.
- Sun, J. &. (2003). Geometric models for calculating cell biovolume and surface area for phytoplankton. *Journal of Plankton Research*,. *Journal of Plankton Research*, 1331-1346.
- Sun, J., & Liu, D. (2003). Geometric models for calculating cell biovolume and surface area for phytoplankton. *Journal of Plankton Research*,. *Journal of Plankton Research*, 1331-1346.
- Taylor, C., & Alley, W. (2001). *Ground-Water-Level Monitoring and the importance of Long-Term Water-Level Data*. Denver, Colorado: U.S. Geological Survey Circular 1217.
- Tecnología y Recursos de la Tierra, S.A.L. (1991). *Aplicación de técnicas especiales al estudio hidrológico de zonas de baja permeabilidad. Isótopos y trazadores*. Instituto Tecnológico Geominero de España.
- Tuinhof, A., Foster, S., & Kemper, K. (2006). *Requerimientos de monitoreo de agua subterránea para manejar la respuesta de los acuíferos y las amenazas a la calidad del agua*. Washington, D.C., Estados Unidos: GW-MATE Banco Mundial.

- Uil, H., Geer, F. v., Gehrels, J., & Kloosterman, F. (1999). *State of the art on monitoring and assessment of groundwaters*. Lelystad, Netherland: Netherlands Institute of Applied Geoscience TNO, Delft, The Netherlands.
- UIT. (2017). *Cambio Climático*. (U. t. Telecomunicaciones, Productor) Recuperado el 09 de 10 de 2017, de https://www.itu.int/itu/news/manager/display.asp?lang=es&year=2008&issue=01&page=ict_and_climate_change&ext=html
- Universidad Nacional Mayor de San Marcos. (2014). *Métodos de colecta, identificación y análisis de comunidades biológicas: plancton, perifiton, bentos (macroinvertebrados) y necton (peces) en aguas continentales del*. Lima: Ministerio de Ambiente.
- USGS. (09 de 11 de 2017). *Water Science for Schools- El Ciclo del Agua*. (U. G. Survey, Productor) Recuperado el 21 de 10 de 2017, de <https://water.usgs.gov/edu/watercyclespanish.html>
- Valencia Cuesta, M. (s.f). *Curso de Aguas Subterráneas- P ruebas de bombeo de pozos*. Bogotá, Colombia: Aguas Subterráneas Ltda.
- Vargas, M. C., & Bobadilla, L. (s.f). *Guías para el monitoreo de calidad de aguas subterráneas*. Bogotá, Colombia: Ingeominas. Sin Publicar.
- Vargas, N. O. (2001). Propuesta para la formulación, diseño e implementación de la Red Básica Nacional de seguimiento y muestreo de aguas subterráneas. Bogotá D.C: IDEAM.
- Vélez, M. V., & Rhenals, R. L. (2008). Determinación de la recarga con isótopos ambientales en los acuíferos de Santa Fé de Antioquia. (S. M. Universidad Nacional de Colombia, Ed.) *Boletín de Ciencias de la Tierra*(24).
- Venrick, E. L. (1978). *How many cells to count? In: A. Sournia. Phytoplankton Manual*. Paris: UNESCO.

- Vrba, J. (1998). Background monitoring for groundwater quality. En H. A. Lanen, *Monitoring for groundwater management in (semi)-arid regions* (pág. 227). Paris, Francia: UNESCO.
- Vrba, j. (1998). *Monitoring for groundwater management in (semi)-arid regions*. Paris, Francia: UNESCO.
- Waterra Pumps Limited. (2016). *waterra*. Recuperado el 15 de 09 de 2017, de <http://www.waterra.com/pages/submersible-pumps/narrow-diameter.html>
- Wetzel, R. &. (2000). *Limnological Analyses*. New York - USA: Springer-Verlag.
- Wetzel, R., & Likens, G. (2000). *Limnological Analyses*. New York - USA: Springer-Verlag.
- Whitton, B. &. (2000). *The ecology of Cyanobacteria*. Kluwer Academic Publisher.
- Whitton, B. A., & Potts, M. (2000). *The ecology of Cyanobacteria*. Kluwer Academic Publisher.
- WMO. (1989). *Management of Groundwater Observation Programmes*. Geneva, Suiza: World Meteorological Organization.
- Yacutec. (2017). *Bailers desechables o reutilizables*. (Y. SAC, Productor) Recuperado el 30 de 06 de 2017, de https://yakutec.com/bailers_desechables/
- Zúñiga, M. d. (2009). *Biondicadores de calidad de agua y caudal ambiental*. En J. Cantera, Y. Carvajal & L. M. Castro (Comps). *Caudal ambiental: conceptos, experiencias y desafíos*. Cali: Programa Editorial de la Universidad del Valle.

ANEXOS