



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

Contrato 214 de 2010

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

INFORME FINAL
**PROTOCOLOS Y PROCEDIMIENTOS
MONITOREO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS**

Presentado por:

epam s.a. esp

Bogotá D.C., junio de 2011

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	1
1. ASPECTOS GENERALES	2
1.1. OBJETIVOS Y JUSTIFICACIÓN	2
1.2. MARCO CONCEPTUAL	4
1.2.1. El ciclo hidrológico y las características generales de las aguas subterráneas	4
2. LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS	6
3. ASPECTOS GENERALES DEL PROGRAMA DE MONITOREO	13
3.1. TIPOS DE ESTACIONES Y UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS	13
3.1.1. Estaciones: pozos de observación	13
3.1.2. Unidades hidrogeológicas de Colombia	13
3.2. TIPOS DE REDES	18
3.2.1. Requerimientos de información	18
3.2.2. Las áreas de monitoreo	20
3.2.3. Diseño y establecimiento de redes y métodos de monitoreo	20
3.2.4. Estrategias para la implementación de la red de monitoreo de aguas subterráneas	24
3.3. FRECUENCIAS DE MONITOREO	29
4. MEDICIÓN	31
4.1. PARÁMETROS A MEDIR Y UNIDADES DE MEDIDA	31
4.2. INSTRUMENTOS DE MEDIDA	31
4.2.1. Medición de niveles	31
4.2.2. Equipos de medición de caudales	31
4.2.3. Equipos de muestreo de agua subterránea	32
4.3. INSTALACIÓN Y EMPLAZAMIENTO DE LOS POZOS	34
4.3.1. Instalación y/o actualización de pozos	34
4.3.2. Pozos	34
4.4. POSIBLES FALLAS Y CAUSAS DE ERRORES EN LA OBSERVACIÓN DE POZOS	42
4.5. PROCEDIMIENTOS DE MEDICIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS	44
4.5.1. Procedimientos de medición de niveles	44
4.5.2. Determinación de parámetros hidráulicos del acuífero	48
4.5.3. Procedimientos para medición de parámetros físicos – químicos	53
4.6. REGISTRO Y PROCESAMIENTO DE DATOS	68
4.6.1. Registro de datos en campo	68
4.6.2. Entrada de datos al sistema	69
4.6.3. Cálculos y procesamiento de niveles	70
4.6.4. Salida de datos de niveles y concentraciones	70
4.6.5. Procesamiento secundario	71
4.7. VALIDACIÓN DE DATOS: CONTROL DE CALIDAD	72
4.7.1. Verificación	72
4.7.2. Validación de datos	73
4.8. ALMACENAMIENTO	76
4.9. DIFUSIÓN DE LA INFORMACIÓN	76
ANEXOS	79
ANEXO 1. FORMATOS	81
Bibliografía	91



INFORME FINAL

epam s.a. esp

Contrato No. 214 de 2010

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



PROTOCOLO DE MONITOREO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

INTRODUCCIÓN

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

El Protocolo que se propone ha sido elaborado con base en la actualización, simplificación y, en algunos casos, ampliación de documentos previamente elaborados por el IDEAM, con base en los cuales ha venido trabajando durante los últimos años. Entre estos documentos se destaca el “Protocolo del agua: Monitoreo de aguas subterráneas”, de Nelson Omar Vargas Martínez (2010), el cual ha sido tomado en forma integral en el presente documento. Así mismo contiene elementos tomados de las recomendaciones de la Organización Meteorológica Mundial, de manera especial los contenidos en la Guía de Prácticas Hidrológicas (versiones 1994 y 2008), y de las normas GTC-30, NTC-ISO 5667-11, NTC-3948 y NTC-ISO 5667-18 del ICONTEC.

Se pretende que el Protocolo sea la base alrededor del cual las distintas entidades que ejecutan monitoreo de aguas subterráneas homologuen o unifiquen sus procedimientos básicos.

El Protocolo se ha organizado en dos partes principales:

- Aspectos generales, que contienen los objetivos y el marco conceptual general.
- El método de monitoreo, o conjunto de procedimientos técnicos para la medición, el muestreo, el procesamiento, la validación, el almacenamiento y la difusión de los datos del monitoreo

El Protocolo va hasta el nivel de generación y procesamiento de la información básica que el IDEAM debe generar para conocer la oferta hídrica nacional y para uso del usuario general que requiere conocer los niveles y caudales medios diarios, mensuales y anuales de aguas subterráneas, así como sus variaciones en el tiempo y el espacio. Procedimientos específicos para monitoreos más especializados sobre aguas subterráneas y/o para procesamientos especializados de los datos para distintos fines, salen del alcance de este Protocolo.

El monitoreo y seguimiento del recurso hídrico es una función legal del IDEAM a nivel nacional, de las corporaciones autónomas regionales (CARs) a nivel regional, y de las autoridades ambientales urbanas y organismos de prevención y atención de desastres a nivel local. Estas funciones derivan de las siguientes normas, entre otras: Decreto-Ley 2811 de 1974, Ley 99 de 1993, Ley 373 de 1997 (ahorro y uso eficiente del agua), Ley 715 de 2001 (vigilancia de municipios), decretos 1541 de 1978, 1594 de 1984, 1276 de 1994 (INVEMAR), 1277 de 1994 (IDEAM), 1600 de 1994 (SINA), 1603 de 1994 (Institutos HUMBOLDT, SINCHI Y NEUMANN), 155 de 2004, 3100 de 2003, 1200 de 2004, 3440 de 2004, 1323 de 2007 (SIRH), 1324 de 2007, 1575 de 2007, 2370 de 2009, 3930 de 2010, y resoluciones 0643 de 2004, 1433 de 2004, 941 de 2009 (SIUR y RUA) del MAVDT.



1. ASPECTOS GENERALES

1.1. OBJETIVOS Y JUSTIFICACIÓN

Objetivo general

De acuerdo con las estrategias para el logro de los objetivos de la política nacional para la gestión integral del recurso hídrico establecidos por el Gobierno Nacional¹, el objetivo general para el Programa Nacional de Monitoreo del Recurso Hídrico (PNMRH) puede establecerse así:

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

Objetivos específicos

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

Objetivos a nivel nacional (tabla 1):

1. El monitoreo del agua subterránea es un programa de continua supervisión diseñado científicamente, para observar, medir, muestrear y analizar mediante métodos técnicos normalizados, variables físicas, químicas y biológicas seleccionadas con los siguientes objetivos (VRBA, SOBLSEK. 1988, en VARGAS, 2010):
 - Capturar, procesar y analizar los datos sobre la cantidad y calidad de las aguas subterráneas, que permitan tener una línea base de conocimiento sobre el estado y las tendencias a nivel de pronóstico de los procesos naturales e impactos de las actividades antrópicas en tiempo y espacio.
 - Suministrar información para el mejoramiento en la planeación y diseño de políticas de protección y conservación de las aguas subterráneas.

Objetivos a nivel regional y local (tabla 1):

1. Homologar, consolidar y compartir los sistemas de monitoreo, seguimiento y evaluación de la cantidad y distribución espacio-temporal de las aguas subterráneas a nivel de cuenca hidrogeológica y acuíferos regionales, de acuerdo con prioridades fijadas en el Plan Hídrico Nacional, y con la finalidad de apoyar la planeación de proyectos de aprovechamiento y control del recurso hídrico.
2. Proveer información hidrogeológica necesaria y suficiente para:

¹ Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, Viceministerio de Ambiente. Política Nacional para la gestión Integral del Recurso Hídrico. Bogotá. 2010.

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

Responder a las numerosas necesidades de una región en materia de explotación y gestión de recursos hídricos.
 Formular planes de manejo y protección integrada de aguas subterráneas y planes de desarrollo regional.

- Integrar en un sistema jerarquizado las redes y programas de monitoreo regional y local de aguas subterráneas, y establecer protocolos comunes de instalación, operación, procesamiento y control de calidad.

Tabla 1. Objetivos de la red nacional y las redes regionales

Red nacional	Red regional
<p>PROPÓSITO: El propósito general de la Red Básica Nacional de monitoreo de aguas subterráneas es evaluar el estado y la dinámica natural del recurso hídrico subterráneo, para planificar su manejo, reconocer los factores que inciden en su agotamiento y deterioro y establecer relaciones con los otros componentes del ecosistema natural para garantizar su sostenibilidad ambiental.</p>	<p>PROPÓSITO: Proveer información hidrogeológica necesaria y suficiente para:</p> <ol style="list-style-type: none"> Responder a las numerosas necesidades de una región en materia de explotación y gestión de recursos hídricos Formular planes de manejo y protección integrada de aguas subterráneas y planes de desarrollo regional.
<p>Objetivos específicos</p> <p>Colectar, procesar y analizar información sobre cantidad y calidad del agua subterránea como línea base para evaluar el estado actual y anticipar los cambios y tendencias de los sistemas hidrogeológicos.</p> <p>Proveer información representativa para el planeamiento, manejo y toma de decisiones acerca del recurso, su desarrollo, protección y conservación y para la implementación de medidas de control y regulación.</p> <p>Soportar estrategias y desarrollo de políticas de uso y protección de aguas subterráneas a nivel nacional, regional y local con el objeto de preservar sus propiedades naturales, especialmente para propósitos de abastecimiento.</p> <p>Disponer de datos correctos y precisos para ayudar a identificar fuentes existentes y potenciales de contaminación difusa y puntual.</p> <p>Producir datos para estudiar los cambios en el tiempo y el espacio de la cantidad y calidad de los sistemas hidrogeológicos.</p> <p>Identificar las propiedades físicas, químicas y biológicas de los sistemas hidrogeológicos. Identificar los efectos e impactos de procesos humanos y naturales sobre los sistemas hidrogeológicos.</p> <p>Crear una plataforma de información básica para el escalamiento de instrumentos económicos relacionados con uso y vertimientos.</p>	<p>Objetivos específicos</p> <p>Determinar la profundidad del nivel freático en zonas poco desarrolladas</p> <p>Evaluar los recursos hídricos disponibles.</p> <p>Determinar la dirección del flujo de aguas subterráneas.</p> <p>Evaluar los componentes del balance hidrológico</p> <p>Determinar los contactos con cuerpos mineralizados de aguas subterráneas, especialmente la interfase agua salada/agua dulce.</p> <p>Proteger los abastecimientos de agua contra la mineralización y la contaminación.</p> <p>Calibrar modelos de cuencas hidrogeológicas</p> <p>Determinar el caudal explotable</p> <p>Caracterizar recursos y reservas de aguas subterráneas.</p> <p>Evaluar los proyectos de agua propuestos.</p> <p>Prever los niveles de agua y las variaciones en composición química por actividades antrópicas de desarrollo regional.</p> <p>Supervisar la explotación del agua y la recarga artificial.</p> <p>Evaluar los impactos ambientales de los proyectos de utilización de las aguas subterráneas.</p> <p>Determinar prioridades y conflictos entre los usuarios de recursos hídricos y otros recursos naturales.</p> <p>Soportar indicadores para escalamiento de instrumentos técnicos y económicos como la Tasa por Uso del Agua y las Concesiones.</p> <p>Soportar indicadores para escalamiento de instrumentos técnicos y económicos como la Tasa por Uso del Agua y las Concesiones.</p>

Fuente: IDEAM-Vargas, 2010

Justificación de las mediciones

Las mediciones de aguas subterráneas se justifican por su uso para los siguientes fines, entre otros:

- Suministro de los elementos para la estrategia de protección de aguas subterráneas en el nivel local, regional y nacional, con miras a su aprovechamiento posterior.
- Generación de datos representativos sobre el estado natural y las tendencias del sistema hidrogeológico, para fines de planeación y control de su aprovechamiento y protección.
- Identificación de fuentes puntuales y difusas de contaminación.
- Generar datos para el estudio de cambios espaciales y temporales en la calidad de los sistemas hidrogeológicos debido a procesos naturales.
- Planeamiento y diseño de sistemas de suministro de agua potable a partir de aguas subterráneas, para comunidades urbanas y rurales.
- Planeamiento y diseño de sistemas de riego y drenaje en actividades como la agricultura, ganadería y silvicultura.
- Planeación municipal, departamental y nacional.
- Sector académico, investigación, programas internacionales de intercambio de datos, programas internacionales de investigación (Estudio Regional del Fenómeno El Niño, ERFEN, etc.)

1.2. MARCO CONCEPTUAL

1.2.1. El ciclo hidrológico y las características generales de las aguas subterráneas

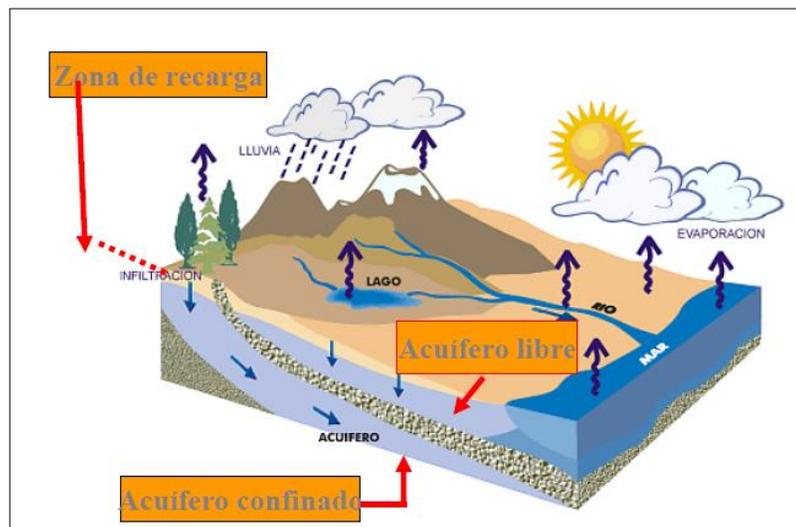
Para planificar el monitoreo de aguas subterráneas y relacionarlo con el monitoreo de las aguas superficiales es necesario comprender las diferencias en la distribución y dinámica de estas dos formas de presentación del recurso hídrico, sin olvidar que las dos están vinculadas a través del ciclo hidrológico, que constituye el marco conceptual para la gestión de dicho recurso.

- Una primera diferencia se relaciona con las velocidades de flujo de las aguas subterráneas, las cuales son menores en varios órdenes de magnitud a las velocidades de tránsito de las aguas superficiales. En efecto, mientras el agua subterránea se desplaza al interior de los acuíferos en términos de metros por día (m/d), las superficiales pueden alcanzar al interior de sus cauces velocidades de varios metros por segundo (m/s). Esta diferencia se refleja en una reducción de los procesos de contaminación de las aguas subterráneas, pero también en una mayor dificultad para su descontaminación, una vez un acuífero ha sido contaminado.
- La segunda diferencia se da en cuanto a la ocurrencia, toda vez que el agua subterránea se encuentra principalmente en unidades hidrogeológicas o ambientes geológicos que permiten almacenar y transmitir agua en cantidades apreciables o significativas, sin que necesariamente estas unidades estén conectadas regionalmente. Asimismo, las características hidráulicas de estas unidades cambian tanto horizontal como verticalmente, debido a la heterogeneidad, anisotropía y discontinuidad de las unidades de roca - sedimento que configuran acuíferos en el subsuelo. Los acuíferos son así sistemas heterogéneos, complejos y segmentados frecuentemente en multicapas que pueden estar o no interconectadas.

- La tercera diferencia se relaciona con la disponibilidad, pues mientras el agua superficial está disponible para que sea captada incluso manualmente, el agua subterránea depende del modelo geológico del subsuelo, el cual determina diferencias de carga de presión, que, a su vez, hacen que el acuífero sea libre o confinado, con diferentes condiciones de disponibilidad de caudal explotable y de calidad, que responden a mecanismos y expresiones diferentes de la hidráulica y la hidroquímica de las unidades hidrogeológicas.

A pesar de que no son visibles porque se encuentran bajo la superficie, las aguas subterráneas constituyen cerca del 97% de los recursos de agua dulce del planeta, sin incluir el hielo polar. Su uso es muy importante y en muchas zonas del país es el único recurso hídrico aprovechable. Por eso, el Programa Nacional de Monitoreo de Aguas Subterráneas busca conocer su distribución espacial, su potencial (caudal) y su calidad a nivel nacional, es decir, a nivel de provincia y cuenca hidrogeológica (ver definiciones en seguida).

Figura 1. El ciclo hidrológico y las aguas subterráneas



Fuente: Vargas, 2010

2. LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

Aguas subterráneas

Agua subsuperficial que ocurre bajo el nivel freático en los suelos y formaciones geológicas que se encuentran totalmente saturadas.

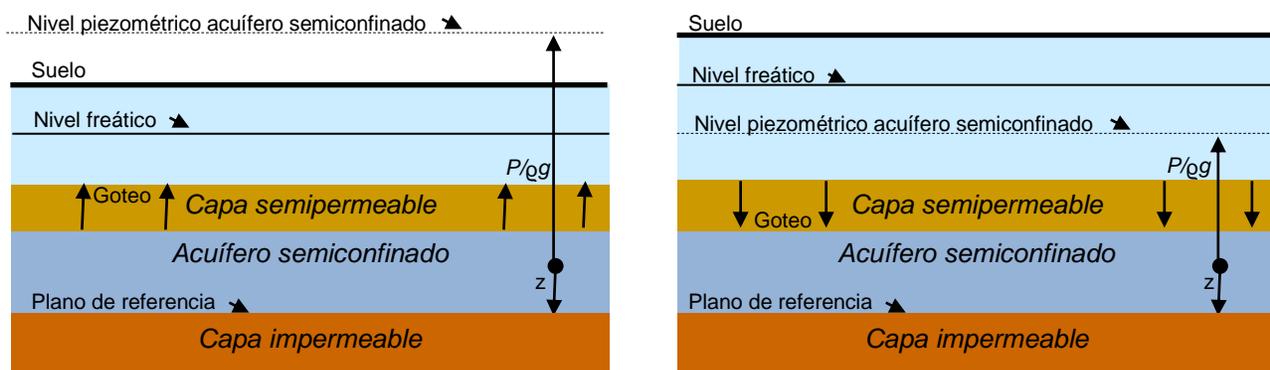
El agua subterránea forma parte del ciclo hidrológico, sufriendo procesos de recarga y descarga. En general, el agua superficial y el agua subterránea son interdependientes (figura 1). Las aguas subterráneas se caracterizan, además, por velocidades de circulación muy lentas.

Acuíferos

Formaciones que contienen agua subterránea y son capaces de transmitir y entregar cantidades significativas de agua. Los acuíferos son alimentados por agua que se infiltra a través de formaciones permeables, como areniscas y arenas (zonas de recarga), las cuales pueden estar o no en las cuencas altas.

Es posible diferenciar tres tipos de acuíferos: libres, es decir, con superficie libre abierta a la atmósfera, los cuales se alimentan principalmente de agua lluvia; acuíferos confinados, en los cuales el agua, sometida a presión, circula por una capa permeable confinada entre dos capas impermeables, por lo que su explotación sólo se puede hacer mediante pozos profundos; y acuíferos semiconfinados o de goteo, que ocurren cuando las capas confinantes de un acuífero confinado permiten cierto paso de agua, ya sea hacia arriba o hacia abajo, en función de la altura piezométrica (figura 2).

Figura 2. Relaciones entre niveles freáticos y niveles piezométricos en acuíferos semiconfinados.



Fuente: Adaptado de Quintero S. J. (s.f).

Altura piezométrica o nivel estático

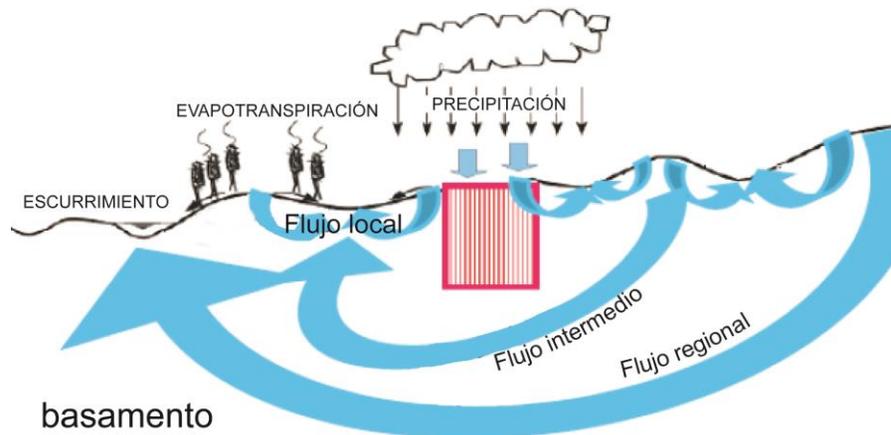
Es la altura sobre un nivel de referencia hasta la que el agua subirá en un tubo con su extremo en el punto en consideración ($\varphi = z + P/\rho g$ en la figura 2, donde $P/\rho g$ es la altura debida a la presión existente en el punto en consideración, ρ es la densidad del agua y z es la altura desde el plano de

referencia hasta el punto considerado).

Tipos de flujo de agua subterránea

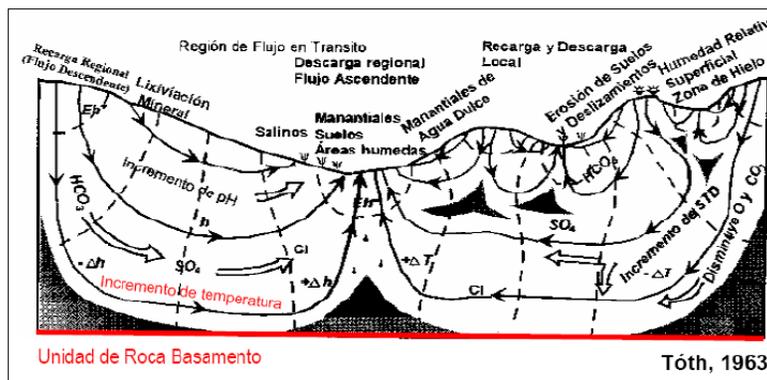
En función de la configuración geológica y topográfica de una cuenca hidrogeológica, el flujo de agua subterránea puede ser regional, intermedio y local o superficial (figuras 3 y 4). En general, el flujo regional está conformado por agua que se ha depositado en acuíferos profundos durante cientos y miles de años, el flujo intermedio durante algunos decenios, y el flujo local por acuíferos de recarga anual. Por tanto, el aprovechamiento de acuíferos profundos implica utilizar aguas que están muy lejos de la superficie y, por tanto, filtradas a través de muchas capas de roca, por lo cual su calidad es por lo general buena. Los acuíferos profundos se deben considerar entonces como un recurso geológico, agotable.

Figura 3. Tipos de flujo de agua subterránea



Fuente: Vargas, 2010

Figura 4. Principales relaciones de tipos de agua subterránea y sus fuentes



Tóth, 1963

Porosidad

Es una propiedad hidrogeológica fundamental, que representa el espacio intersticial de la roca y, por tanto, su capacidad de almacenar agua. Se define como el volumen de vacíos dividido por el

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

volumen total de la roca. Se distingue la porosidad primaria o ligada al origen de la roca, por lo general homogénea, y la porosidad secundaria, adquirida con posterioridad a su disposición, como consecuencia de fracturamientos, fallamientos, dilución kárstica o pseudokárstica u otros. La porosidad depende de factores tales como la forma y colocación de las partículas, la granulometría, el grado de compactación y la cementación de los granos de una roca o formación.

La porosidad se expresa por:

$$\emptyset = (V - V_m)/V$$

Donde V es el volumen total de la roca y V_m es el volumen de las partículas o granos.

Material	Porosidad %
Margas	47-50
Arcillas	44-50
Gravas	25-40
Arena y grava	20-35
Arena uniforme	35-40
Arena fina y media	30-40
Aluviones recientes	5-15
Caliza	0,5-17
Esquistos	1-10

Fuente: Quintero S. J. (s.f). Valores dependen de compactación.

No obstante, no toda el agua contenida en una roca es aprovechable. Una parte está adsorbida por la roca (agua higroscópica y pelicular), otra es retenida por las fuerzas de capilaridad (agua capilar) y sólo el agua gravítica o que se mueve por acción de la gravedad, que es el agua aprovechable.

En relación con la porosidad está el concepto de *retención específica*, o relación entre el volumen de agua retenido por la roca V_r después de haber salido el agua libre, y el volumen total de la roca V, cuando es posible su drenaje gravitatorio:

$$S_r = V_r/V$$

A su vez, la *porosidad eficaz* o *producción específica* es la cantidad de agua que el acuífero puede liberar por gravedad, es decir el agua útil y aprovechable, y se representa por la relación entre el agua libre que circula por la acción de la gravedad V_g y el volumen total, con V_v como volumen de vacíos:

$$S_y = V_g/V$$

$$S_r + S_y = V_r/V + V_g/V = V_v/V$$

Material	Porosidad efectiva S _y %
Gravas	15-30
Arena	10-30
Arena fina	10-15
Arcilla	1-10
Arena y grava	15-25

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

Material	Porosidad efectiva S_y %
Arenisca	5-15
Caliza - pizarra	0,5-5

Fuente: Quintero S. J. (s.f). Valores dependen de compactación.

Permeabilidad

En relación estrecha con la porosidad, la permeabilidad se define como la capacidad que tiene un medio poroso para transmitir agua bajo un gradiente de presión dado. Depende de la granulometría, la porosidad, la forma y el tamaño de los granos y la colocación y orientación de los granos.

Material	Permeabilidad K (m/día)
Arcilla	10-3
Arena	5-40
Grava	100-1.000
Arenisca fisurada	50 y más
Caliza	25
Grava y arena:	
40-50% grava	K arena
60% grava	2K arena
70% grava	4K arena

Fuente: Quintero S. J. (s.f). Valores dependen de compactación.

Nivel estático

Es el nivel al que permanece el agua en un pozo cuando no existe ninguna causa externa que lo interfiera (bombeo o inyección) (figura 5), por lo cual es equivalente a la altura piezométrica.

Nivel de bombeo

Es el nivel al que se encuentra el agua en un pozo durante la extracción de agua en el mismo para un caudal determinado (figura 5).

Aforo

Se trata de la prueba de pozo, cuando se desea conocer las características del pozo mismo, como caudal de explotación, nivel de bombeo, eficiencia, etc. En resumen, para obtener los datos necesarios para la adquisición del equipo de bombeo.

Prueba de acuífero

Es una prueba que se hace a un acuífero, para conocer su comportamiento y características hidrogeológicas, como las características hidráulicas, barreras, zonas de recarga, etc.

Abatimiento

Distancia entre el nivel estático y el nivel de bombeo (figura 5).

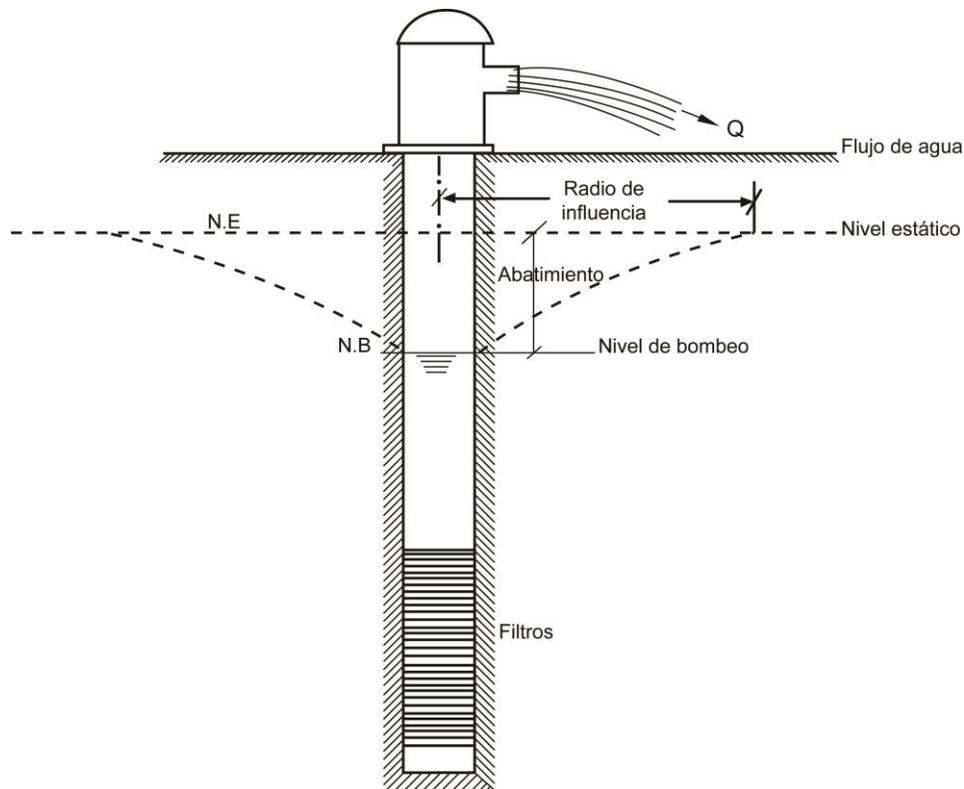
Radio de influencia

Distancia entre el pozo de bombeo y el sitio donde el efecto producido por la prueba es nulo (no hay abatimiento) (figura 5).

Coeficiente de almacenamiento

Este coeficiente (S) corresponde a la disminución del volumen de los intersticios por unidad de área al interior de un acuífero debido a la compactación del mismo y a la expansión del agua durante una prueba de bombeo. Este valor es mucho mayor para acuíferos libres (entre 0,1 y 0,30) que en acuíferos confinados (entre 0,000001 y 0,001). La compactación del acuífero puede traducirse en hundimientos del suelo después de prolongados períodos de bombeo.

Figura 5. Definiciones de los términos usados en pruebas de bombeo



Capacidad específica

Es un parámetro que indica la producción de un pozo por unidad de abatimiento. Se halla dividiendo el caudal durante la prueba por el abatimiento y se expresa en litros por segundo y por metro (Q/s). En general, este valor es estable en acuíferos libres y variable con el abatimiento en acuíferos confinados. Se debe indicar el tiempo en que se hace la lectura si aún no se ha llegado a la estabilización de los niveles en el pozo.



Caudal del pozo

El caudal o producción de un pozo se obtiene multiplicando la capacidad específica por el abatimiento disponible y por la eficiencia estimada del pozo.

Recuperación

Tendencia del nivel de agua a recuperar su nivel original en el pozo inmediatamente después de parar el bombeo.

Modelo hidrogeológico

El modelo hidrogeológico es el instrumento básico para planificar el monitoreo de las aguas subterráneas. Para ello es necesario tener un conocimiento mínimo sobre las características físicas y químicas del acuífero y sobre su dinámica.

Se debe tener en cuenta que los acuíferos son en general **sistemas heterogéneos**, complejos, segmentados, y frecuentemente multicapas, que pueden estar interconectadas o no.

Los factores físicos y químicos de un acuífero están determinados por:

- Las características geológicas, de las cuales depende el tipo, textura y estructura de la roca, las cuales a su vez determinan parámetros como la porosidad, la permeabilidad, la capacidad de almacenamiento y la capacidad específica.
- Las características hidrológicas, en especial la lluvia, de la cuales depende la cantidad y localización de las zonas de recarga.
- La topografía, la cual condiciona asimismo la distribución de las zonas de recarga.

La dinámica del acuífero está determinada por:

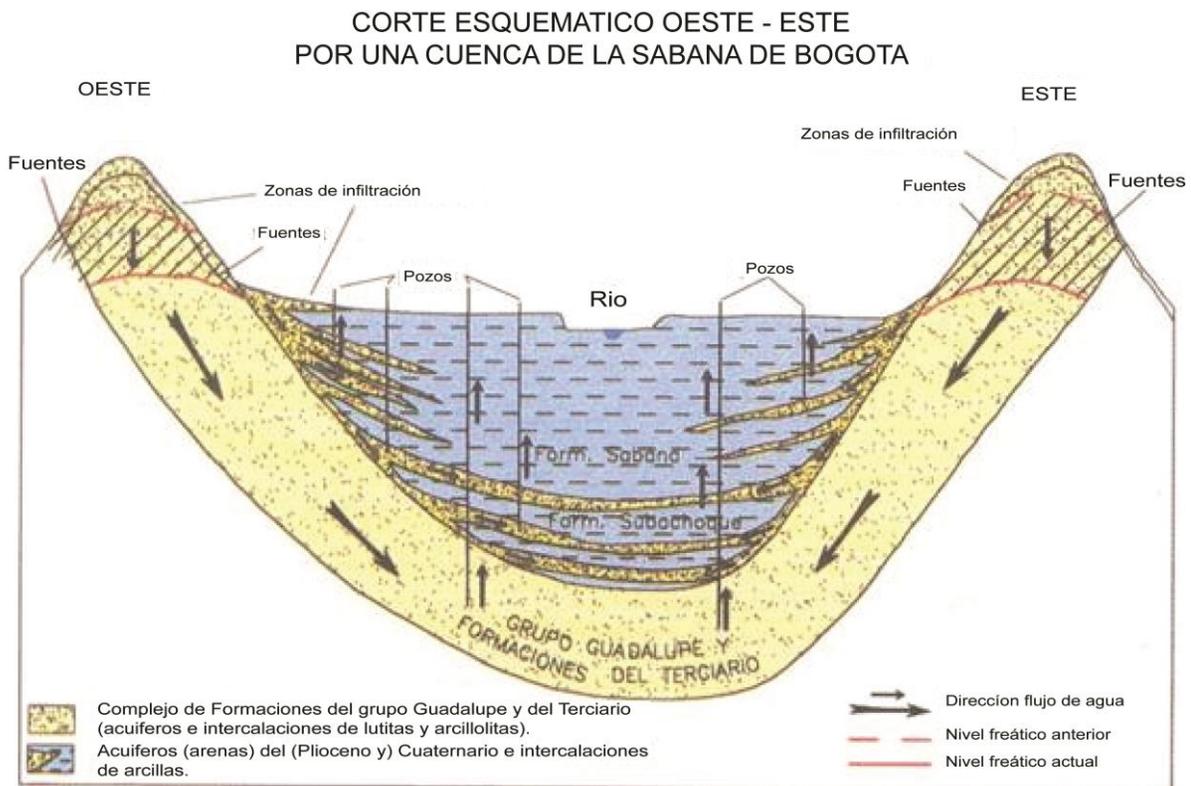
- El balance hídrico
- Las zonas de recarga
- Las zonas de descarga
- Las direcciones de flujo
- Las velocidades de flujo
- Las interconexiones con ríos y lagos (reversibilidad del acuífero)

La sistematización e interpretación de la anterior información permite elaborar el modelo conceptual (cualitativo) del acuífero. El monitoreo es el instrumento que permite validar el modelo postulado. Con base en él puede ser necesario complementar o confirmar información. La figura 6 muestra los componentes básicos de un modelo hidrogeológico y la figura 7 muestra un modelo para la Sabana de Bogotá.

Figura 6. Componentes básicos de un modelo hidrogeológico



Figura 7. Ejemplo de modelo conceptual del acuífero de la Sabana de Bogotá



Fuente: Van der Hammen, 1998.

3. ASPECTOS GENERALES DEL PROGRAMA DE MONITOREO

3.1. TIPOS DE ESTACIONES Y UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS

3.1.1. Estaciones: pozos de observación

Las estaciones de monitoreo de aguas subterráneas están constituidas por pozos de observación, en lo posible cercanos al pozo de bombeo, en los cuales se miden los efectos (cambios de nivel) producidos durante la explotación o prueba de estos últimos (ver figura 8).

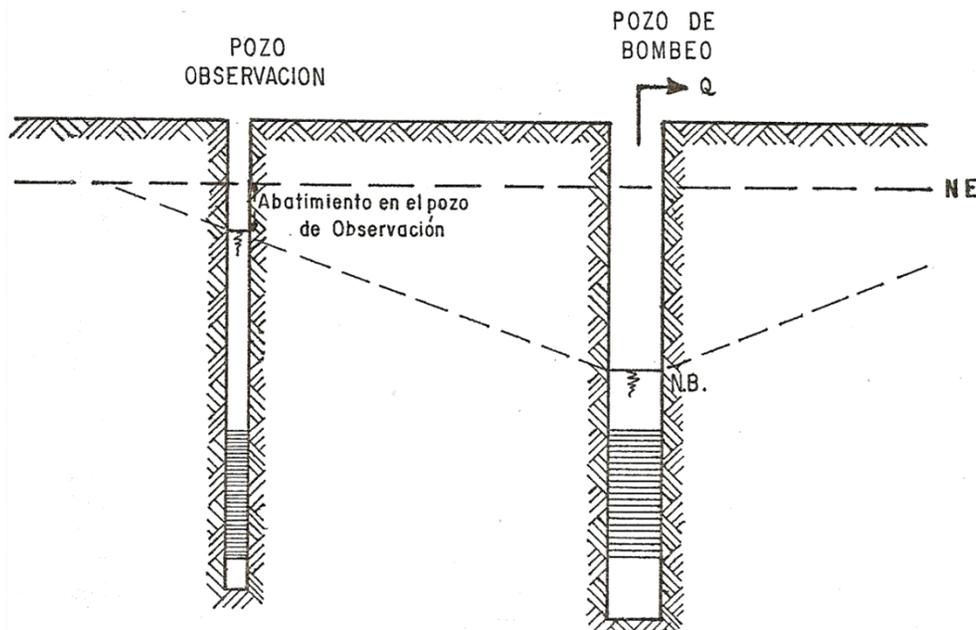
3.1.2. Unidades hidrogeológicas de Colombia

La figura 9 muestra las unidades hidrogeológicas mayores de Colombia, objeto del programa nacional de monitoreo y la tabla 2 muestra la importancia cuantitativa de cada una de estas unidades.

Provincias hidrogeológicas

Las provincias hidrogeológicas se caracterizan porque, en cada una de ellas, sus acuíferos han sido formados por procesos geológicos similares, tienen particularidades geomorfológicas comunes y se hallan separadas entre sí por rasgos tectónicos regionales, que generalmente coinciden con límites (o barreras) impermeables.

Figura 8. Pozo de bombeo y pozo de observación



Las provincias hidrogeológicas constituyen unidades mayores (identificables a escalas entre 1:10.000.000 y 1:500.000), definidas con base en unidades tectónicas y estratigráficas.



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

Para evaluar las provincias hidrogeológicas se puede trabajar con datos escasos y heterogéneos, de varias fuentes, ya que no se requiere de un nivel alto de información. Se representan en mapas hidrogeológicos generales y son útiles para reconocimiento nacional o internacional, pues representan grandes áreas con parámetros estáticos, sin dependencia del tiempo.

Las provincias hidrogeológicas pueden estar integradas por una o varias cuencas hidrogeológicas.

Cuencas hidrogeológicas

Las cuencas hidrogeológicas corresponden a unidades que poseen límites geológicos conformados por estructuras regionales entre las cuales los estilos estructurales y de estratigrafía homogénea.

A nivel de cuencas hidrogeológicas se pueden enfocar programas de investigación sistemática, subregional, en donde las cuencas pueden ser representadas con mayor resolución, detalle y precisión, a escalas del orden de 1:100.000 a 1:500.000.

La metodología que se aplica en un estudio a escala regional (provincia hidrogeológica), es diferente a la empleada a escala de cuenca o subcuenca hidrogeológica, en donde se requiere mayor y más detallada información espacial y temporal.

Subcuencas hidrogeológicas

Las cuencas hidrogeológicas pueden igualmente estar integradas por varias subcuencas, delimitadas por rasgos estructurales o estratigráficos, que interrumpen la conexión hidráulica de los acuíferos. Este tipo de unidades requiere representaciones en escalas medias a mayores (1:100.000 a 1:5.000)

Unidades hidrogeológicas

Las unidades hidrogeológicas caracterizan y agrupan las unidades geológicas de acuerdo con su capacidad para almacenar y permitir el flujo de agua, en cuatro grupos diferentes a saber: acuíferos, acuitardos y acuifugas (figura 10).

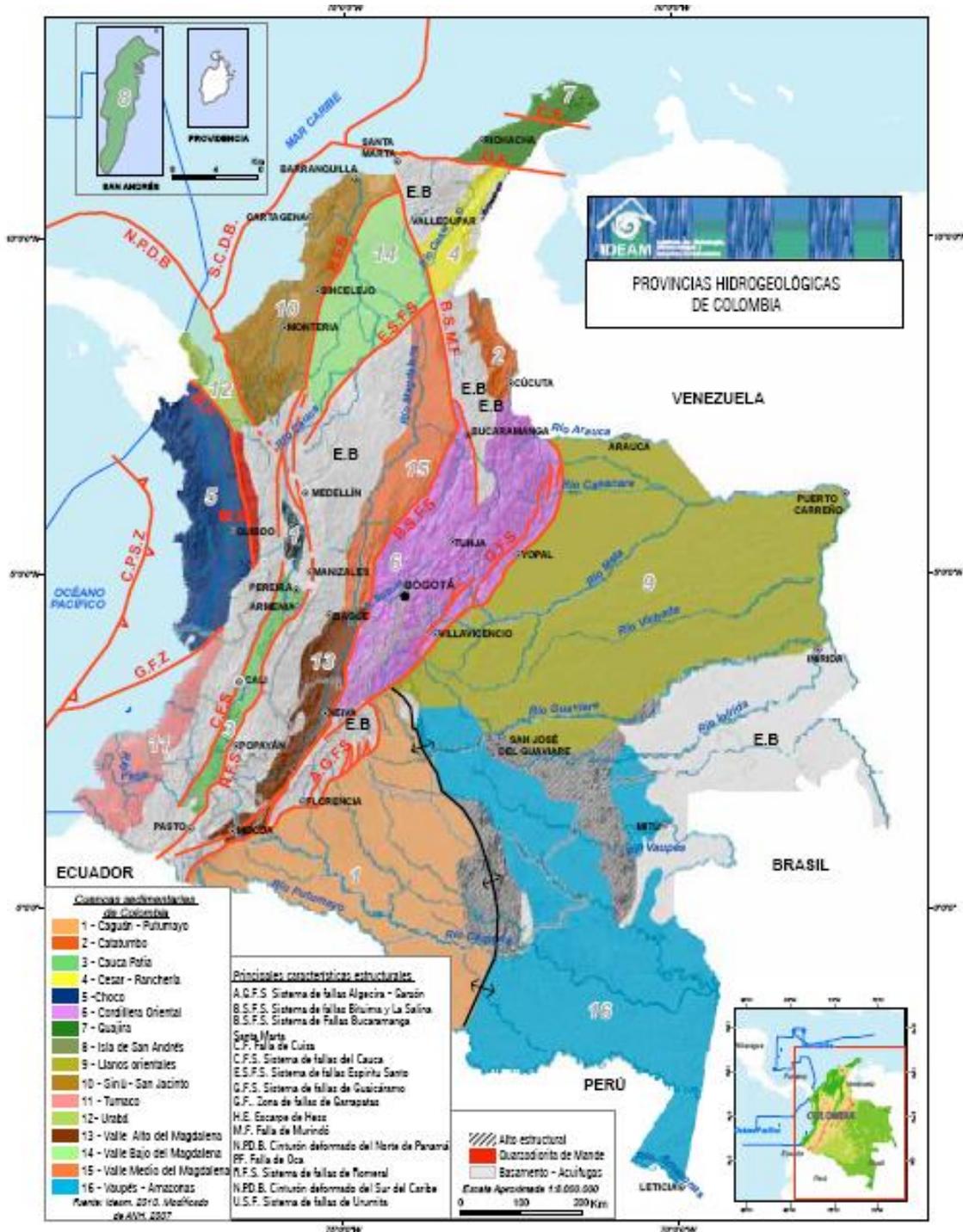
Acuíferos: Rocas permeables que almacenan y permiten el paso de agua relativamente fácil, bajo condiciones naturales de campo.

Acuitardos: Materiales que almacenan agua pero solo permiten el flujo muy lento de ella, por sus condiciones semipermeables o impermeables. Algunos autores utilizan el término acuicierre como sinónimo de acuitardo.

Acuifugas: Materiales que no contienen ni permiten el flujo de agua. Son considerados materiales impermeables.

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

Figura 9. Zonas hidrogeológicas de Colombia



Fuente: IDEAM, Estudio Nacional del Agua, 2010.

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

Tabla 2. Resumen de unidades hidrogeológicas de Colombia

Provincia hidrogeológica	Formaciones geológicas con potencial hidrogeológico	Tipo de acuífero	Área (km ²)	Espesor acuífero (m)	Rendimiento específico	Reservas (m ³ x10 ¹⁰)
Llanos orientales	Mirador Guayabo/Caja Necesidad Corneta. Depósitos recientes de tipo aluvial y terrazas	Acuíferos libres a semiconfinados en los sedimentos aluviales y de terraza. Confinados para el resto de unidades.	265.547,29	550	0,02 - 0,08	239,06
Vaupés - Amazonas	Depósitos recientes aluviales y terrazas subrecientes a recientes. Niveles arenosos de las Formaciones Serranía, Aracuara y Güejar (?)	Acuíferos libres a semiconfinados en los sedimentos aluviales y de terraza.	126.050,61	250	0,01 - 0,05	2,42
Caguán - Putumayo	Depósitos recientes aluviales y terrazas subrecientes a recientes. Niveles arenosos y conglomeráticos de las Formaciones Caimán, Caballos y Pepino	Acuíferos libres a semiconfinados en los sedimentos aluviales y de terraza.	140.000,00	360	0,02 - 0,06	66,11
Cordillera Oriental	Depósitos recientes de origen aluvial y terrazas. Formación Tilatá, Formación Regadera. Formación Arenisca Tierna del Grupo Guadalupe, Formación Cacho y Socha Inferior en el altiplano cundiboyacense. Secuencias clásticas de las Formaciones Mesa, Cimarrona, Tabla y Hoyón hacia el piedemonte occidental.	Acuíferos libres a semiconfinados para las unidades recientes. Libres a confinados para el resto de unidades.	59.933,77	3400	0,005 - 0,1	90,07
Cauca - Patía	En el Valle del río Cauca: capas de arenas, gravas y algunas veces cantos rodados, intercalados entre capas de arcillas. Se reconocen también como acuíferos los horizontes permeables clásticos y vulcanoclásticos de las formaciones Popayán, Galeón, Patía y Armenia (Glacis del Quindío)	Acuíferos libres a semiconfinados en la Unidad A y en los niveles arenosos de las formaciones Armenia, Paila, Galeón, Popayán y Patía. Confinados en la Unidad C.	12.500,00	250	0,01 - 0,15	10,10
Urabá	Depósitos de terraza y llanura aluvial de los ríos principales. Capa de arenisca en matriz arcillosa, interstratificadas con lentes de conglomerado y lodolitas que agrupa las formaciones La Risa, Ciénaga de Oro, Floresanto y Tubará. Formación Carpa constituida por intercalaciones de lodolitas, areniscas y conglomerados.	Acuíferos libres en las unidades de terrazas y llanura aluvial. Semiconfinados a confinados en las Unidades T1 y T2.	5.264,43	250	0,01 - 0,04	0,79
Sinú - San Jacinto	Sedimentos arenosos y de gravas, areniscas friables y conglomeráticas de la Formación Morroa, Sincelejo, Cerrito, Ciénaga de Oro, San Cayetano, Gravas de Rotinet.	Acuíferos libres a semiconfinados para las unidades recientes. Libres a confinados para el resto de unidades.	37.770,88	970	0,005 - 0,13	19,40



INFORME FINAL

epam s.a. esp

Contrato No. 214 de 2010

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

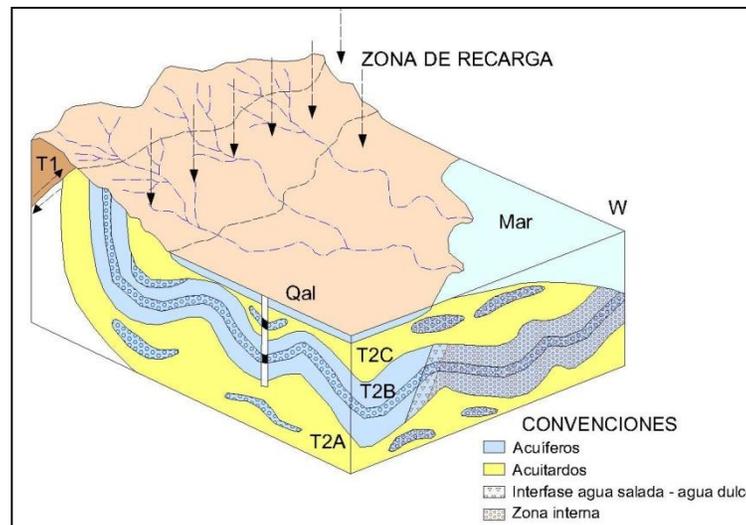
Provincia hidrogeológica	Formaciones geológicas con potencial hidrogeológico	Tipo de acuífero	Área (km ²)	Espesor acuífero (m)	Rendimiento específico	Reservas (m ³ x10 ¹⁰)
Valle Bajo del Magdalena	Sedimentos arenosos y de gravas de la Formación Betulia. Sedimentos de terraza, aluviales recientes, de cauce aluvial y de ciénaga que conforman acuíferos libres a semiconfinados y los depósitos arenosos del grupo Tubará - Porquero. Areniscas y conglomerados de la Formación San Jacinto.	Acuíferos libres a confinados.	44.917,64	900	0,01 - 0,05	36,22
Guajira	Un acuífero libre conformado por las unidades recientes (depósitos de llanura aluvial, de cauce aluvial, de playón, de barra y de dunas). Un acuífero confinado formado por el conjunto detrítico terciario Uitpa y Monguí.	Acuíferos libres a confinados.	13.323,08	580	0,01 - 0,1	9,99
Catatumbo	Formación Mirador, formación Carbonera Grupo Guayabo, complejo de limos y cantos rubificados, terrazas y aluviones recientes.	Acuíferos libres a semiconfinados en terrazas y aluviones recientes, y confinados en niveles arenosos de las formaciones Mirador, Carbonera y Guayabo.	6.963,31	1150	0,02	8,36
Cesar - Ranchería	Formación Aguas Blancas, Formación Molino, Formación Barco, Formación Cuesta. Terrazas altas, terrazas medias, depósitos lacustres y cenagosos. Unidades recientes de llanura aluvial (Valle del río Cesar, Los Venados, Ariguaní, Codazzi-Sicarare, Becerril-La Loma, Rincón Hondo, Astrea-San Alberto), de aluviones recientes (Planicie del río Cesar), de abanicos aluviales (Abanicos de Valledupar, de Manaure, de Codazzi, de La Jagua, de Pailitas y de Aguachica) y de terrazas en la esquina nororiental del departamento. Formaciones La Luna y Cogollo.	Acuíferos libres en unidades recientes de llanura aluvial, aluviones recientes y terrazas, y Formación Cuesta. En el resto de unidades se conforman acuíferos confinados.	10.099,79	1470	0,005 - 0,09	14,00
Chocó - Pacífico	Sedimentos fluviales y transicionales del Cuaternario localizados en las márgenes de los ríos Atrato, Baudó y San Juan. Niveles arenosos de las formaciones Quibdó y Munguidó.	Acuíferos libres en sedimentos recientes.	31.762,53	800	0,03 - 0,05	43,86
Tumaco	Sedimentos fluviales y de playa, niveles arenosos de las Formaciones San Agustín, Tumaco y localmente Raposo, Mallorquín, Chagi y Naya podrían representar potencialmente acuíferos discontinuos.	Acuíferos libres a semiconfinados pobres en depósitos recientes y libres a confinados en formaciones terciarias.	23.749,42	570	0,02 - 0,03	7,18
San Andrés	Formaciones San Luis y San Andrés.	Acuíferos libres a confinados.	25,00	90	0,01 - 0,04	0,00196

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

Provincia hidrogeológica	Formaciones geológicas con potencial hidrogeológico	Tipo de acuífero	Área (km ²)	Espesor acuífero (m)	Rendimiento específico	Reservas (m ³ x10 ¹⁰)
Valle Alto del Magdalena	Terrazas aluviales antiguas, aluviones recientes y lahares. Abanico de Ibagué compuesto por lahares, flujos piroclásticos y depósitos de canales y el Abanico del Espinal. Conos coalescentes menores conformados por depósitos aluviales de flujos de escombros. Formaciones Honda, Gigante y Guacacallo. De menor importancia formaciones Gualanday, Monserrate, Caballos.	Acuíferos libres a semiconfinados en formaciones recientes y del Terciario Superior. Libres a confinados para formaciones más antiguas.	14.686,77	850	0,02 - 0,01	11,11
Valle Medio del Magdalena	Depósitos aluviales recientes y de terraza, sedimentos detríticos poco consolidados (areniscas, conglomerados) de la Formación Mesa y el Grupo Real.	Acuíferos libres a semiconfinados en unidades recientes y del Terciario Superior. Libres a confinados en unidades más antiguas.	27.533,52	3500	0,005 - 0,08	26,08
TOTALES			820.128,04			584,752

Fuente: IDEAM, Estudio Nacional del Agua, 2010

Figura 10. Esquema general de los acuíferos



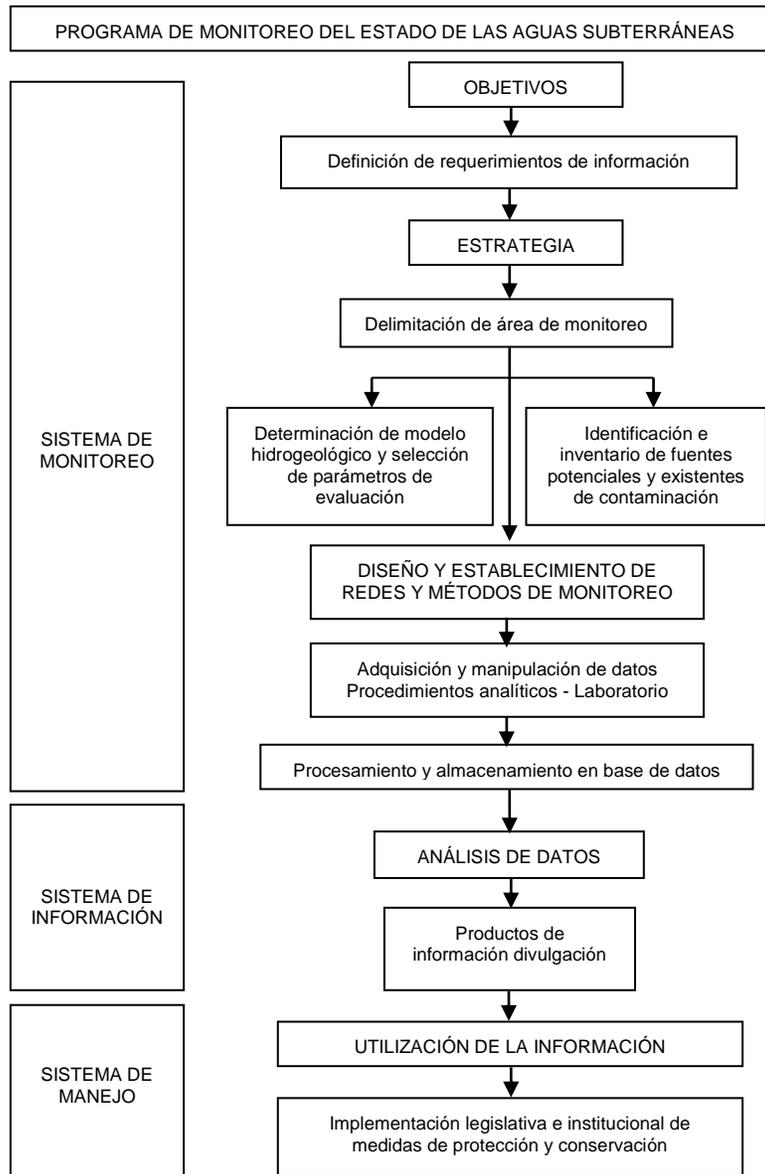
Fuente: Vargas, 2010

3.2. TIPOS DE REDES

3.2.1. Requerimientos de información

La definición de objetivos y requerimientos de información primaria y agregada es el primer punto crítico de un programa de monitoreo y tiene que ser definido antes de localizar la primera estación de monitoreo y de hacer el primer muestreo. La figura 11 muestra el flujograma de las actividades del monitoreo (Musicar, R. 2002, en Vargas, 2010).

Figura 11. Flujoograma para la implementación de un programa de monitoreo de aguas subterráneas



Fuente: Modificado de VRBA, J. 1988, en Vargas, 2010.

Definidos los objetivos del monitoreo, es esencial determinar los resultados esperados del mismo. Como se dijo atrás, los objetivos varían en función del nivel de la red, es decir, si se trata de una red nacional, regional o local. Los requerimientos de información por los usuarios (planeadores, políticos y tomadores de decisiones, científicos y público en general) no pueden ser satisfechos cuando los objetivos del monitoreo no han sido claramente establecidos.

Los requerimientos de información están ligados a los objetivos de la red (ver tabla 1, objetivos del monitoreo):

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

- Para la red nacional bastan los niveles estáticos y la calidad del agua. Los parámetros de calidad deben buscar la caracterización hidrogeoquímica del acuífero, tal como se definen más adelante, en la sección 4.5.3.
- Para las redes regionales interesan los niveles estáticos, los caudales extraídos y parámetros de calidad que permitan caracterizar y/o hacer seguimiento a problemas de contaminación y aprovechamiento del acuífero.
- Para redes locales o con propósitos específicos, interesan los niveles, los caudales y los parámetros de calidad exigidos según el uso al que se vaya a destinar el agua extraída. Por ejemplo, si el agua se va a destinar a consumo humano, se deben considerar los parámetros exigidos por las normas nacionales de agua potable.

3.2.2. Las áreas de monitoreo

En principio, las unidades de monitoreo son las siguientes, según el nivel de la red:

- A nivel nacional, las unidades de monitoreo corresponden a provincias, cuencas y subcuencas hidrogeológicas (ver tabla 2).
- A escala regional, las áreas de monitoreo corresponden a acuíferos de extensión regional, es decir, acuíferos que sobrepasen el interés de un solo usuario. El seguimiento de estos acuíferos debe realizarse no sólo en sentido horizontal sino vertical (ver justificación en figuras 3 y 4). El área también puede depender del interés específico de control por parte de la Autoridad Ambiental, por ejemplo, seguimiento de un problema de contaminación, de los efectos del aprovechamiento sobre los niveles de los acuíferos, o de los conflictos entre usuarios, entre otros.
- A escala local, el área de monitoreo puede ser relativamente pequeña y referirse sólo a un acuífero local, o a un sector o parte de un acuífero o a una capa de un acuífero de mayor extensión horizontal o vertical. También puede estar condicionada por un interés particular como la identificación de una fuente de contaminación, el seguimiento a una pluma de contaminación, a una medida de control o tratamiento, o a los efectos del aprovechamiento.

3.2.3. Diseño y establecimiento de redes y métodos de monitoreo

El diseño de la red es la selección de los sitios para el muestreo de la calidad y cantidad de las aguas subterráneas, la cual debe hacerse a partir del modelo hidrogeológico conceptual de los sistemas acuíferos presentes en las cuencas y/o subcuencas hidrogeológicas. Es importante destacar que las variaciones naturales de los niveles y la calidad de las aguas subterráneas están íntimamente relacionadas con las variaciones espaciales y temporales de variables meteorológicas e hidrológicas que definen las diferentes épocas climáticas.

El diseño e implementación de una red de monitoreo puede variar ampliamente dependiendo de los objetivos de la misma. En cualquier caso el diseño de una red de monitoreo debe hacer énfasis en la evaluación de unidades hidrogeológicas previa y claramente identificadas, teniendo en cuenta que, como se dijo arriba, el agua subterránea se caracteriza, en términos generales, por poca variabilidad en el tiempo (tanto de niveles estáticos como de la calidad del agua), y por amplia variabilidad espacial.



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

Desde el punto de vista hidrogeológico es importante conocer el tipo de acuífero a monitorear teniendo en cuenta²:

- El marco geológico, geofísico y estructural
- El modelo de flujo que defina sus zonas de recarga, tránsito y descarga
- Las relaciones río-acuífero, sus parámetros hidráulicos y sus características hidrogeoquímicas naturales
- La recarga proveniente de la precipitación, sus recursos y reservas
- La vulnerabilidad y las fuentes potenciales puntuales y/o difusas de contaminación

Todo lo anterior permite definir no solo los sitios de muestreo sino la frecuencia mediante modelos estadísticos y de flujo y transporte de contaminantes.

El monitoreo de aguas subterráneas no es de por sí un campo nuevo en el conocimiento; sin embargo en Colombia aún no se tiene operando una red nacional para este fin. El IDEAM ha dado lineamientos para la formulación y diseño de una red básica nacional de seguimiento y muestreo de este universo, encontrándose actualmente en el proceso de hacerla compatible con las redes regionales de las CARs y entidades sobre las cuales recae la responsabilidad de este recurso en el país. Se espera que los resultados del monitoreo tanto de la cantidad como de la calidad de las aguas subterráneas, permitan mejorar el planeamiento y desarrollo de los aprovechamientos hídricos, y la protección del recurso para anticipar o reducir escenarios de contaminación y deterioro.

La red de estaciones debe ser susceptible de reevaluar, con el fin de incorporar prioridades y necesidades por parte de cada uno de los componentes institucionales o nodos del sistema (principalmente las CAR).

Programa nacional

El programa nacional de aguas subterráneas comprende la recolección de datos sobre el estado natural y el estado intervenido de las aguas subterráneas, en cantidad y calidad, de los principales sistemas acuíferos. Esta información soporta la política nacional de protección y conservación de aguas subterráneas. A la vez permite incorporar información a los modelos hidrológicos nacionales para fines de gestión de los recursos hídricos.

La línea base y las tendencias juegan un rol importante en el monitoreo de aguas subterráneas a nivel nacional. Normalmente representan las condiciones hidrogeológicas naturales y están por fuera de la influencia de fuentes de contaminación locales.

La red nacional tiene un alcance multipropósito y se implementa únicamente en los sistemas hidrogeológicos prioritarios. Sus métodos y procedimientos están estandarizados pero se ajustan a las condiciones regionales.

La importancia del agua subterránea como fuente de abastecimiento de agua potable, como bien ambiental y la vulnerabilidad de acuíferos controlan el diseño de la red nacional de aguas subterráneas.

²IDEAM, Guía para el monitoreo de vertimientos, aguas superficiales y subterráneas, 2003 p. 9.



En la planeación de estudios de aguas subterráneas a escala nacional, es recomendable comenzar inicialmente a nivel regional. Luego, en la medida en que se vaya obteniendo la información requerida, se podrán desarrollar los modelos básicos que sirvan de marco, orientación, y planeación para estudios más detallados, los cuales a su vez conducirán finalmente a estudios intensivos y localizados, algunos de ellos altamente especializados, relacionados con problemas de gestión de aguas subterráneas.

Mirando el panorama actual de las aguas subterráneas a nivel nacional, se puede inferir que hasta ahora se está desarrollando la primera fase, correspondiente al proceso técnico y sistemático de identificación y delimitación de provincias hidrogeológicas, gracias a la acción que en este sentido ha realizado el IDEAM, en el “Estudio Nacional de Aguas ENA- 2010”

El monitoreo de las aguas subterráneas a escala nacional deberá programarse e iniciarse (tan pronto como sea posible), dentro del marco de las provincias hidrogeológicas identificadas y delimitadas en el ENA 2010. Para ello deberán seleccionarse las provincias, cuencas y subcuencas hidrogeológicas que de acuerdo con su importancia (técnica, y socio económica), se consideren prioritarias en su evaluación y monitoreo

Densidad de la red. La densidad de puntos de observación de acuerdo con el Global Environment Monitoring System (GEMS) debe ser de una estación por cada 100 a 10.000 km² (VRBA, J. 2002).

Programas regionales de aguas subterráneas

A nivel regional o local, la primera fase de un estudio de aguas subterráneas está centralizada en la identificación del ambiente hidrogeológico, que involucra la determinación de parámetros estáticos a saber:

- Materiales que integran los acuíferos
- Delimitación y geometría del sistema (extensión lateral, espesor, profundidad)
- Volumen de agua almacenado y
- Características del agua.

En una fase posterior se debe identificar el sistema de flujo que involucra parámetros variables tales como:

- Parámetros hidráulicos de los acuíferos
- Entradas y salidas del sistemas y
- Respuesta del sistema a cambios físicos y químicos.

Dada la conformación territorial de las autoridades ambientales regionales, los programas regionales de aguas subterráneas, a cargo de tales autoridades, deben estar interrelacionados con otras redes regionales de aguas subterráneas y superficiales y programas ambientales. Un programa regional de monitoreo debe ser flexible y capaz de servir a diferentes propósitos. Su principal objetivo es adquirir datos estadísticamente representativos y significativos sobre el agua subterránea para establecer planes de manejo regional del recurso, políticas regionales y estrategias de seguimiento y protección en las áreas de jurisdicción de las autoridades ambientales del país.



Densidad de la red. Los programas regionales de monitoreo complementan el programa nacional de monitoreo pero sus propósitos se orientan al seguimiento de actividades que causan potencial o real contaminación, a la protección de área de captación de abastecimiento de agua potable y en términos generales soportan el Plan Regional de Protección y Manejo de las Aguas Subterráneas. El diseño de pozos de monitoreo debe permitir el seguimiento de movimiento vertical de contaminantes, incluso en la zona no saturada. Las empresas abastecedoras de agua potable están obligadas por su parte a implementar programas de monitoreo como parte de la política de protección de sistemas de abastecimiento de agua potable.

La densidad de puntos de observación depende de las especificidades regionales pero las normas internacionales recomiendan una estación por cada 10 a 100 km² ((VRBA, J. 2002). Para la zona montañosa de Colombia, se considera adecuado un promedio de un pozo por cada 16 km², con cartografía a escalas 1:100.000 a 1:200.000.

Programas locales de monitoreo de aguas subterráneas

Los programas locales de monitoreo de aguas subterráneas persiguen los siguientes objetivos:

- Identificación de fuentes potenciales de contaminación, con el propósito de dar alertas tempranas acerca del deterioro o degradación de las aguas subterráneas.
- Observación y control del movimiento de plumas de contaminación o efectos de remediación en fuentes de contaminación existentes.
- Seguimiento de la fluctuación de los niveles estáticos en relación con los caudales de descarga.

Densidad de la red. Estos programas operan independientemente de los programas nacionales y regionales. Se circunscriben a los sitios específicos y pueden requerir gran cantidad de pozos de monitoreo (del orden de miles de m² a 1 km² por pozo), alta frecuencia de monitoreo y selección de variables específicas de acuerdo con el tipo y propiedades de los contaminantes identificados. Estas redes locales tienen altos costos que son cubiertos por los contaminadores de acuerdo con la normatividad vigente. Algunas de estas redes se implementan por tiempo limitado. Para las condiciones montañosas de Colombia, se considera adecuado un promedio de 1 pozo por cada km², para cartografías mayores de 1:50.000.

En cualquier tipo de red, la densidad y la localización óptima de los sitios de monitoreo está supeditada a los propósitos del mismo, a la extensión del territorio a ser abarcado, a la continuidad de los acuíferos y a los impactos sobre el sistema hidrogeológico.

Al referirse a la densidad regional de pozos, la OMM³ (1994-2008) precisa que "dependerá de las características de las unidades hidrológicas, las propiedades del material acuífero y la importancia y necesidad del desarrollo de los recursos de aguas subterráneas". Si bien las densidades mínimas para aguas subterráneas no han sido definidas, se pueden ofrecer otras orientaciones sobre la ubicación de las estaciones y la manera de hacer el muestreo. El espaciado de los puntos de observación, a juicio de la OMM en una red para estudiar las aguas subterráneas depende de:

³Op. Cit



- El tamaño de la zona
- La complejidad de la zona desde un punto de vista hidrogeológico
- Los objetivos de la red
- Las limitaciones financieras

Se considera además que "si en la investigación hay varios acuíferos a diferentes profundidades con diferentes alturas piezométricas y salinidades, para su estudio se deberán hacer perforaciones de pequeño diámetro y llegar así a cada acuífero. Estas perforaciones pueden estar separadas sólo de unos metros. La distancia entre dos pozos de observación tiene que ser lo suficientemente flexible como para permitir el uso de pozos existentes y el acceso para las mediciones" (OMM, 1994-2008). El espaciado puede ser diferente para cada acuífero.

También postula la OMM (1994-2008) que una red nacional o regional mínima en zonas poco explotadas "deberá ser suficientemente densa para observar todos los acuíferos principales, cuya definición se basa inicialmente en la información geológica disponible". Recomienda la OMM como criterios para establecer la red inicial de un acuífero poco explotado:

- La distancia entre dos pozos de observación tiene que ser similar a la distancia sobre la cual la configuración geológica del acuífero pueda ser extrapolada.
- Esta distancia variará de un sitio a otro. La distancia máxima entre pozos en zonas extremadamente grandes en una red básica no debería exceder los 40 km.
- Hacer uso completo de la información hidrogeológica obtenida a partir de pozos perforados para otros fines.
- Incorporar pozos existentes en la red para reducir el costo de instalación y perforación de pozos de observación adicionales.
- En terrazas aluviales con poco alcance de los ríos, debería estudiarse la conexión hidráulica entre las aguas subterráneas y las fluctuaciones del nivel de agua en el río.

3.2.4. Estrategias para la implementación de la red de monitoreo de aguas subterráneas

Elementos generales de la estrategia

La estrategia de monitoreo depende de los objetivos y nivel de la red. La definición de la estrategia conlleva la delimitación del área de monitoreo. Ésta debe basarse en la determinación del modelo hidrogeológico conceptual y/o en la identificación de fuentes actuales o potenciales de contaminación y aprovechamiento. La determinación del modelo hidrogeológico debe realizarse con base en el análisis de la estructura geológica, el sistema de flujo de aguas subterráneas y la calidad de las aguas subterráneas, para lo cual se debe utilizar la información disponible.

De otro lado, para establecer la estrategia de monitoreo de aguas subterráneas es necesario considerar las diferencias en las propiedades de éstas y las aguas superficiales, a las que se hizo referencia anteriormente. En particular, el agua subterránea es afectada por los impactos antropogénicos menos rápidamente que el agua superficial y, por tanto, la respuesta de un acuífero se da por lo general retardada, debido a la lentitud del movimiento de los contaminantes en el subsuelo, en función de las condiciones hidrodinámicas y la naturaleza de los procesos bioquímicos. Esta condición debe usarse en la estrategia de protección del sistema hídrico subterráneo.

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

Para el desarrollo de la estrategia se debe considerar los siguientes factores (VRBA, 2000, *ibid*):

- Objetivos del monitoreo
- Importancia y vulnerabilidad de los sistemas hidrogeológicos
- Tipos y extensión de las fuentes potenciales de contaminación y degradación.
- Beneficios de las actividades de monitoreo.
- Prioridades, intereses y necesidades relativas al desarrollo de los recursos hídricos.

Los objetivos de monitoreo dependen del nivel (nacional, regional, local), de las prioridades, de los intereses y de las necesidades de los usuarios. En sentido amplio, son objetivos comunes a todos los niveles:

- Identificar las propiedades físicas, químicas y biológicas del sistema de aguas subterránea, con el fin de definir su cantidad y calidad.
- Identificar y evaluar los efectos de los procesos naturales y antrópicos.
- Definir el grado de vulnerabilidad de los sistemas hidrogeológicos.
- Pronosticar a largo plazo las tendencias en cantidad y calidad del recurso subterráneo.
- Definir, planificar y priorizar la ejecución de medidas para prevenir la degradación de las aguas subterráneas o restaurar los acuíferos afectados.
- Resolver conflictos entre los usuarios de los recursos hídricos subterráneos y otros recursos naturales.

La importancia y vulnerabilidad de los sistemas hidrogeológicos está dada por:

- Población que depende de las aguas subterráneas para atender sus necesidades de consumo doméstico.
- Aprovechamiento del agua subterránea para riego e industrias de alimentos y bebidas.
- Relación recarga/descarga, donde el caudal aprovechado dependa de la recarga anual.
- Profundidad de los acuíferos y susceptibilidad a la contaminación.

Los tipos y extensión de las fuentes potenciales de contaminación están dados por la presencia de actividades fuertemente contaminantes en el área de influencia de un acuífero, tales como rellenos sanitarios, ríos contaminados, disposición de residuos de minería y otras.

Entre los beneficios de las actividades de monitoreo se pueden citar, entre otros:

- Conocimiento del potencial y de la hidrogeoquímica de las aguas subterráneas.
- Planeación del aprovechamiento de las aguas subterráneas.
- Control del aprovechamiento y de la contaminación de las aguas subterráneas.

Las prioridades, intereses y necesidades relativas al desarrollo de los recursos hídricos dependen de las fuentes de aguas superficiales existentes y de los costos de oportunidad del aprovechamiento de las aguas subterráneas en relación con otras fuentes.

No obstante, cada autoridad ambiental debe definir sus propios objetivos de monitoreo, de acuerdo con las realidades regionales y locales, sin perder de vista que el monitoreo de las aguas subterráneas es parte de las actividades y responsabilidades de la estructura gubernamental y de las autoridades ambientales encargadas de implementar de manera coordinada estrategias y políticas para regular el aprovechamiento, manejo, protección y control de las aguas subterráneas.



Tipos de redes según nivel y responsabilidades

El programa nacional de monitoreo de aguas subterráneas, como una parte integral de otros programas ambientales, es multipropósito y busca conocer el estado de las aguas subterráneas en cantidad y calidad, evaluar las variaciones cuantitativas y cualitativas del recurso y determinar las tendencias a largo plazo. Constituye pues un generador de línea base para soportar las estrategias nacionales de protección, manejo y desarrollo del recurso.

- El monitoreo y control de aguas subterráneas puede hacerse a tres niveles básicos: nacional, regional y local, y en cada uno de estos niveles, los actores institucionales y los usuarios de la información son diferentes.
- La red nacional es de tipo básico, es decir, una red destinada al conocimiento fundamental de la hidrogeología nacional, que pueda servir de referencia a otros tipos de redes. Por tanto, se diferencia de las redes locales o regionales, por cuanto el objetivo de éstas es generar información para planificar el uso del agua, para la protección de acuíferos destinados a abastecimiento de agua potable, o para la vigilancia de la contaminación por la proximidad de zonas de riesgo, ligadas a instalaciones o actividades potencialmente contaminantes, y/o para resolver conflictos entre los usuarios de los recursos hídricos subterráneos y otros recursos naturales. Lo anterior implica que los puntos de observación de la red nacional "deben situarse en zonas relativamente libres de la influencia de cambios antropogénicos pasados o futuros"⁴.
- La densidad de una red depende del objetivo y nivel del programa de monitoreo. No puede tener la misma densidad una red nacional de referencia, que una red destinada a control de vertimientos, seguimiento de la contaminación o de los cambios de niveles por aprovechamiento, las cuales, por necesidad, tienen que ser mucho más densas.
- La densidad también depende de la geología y de las condiciones de los acuíferos. En acuíferos multicapas, por ejemplo, puede ser necesario establecer pozos para cada acuífero.
- La frecuencia de observación depende de los objetivos del monitoreo.
- Antes de decidir si perforar o no un pozo, se debe hacer el uso más completo posible de la información hidrogeológica obtenida a partir de pozos perforados para otros fines, existentes en el área a monitorear.
- Los pozos existentes deben ser incorporados a la red para reducir el costo de instalación y perforación de pozos de observación adicionales.

En el numeral 3.2.3 se establecen algunos criterios para la densidad de pozos y frecuencia de observación.

De acuerdo con lo expuesto, las redes pueden organizarse en tres ámbitos de intervención (figuras 12 y 13) y, de acuerdo con las competencias institucionales, tienen objetivos, densidades de puntos de observación, frecuencia de muestreo y otras especificidades propias de cada nivel. Debe quedar claro que la red nacional se deriva de la red regional y su diferencia es el propósito mismo del monitoreo. Las redes locales o específicas se disponen para hacer seguimiento a variables determinadas por las condiciones de un proyecto o una actividad local. Tal es el caso de estaciones de servicio, en las cuales se miden hidrocarburos de manera particular o el de plaguicidas en los distritos de riego. Para cada proyecto o actividad antrópica se prevén las exigencias de monitoreo de acuerdo con el tipo de contaminantes que potencialmente generan en el proceso de producción.

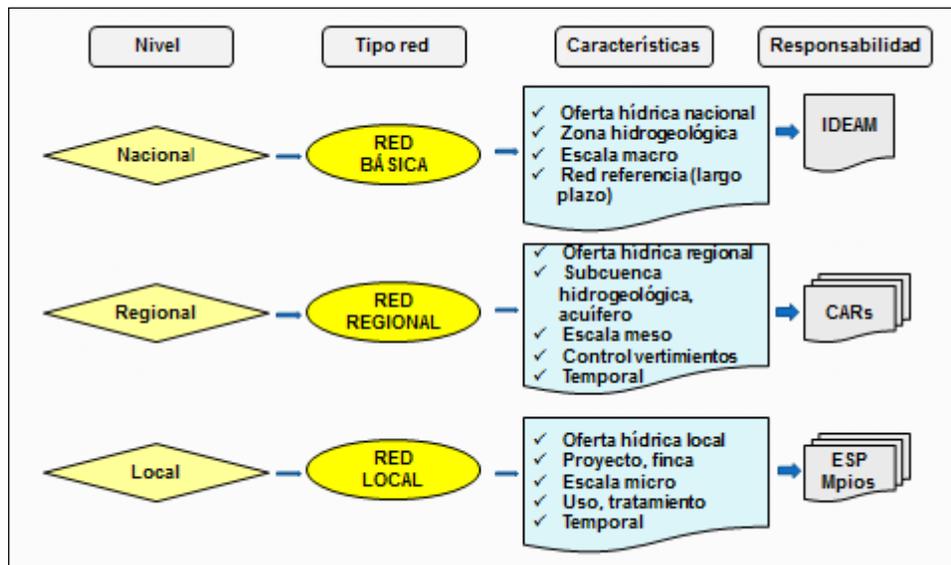
⁴OMM, Capítulo 20. 1994

De acuerdo con lo establecido en la Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico (GIRH) y en el decreto 1323 de 2007, las responsabilidades institucionales del Programa Nacional de Monitoreo del Recurso Hídrico son las siguientes (figura 12):

- IDEAM: Red básica nacional, nivel 1, a escala de cuenca hidrogeológica, la cual debe conformar en el futuro la red nacional de referencia. Esta responsabilidad del IDEAM le está asignada de manera general en la ley 99 de 1993 y de manera particular en el decreto 1277 de 1994.
- CARs: Redes regionales de nivel 2, a escala de subcuenca hidrogeológica y/o acuíferos regionales.
- Autoridades locales, empresas públicas: Redes de nivel 3, establecidas de acuerdo a las necesidades de los proyectos y/o explotaciones de aguas subterráneas.

A diferencia de las redes nacional y regional que están a cargo desde el punto de vista presupuestal de las instituciones públicas, las redes específicas son responsabilidad de los usuarios, quienes reportan la información a las autoridades ambientales pertinentes para sus fines de gestión.

Figura 12. Niveles y responsabilidades de las redes de monitoreo



Estrategia para la implementación de la red

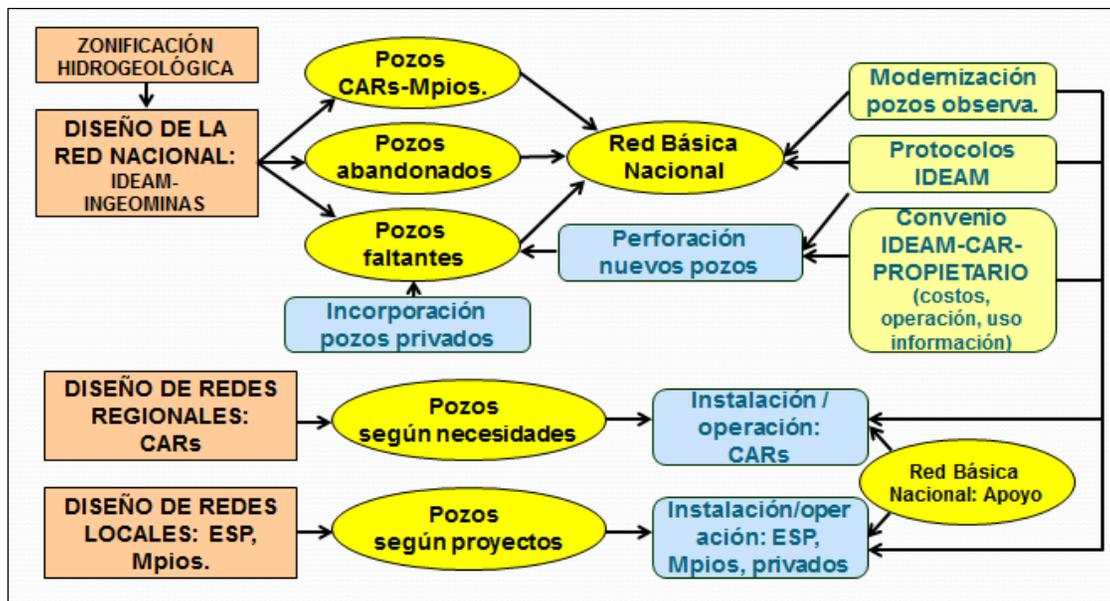
De acuerdo con lo expuesto en las secciones anteriores, la estrategia para la implementación de la red de monitoreo de aguas subterráneas a nivel nacional debe contemplar los siguientes pasos (ver figura 13):

1. Zonificación hidrogeológica nacional. El Estudio Nacional de Aguas (2010) del IDEAM presenta una primera zonificación a nivel de provincia hidrogeológica, con un total de 16 provincias.

2. Definición de acuíferos de importancia nacional. En el marco de la zonificación por provincias hidrogeológicas, el siguiente paso debe ser la subdivisión de las mismas en cuencas, subcuencas y unidades hidrogeológicas regionales, dentro de las cuales las más importantes son los acuíferos.
3. Determinación del nivel de prioridad para el monitoreo de los acuíferos, para lo cual se pueden considerar factores tales como: reservas probables, nivel de aprovechamiento, importancia como fuente de suministro para consumo humano, riesgo de contaminación.
4. Diseño de la red mínima de monitoreo en cada acuífero de importancia nacional.
5. Concertación con autoridades ambientales regionales y locales para instalación y operación de la red y/o para el inventario de los pozos de su jurisdicción y para la selección de pozos de sus redes que conformen la red nacional.
6. Concertación para la entrega y uso conjunto de los datos del monitoreo (IDEAM-CAR).

En consecuencia, la red nacional puede y debe compartir puntos de observación de la red regional, pero sus objetivos son diferentes desde el punto de vista de las variables y exigencias de monitoreo. En la tabla 1 se diferencian los alcances de cada red.

Figura 13. Estrategia para la implementación de la red de aguas subterráneas



La red nacional no instalará pozos propios sino que estará conformada por pozos de entidades regionales (CARs) o de usuarios del recurso (redes locales), de los cuales utilizará sólo ciertos tipos de parámetros. La operación de los pozos estará a cargo de sus propietarios (CARs, municipios, ESP, etc), quienes enviarán al IDEAM la información contemplada en este protocolo, de los pozos que sean incorporados a la red nacional.

Una alternativa es utilizar pozos abandonados, caso en el cual éstos deben ser recuperados y acondicionados por el IDEAM, y entregados a la CAR respectiva para su operación.

3.3. FRECUENCIAS DE MONITOREO

Frecuencia de lecturas y muestreos

Las fluctuaciones en los niveles de las aguas subterráneas reflejan cambios en su almacenamiento en los acuíferos. Se pueden identificar dos grupos principales de fluctuaciones: las de período largo, como las causadas por cambios estacionales en la recarga natural y el bombeo persistente, y las de período corto, como por ejemplo, las 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. En general, no es necesario realizar mediciones continuas ya que los niveles del agua subterránea responden generalmente con lentitud a los cambios de origen externo. Las observaciones sistemáticas a intervalos fijos son más adecuadas para los objetivos de la mayoría de las redes nacionales. Donde las fluctuaciones, por cualquier razón, son rápidas, convendría un registro continuo, al menos hasta que se haya definido la naturaleza de dichas fluctuaciones.

De otro lado, en el país se observan tres tipos de regímenes de precipitación: 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. Y dado que las lluvias son la principal fuente de recarga de los acuíferos, el seguimiento de éstos debiera estar en relación con el régimen de lluvia.

Por tanto, para los fines de la red nacional, se recomienda que las lecturas de niveles estáticos de cada pozo sean realizadas con una frecuencia semestral (2 veces al año), buscando que cada lectura corresponda al mes más seco y más húmedo en cada sitio, de acuerdo con los registros de precipitación. De igual manera, el muestreo de la calidad de agua subterránea debe tener una periodicidad de 1 a 2 veces al año, en especial para evaluación hidrogeoquímica.

En los casos de redes regionales o locales con otros fines, la frecuencia de lecturas puede ser diferente:

- Así por ejemplo, en redes regionales, las normas internacionales recomiendan cuatro veces al año o más por estación o punto de observación. Sin embargo esta frecuencia y las variables analizadas para el caso de Colombia deben adaptarse a las circunstancias regionales. En pozos de las redes regionales de las CARs cuyo objeto es hacer seguimiento a los aprovechamientos de agua subterránea y a los procesos de contaminación, la frecuencia podría ser de 4 veces al año. Si las circunstancias del aprovechamiento lo ameritan la frecuencia podría ser mensual, por lo menos mientras se da respuesta al objeto de control (conflictos de usuarios, contaminación, etc), y posteriormente volver a trimestral.
- Y en pozos de interés local, para acueductos veredales o municipales, establecimientos y fincas, entre otros, la frecuencia tendría que ser la necesaria para el control del uso, es decir, debe ser definida por el usuario o propietario del pozo.
- En todo caso, la frecuencia de monitoreo para caracterización de contaminación dependerá de la velocidad de flujo, el tipo de contaminante y los mecanismos de transporte del contaminante.



Frecuencia de inspecciones a las estaciones

Dada la necesidad de personal técnico entrenado para las mediciones de niveles (y/o caudales) y para el muestreo de aguas subterráneas, la frecuencia de visitas de inspección a los pozos de la red nacional debe ser la misma de lectura. Las visitas estarán a cargo del inspector a cargo de la zona, con su ayudante (ver sección 4.7, Verificación).

Frecuencia de transmisión de los datos de campo a oficina

La frecuencia de transmisión del dato de campo a oficina está en relación con el objetivo de la red de monitoreo:

- Para los fines de la red nacional, la frecuencia de transmisión puede ser la misma de la lectura (cada 6 meses).
- En los casos de redes regionales o locales con otros fines, la frecuencia de transmisión puede ser diferente. Así por ejemplo, en pozos de las redes regionales, la frecuencia de transmisión debe ser la misma de la lectura, al igual que la de los pozos de las redes locales. En todo caso, en este último caso, la frecuencia la define el usuario o propietario de los pozos, pues ella depende de la utilización del dato.

Previo el envío de los datos a la oficina central de la entidad, los mismos deben ser objeto de un control de calidad por parte del Área Operativa o entidad involucrada, tal como se describe más adelante, en la sección de Procedimientos.

4. MEDICIÓN

4.1. PARÁMETROS A MEDIR Y UNIDADES DE MEDIDA

Los principales *parámetros* de las aguas subterráneas a medir en el marco del Programa Nacional de Monitoreo son:

- Niveles estáticos
- Calidad del agua (ver sección 4.5.3 y Protocolo de calidad del agua)

Las unidades de medida son:

- Niveles: en metros y centímetros
- Calidad del agua (ver sección 4.5.3. y Protocolo de calidad del agua)

4.2. INSTRUMENTOS DE MEDIDA

4.2.1. Medición de niveles

La medición directa de los niveles de agua subterránea en los pozos de observación puede hacerse con instrumentos de operación manual o con ayuda de instrumentos de registro continuo.

La medición manual se realiza con sondas de nivel. Estas sondas constan de una cinta muy resistente marcada con intervalos de un mm con longitudes hasta de 900 metros dispuestas en carreteas balanceados con manija para transportarlo y freno. Poseen alarma visual y sonora que se activa al contacto del sensor con el agua (figura 14).

Igualmente se encuentran en el mercado registradores automáticos para niveles de agua o transductores de presión, que tienen capacidad de almacenamiento hasta de 24.000 datos por canal. Estos registradores normalmente miden presión, temperatura y conductividad eléctrica. Su software despliega lecturas de nivel compensado por temperatura, extiende lecturas de conductividad y temperatura por separado. Adicionalmente se ofrecen registradores telemétricos que tienen interfaces con estaciones remotas a través de sistema celular análogo, digital, por línea telefónica o por radio.

La toma de niveles requiere que los pozos se encuentren nivelados a una cota de referencia, ojala real sobre el nivel del mar y georreferenciado, y además que el sitio de medida en la boca del pozo está claramente establecido.

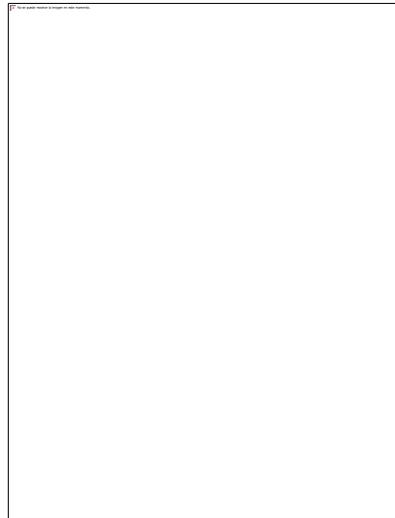
De uso menos extensivo son los sensores o medidores de nivel por radar o ultrasonido.

4.2.2. Equipos de medición de caudales

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. Si se requiere hacer prueba de bombeo, es importante que la bomba permita bombear a caudal constante y que sea adaptable para tubos de pequeño diámetro. 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. El tipo y capacidad de la bomba depende de la producción potencial y profundidad del pozo, de acuerdo con la información disponible sobre el acuífero (modelo conceptual).

Figura 14. Sonda eléctrica para medición de profundidad del agua



Fuente: www.metaldrillingsac.com

4.2.3. Equipos de muestreo de agua subterránea

Para extracción de agua en pozos de observación, se puede utilizar bombas de diferentes características, tanto mecánicas o eléctricas como manuales tipo pedal o palanca. La medición del caudal se puede hacer mediante el uso de un balde graduado, un flujómetro, o instalaciones como canaletas y otras indicadas en la sección de Procedimientos. Para seleccionar el tipo de bomba a emplear se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- Al extraer agua se provoca un descenso del nivel piezométrico y un incremento en la velocidad de flujo, sometiéndose al medio poroso a esfuerzos mayores a los usuales, induciendo la resuspensión de partículas, y un consecuente incremento de turbiedad y concentración de elementos o especies. Esta adición de sólidos no puede eliminarse con un filtrado ya que también se quitarían los que están integrados naturalmente al flujo subterráneo. Por esto, es necesario que la extracción provoque pequeños descensos de nivel del agua y por ende mínimas alteraciones al flujo subterráneo⁵. Algunas especies son muy sensibles a las variaciones de presión (tal es el caso de los compuestos orgánicos volátiles), por lo cual su extracción debe realizarse con las bombas sumergibles, de succión, de eyector o de vaivén⁶.
- Además del objetivo de análisis, conocer el uso regular del pozo es conveniente para elegir el equipo y caudal de extracción. Por ejemplo, cuando un pozo es fuente de gran cantidad de agua, la cual se desea caracterizar, es necesario muestrear en condiciones normales de uso,

⁵Op.cit. Pág. 3.

⁶ Op cit. Pág. 4.

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

mientras que si se desea evaluar las características del flujo natural del acuífero, el caudal a utilizar en el muestreo será inferior al usual⁷.

- En general, las bombas sumergibles colocadas permanentemente en el pozo son adecuadas para el muestreo físico - químico y microbiológico. En la tabla 3 se indican ventajas y desventajas del muestreo con distintos equipos de extracción⁸.

Tabla 3. Resumen de las características de las bombas de monitoreo de pozos

Mecanismo de bombeo	Principio de operación	Ventajas	Limitaciones	Costo relativo
Impulsión por succión * Peristáltica * Aspiradora manual * Centrífuga	Muestra tomada por succión aplicada directamente al agua o través de botella de recolección	Muy portátil. Apropriada para todos determinantes con adaptación y para piezómetros de pequeño diámetro Entrega suave apropiada con bajas lasas de bombeo	Profundidad de muestreo limitada a 8 m. Desgasificación y aireación difíciles de controlar.	Bajo pero sé incrementa si sé usan materiales Inertes.
Impulsión por gas • Tubería doble • Entrega continua	Presión positiva de gas Empuja el agua hasta la superficie, válvulas de retención previenen contraflujo	Profundidad limitada, se pueden construir de materiales inertes. Eficiente para limpieza antes de muestreo. Tasas de flujo pueden ser controladas. Pueden combinarse con sorción in situ o empaquetadores. Apropriados para instalación permanente	Gas puro inerte muy pura para evitar contaminación. Entrada de gas en tubería de descarga puede causar desgasificación / volatilización. Portabilidad se reduce para pozos profundos	Bajo a moderado pero se incrementa si se usan materiales inertes
Desplazamiento positivo. • Sumergible A • Centrífuga eléctrica • Bomba de pistón • Bomba de diafragma	Agua bombeada continuamente desde el pozo por: • Ensamblaje de engranajes o rotores • Émbolo operado por gas • Diafragma operado por gas	Profundidad ilimitada Adaptación para lodos determinantes con uso materiales inertes. Apropiado para piezómetros de pequeño diámetro. Pueden combinarse con sorción in situ. Tasas de flujo pueden ser controladas eficientemente para limpieza antes de muestreo. Gas de baja pureza aceptable porque no hay contacto con la muestra.	Moderadamente portátil. Centrífugas Eléctricas no confiables para determinantes inestables. Bombas de pistón de entrega continua son difíciles de limpiar/mantener	Moderado a alto especialmente si se usan materiales inertes
Desplazamiento positivo. • Inercial manual • Inercial mecánico	Tubo de toma de muestra y válvula de pie se mueven verticalmente, llenando de agua cuando se baja y bombeando el agua cuando sube, con mantenida inercia cuando baja de nuevo	Portátil pero también pueden ser delicados. Durable tasas de flujo pueden ser controladas Pueden hacerse de materiales inertes. Apropiado para materiales inestables	Profundidad de muestreo imitada (1 a 40 m). Pozos más profundos requieren bombeo a motor, reduciendo su movilidad e incrementando su costo. Quita tiempo. Válvulas clásicas de pie se gastan con uso continuo.	Bajo para versión manual casera. Aumentan considerablemente con transporte del motor y materiales inertes que puede ser difíciles de obtener

Fuente: Cepis. Monitoreo de la calidad de las aguas subterráneas. 1989

Los equipos de muestreo dependen de la profundidad del pozo y del tipo de muestra a obtener. Para muestreo a profundidad se utilizan muestreadores "ladrón" o de cucharón, que son dispositivos que pueden ser bajados en un pozo a una profundidad específica. Los diseños difieren principalmente por su mecanismo de cierre. Los muestreadores de tubo abierto dejan fluir el agua y se pueden sellar a una profundidad específica por medio de un mensajero mecánico o una trampa operada eléctricamente⁹.

⁷O cit. Pág. 4.

⁸ En CEPIS, 1998 y NORMA ICONTEC NTC - ISO 5667 (1996).

⁹ Vargas, M.C. Ingeominas s.f.

Otro sistema de muestreo es el "bailer", un sistema manual, que consiste en un tubo de teflón con una válvula de pie en la parte baja del recipiente, la válvula está abierta cuando el bailer desciende y se cierra cuando empieza a ascender. Presenta problemas cuando el agua está turbia porque no permite un buen cierre de la válvula. Al bailer hay que hacerle limpieza cada vez que se utilice (agua y solución)¹⁰

Equipos para análisis de calidad de agua subterránea

Para los análisis de calidad el agua subterránea se emplean equipos de campo y laboratorio, a los cuales se hace referencia en la sección 4.5.3, Procedimientos para medición de parámetros físico-químicos de este documento, y en el Protocolo de Calidad del Agua.

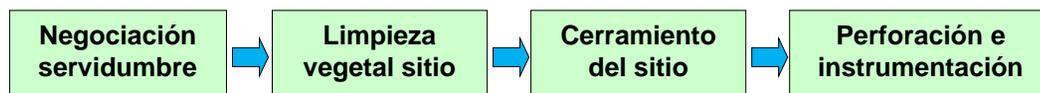
4.3. INSTALACIÓN Y EMPLAZAMIENTO DE LOS POZOS

4.3.1. Instalación y/o actualización de pozos

El monitoreo de aguas subterráneas se realiza en pozos construidos o adecuados para tal fin que debe cumplir especificaciones técnicas para considerarse como tal. No obstante, como se verá posteriormente, la dificultad mayor estriba en la selección de métodos de muestreo de aguas subterráneas, debido, en particular, a la permanencia larga del agua dentro del pozo.

La instalación consiste en la perforación del pozo de observación, la cual procede cuando se trata de una estación nueva, caso en el cual se debe seguir el proceso indicado en la figura 15.

Figura 15. Proceso para instalación de un pozo de observación



- La negociación de la servidumbre puede ser por contrato de arrendamiento, cesión temporal, comodato u otro que se acuerde con el propietario.
- El sitio debe limpiarse de la vegetación arbórea, arbustiva o maleza alta que pudiese tener. Se debe buscar que el sitio no tenga árboles a una distancia H del punto de implantación del pozo, siendo H la altura del árbol, a fin de evitar que las raíces afecten el pozo.
- Aunque es opcional, el cerramiento del sitio puede ser en cerca de alambre de púa, con postes de madera en las esquinas, empotrados directamente en el suelo compactado. Por el tamaño de la estación (2 x 2 m) no es necesario colocar viga lateral de amarre.
- Instalación de los equipos o instrumentación del pozo.

4.3.2. Pozos

Los pozos de monitoreo pueden clasificarse en dos clases: convencionales y no convencionales

¹⁰ Op.cit.

Pozos convencionales

Existen tres tipos de piezómetros: sencillos, dobles y múltiples. Los segundos se instalan para considerar la evaluación simultánea de dos niveles acuíferos. Los de tipo múltiple se utilizan cuando se van a evaluar más de dos niveles acuíferos. Pueden ser más económicos y se instalan de acuerdo con la experiencia, el conocimiento geológico y las necesidades de muestreo. Cuando se trata de acuíferos confinados y profundos se debe evaluar cada caso y determinar si se requieren multipozos en un solo punto para muestreo de varios acuíferos o muestreo puntual de un acuífero en particular.

Las especificaciones técnicas para la construcción de pozos de monitoreo de aguas subterráneas se encuentran en la Norma Técnica Colombiana ICONTEC NTC-3948 (1996). En esta norma se detallan metodologías para la construcción de piezómetros, métodos de perforación, materiales y procesos de limpieza y desarrollo.

Los piezómetros se construyen en tubería PVC de 50,8 mm (2 pulgadas) de diámetro. Los filtros deben cubrir la tabla de agua y su longitud dependerá del tipo de acuífero por analizar. En el caso de acuíferos libres, la norma establece una longitud de rejilla de tres metros (aproximadamente 1,5 m por encima y 1,5 metros por debajo de la tabla de agua), previo conocimiento de las variaciones de éste, para cubrir cambios estacionarios.

La misma norma NTC-3948 del ICONTEC se refiere a los piezómetros dobles como "dos piezómetros sencillos en perforaciones separadas adyacentes".

Se recomienda perforar estos pozos con barreno helicoidal tipo Auger de diámetro no inferior a 4,5 pulgadas. Este tipo de perforación es apropiado para material no consolidado y poco consolidado. En caso de encontrarse material consolidado la opción recomendada por la referida norma de ICONTEC es la perforación con martillo de fondo o percusión.

La norma se refiere además al tipo de tubería recomendando: PVC tipo 1 cédula 40 de 50,8 mm de diámetro. Los extremos de tubería deben ser roscados (véase ASTM F480), con secciones de 3 metros de longitud. De igual manera, los filtros o rejillas tendrán acoples roscados en los extremos. El tamaño de las ranuras debe estar entre 0,508 mm (No. 20) dependiendo de la granulometría encontrada¹¹.

Según la norma mencionada, el espacio anular hasta un máximo de 0,5 metros por encima de la rejilla, se llena con arena gradada silíceas. Asimismo se dispone a continuación "un sello impermeable primario (sello sanitario) con una longitud de 1 metro, utilizando tabletas tipo bentonita y/o cemento tipo bentonita o una mezcla de estas con arena". No se aceptan ripios de perforación para el sello sanitario pues no se compactan y aumentan el pH del agua subterránea.

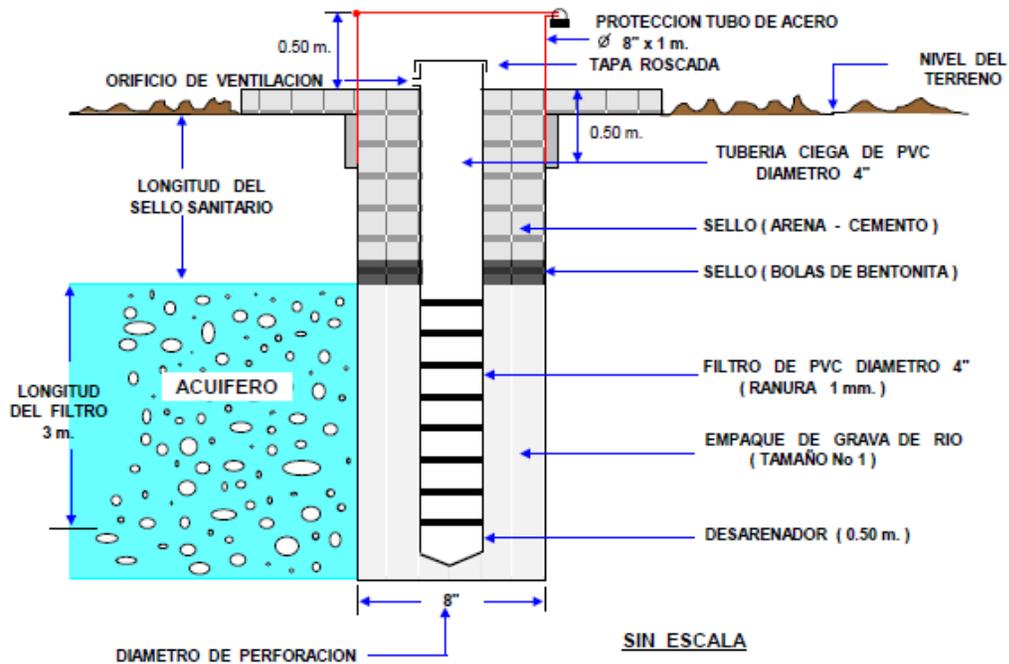
La parte superior del pozo debe protegerse según lo indicado más adelante en el subtítulo de Construcción.

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

¹¹Op. Cit. Página 6.

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 (norma NTC-3948 de ICONTEC, 1996). En las figuras 16, 17 y 18 se ilustran modelos de pozos de monitoreo convencionales.

Figura 16. Pozo de monitoreo convencional tipo CVC



- 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.

Fuente: CVC. 2004

Pozos no convencionales

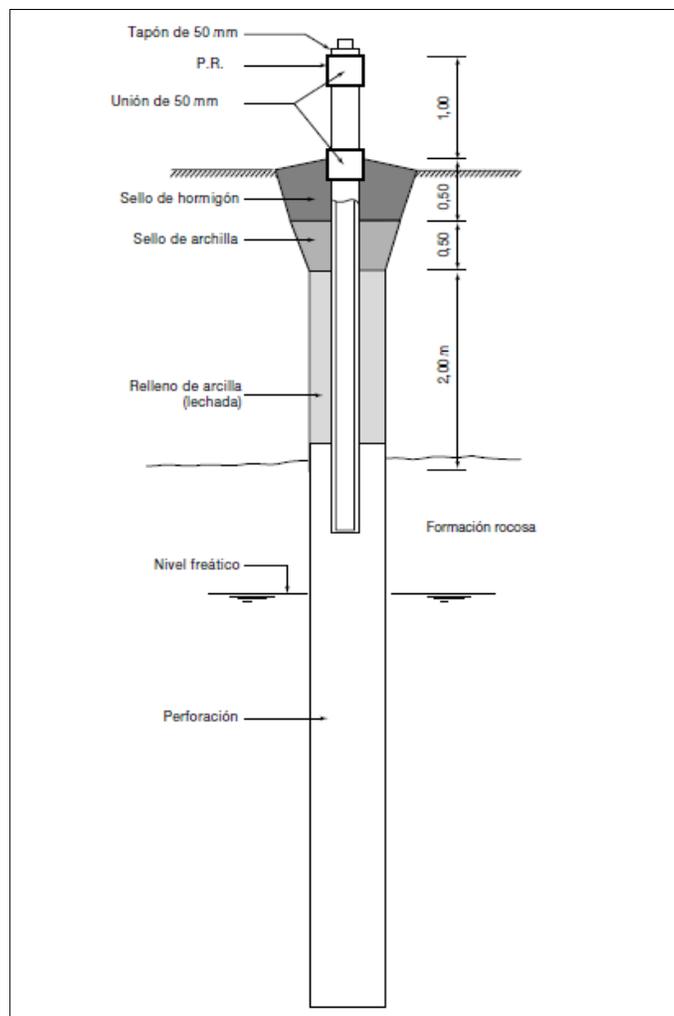
Estos pozos corresponden a aquellos abandonados que eventualmente se adecúan como pozos de monitoreo por razones económicas. Deben cumplir con especificaciones mínimas relacionadas con el reconocimiento de su diseño, captar únicamente el acuífero objeto de monitoreo y cumplir con disposiciones sanitarias que impidan el acceso de contaminantes desde la superficie.

En algunos casos se utilizan pozos de producción como pozos de monitoreo, pero los procedimientos de muestreo y toma de datos deben considerar un estado estático y una purga adecuada. Los pozos de producción aptos para monitoreo deben permitir el libre paso de una sonda para medición de niveles y permitir el libre acceso de un bailer si se incorporan además para monitoreo de calidad.

En todos los casos, los pozos de monitoreo deben:

- Estar georreferenciados y nivelados a un BM único o a una red de puntos del IGAC referenciados al datum nacional.
- Cumplir con disposiciones sanitarias (cerramiento, tapa de seguridad y sello sanitario).
- Tener zonas de protección definidas.
- Tener una ficha en la base de datos del sistema de monitoreo 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 de sistema de recepción y transmisión de datos, fechas de limpieza, desarrollo y mantenimiento

Figura 17. Pozo de observación en terreno rocoso tipo OMM



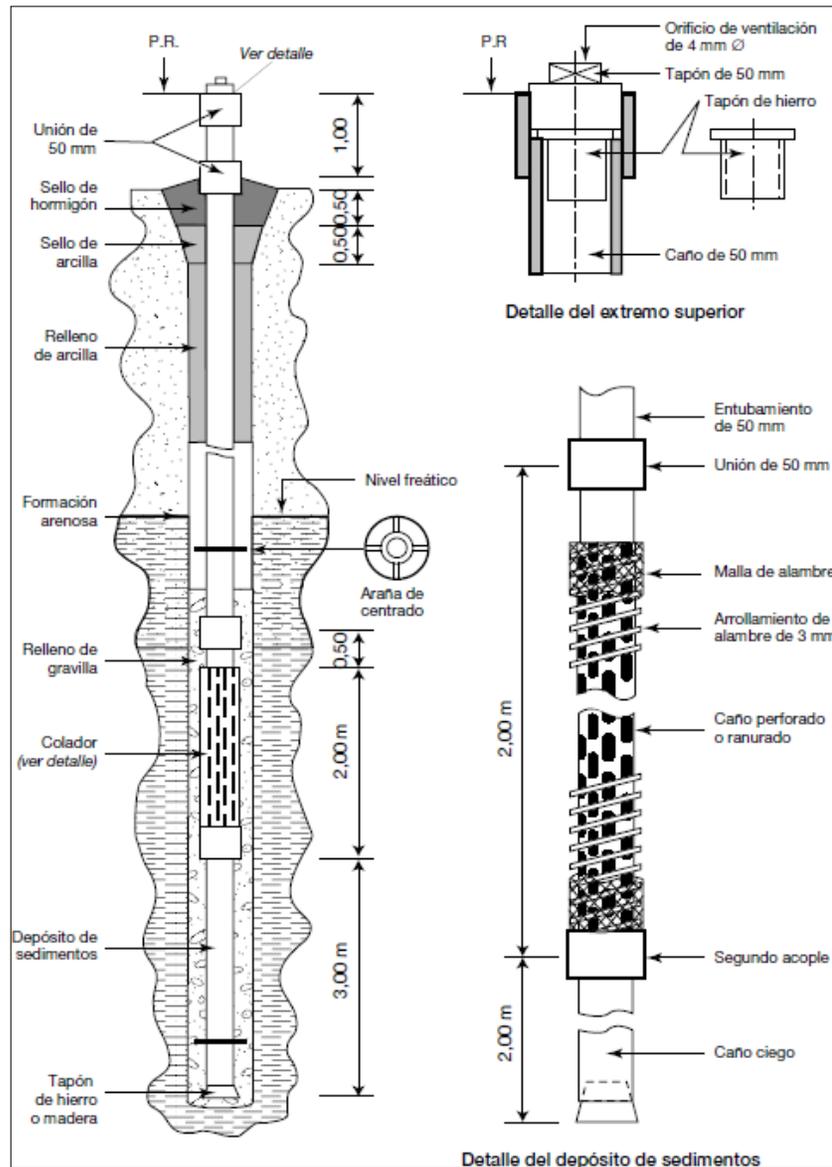
Fuente: OMM, 1994, 2008.

Diseño del pozo

Para el diseño de detalle del pozo, se requiere la siguiente información:

- Columna litológica y profundidad del acuífero, para lo cual podría efectuarse una perforación de prueba de diámetro entre 4 y 8", tomando muestras cada metro.
- Rata de perforación y medidas de viscosidad cada metro.

Figura 18. Pozo de observación típico en depósitos no consolidados tipo OMM

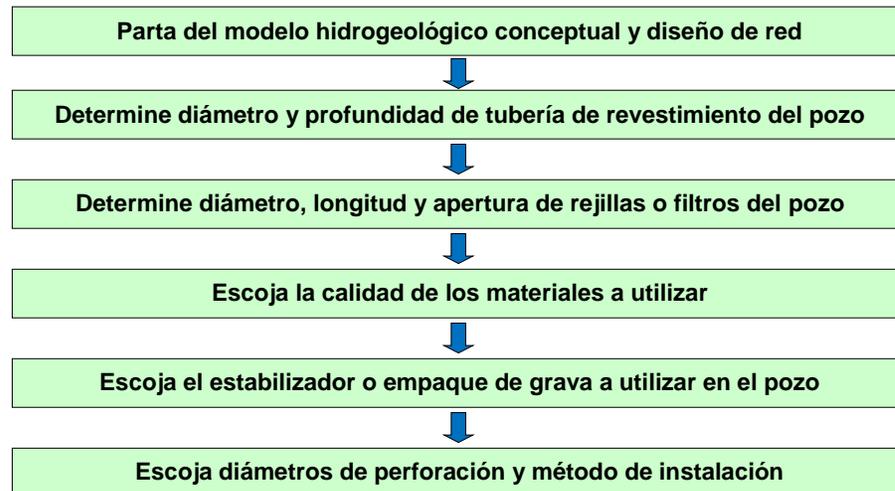


Fuente: OMM, 1994, 2008.

- Registro geofísico, el cual servirá para definir los tramos para rejillas.
- Análisis granulométrico de los sitios donde se colocarán las rejillas
- Información sobre nivel estático y capacidad específica teórica, los cuales se pueden obtener de pozos construidos en la zona, o, en caso de no contarse con ella, a partir de la prueba de bombeo.

Una vez con la anterior información, se procede a diseñar el pozo, para lo cual se pueden seguir los pasos de la figura 19.

Figura 19. Pasos para diseño de un pozo



Construcción del pozo

Para la construcción del pozo se recomienda tener en cuenta las siguientes consideraciones:

1. En formaciones de roca sólida, los pozos de observación pueden ser perforados y completados sin entubamiento. La figura 18 muestra el pozo típico terminado en terreno rocoso. La perforación deberá ser limpiada de partículas finas así como de todo el barro de perforación que sea posible. Esta limpieza puede realizarse por bombeo o achicando el agua del pozo hasta que el agua se aclare.
2. Los entubamientos se instalan en pozos ubicados en depósitos no consolidados. En las figuras 16 y 18 se dan las características principales de esas instalaciones. Cabe señalar que:
 - De acuerdo con la norma de NTC-3948 (1996) de ICONTEC, el diámetro normal del entubamiento en un pozo de observación es de 50,8 mm.
 - En el fondo del pozo se instala un tramo ciego de tubería (tapado en el extremo inferior). Este tubo ciego deberá tener por lo menos tres metros de longitud y sirve para recoger los sedimentos provenientes de la parte perforada del entubamiento. Esta parte se denomina depósito de sedimentos.
 - Al depósito de sedimentos se le conecta por la parte superior un tramo perforado de tubería, denominado colador, filtro o rejilla, para asegurar un libre intercambio de agua entre el acuífero y el pozo de observación. En los pozos de observación, un tramo de tubo perforado de menos 2 metros de largo sirve para este propósito (3 metros en acuíferos libres, según la norma de NTC-3948 de ICONTEC).
 - El espacio anular hasta 50 cm por encima de la rejilla se rellena con arena gradada silíceica, y luego se coloca un sello sanitario de 1 metro de longitud en bentonita, cemento tipo bentonita o una mezcla de ambos, según la referida norma de ICONTEC. Por encima del filtro se conecta un tubo ciego, el cual debe ser lo suficientemente largo como para sobresalir alrededor de un metro sobre el nivel del terreno. El tope de este entubamiento

conforma así un punto de referencia con respecto al cual el observador relaciona las distintas variables incluidas en un programa de observación (ver figuras 16, 17 y 18). El uso de arañas de centrado permite asegurar una apropiada ubicación de la columna del filtro en los pozos perforados

3. En los acuíferos con arena fina o limosa, deberá protegerse el tubo ranurado de la obstrucción debida a elementos finos, mediante un empaque o relleno de material grueso, convenientemente graduado, que llene el espacio anular comprendido entre el filtro y la pared del pozo perforado. En el caso de orificios de 150 mm y entubado de 50,8 mm, el espesor normal de la grava filtrante puede ser de unos 45 mm y no menor de 30 mm de espesor. El material grueso utilizado puede ser grava fluvial, de 1 a 4 mm de diámetro. La grava deberá ser colocada a través de un tubo guía de pequeño diámetro, introduciéndola dentro del espacio entre el entubado y la pared del pozo. Se usará suficiente cantidad de grava para rellenar el espacio anular y el fondo del pozo; es decir, la longitud completa del depósito de sedimentos y por lo menos 50 cm por encima del tramo del tubo perforado, como ya se anotó.
4. Para sellar la parte superior del pozo, se excava un pozo a nivel del terreno y alrededor del entubamiento. Las dimensiones recomendadas (OMM, 1994-2008) para dicho pozo son 80 x 80 cm al nivel del suelo, reduciéndose como un tronco de pirámide con una base menor de 40 x 40 cm a una profundidad de un metro. Luego se coloca una lechada de arcilla alrededor del entubamiento, hasta una profundidad adicional de dos metros por lo menos, para obtener un sellado de la unión entre el tubo y la perforación, a fin de prevenir filtraciones de agua contaminada desde los alrededores hacia el acuífero por el borde del entubamiento. El pozo debe llenarse parcialmente con un sello de arcilla y la parte superior con concreto (hormigón). El concreto se debe vertir de modo que llene el pozo y forme un cono alrededor del entubamiento para drenar fuera de la perforación, tanto la precipitación como el agua superficial. Este sellamiento con material impermeable debe cubrir los tres metros superiores del pozo.
5. El extremo superior del entubamiento, que sobresale del terreno por encima del cono de concreto, debe cerrarse por razones de seguridad. Los primeros 50 cm de perforación bajo la superficie se llenan con concreto impermeabilizado para formar una base que sobresale 50 cm del suelo con pendiente tal que la escorrentía no vaya directamente al piezómetro. En esta base se empotra un tubo de acero de 14 cm de diámetro aproximadamente, con tapa metálica, de manera que se pueda colocar un candado u otra protección al piezómetro. La boca del tubo se puede proteger con un tapón metálico que puede levantarse mediante un imán. Adicionalmente se instala una barrera metálica alrededor de la base en concreto que impida acciones de destrucción de piezómetro. Deberá marcarse claramente un nivel cerca de la boca del pozo, referido a un punto conocido, a partir del cual se medirá el nivel del agua (OMM, 1994-2008).

La parte del entubado que se extiende sobre el nivel del terreno deberá pintarse de un color brillante para facilitar la ubicación a distancia. La profundidad del nivel del agua subterránea se mide desde el borde del entubado (después de remover los tapones). Este punto de referencia deberá ser nivelado con respecto al nivel general de la zona de estudio.

6. En muchos casos, el acuífero a monitorear está confinado y separado por una capa mucho menos permeable de otro acuífero. Todos los acuíferos superiores que se atraviesan durante la perforación deben aislarse del acuífero en estudio, mediante un procedimiento conocido



como sellado por lechada. La lechada debe ser de arcilla o una mezcla líquida de cemento y agua con una consistencia que permita inyectarla a través de caños y colocarla donde se requiera. La inyección de la lechada y el sellado de entubamientos en los pozos de observación deben llevarse a cabo por las siguientes razones (OMM, 1994-2008):

- Impedir que por el exterior del entubamiento se infiltre agua superficial contaminada al interior del acuífero.
 - Impedir la entrada de agua desde una formación superior al acuífero en estudio.
 - Hacer que el entubado se ajuste en el pozo perforado de mayor diámetro que la tubería.
7. Para aislar un acuífero superior, el sello del material impermeable no deberá tener menos de tres metros de longitud, extendiéndose sobre la capa impermeable que existe entre los acuíferos.
8. Si en la zona de estudio existen varios acuíferos a diferentes niveles, separados por capas impermeables de distintos espesores, lo más recomendable y económico para el monitoreo es construir un pozo por cada acuífero, separados apenas por unos pocos metros. También es posible perforar un pozo de gran diámetro, por el método de percusión, hasta penetrar el acuífero más profundo, instalando el tubo con el filtro correspondiente, como quedó dicho arriba; luego se sella el techo de este acuífero mediante una lechada de cemento u otro material impermeable; se inserta luego otro tubo con su filtro en el acuífero inmediatamente superior, sellando su techo con una lechada similar a la anterior; y así sucesivamente, hasta cubrir la totalidad de acuíferos existentes. Este método implica que el sellamiento sea muy bien realizado, a fin de evitar el intercambio de agua entre un acuífero y otro (OMM, 1994-2008).
9. *Prueba de pozos de observación.* De acuerdo con la OMM (1994-2008), para controlar la respuesta de un pozo de observación a los cambios del nivel del agua del acuífero se debe hacer inmediatamente después de haber completado la construcción del pozo. La prueba consiste en estudiar la disipación de la zona de recarga, para lo cual se inyecta en el pozo un volumen conocido de agua y se mide el descenso subsiguiente del nivel del agua. En pozos productores, la elevación inicial del nivel del agua debería disiparse dentro de tres horas, alcanzándose un nivel que no difiera más de cinco milímetros del nivel original. Si el descenso del nivel del agua es muy lento, el pozo debe limpiarse eliminando las obstrucciones del filtro y la mayor cantidad posible del material fino existente en la formación o en el relleno de grava alrededor del pozo. Esta limpieza se puede hacer creando movimientos alternativos del agua subterránea hacia el interior y el exterior del pozo. Después de limpiar el pozo, se mide la profundidad desde el fondo del pozo hasta la marca de referencia. Esta medición, comparada con la longitud total del entubamiento, indica la cantidad de sedimentos que hay en el depósito de escombros. Si la medición desde el fondo del pozo indica que los sedimentos llenan toda la columna del depósito y el filtro, el nivel del agua en el pozo puede no ser representativo del verdadero nivel de agua del acuífero. En este caso se debe cuestionar la fiabilidad de ese pozo de observación. Esta prueba debe repetirse ocasionalmente en los pozos de observación para verificar la eficiencia de los filtros.

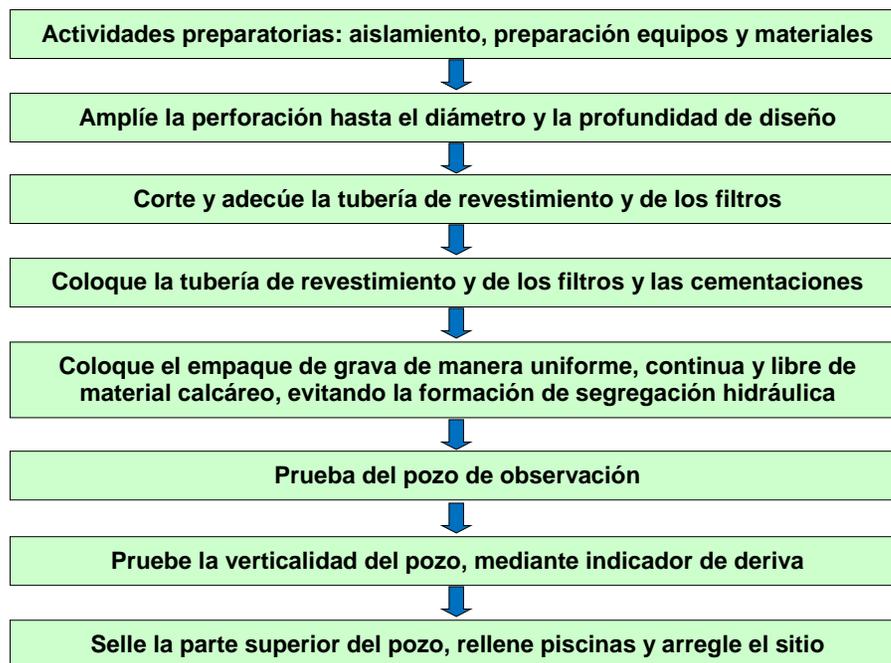
La construcción del pozo se debe documentar con los siguientes documentos como mínimo:

- Registro de perforación
- Análisis granulométrico

- Análisis de calidad del agua
- Registro eléctrico
- Diseño del pozo as built
- Datos de prueba de bombeo

La figura 20 muestra las principales actividades para la construcción de un pozo.

Figura 20. Proceso para construcción de un pozo



Mantenimiento de los pozos

El mantenimiento de los pozos de observación debe estar a cargo del organismo encargado de la observación o de la investigación. El área alrededor del pozo de observación debe mantenerse libre de vegetación y escombros. Puede fijarse un disco de bronce en el sello del concreto a nivel del suelo con la inscripción “pozo de observación” y el nombre del organismo o de la organización. Este disco de bronce puede servir también como punto de referencia para fines topográficos. La parte sobresaliente del entubamiento debe ser reemplazada cuando ha sufrido daños.

Los pozos de bombeo particulares que se incorporan a la red de observación deben ser mantenidos por los propietarios.

4.4. POSIBLES FALLAS Y CAUSAS DE ERRORES EN LA OBSERVACIÓN DE POZOS

La tabla 4 muestra una relación de las fallas y/o errores más frecuentes en la instalación, operación y mantenimiento de pozos de observación de agua subterránea.

Tabla 4. Errores más frecuentes en la instalación, operación y mantenimiento de pozos de observación de agua subterránea

Errores de instalación del pozo	Errores de operación de pozos de observación	Errores de mantenimiento de pozos de observación
<ul style="list-style-type: none"> • Datos de campo mal tomados. • Pozo sin diseño hidrogeológico (sin modelo) • Pozo desnivelado. • Pozos mal sellados, lo que facilita el intercambio entre acuíferos diferentes • El pozo no es representativo de una zona o de un acuífero • Difícil acceso. • Déficit de observadores. • Soportes sin firmeza 	<ul style="list-style-type: none"> • Error de paralaje en lecturas de cintas. • No limpiar el cable y la cinta del limnicontrato después de cada medición • Sonda muy voluminosa, que dificulta su penetración en el pozo, o que roza sus paredes, alterando la medida • Pozo sin georreferenciación. • electrónico. • Muestreador inadecuado • Rozamiento del flotador contra las paredes del tubo, en caso de medición con equipos registradores (limnógrafos). • Lecturas mal anotadas (por ejemplo, 5 en lugar de 0.5). • Anotaciones ilegibles o dudosas. • Diligenciamiento incompleto de datos de campo del formato único nacional • Errores de transcripción a formato único nacional 	<ul style="list-style-type: none"> • Filtros obstruidos. • Falta de limpieza y prueba del pozo cuando hay obstrucción. • Descalibración de sondas eléctricas. • Falta de mantenimiento de sondas, cables, cintas, sensores, contadores de revoluciones u otros, según el método manual empleado. • Infiltración de agua contaminada superficial al pozo. • Área del pozo invadida por maleza y sin protección • Cabezote del pozo en mal estado, sin seguridad. • Falta de mantenimiento del sistema de registro, relojería, tambor y flotador, en caso de equipos registradores.

Figura 21. Pozo típico de observación hidrogeológica, con sonda eléctrica para medición de niveles.





4.5. PROCEDIMIENTOS DE MEDICIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

4.5.1. Procedimientos de medición de niveles

Esta sección se refiere a los métodos e instrumentos de observación que deben utilizarse con base en los procedimientos y protocolos que al respecto se encuentran en las normas GTC-30 (1996) y NTC-ISO-5667-11 (1996) de ICONTEC, las guías hidrológicas de la OMM (1994) y las recomendaciones de la CEPIS, 1994. Se obvian los procedimientos analíticos de laboratorio que corresponden a marchas y metodologías expeditas para cada variable química.

Para las mediciones propiamente dichas, es conveniente además, tener en cuenta las particularidades de las aguas subterráneas, tal como ellas han sido descritas en la sección 2 del presente protocolo.

La medición de niveles requiere un conocimiento del modelo hidrogeológico conceptual pues los niveles registrados deben corresponder a una unidad acuífera en particular y no a la mezcla de varias unidades cuando el acuífero es multicapa, pues las condiciones hidráulicas de cada una son diferentes dependiendo de las condiciones de presión y confinamiento.

Normalmente, la toma de niveles está precedida por un inventario de puntos de agua cuyo propósito es tener un mejor conocimiento de la situación actual, tanto de las condiciones de los acuíferos como del aprovechamiento de las aguas subterráneas.

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. Al respecto se deben tener en cuenta las densidades recomendadas en la sección 3.2.2. El rendimiento de un técnico de inventario puede ser de 60 a 120 puntos por mes, incluyendo el tiempo necesario para pasar los datos a limpio. En el caso de un estudio en detalle, donde se tiene que cuantificar con el mayor detalle posible 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.

Durante el inventario de pozos, aljibes y manantiales, los datos que se recaban y las mediciones que se realizan en campo tiene que ver con la localización geográfica del pozo, 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 (ver más adelante, formatos de registro).

La realización del inventario de puntos de agua así como las actividades de fiscalización y monitoreo periódico deben estar soportadas en una estructura institucional, mano de obra capacitada y apoyo logístico

La medición de niveles se debe hacer con la frecuencia establecida en la sección 3.3.

El procedimiento para la medición de niveles depende del equipo que se utilice para el efecto (véase sección 4.2 y figura 22).

Métodos manuales

El método más común de medición manual consiste en suspender un cuerpo lineal pesado (por ejemplo, una cinta o cable graduado de acero flexible o cubierta de plástico) desde un punto definido en la superficie, usualmente en la cabecera del pozo, hasta un punto por debajo del nivel agua subterránea. Después de sacar la cinta, la posición del nivel del agua subterránea se define al sustraer la longitud de la parte de cinta que ha sido sumergida de la longitud total de la cinta suspendida en el pozo. Esta parte húmeda puede identificarse más claramente cubriendo la parte inferior de la cinta con tiza antes de realizar cada medición. Para indicar la parte de cinta que ha estado en inmersión se han utilizado pastas que cambian de color, aunque deben evitarse sustancias que contengan productos tóxicos. En ocasiones deben realizarse varias observaciones de ensayo con el fin de que la profundidad del agua se conozca aproximadamente antes de realizar la medición. A medida que la profundidad del nivel del agua aumenta, la longitud de la cinta que haya de utilizarse también aumenta, y puede ser difícil superar los inconvenientes debidos al peso del instrumento y a lo complicado que es su funcionamiento en estas condiciones. Las profundidades a la superficie del agua de hasta 50 m se miden con facilidad, pero con creciente dificultad hasta 100 m o más. A estas grandes profundidades pueden utilizarse cintas más estrechas de acero o cintas de cobertura plástica de escaso peso. La profundidad del nivel del agua se puede medir con un error de pocos milímetros, aunque la exactitud de la medición por otros métodos depende generalmente de la profundidad.

Se han diseñado instrumentos inerciales de modo que un peso unido al extremo de un cable cae a una velocidad constante, debido al efecto de la gravedad, desde un instrumento portátil situado en la superficie. Al chocar con el agua, un mecanismo de frenado evita automáticamente la continuación de la caída. La longitud del cable libre, que equivale a la profundidad del nivel del agua, queda anotada en un contador de revoluciones. Este sistema permite mediciones con un error inferior a un centímetro, aunque un operador con experiencia puede reducirlo a 0,5 cm.

El sistema de electrodo doble emplea dos electrodos pequeños adyacentes, incorporados dentro de una sola unidad de 10 a 20 cm de longitud situada al final del cable. El sistema también incluye una batería y un molinete eléctrico. La corriente fluye a través del sistema cuando los electrodos están sumergidos en el agua. El cable conductor de electricidad debe tener poca elasticidad, prefiriéndose los cables recubiertos de plástico a los de caucho. El cable se calibra con cintas adhesivas o señales a intervalos prefijados de uno o dos metros. La profundidad exacta del nivel del agua se mide hasta la señal más próxima marcada sobre el cable, mediante una regla de acero. Se pueden realizar con facilidad mediciones del nivel del agua hasta una profundidad de alrededor de 150 m y hasta 300 m y más, con alguna dificultad.

Los límites de la profundidad de la medición están asociados esencialmente a la longitud del cable eléctrico y al diseño del circuito eléctrico, así como al peso del equipo (en particular del cable suspendido), y al esfuerzo que hay que realizar para enrollar y desenrollar el cable. El grado de exactitud de la medición depende de la habilidad del operador y de la exactitud con la que se hayan fijado las señales al cable. Las marcas o señales fijas deben calibrarse a intervalos regulares, y debe comprobarse también el funcionamiento del circuito, sobre todo antes y después de cualquier serie de observaciones. Este sistema es muy útil cuando se hacen mediciones repetidas del nivel del agua a intervalos frecuentes durante las pruebas de bombeo.

En pozos muy profundos, que requieren longitudes de cable del orden de 500 m, la exactitud de la



medición es de ± 15 cm aproximadamente. Sin embargo, las mediciones de los cambios de nivel del agua en las que se deja suspendido el cable en el pozo y la sonda cerca de la capa freática, se expresan hasta el milímetro más próximo.

El efecto electroquímico de dos metales diferentes sumergidos en agua puede ser aplicado a instrumentos de medición manual. De este modo, no se requiere de baterías para el suministro de corriente eléctrica. Puede producirse una corriente eléctrica susceptible de ser medida mediante la inmersión, en la mayor parte de las aguas subterráneas, con dos electrodos (por ejemplo, magnesio y latón) formando una sola unidad, o con un solo electrodo (magnesio) conectado a tierra mediante un anclaje de acero situado en la superficie. En vista de la baja intensidad de corriente que se produce de esta manera, se requiere un microamperímetro como indicador del nivel.

El sistema de un solo electrodo puede incorporarse a una cinta de acero graduada, que es conductora eléctrica, o bien a una cinta cubierta de plástico incorporada a un solo cable conductor. La exactitud de la medición depende de la graduación de la cinta, siendo posible conseguir con facilidad lecturas con error inferior a 0,5 cm.

En un pozo de observación se puede instalar permanentemente un flotador unido a un contrapeso mediante un cable que pasa por una polea. Las variaciones del nivel del agua pueden medirse por el cambio de nivel del contrapeso o de una señal fija sobre el cable. Se puede unir a la polea una escala de lectura directa. El método se limita generalmente a fluctuaciones de escasa amplitud.

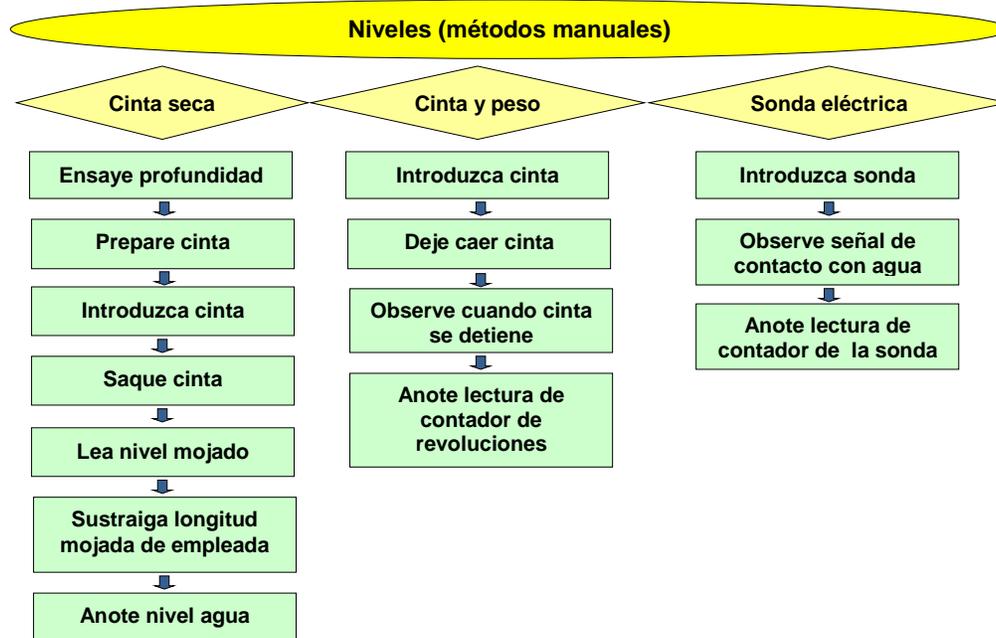
Cuando el agua subterránea artesiana rebase la superficie, es preciso fijar un obturador a la boca del pozo antes de realizar las mediciones. La presión en la superficie (o el nivel del agua equivalente) puede medirse mediante la instalación de un manómetro (para observaciones visuales o acoplados a un sistema de registro continuo) o bien, donde resulte practicable, observando el nivel del agua en el interior de un tubo de cristal o plástico de pequeño diámetro, encajado en el obturador directamente sobre la boca del pozo. Si existe el riesgo de que se produzcan heladas, debe añadirse aceite o una solución anticongelante a la superficie del agua.

Todos los dispositivos de medición manual necesitan un manejo cuidadoso y un mantenimiento realizado a intervalos frecuentes, si no puede disminuir gravemente su eficacia. La medición del nivel del agua subterránea mediante métodos manuales exige un alto grado de habilidad de un operador bien adiestrado.

Métodos automáticos

Actualmente se utilizan numerosos y diferentes tipos de registradores automáticos del nivel de agua. Si bien cada registrador puede ser diseñado para una instalación determinada, debe insistirse en que pueden usarse en múltiples aplicaciones. Los instrumentos deben ser portátiles, fáciles de instalar y capaces de registrar en una gran variedad de condiciones climáticas y funcionar sin control durante períodos de tiempo variables. También deben ser capaces de medir las variaciones lineales y temporales del nivel de agua subterránea con distintas velocidades de registro, por intercambio de engranajes, en las escalas de tiempo y de nivel. De este modo el mismo instrumento, con el mínimo uso de equipo auxiliar, podrá ser utilizado durante varios períodos de observación y para un extenso intervalo de variaciones de agua subterránea en numerosos pozos de observación.

Figura 22. Resumen de procedimientos de medición de niveles



La experiencia ha demostrado que el registrador analógico más adecuado en la actualidad, es el accionado por flotador. El hidrograma es trazado sobre una banda fijada a un tambor de registro horizontal o vertical, o bien sobre un gráfico de cinta continua. Para obtener los mejores resultados con el máximo de sensibilidad y en condiciones óptimas de funcionamiento, el diámetro del flotador debe ser tan grande como sea posible con el mínimo de peso del cable y del contrapeso. En general, el diámetro del flotador no debe ser inferior a unos 12 cm, aunque las modificaciones en algunos tipos de registradores permiten emplear flotadores de menor diámetro. El tambor de registro o la pluma pueden ser accionadas por relojes de cuerda o eléctricos. El registro puede obtenerse por una pluma o un estilete apoyado sobre un papel especialmente preparado. La relación entre el movimiento del tambor y las variaciones de nivel del agua pueden modificarse por medio de engranajes intercambiables; de este modo, el coeficiente de reducción varía, en general, entre 1:1 y 1:20.

La velocidad del trazado varía de acuerdo a la fabricación de los instrumentos, pero la relación de los engranajes se adapta usualmente para que toda la anchura del cuadro corresponda a períodos de 1,2, 3, 4, 5, 16 ó 32 días. Algunos registradores de cinta continua pueden funcionar durante períodos superiores a los seis meses.

Si los registradores activados con flotador tienen instaladas cintas calibradas, deben realizarse mediciones directas de la profundidad (o profundidad relativa) del nivel del agua al comienzo y al final de cada hidrograma, cuando se cambian las bandas. Ese nivel debe verificarse a intervalos regulares por observaciones manuales. La exactitud de la lectura de los niveles intermedios en la banda depende básicamente de la relación entre el movimiento del tambor y las variaciones del nivel de agua subterránea, y en consecuencia de la relación de engranajes.

La medición continua de la profundidad del nivel del agua subterránea en pozos de pequeño



diámetro es difícil porque la sensibilidad de un sistema accionado por flotador disminuye a medida que se reduce el diámetro del flotador. Se han elaborado flotadores en miniatura o sondas eléctricas de pequeño diámetro para seguir las variaciones del nivel del agua. La fuerza impulsora proviene en general de un servomecanismo, 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 servomotor 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. El servomotor, que mueve el tambor del cable, puede ser activado mediante una sonda eléctrica desde el nivel del agua en el pozo. Este dispositivo consiste en una sonda pesada suspendida en el pozo por un cable eléctrico almacenado en el tambor de acción mecánica del registrador de nivel del agua. 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. Este interruptor acciona el motor del tambor, de modo que la sonda es levantada o descendida, hasta que alcance una nueva posición neutra en el nuevo nivel de agua.

El rozamiento del flotador y del cable contra el entubamiento del pozo afecta la exactitud de los registradores del nivel de agua, especialmente en pozos profundos. El mayor error es causado por el arrastre de la línea del flotador contra el entubamiento. Para reducir el error debido a la fricción, se puede dotar a un flotador de pequeño diámetro con rodillos deslizantes fijados en ambos extremos del flotador (figura 23).

Para los propósitos de la red nacional, la medición con sonda eléctrica (limnicontacto) es el procedimiento más indicado. La figura 22 muestra el resumen de los procedimientos de medición de niveles, con diferentes tipos de instrumentos.

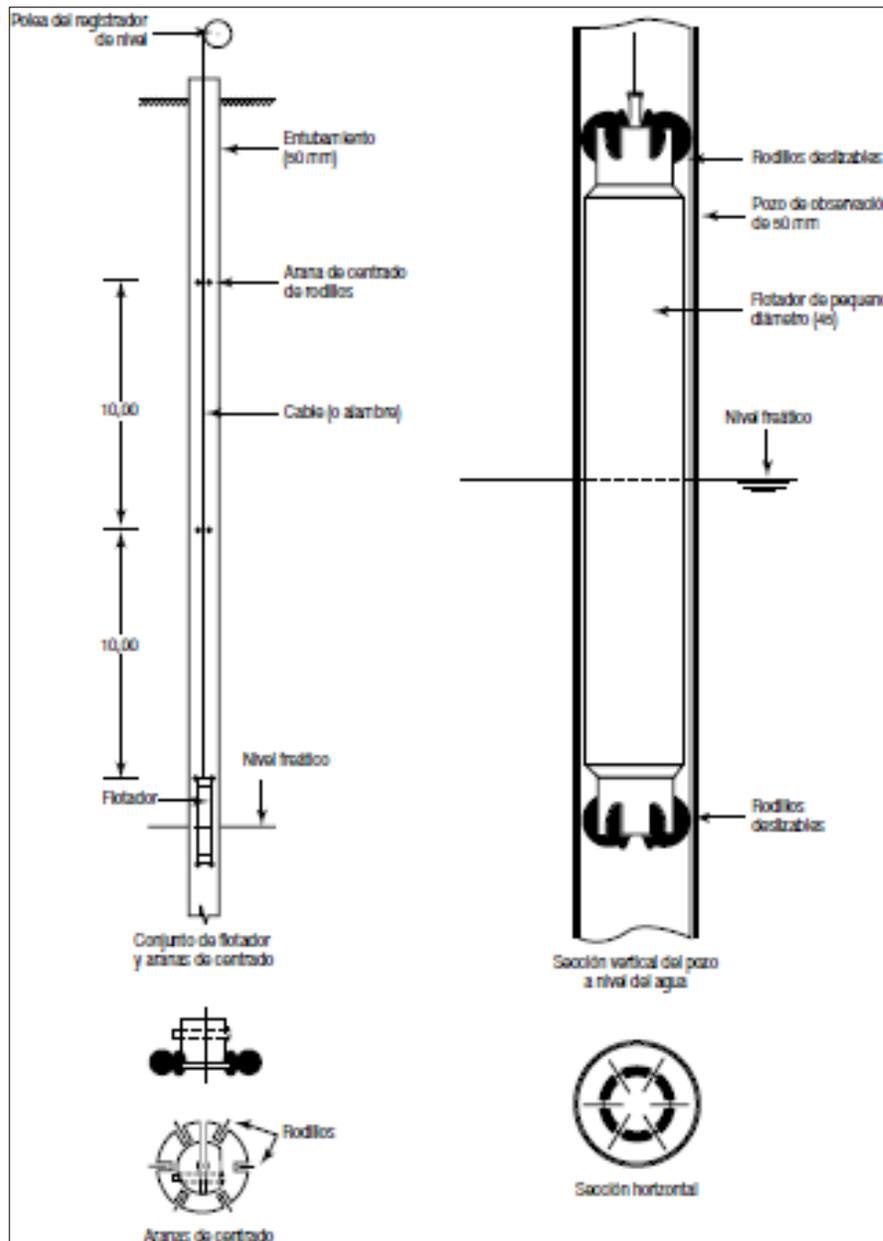
4.5.2. Determinación de parámetros hidráulicos del acuífero

Al enfocar la solución de problemas de hidrología subterránea en pequeña o gran escala, el investigador se enfrenta continuamente ante la situación de poder obtener valores confiables y representativos de las características hidráulicas de los acuíferos (conductividad hidráulica, coeficiente de almacenamiento, transmisividad). Los ensayos o pruebas de bombeo han probado ser el medio más adecuado para alcanzar ese objetivo. Estos obtienen los parámetros bombeando en un sondeo y midiendo en otro próximo.

La ejecución de las pruebas de bombeo responde en general a uno de los dos objetivos siguientes:

- a. Estimar la cantidad de agua que puede extraerse de un pozo bajo condiciones previamente establecidas, o sea, con propósitos de aforo. En este tipo de pruebas, basta generalmente obtener información del pozo de bombeo y de dos pozos de observación o satélites.

Figura 23. Flotador de pequeño diámetro con rodillos deslizantes



Fuente: OMM, 1994-2008

- b. Determinar las propiedades hidráulicas de un acuífero, para poder predecir posteriormente su comportamiento bajo situaciones diversas, evaluar la disponibilidad de recursos de agua subterránea, etc. En general, en este caso, es necesario obtener información de varios puntos seleccionados del acuífero, para lo cual se utilizarán varios pozos de bombeo con dos o más satélites cada uno.

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

Por otra parte, desde el punto de vista del caudal extraído, las pruebas de pozo pueden realizarse a caudal constante o con abatimiento escalonado. En las pruebas a caudal constante, éste debe mantenerse fijo durante toda la realización de la prueba, por lo que habrá necesidad de ir ajustándolo según pase el tiempo. Como se dijo anteriormente, para pruebas de este tipo es importante que la bomba permita bombear a caudal constante y que sea adaptable para tubos de pequeño diámetro. El caudal bombeado en sistemas de aforo continuo puede medirse mediante dispositivos tales como:

1. Vertederos calibrados.
2. Orificio libre.
3. Descarga libre en tubería
4. Canaleta Parshall
5. Contadores

Estos sistemas permiten calcular en forma continua el caudal bombeado (volumen por unidad de tiempo).

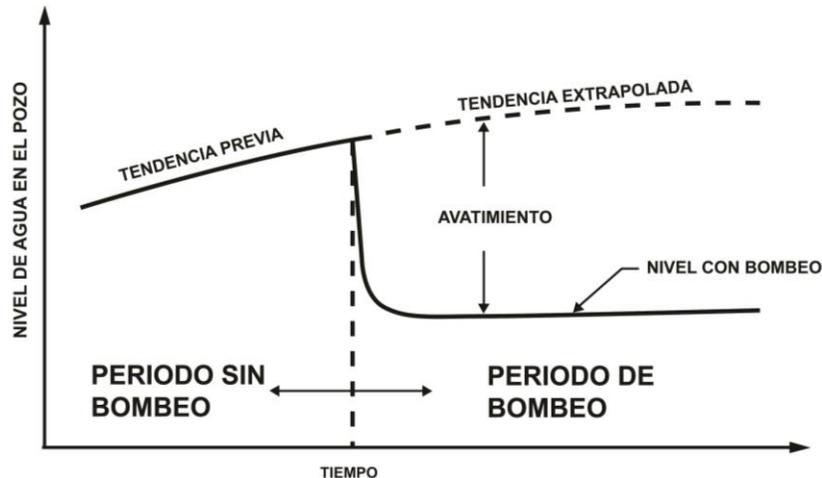
Se denominan pruebas de pozo con abatimiento escalonado a aquellas en que el caudal extraído del pozo se mantiene constante durante un tiempo, para cambiar súbitamente a otro caudal que se mantendrá constante durante otro tiempo, para volver a cambiar a un tercer caudal durante un tercer espacio de tiempo, y así sucesivamente.

Los registros que se necesitan para el análisis y las tolerancias que se consideran generalmente aceptables en las mediciones, son las siguientes:

- Caudal del pozo de control: $\pm 10\%$
- Profundidad hasta el agua en los pozos, por debajo del punto de referencia: ± 3 mm
- Distancia del pozo de control a cada pozo de observación: $\pm 0,5\%$
- Descripción de los puntos de referencia
- Elevación de los puntos de referencia: ± 3 mm
- Distancia vertical entre los puntos de referencia y la superficie del terreno: ± 30 mm
- Profundidad total de los pozos: $\pm 1\%$
- Profundidad y longitud de los intervalos con rejillas en todos los pozos: $\pm 1\%$
- Diámetro, tipo de camisa, tipo de rejilla, método de construcción de todos los pozos.
- Localización de todos los pozos en planta en relación con algún levantamiento topográfico o por coordenadas de latitud y longitud (la precisión dependerá de lo que se necesite en cada caso), pero sobre todo debe estar bien clara la posición de los pozos de observación respecto a los de control.

Las fórmulas de flujo hacia los pozos se basan, generalmente, en el cambio de la carga, h , o en el cambio de abatimiento S . Es muy importante recordar que los cambios de profundidad hasta el agua, observados durante la prueba pueden incluir componentes debidas a otras variables, como son, por ejemplo, las variaciones de la presión atmosférica, el efecto de las mareas y una posible recarga del acuífero. Por otra parte, el flujo natural en la mayoría de los acuíferos es generalmente diferente de día a día, por lo cual se hace necesario observar las profundidades hasta el agua durante un tiempo anterior a la prueba, para determinar la tendencia del nivel del agua y usarla al calcular los abatimientos.

Figura 24. Hidrograma de un pozo de observación indicando el abatimiento sobre la base de la tendencia del nivel del agua subterránea cuando no existe extracción



Fuente: Vargas, 2010.

El período de observación anterior al comienzo de 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.

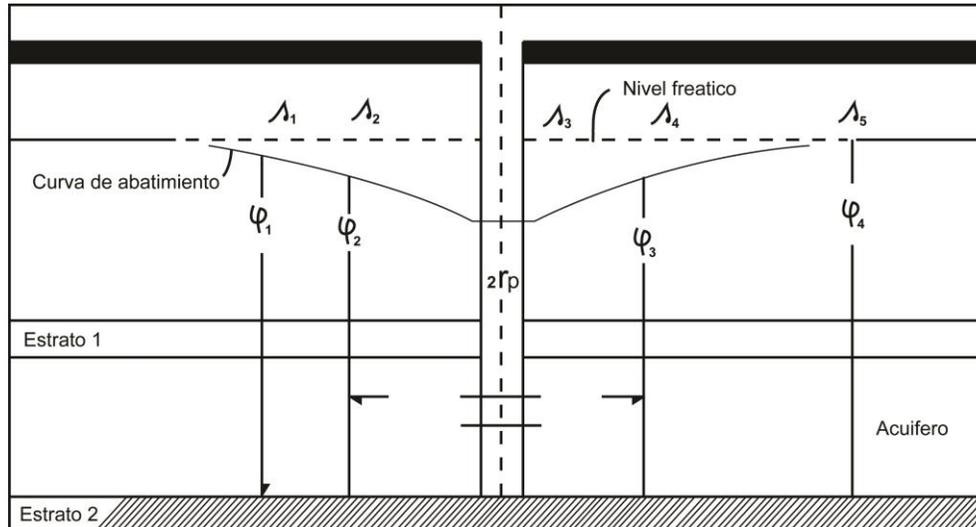
Durante las 2 o 3 primeras horas a partir de la hora en que se inicia la prueba es preferible que haya un observador en cada uno de los pozos de observación y en el de control. Después de 300 minutos las mediciones se harán con espacios de tiempo de 100 minutos o más entre sí; en ese caso, podrá utilizarse 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.

El caudal obtenido en el pozo principal se mide normalmente haciendo pasar el flujo por una restricción, para la cual se conoce la curva de calibración. En los manuales de hidráulica hay abundancia de descripciones y calibraciones de este tipo de dispositivos. En caso de no poder contarse con dispositivos semejantes, puede utilizarse un recipiente previamente tarado en el que se medirá el tiempo de llenado del mismo.

En la figura 25 se muestra una representación esquemática del flujo hacia un pozo en un acuífero confinado.

La curva característica de un pozo de bombeo no es más que la representación gráfica de la relación entre los caudales extraídos y los abatimientos que se han producido en el pozo para condiciones de equilibrio, durante la ejecución del ensayo de bombeo.

Figura 25. Flujo hacia un pozo en acuífero confinado



Fuente: Vargas, 2010.

Para pozos de pequeño diámetro se utilizan pruebas denominadas slug test que cumplen con los mismos objetivos de las pruebas de bombeo.

Para cada tipo de acuífero (libre, semiconfinado o confinado) se han construido desarrollos matemáticos simples y modelos interpretativos que pueden ser consultados en cualquier texto de hidrogeología o en textos especializados en este tema.

En síntesis, los sistemas de aforo discontinuo pueden ser de varios tipos, pero se reducen a bombear agua durante un cierto período de tiempo, midiendo su volumen (métodos de llenado de caneca y cuchareo), y observando el cambio correspondiente en el nivel del pozo (abatimiento).

El caudal del pozo se puede dar en términos de capacidad específica (caudal/unidad de abatimiento), lo que permite hacer comparaciones entre pozos siempre que el diámetro del tubo sea igual. O mediante la diferencia entre caudal bombeado y la pérdida por abatimiento:

$$Q = (V_b - V_a)/t = (V_b - \pi r^2 \Delta h)/t$$

Donde:

V_b : Volumen de bombeo

V_a : Volumen debido al abatimiento (pérdida)

r : Radio del tubo del pozo

Δh : Abatimiento

t : Tiempo de bombeo

4.5.3. Procedimientos para medición de parámetros físico-químicos

4.5.3.1. Aspectos generales

La composición química de las aguas subterráneas puede aportar una 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.

El origen de los iones presentes en el agua subterránea puede corresponder a sustancias disueltas en la precipitación o a sustancias incorporadas al flujo de aguas subterráneas durante la infiltración a través del suelo. Una vez el agua alcanza la superficie freática la evolución química dependerá de los minerales con los que entre en contacto y la duración de dicho contacto.

Como norma general, a mayor tiempo de permanencia en el terreno, mayor será la salinidad del agua. De la misma manera, se observa que las aguas subterráneas con menor tiempo de permanencia en el subsuelo son bicarbonatadas, después predomina el sulfato y las aguas más salinas son cloruradas. Esta evolución se denomina secuencia de Chevotareb¹². En la composición catiónica la secuencia análoga sería: $Ca^{++} - Mg^{++} - Na^{+}(K^{+})$. Esta secuencia, sin embargo, no es tan clara pues es mayor el número de excepciones. La secuencia se debe a dos causas: solubilidad y abundancia en el subsuelo de las distintas sales.

La complejidad del sistema hidrogeológico requiere de análisis vinculados a los modelos hidrogeológicos conceptuales para verificar hipótesis de trabajo. En este sentido, en una misma área pueden extraerse aguas de composiciones muy distintas aunque la litología sea relativamente homogénea en razón a la zonificación vertical y la distancia a las zonas de recarga. En otras palabras, podría decirse que en una misma área se puede estar captando un flujo regional o interceptando un flujo local con las obvias diferencias hidrogeológicas¹³.

En términos generales, las sustancias disueltas en el agua subterránea pueden pasar de unos pocos mg/l en un manantial a más de 100.000 mg/l. Las aguas dulces tienen menos de 1.000 mg/l, hasta 5.000 mg/l se denominan salobres. El agua de mar alcanza 35.000 mg/l. El 99% de estas sustancias disueltas corresponden a las relacionadas en la tabla 4.

Los componentes mayores en las aguas subterráneas se encuentran siempre en concentraciones mayores de 1 mg/l. El NO_3 generalmente se encuentra en este rango, pero siempre se debe a contaminación orgánica¹⁴. Los componentes menores (1 a 0,1 mg/l) más frecuentes son Fe^{-} , PO_4^{3-} , CO_3^{-} , Sr^{++} , Fe^{++} . El resto de componentes suelen estar en concentraciones inferiores a 0,1 mg/l.

El monitoreo se orienta a estos componentes y se complementa normalmente con:

- Temperatura. Es importante tenerla en cuenta para interpretaciones detalladas de la composición química del agua.

¹²En Kehew, A.2001 p. 289. (en Vargas, 2010)

¹³Precisiones al respecto se encuentran en Doménico, P. y Schwartz, J. 1998. 502 pp. (en Vargas, 2010)

¹⁴Apuntes de clase de F. Javier Sánchez San Román - Depto. De Geología. Universidad de Salamanca España disponibles en <http://web.usal.es/javisan/hidro>.

Tabla 4. Sustancias disueltas en aguas subterráneas

Aniones	Cationes	No iones
Cl ⁻	Na ⁺ (K ⁺)	SiO ₂
SO ₄ ⁻	Mg ⁺⁺	CO ₂
CO ₃ H ⁻	Ca ⁺⁺	(O ₂)

Fuente: Sánchez, J. 2002 (en Vargas, 2010)

- Conductividad eléctrica. Corresponde a la facilidad del agua para conducir la corriente eléctrica. El agua destilada es prácticamente aislante, pero la conductividad aumenta rápidamente con la cantidad de iones disueltos. Su importancia se basa en que se mide muy fácilmente e indica aproximadamente la salinidad del agua de acuerdo con la ecuación aproximada:
Suma de sales disueltas (mg/l)=Conductividad (μS/cm)*0,75.
La conductividad varía mucho con la temperatura. Es útil para estudios preliminares de la hidroquímica de una zona, en zonas con tipos de agua muy distintos (muy salinas y poco salinas), para establecer muestreos inteligentes y en zonas costeras para detectar la profundidad de la interfase agua dulce - agua salada.
- pH. Mide la acidez del agua. En las aguas subterráneas naturales oscila entre 6,5 y 8,5.
- Dureza. Propiedad de un agua caracterizada por la dificultad de hacer espuma con jabón. Es debida a la presencia de alcalinotérreos (Ca, Mg).

El objetivo general del monitoreo de calidad es determinar la variación espacial y temporal de las variables físico - químicas en consideración. En este sentido, se debe definir el propósito de monitoreo para definir las variables a ser monitoreadas. En términos generales, se pueden identificar tres objetivos específicos:

- Realizar evaluación hidroquímica para reconocer la caracterización hidrogeoquímica, la evolución de las aguas subterráneas y dinámica de flujo.
- Detectar y evaluar el avance de una pluma contaminante con el fin de tomar medidas de control.
- Realizar la vigilancia y control de la calidad del agua potable para definir medidas de protección de pozos de abastecimiento.

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"¹⁵, 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.

Las operaciones necesarias para el muestreo parten desde las acciones preparatorias y se extienden hasta la cadena de información, que, soportada en resultados analíticos, convierten el dato en información y conocimiento útil para la sociedad.

¹⁵Vargas, M.C. en la Guía para el monitoreo de la calidad de las aguas subterráneas. Ingeominas. s.f.

Por estas razones, es pertinente describir los métodos y procedimientos utilizados en el monitoreo de aguas subterráneas desde la etapa previa al campo.

4.5.3.2. Etapa previa a la salida de campo

En esta etapa se prepara la documentación necesaria (listas de chequeo, libretas y formularios de campo, protocolos de muestreo, mapas, 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. Al final de la etapa previa se procede a reunir y verificar el funcionamiento del equipo a utilizar. Se destacan a este respecto¹⁶:

- 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.).

El uso adecuado de los medidores portátiles dependerá en gran medida de su calibración y almacenamiento requerido. Para ello es necesario realizar calibraciones 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 realizada¹⁷.

En la tabla 5 se indican las características recomendables para medidores, soluciones de calibración, periodicidad de calibración y puntos de lectura.

Los envases deberán ser nuevos, contar con tapa y contratapa a presión que permitan un cierre fácil, hermético y sin burbujas de aire, siendo de un material tal que no reaccione con la muestra. En general serán de polietileno, polipropileno o PVC, pero para muestreo de compuestos orgánicos se utilizarán envases de vidrio oscuro.

Una vez elegidos, los envases deben ser acondicionados de acuerdo al parámetro a medir, según se indica a continuación. El lavado puede realizarse para el caso de aniones, lo cual es justificable para frascos usados o con posibles incrustaciones, pero los enjuagues posteriores a la acidulación deben ser mayores para quitar los residuos del ácido, los que modificarían la alcalinidad y cloruros o nitratos.

¹⁶ DINAMA, 2004 (en Vargas, 2010).

¹⁷ Op.cit. pág. 2 (en Vargas, 2010)

Tabla 5. Condiciones de calibración y uso de equipos portátiles

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	Idem anterior	< 1 mhos/cm	1
PH	Idem anterior	0,1 a 0,01 unidades de pH	2 o 3
Eh (Potencial ReDox)	ídem anterior	< 1 mV	1

Fuente: Dirección Nacional del Medio Ambiente. Ministerio de Vivienda, Ordenamiento y Medio Ambiente del Uruguay.

Todo el instrumental deberá ser lavado con agua destilada o deionizada tras su uso en cada sitio. En caso de muestreo para determinación de elementos traza, y contaminantes se deberá limpiar profundamente todo el equipamiento utilizado (bomba, medidor de nivel, sensores, etc.) para evitar contaminación cruzada¹⁸ (Dirección Nacional del Medio Ambiente. Ministerio de Vivienda, Ordenamiento y Medio Ambiente del Uruguay, en Vargas, 2010).

Figura 26. Preparación de equipo y recipientes de muestreo



Fuente: CVC 2006

En todos los casos la limpieza y descontaminación se realizará de acuerdo a las condiciones dadas por el fabricante. No obstante, en general, la operativa para el lavado o descontaminación del equipo utilizado puede realizarse de acuerdo a los siguientes métodos¹⁹:

Cationes mayoritarios, aniones y elementos traza (antes y después del uso):

- Lavado con ácido nítrico o clorhídrico ppa diluido al 30%
- Enjuagado 3 o 4 veces con agua destilada o deionizada

¹⁸Op.cit. pág. 3.

¹⁹Para el caso de contaminantes orgánicos se recomienda leer ASTM D5088 (90).

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).

4.5.3.3. Muestreo, preservación y transporte de la muestra

Cada pozo debe ser adecuadamente identificado y ubicado, debiéndose definir en éste un punto de referencia con coordenadas y cota conocidas, a partir del cual se tomarán las medidas. La cota debe ser referida al cero oficial, siendo recomendable su medición con precisión centimétrica.

En el pozo, se debe determinar el diámetro de la boca de pozo, altura (respecto del punto de referencia), profundidad total y al nivel del agua. La medición regular de la profundidad permite evaluar el estado constructivo del pozo. Se recomienda que dicha medición se realice las veces que sea posible, y al menos una vez al año. Ésta debe hacerse posterior a la toma de muestra, para evitar la resuspensión de partículas.

La medición de la profundidad al nivel del agua debe realizarse con una precisión de un centímetro.

El agua en el tramo de pozo frente a la zona filtrante generalmente se encuentra en circulación debido al flujo natural existente en el acuífero. En cambio, el agua por sobre la zona ranurada se mantiene casi estancada, siendo alterada por fenómenos físico - químicos o bioquímicos diferentes a los que ocurren en el acuífero. 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, son fenómenos que hacen necesaria la purga previa del pozo para obtener una muestra representativa del nivel acuífero investigado.

La succión del dispositivo de extracción deberá colocarse próxima a la parte ranurada, o frente a la zona de aporte en caso de pozos abiertos en roca con el objetivo de minimizar la resuspensión de los sedimentos que se encuentran en el fondo del pozo. A su vez, en superficie, se debe conducir adecuadamente el agua extraída de modo que ésta no sea vector de contaminación al propio u otro pozo.

Es importante indicar que el caudal de purga debe ser inferior al utilizado durante el desarrollo de la perforación.

La operación de purga más frecuente es la de extraer varias veces el volumen de agua almacenado en la perforación, siendo usual retirar al menos tres veces dicho volumen para la obtención de una muestra representativa. Esta recomendación, eminentemente práctica, puede ser complementada con la aplicación del siguiente criterio como forma de verificar la eliminación del agua estancada, información que permitirá realizar futuras purgas.



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

Cuando un pozo presenta muy bajo caudal de aporte, este criterio es impráctico, ya que no se puede retirar un número mínimo de volúmenes acumulados dentro de la perforación en poco tiempo o sin provocar grandes descensos. En estos casos tampoco se puede obtener una estabilización de parámetros antes de "secar" el pozo, por lo que 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.

Como criterio para la purga de un pozo suele utilizarse la estabilización de parámetros, lo cual se produce cuando el agua extraída corresponde a la aportada por el acuífero. Para esto, es necesario realizar mediciones regulares de algunos parámetros (pH, temperatura, Eh, etc.) en la propia línea de extracción. El caudal de extracción, el nivel hidráulico y el volumen total extraído pueden ser utilizados como indicadores de la estabilización de parámetros para subsecuentes muestreos en el mismo pozo.

En general, el orden de estabilización es pH, temperatura y conductividad eléctrica, seguidos por potencial redox, oxígeno disuelto y turbiedad. Se puede considerar que se han estabilizado los parámetros cuando en al menos tres lecturas consecutivas realizadas con más de dos minutos de separación o por la mitad del volumen almacenado en el pozo, difieren en menos de los rangos indicados en la tabla 6.

Tabla 6. Criterios usuales para definir el final de la purga por el método de estabilización de parámetros.

Parámetro a medir	Criterio de finalización de purga
Oxígeno disuelto	+/- 0,2 mg/l
Conductividad eléctrica	+/- 5,0 µmhos/cm si los valores son inferiores a 1000 µmhos/cm +/- 10,0 µmhos/cm si los valores son superiores a 1000 µmhos/cm
PH	+/-0,1 unidad de Ph
Temperatura	+/-0,1 °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

Fuente: Karklins, S., 1996.

Previo al muestreo de un pozo debe conocerse el tiempo transcurrido desde su desarrollo y desinfección, ya que éste puede realizarse una semana después de culminadas dichas operativas, siendo recomendable un mes de espera.

El muestreo debe realizarse inmediatamente después del purgado del pozo y siguiendo un orden de toma en función de los elementos o parámetros a determinar.

Antes de su uso, los envases deben ser elegidos y acondicionados de acuerdo al parámetro a medir, según se indica en el subtítulo de "Etapa previa a la salida de campo".

Al planificar una campaña de muestreo, se proyectará el orden de trabajo, considerando que se debe coleccionar desde el sitio que se estima menos al más contaminado. Asimismo, se debe considerar el método de conservación adecuado y el tiempo máximo posible para asegurar la representatividad de las muestras al final de la campaña.

Figura 27. Inyección de trazador



Fuente: Carsucre. 2004

En todos los casos se debe garantizar que los recipientes de las muestras se envíen al laboratorio cerrados herméticamente, protegidos de los efectos de la luz y calor excesivos. Si no se procede así la calidad de la muestra puede cambiar rápidamente debido al intercambio de gas, las reacciones químicas y microbianas.

Las muestras que no puedan ser analizadas el mismo día del muestreo deben refrigerarse a 4 °C y preservarse de acuerdo con la tabla 7, según el parámetro a analizar.

Los equipos de muestreo a emplear dependen de la profundidad del pozo y del tipo de muestra a tomar. Los dos principales tipos de muestreadores son el cucharón para muestreo a profundidad, y el muestreador manual bailer, para pozos poco profundos (ver numeral 4.2.3).

Al tomar muestras de aguas subterráneas, es importante realizar tantas determinaciones en el sitio como sea práctico, o lo más pronto posible después de recoger la muestra. Especialmente la temperatura, el pH, el potencial electroquímico, la alcalinidad y los gases disueltos.

Se recomienda la filtración de las muestras en el sitio de muestreo para estabilizarlas, especialmente cuando la composición de éstas se está evaluando. El tamaño de poro de los filtros recomendado para trabajos con aguas subterráneas es de 0,4 a 0,5 micras, aunque pueden usarse otros tamaños, dependiendo del propósito particular del muestreo y el interés de las variables²⁰.

²⁰Op.cit.

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

Tabla 7. Preservación de muestras

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. HNO 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	H ₂ SO ₄ PH<2, refrigerar	Vid/Plast	200	
Nitratos	Refrigeración	Vid / Pías	100	48 Hr
Nitritos	Refrigeración	Vid/pastic	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. HNO ₃ PH<2	Vid/Plast	100	6 m
N. Amoniacal/N total	Ac.Sulfúrico pH<2	Vid /Plast	500/200	7 d
Nitrato/Nitrito	H ₂ SO ₄ PH<2, refrigerar	Vid/Plast	200	
Nitratos	Refrigeración	Vid / Pías	100	48 Hr
Nitritos	Refrigeración	Vid/pastic	100	48 Hr
PH	Refrigeración	Vid /Plast	100	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	NaOH ₅ %. 10 ml/100 ml	Piástico	100	
Turbiedad	Refrigeración	Vid /Plast	100	24 Hr

Fuente: Ingeominas, s.f.

Registro de la cadena de custodia

Para el registro de la cadena de custodia se puede usar los siguientes formatos:

- Formatos de Control de Visitas. Cada entidad (IDEAM, CAR, ESP) debe diseñar un formato para el control de la cadena de custodia de las muestras que se envíen al laboratorio, en el cual se identifique claramente el pozo, su código, localización, tamaño de la muestra, preservación empleada y parámetros a determinar, junto con los resultados de las determinaciones in situ y el nivel estático.
- Etiquetas para recipientes de muestreo y cajas de transporte de las muestras. Estas etiquetas identifican y dan información básica sobre la muestra.



4.5.3.4. Determinaciones in situ

La medición de parámetros en sitio (pH, oxígeno disuelto, Eh, temperatura y conductividad eléctrica) debe realizarse antes o inmediatamente después de la toma de muestra. Los equipos y precauciones a tener en cuenta están indicadas en la sección 4.2.3, Equipos, de este documento, y en el protocolo de calidad del agua.

Para extraer muestras de agua de la capa superior de un pozo se puede utilizar un cubo o vertedor, compuesto de un tramo de tubo con una válvula de retención en el fondo, que se suspende de un cable y se baja al pozo. La válvula deja entrar el agua al tubo y, cuando éste se levanta, impide el escape de su contenido. El agua de cualquier punto profundo de la columna de agua del pozo entrará al cubo, pero se mezclará con la de la capa superior al levantarlo.

Para el muestreo a cualquier profundidad dentro del pozo, se han diseñado muestreadores con válvulas operadas con resorte. El tubo de muestreo se baja suspendido de un cable hasta la profundidad deseada, con ambos extremos abiertos, para permitir el flujo libre de agua a través del mismo, tomando las lecturas de profundidades con un contador. Una vez a la profundidad deseada, se desliza un peso sobre el cable de suspensión, el cual golpea un gatillo que cierra la cámara de muestreo. Luego se sube a la superficie y se abre la cámara oprimiendo la válvula del gatillo. El muestreador Bailer es una variante de este tipo de muestreadores.

Otras orientaciones para el muestreo y manejo de muestras de aguas subterráneas son abordadas por la "Guía para el muestreo de aguas subterráneas" que forma parte de la Norma Técnica Colombiana NTC-ISO 5667-11 (1996) de ICONTEC, así como en el texto del Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente CEPIS intitulado "Monitoreo de la calidad de las aguas subterráneas: una evaluación de métodos y costos" publicado en 1989 con la autoría de Stephen Foster y la participación de la UK Overseas Development Administration y la Organización Panamericana de la Salud OPS. Una versión actualizada se encuentra disponible en Internet.

Sensores de salinidad y temperatura

Como es sabido, la conductividad eléctrica del agua aumenta con la salinidad. Para medir la conductividad eléctrica se pueden utilizar los procedimientos de campo contemplados en los protocolos adoptados por el IDEAM (ver protocolo de calidad del agua).

La alcalinidad deberá determinarse en sitio, siendo la titulación el método más empleado. Las alternativas más usuales son la titulación volumétrica con bureta o la potenciométrica. En general la segunda técnica es más precisa, ya que la primera necesita de un operador entrenado para identificar precisamente el punto de cambio.

El volumen de muestra a analizar y la normalidad del titulante son función de la alcalinidad de la muestra y del instrumental de titulación. Para agua de baja alcalinidad se deberá utilizar mayor volumen de muestra, mientras que cuando el material titulante presente mayor precisión menor será el volumen de agua necesario (tabla 8).

Tabla 8. Volumen de agua para análisis y normalidad recomendada a partir de la alcalinidad esperada del agua y de la precisión del instrumental de titulación.

Alcalinidad (meq/l)	Alcalinidad (mg/l de CaCO ₃)	Precisión instrumento de titulación 0,05 ml		Precisión instrumento de titulación = =< 0,02 ml	
		Vol. muestra (ml)	Norm. ácido (N)	Vol. muestra (ml)	Norm. ácido (N)
0 a 1,0	0 a 50	100 o superior	0,01 a 0,02	100 o superior	0,02 a 0,2
1,0 a 4,0	50 a 200	50 a 0	0,02	50 a 70	0,1 a 0,2
4,0 a 20,0	200 a 1000	50	0,02 a 0,1	100	1 a 2
> 20,0	> 1000	50	0,02 a 0,1	50	1 a 2

Fuente: DINAMA, 2004.

Para medir la salinidad a una profundidad específica (por ejemplo en la zona del filtro del entubamiento) o para un registro de toda la columna de agua del pozo, se puede utilizar un medidor eléctrico de salinidad, el cual se compone de una celda sujeta a un cable, en la cual dos electrodos sumergidos hacen circular una corriente eléctrica que atraviesa el agua. Se mide la resistencia del agua con un potenciómetro digital conectado del extremo del cable a un medidor de resistencias.

Como la resistencia cambia con la temperatura del agua, se mide la temperatura al tiempo con un termistor contenido en la celda. La concentración de minerales disueltos en cada nivel del pozo se calcula con ayuda de una curva de calibración a través de puntos determinados, midiendo las resistencias correspondientes a las respectivas concentraciones de KCl en soluciones patrones. La resistencia se calcula a la temperatura de 25°C, usando la siguiente ecuación:

$$R_{25} = (R_{\Theta} - r) (1 - 0,02 \Delta \Theta)$$

Donde R_{25} es la resistencia de la muestra a 25°C, R_{Θ} la resistencia indicada por el medidor a la temperatura medida de 0°C, r la resistencia del instrumento (celda + cable, etc.), Θ la temperatura medida en grados centígrados, y $\Delta = 25^{\circ}\text{C} - \Theta$.

Para determinar otros parámetros in situ, como el pH, el oxígeno disuelto y la turbiedad, se deben utilizar los métodos presentados en el Protocolo de Calidad del Agua.

4.5.3.5. Procedimientos de laboratorio

Selección de parámetros analíticos

Debido a la amplia gama de iones y elementos químicos presentes en las aguas subterráneas, así como el elevado costo de los análisis de laboratorio, en la mayoría de los casos es necesario racionalizar el programa analítico de monitoreo a través de parámetros indicadores. A continuación se enumeran a manera de guía los indicadores o parámetros analíticos, según el objetivo del muestreo.

Evaluación hidrogeoquímica

Cuando se utilizan técnicas geoquímicas para la caracterización de un acuífero, o como herramienta para determinar los regímenes de flujo de las aguas subterráneas, los parámetros de



mayor interés son: pH, Eh, cationes mayores (Ca, Mg, Na, K), aniones mayores (Cl, HCO₃, SO₄, NO₃), ciertos isótopos (H₂, H₃, O₁₃, C₁₃, C₁₄), y algunos elementos traza (Si, Fe, Mn, B).

Usos del agua subterránea

Si es como fuente de agua potable, se deben seleccionar todos los parámetros establecidos en la Norma para Agua Potable (Decreto 475, Ministerio de Salud, 1998). Si es para uso industrial y agrícola también existen normas apropiadas que determinan que parámetros se deben incluir para su clasificación como apta o no para un determinado uso.

Cabe destacar que el grupo de aguas subterráneas de la Subdirección de Georrecursos de Ingeominas cuenta con protocolos para muestreos especializados de aguas termales y gases volcánicos e hidrotermales²¹.

Las aguas termales representan un importante recurso natural cuyo reconocimiento y monitoreo permite caracterizar el fluido para fines potenciales, determinar su origen, postular la identidad de los minerales en equilibrio, evaluar cambios en el reservorio y recomendar usos potenciales.

Asimismo, el muestreo de gases volcánicos e hidrotermales forma parte de los programas de vigilancia geoquímica de la actividad volcánica, desarrollados por los Observatorios Vulcanológicos del Ingeominas. Estos se han basado en medidas de la descarga de SO₂ por el método COSPEC (técnica espectrométrica basada en la cuantificación de la intensidad de luz absorbida por el SO₂, análisis de los gases fumarólicos condensables en solución alcalina (cajas japonesas y botellas de Giggenschbach), emanometría del gas radón, análisis de especies acuosas mayores en manantiales termales y eventualmente análisis de metales y aniones en condensados de vapor de agua fumarólico y aniones en agua lluvia.

Problemas de contaminación²²

La contaminación del agua subterránea aporta componentes indeseables en concentraciones apreciables en ciertos casos (nitratos, cloruros, etc. o bajas en otras (plaguicidas, metales pesados) con la característica común de su toxicidad o de inutilizarla para un uso determinado.

Se puede diferenciar entre contaminación natural, resultado del equilibrio químico del planeta, y contaminación antrópica resultado de las actividades del hombre

Uno de los focos de contaminación son las actividades agrícolas, cuya contaminación está producida por el uso de fertilizantes y plaguicidas. Tiene carácter difuso. La contaminación ganadera supone una contaminación puntual de carácter orgánico y bacteriológico. La contaminación de origen urbano se relaciona con la producción de lixiviados a partir de depósitos de residuos sólidos, que se infiltran a través del subsuelo produciendo aumento de su mineralización, aparición de olores desagradables o coloración del agua, aumento del contenido de amonio, DBO, DQO, posible reducción de sulfatos, movilización del hierro e incremento del dióxido de carbono. En relación con las aguas residuales domésticas, la contaminación puede producirse por fugas en fosas sépticas, pozos negros y redes de alcantarillado, por vertidos libres o por su uso como agua de riego.

²¹ Preparados por Claudia Alfaro.

²² En Delgado, C. et.al. 2005. Recursos Hídricos: Conceptos básicos y casos en Iberoamérica.



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

La contaminación por aguas residuales se puede diferenciar en tres grupos:

- Contaminación química. Entre los elementos a considerar cabe destacar el nitrógeno, en todas sus formas, el fósforo, cationes tóxicos (metales pesados) y productos tensoactivos.
- Contaminación física, como los sólidos en suspensión.
- Contaminación microbiológica. Los organismos patógenos presentes en el agua pueden ser muy variados. Entre los virus cabe señalar los adenovirus, virus de hepatitis A, etc. En cuanto a las bacterias son utilizados como indicadores de contaminación fecal el Escherichia Coli. También pueden aparecer protozoos y helmintos.

Otra fuente de contaminación, es la intrusión marina que se produce en acuíferos costeros por modificación de las condiciones naturales del equilibrio de la interfaz agua dulce - agua salada. Esta alteración puede ser producida por recargas inducidas y sobreexplotación por bombeo, que producen notables incrementos de la salinidad.

Las determinaciones en campo (in situ) son: pH, temperatura, conductividad, turbiedad, alcalinidad y acidez. Las frecuencias de muestreo se tratan en la sección 3.3 del presente documento.

Para el muestreo de aguas subterráneas en sitios contaminados, se recomienda consultar la norma técnica NTC-ISO-5667-18 de ICONTEC (2003).

Muestreo de isótopos estables²³

Para obtener datos isotópicos fiables es indispensable observar en detalle el procedimiento que se describe más adelante. Ante todo se debe evitar la evaporación ya que éste afecta notablemente la composición isotópica del agua de la muestra. Por lo tanto, es indispensable utilizar frascos herméticos para conservar, expedir y almacenar las muestras de precipitación recogidas para su análisis isotópico.

Prácticas generales para muestreo de $2H$, $18O$ y tritio:

- Se requiere botellas plásticas de alta densidad (enviadas por el OIEA) de 50 ml con doble tapa (500 ml para tritio).
- Se ambienta 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).
- Se rotula cada frasco con la siguiente información: fecha, hora de muestreo, nombre o identificación de la fuente de agua, lugar de muestreo y sus coordenadas. El marcador utilizado tiene que ser resistente al agua.
- Al mismo tiempo se debe registrar en un cuaderno la información completa de la muestra para tener un respaldo.
- Usando un recipiente (previamente ambientado) se toma otra muestra del mismo lugar, se mide el pH, la temperatura y conductividad (y la alcalinidad y oxígeno disuelto si se tienen los aparatos necesarios). Estos parámetros se pueden agregar a la etiqueta de la botella o bien anotarlos en el cuaderno de registro.

²³Texto tomado de Vargas, M.C. de la Subdirección de Georrecursos de Ingeominas.

Contrato No. 214 de 2010

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

- Las muestras se llevan al laboratorio y se almacenan en un lugar fresco y oscuro hasta el momento de su envío.

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.

Nota: 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:

- 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 hasta su análisis.

Nota: Esta cantidad de muestra es suficiente para medir, además, 18 O

Caso específico del muestreo de las aguas de superficie:

- El muestreo normalmente no presenta problemas específicos.
- La muestra tiene que ser tomada en el centro del río donde el flujo es importante, la mezcla buena y no hay probabilidad de evaporación de las muestras con contactos de largo tiempo con el aire (cerca de la orilla, en cubetas de retención, cerca de embalses naturales,...). Si el río es de gran caudal se puede muestrear a la orilla hacia un sector profundo donde corre el agua.
- Hay que verificar que el muestreo se hace lejos de las confluencias y que las aguas que se muestrean presentan una mezcla de los dos ríos aguas arriba. En ríos grandes, esta distancia puede ser de varios kilómetros.
- Para lagos, embalses, las aguas deben ser muestreadas en la superficie y profundidad.



Caso específico del muestreo de las aguas subterráneas

- Si se toma una muestra de un pozo con bomba, el agua a muestrear se deja correr por espacio de 1 min.
- Si no se dispone de bomba se usa un muestreador de pozo.
- Si se toma la muestra en un pozo estático (de observación) hay que expulsar el equivalente a dos veces el volumen del pozo (o hasta observar una estabilización de los valores de los parámetros fisicoquímicos como temperatura y Eh, para evitar el muestreo de agua "antigua" influenciada por evaporación e intercambio con dióxido de carbono.
- Los pozos utilizados (bombeados) de manera continua para alimentación de pueblos o agricultura no necesitan ser purgados.
- Para manantiales hay que hacer el muestreo lo más cerca posible del sitio donde sale el agua
- Hay que tomar nota de las características del pozo y medir los parámetros específicos tal como nivel piezométrico, profundidad del muestreo, sistema de muestreo (bomba o muestreador), tiempo de bombeo antes tomar las muestras,....

Caso específico del muestreo de las aguas de lluvias:

- 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).
- 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.
- 50 ml (para el análisis de isótopos estables) es la cantidad de agua que se considera necesaria para los análisis isotópicos ($^{18}\text{O}/^{2}\text{H}$). Si es necesario, se llenará un frasco de 50 ml para el análisis de isótopos estables y con el resto del agua se llenará el frasco de medio litro (o parte del mismo, si la muestra es insuficiente) para el análisis del tritio.
- El agua de lluvia se recoge en un pluviómetro normal, haciéndose una lectura del volumen recogido y vaciándose el pluviómetro tan pronto sea posible después de cada precipitación, de ser factible, o sino cada mañana. Después de la lectura del pluviómetro se debe verter la precipitación en un recipiente de plástico de 5 litros con un buen tapón para evitar la evaporación. Se debe guardar este recipiente en un lugar fresco y oscuro. Es muy importante que permanezca siempre bien cerrado, ya que la evaporación modifica la composición isotópica del agua, y por lo tanto se deben tomar todas las precauciones posibles para evitarlo.
- Es absolutamente indispensable transferir el agua después de cada precipitación, o cada día, y secar cada vez el colector del pluviómetro con un trapo limpio y seco antes de volver a instalarlo en la posición de recolección.
- Si el agua lluvia debe permanecer varios días en el colector del pluviómetro (que puede consistir sencillamente en una botella de plástico con un embudo), antes de transferirla a un recipiente hermético, es necesario poner aceite de parafina medicinal, que se adquiere fácilmente en una farmacia, en el recipiente colector del pluviómetro, para impedir la evaporación. La película flotante de parafina sobre el agua debe tener un espesor de 0,5 cm aproximadamente. El agua lluvia con el aceite de parafina 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.
- 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.



Contrato No. 214 de 2010

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

- 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.
- Si la cantidad de agua recogida en un mes cualquiera excediera de 5 litros, se puede utilizar una segunda botella de 5 litros para acumular el agua excedente. Al final del mes se debe mezclar toda el agua de los dos recipientes antes de llenar los frascos con las muestras. Las operaciones descritas en los párrafos 3 a 7 se deben efectuar lo más rápidamente posible, con el fin de reducir el tiempo para evitar que la muestra quede expuesta a la atmósfera y corra por lo tanto el riesgo de evaporación.
- Si se ha utilizado aceite de parafina medicinal, éste no se puede separar del agua en el momento del muestreo, sino que se hará en el laboratorio encargado del análisis isotópico. En tal caso, se tratará de minimizar la cantidad de aceite presente en el frasco de medio litro que da el laboratorio, cerciorándose de que la cantidad de agua enviada excede en gran medida a la del aceite.
- Al cabo del mes, cuando se hayan llenado los frascos de muestras, se debe secar el recipiente de 5 litros antes de utilizarlo para acumular la precipitación del mes siguiente.
- En ningún caso debe llenar completamente los recipientes de plástico. Se deja siempre un pequeño espacio de aire (más o menos el 5% del volumen del frasco) para permitir la expansión del agua resultante de posibles aumentos de temperatura, o de descensos por debajo del punto de congelación. Se debe verificar que la tapa quede herméticamente cerrada.
- Se marca claramente en las etiquetas la información relativa a la estación de observación, al mes y a la cantidad de precipitación total. Los frascos se marcan inmediatamente después de ser llenados.

Envío de las muestras

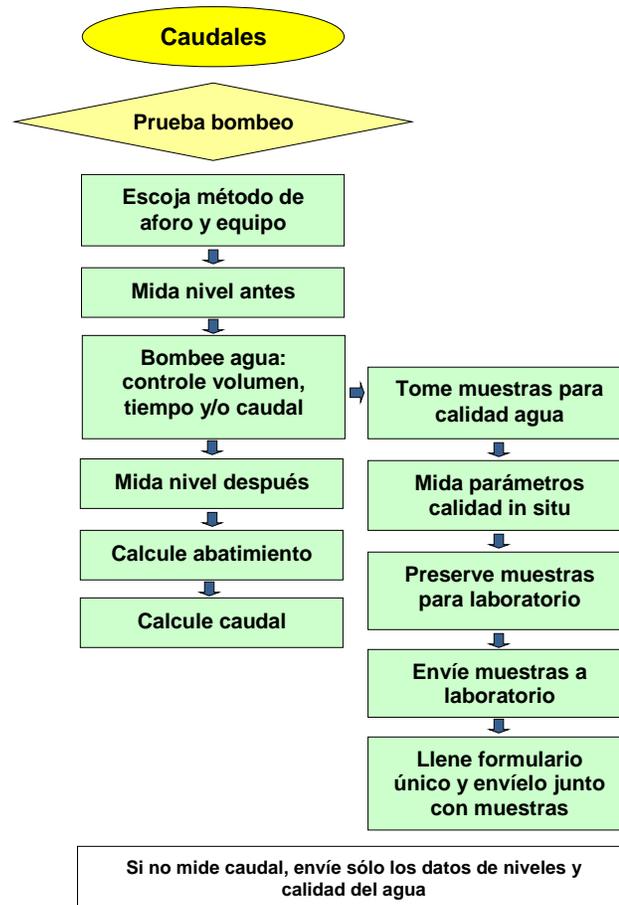
- Se informa al Coordinador del proyecto de la recolección de las muestras, enviando el fichero excel/quattropro con la información completa y el fichero ISOHIS con los datos del proyecto
- El coordinador técnico contactará varios laboratorios para verificar la disponibilidad que tienen para efectuar los análisis en un tiempo razonable (3 meses para isótopos estables, hasta 5 meses para tritio en caso de necesitar enriquecimiento).
- El coordinador técnico informará a la contraparte el lugar a donde tiene que enviar las muestras.
- En cada envío se debe anotar de manera legible para evitar problemas con las aduanas, que son botellas que contienen agua para análisis y que no tienen valor comercial. Conviene cerciorarse de que no existan objetos tales como tornillos, clavos, astillas de madera), ya que dichos objetos pueden perforar las botellas de plástico.

Procedimientos de análisis en laboratorio

Para otros aspectos de la preparación del trabajo de campo de toma de muestras para análisis en laboratorio, y para la selección y ejecución de los análisis en laboratorio, se deben aplicar los protocolos adoptados por el Laboratorio de Aguas del IDEAM, los cuales se presentan en el protocolo de calidad del agua.

La figura 28 muestra el resumen del procedimiento de medición de caudales y calidad del agua.

Figura 28. Procedimiento de medición de caudales y muestreo de calidad de agua



4.6. REGISTRO Y PROCESAMIENTO DE DATOS

4.6.1. Registro de datos en campo

La captura o registro de los datos se debe hacer en el Formato Único Nacional de Inventario de Puntos de Agua (ver formato 1 del Anexo 1), el cual se puede bajar de la siguiente dirección de la página web del IDEAM:

<http://institucional.ideam.gov.co/descargas?com=institucional&name=pubFile465&downloadname=Formulario%20de%20Inventario%20Puntos%20de%20agua.pdf>

Este formato ha sido concertado entre las CARs y el IDEAM y ha venido siendo aplicado en algunas regiones piloto. Este formato debe ser llenado por el Inspector que realice la medición y muestreo del pozo, y consta de las siguientes partes:

1. Información general: nombre del proyecto, responsable, tipo de punto, condiciones del punto.



Contrato No. 214 de 2010

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

2. Fuentes de información y datos del propietario
3. Información del punto: estado legal, localización, método de medida de cota
4. Características topográficas, climáticas, geomorfológicas y geológicas del sitio
5. Características de los pozos y aljibes: datos de construcción, material de revestimiento, método de extracción de agua, tipo de energía, diseño del pozo, características hidráulicas, método de medida de caudal, caudal estimado, otros.
6. Construcciones adicionales de la captación: embalses, tanques, albercas, tuberías.
7. Características de los manantiales: tipo, permanencia, medio de surgencia.

8. Parámetros físico-químicos del agua: método de muestreo, propiedades físico-químicas, propiedades organolépticas, datos de laboratorio, calidad.
9. Usos del agua: tipo de uso, descripción, fuentes de abastecimiento y frecuencia.
10. Diagnóstico sanitario de la captación: terinas, charcos, basuras en las proximidades, bordes del pozo, condición del punto, fuentes puntuales de contaminación.
11. Datos gráficos: croquis y fotos.
12. Observaciones

Anexo al formulario se presenta el instructivo para el diligenciamiento. Este formulario debe actualizarse cada vez que se haga una visita, medición o muestreo.

Para los registros de calidad del agua subterránea se pueden utilizar los mismos formatos establecidos para calidad de aguas superficiales, tal como se presentan en el protocolo de calidad del agua.

En casos de pozos de propiedad de CARs u otros organismos, éstas podrán adoptar estos formularios u otros similares, a condición que reúnan los mismos datos como mínimo. En todo caso, los formularios deben ser de forma que el observador pueda registrar las observaciones cada vez que efectúe mediciones de nivel estático y muestreos o determinaciones de calidad. Copia del formato de captura o diario de la estación debe permanecer en poder del observador, en caso de que se pierda en la transmisión a un centro de proceso de datos.

En el caso de un proceso automático de datos, los formularios de informes pueden también estar en formatos codificados apropiados para la conversión directa a un medio informático. Los datos pueden ser directamente insertados en una computadora portátil o fija, ubicada en el sitio de recolección.

Los avances recientes que minimizan errores en el proceso de datos procedentes de los libros de mediciones de terreno (lectores ópticos y computadoras de terreno portátiles) permiten la entrada directa de las observaciones en la memoria de la computadora. Estos aparatos permiten un control automático de la calidad de los datos.

4.6.2. Entrada de datos al sistema

Para la captura y procesamiento de la información de niveles y calidad del agua, se utiliza un programa de computador, cuyas características dependen del sistema utilizado en la entidad.

El ingreso de los datos al sistema de almacenamiento se hace por primera vez en las oficinas de las áreas operativas, a cargo de los mismos inspectores de campo, los cuales recogen la información en terreno. La digitación de la información al disco duro del sistema de



almacenamiento y operativo consiste en la grabación de los datos contenidos en las carteras diligenciadas en terreno y en ella se cumple el primer control de calidad.

La captura inicial y posterior actualización de los datos tomados de nivel para un año/mes determinado de una estación se debe hacer en forma totalmente interactiva (conversacional). En principio, los pasos son:

- Grabar los datos de identificación de la estación, año y mes a procesar.
- Grabar el tipo de instrumento, así: sonda eléctrica, cinta, registrador, pozo seco y/o datos estimados
- Grabar y/o actualizar la información previamente depurada en la el formato único nacional, a saber:
 - Nivel en cm.
 - Parámetros de calidad del agua
 - Convención para borrar un dato (rellenar el respectivo campo de nueves (9)), o dejar en blanco si no existe dato.
 - Diseño de pantalla para la entrada de datos.

4.6.3. Cálculos y procesamiento de niveles

Con base en los datos mensuales, semestrales o anuales, el programa debe calcular:

- Nivel medio mensual, semestral y/o anual. Una vez realizado el control de calidad de los datos, tal como se indica en la sección 4.7, de los niveles estáticos estandarizados de un pozo, se deben calcular los valores medios para diferentes períodos, mediante el promedio aritmético de las lecturas de nivel, si la estación no tiene registrador, o de los 24 valores horarios extraídos de la gráfica del limnógrafo.
- Concentración media mensual, semestral y/o anual. Una vez realizado el control de calidad de los datos, tal como se indica en la sección 4.7, de las concentraciones o valores de calidad del agua subterránea, se deben calcular los valores medios para diferentes períodos, mediante el promedio aritmético de las concentraciones correspondientes.

4.6.4. Salida de datos de niveles y concentraciones

Los formatos de salida deben mostrar la siguiente información.

- Relación de información capturada: información grabada en los archivos de datos mensuales, semestrales o anuales para cada pozo. El reporte se puede producir en forma global o específicamente para una regional, un pozo en particular, y un año determinado.
- Informe de niveles estáticos. Estos son los datos básicos fundamentales de cada pozo, correspondientes a los valores de los niveles que fueron digitados y que no tienen ningún proceso más que el análisis de su calidad. De aquí se pueden extraer los valores medios, máximos y mínimos instantáneos de toda la serie o del período que se desee.
- Informes de valores de concentración. Estos son los datos básicos fundamentales de cada pozo, correspondientes a los valores de concentración de los parámetros de calidad del agua que fueron digitados y que no tienen ningún proceso más que el análisis de su calidad. De aquí se pueden extraer los valores medios, máximos y mínimos instantáneos de toda la serie o del período que se desee.

- Con base en los anteriores datos, se pueden generar resúmenes mensuales, semestrales, anuales y multianuales de niveles y concentraciones (medios, máximos y mínimos).

En casos de estaciones de propiedad de CARs u otros organismos, éstas podrán adoptar formularios de salida similares, a condición que reúnan los mismos datos como mínimo.

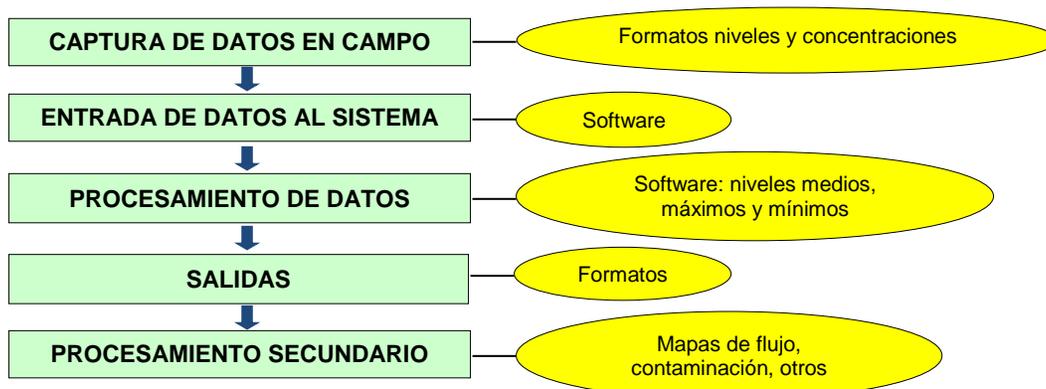
4.6.5. Procesamiento secundario

Los datos de niveles, junto con otros parámetros hidráulicos del pozo levantados durante las pruebas de bombeo, se pueden utilizar para alimentar o calibrar el modelo hidrogeológico preliminar del acuífero, en tal forma que los datos sirvan como base para determinar la productividad del mismo y elaborar balances hídricos y determinación de la oferta hídrica real a nivel de zona hidrográfica, junto con los datos de precipitación, evaporación y caudales de aguas superficiales (figura 29).

Mediante el procesamiento de la información de niveles, se pueden elaborar mapas de flujos, que, junto con los datos de conductividad eléctrica y otros de calidad del agua, permitan conocer las áreas de recarga y descarga de los acuíferos, las zonas de explotación intensiva o sobre explotación, las áreas con problemas de contaminación las fuentes de contaminación. Esta información es un criterio técnico importante para establecer políticas inmediatas de aprovechamiento de las aguas subterráneas y contribuye a optimizar la red de monitoreo.

El inventario requiere actualizaciones periódicas de acuerdo con las dinámicas regionales. En todos los casos, este inventario alimenta tanto los modelos hidrogeológicos conceptuales como los modelos numéricos o matemáticos para la toma de decisiones.

Figura 29. Flujoograma general del procesamiento básico de la información



Generalmente, los criterios técnicos que permiten determinar si un acuífero se encuentra en proceso de explotación intensiva o sobre - explotación son el descenso permanente de los niveles en función de tiempo y espacio, lo cual es producto del desbalance de las aguas subterráneas; el cambio de la composición química, y los efectos de carácter social y económico, tales como la migración de la población, la disminución de productos agrícolas y la escasez en el suministro de agua potable, con sus consecuencias en la salud de la población. Sin embargo, el descenso de los niveles se puede atribuir no solamente a la explotación intensiva o sobre - explotación de las aguas subterráneas, sino también a la falta de recarga de los acuíferos, ya sea por los períodos



largos de sequía o por la expansión poblacional en las zonas de recarga de los acuíferos. Por esta razón, la observación de niveles deben ser sistemática y requiere un periodo mínimo de diez a quince años para poder definir si se trata de un caso de sobre - explotación o explotación intensiva.

4.7. VALIDACIÓN DE DATOS: CONTROL DE CALIDAD

4.7.1. Verificación

4.7.1.1. Preverificación de los datos en el pozo

Esta se lleva a cabo en el propio pozo, durante la realización de la lectura de nivel y muestreo del pozo. En general, cada pozo de la red nacional es visitado una vez por semestre o por año. En los pozos de observación automática se puede utilizar la misma frecuencia, desde que no se presenten problemas de mal funcionamiento. En caso contrario, las visitas de inspección deben tan frecuentes como lo exija el manual del equipo registrador.

- La comisión de campo corroborará que se cumplan todos los requisitos técnicos para la realización de la lectura de nivel, para las determinaciones in situ y para la toma de muestras con destino al laboratorio, en particular que se eviten los errores descritos en la tabla 4 del presente protocolo:
 - Error en lecturas de cintas, en caso de usarlas.
 - No limpiar el cable y la cinta del limnicontrato después de cada medición, de ser el caso.
 - Sonda muy voluminosa, que dificulta su penetración en el pozo, o que roza sus paredes, alterando la medida, si se usa sonda.
 - Muestreador inadecuado.
 - Rozamiento del flotador contra las paredes del tubo, en caso de medición con equipos registradores (limnógrafos).
 - Pozo sin georreferenciación.
 - Lecturas mal anotadas en el formato.
 - Anotaciones ilegibles o dudosas.
 - Diligenciamiento incompleto de los datos de campo del formato único nacional.
 - Errores de transcripción a formato electrónico.
- Paralelamente, durante la inspección, se debe examinar el estado del pozo y efectuar las labores de mantenimiento que sean necesarias.
- Si se detectan problemas de obstrucción de filtros, se deben realizar labores de limpieza y/o prueba de pozo.
- Se debe verificar el correcto funcionamiento de las sondas, sensores o registradores, tal como se explica en las secciones 4.4 y 4.5.
- Se debe eliminar las filtraciones de agua contaminada o agua superficial al pozo, y corregir los problemas de seguridad del mismo.

Una vez de regreso en la sede, la comisión realiza la revisión de las mediciones de nivel y de las determinaciones de campo, y revisará, elaborará los formatos de custodia y enviará las muestras al laboratorio. También buscará detectar errores en el llenado del formato único nacional de inventario de puntos de agua, como se explica en seguida.



4.7.1.2. Verificación de los datos sobre el formato

- Se evalúa la calidad de los registros de la medición, según sean: confiables, incompletos o dudosos. Esto se hace mediante el examen del formulario único nacional de inventario de puntos de agua, a ser llenado por el inspector:
 - No anotar correctamente el nombre del pozo, su código, unidad hidrogeológica, fecha y hora de la medición.
 - No registrar los niveles del agua durante la medición, el instrumento utilizado y otros datos requeridos en el formulario.
 - Mala anotación de las determinaciones in situ (pH, oxígeno disuelto, Eh, temperatura y conductividad eléctrica).
 - Anotaciones ilegibles o dudosas.
- Luego se procede a la grabación de los datos, siguiendo las especificaciones e instrucciones técnicas del software utilizado por cada entidad. Una vez grabados los datos de la medición de cada pozo, se hace una impresión del formulario para confrontar los datos de salida contra los archivos de codificación y así corregir posibles errores de digitación.

4.7.1.3. Verificación de los datos de laboratorio

La verificación del análisis de laboratorio sobre las muestras procesadas se lleva a cabo por el revisor de laboratorio, mediante la comprobación de que no han ocurrido los errores descritos en la toma de muestras, envío y análisis de laboratorio, de acuerdo con lo previsto en el protocolo de calidad del agua y en el presente protocolo (sección 4.5.3, Procedimientos para medición de parámetros físico-químicos).

En particular, se hace hincapié en la necesidad de incluir blancos, duplicados y contramuestras en todo programa de muestreo y análisis.

- Se hacen blancos de los envases y del muestreador, que una vez prelavados se llenan con agua destilada - desionizada, la cual se preserva igual que las muestras.
- Para la realización de análisis por duplicado, se toma suficiente cantidad de muestra (1.000 ml), dependiendo de la conductividad del agua.
- Para las contramuestras se toma igual cantidad de agua para ser enviada a otros laboratorios que tengan homologados sus procedimientos analíticos.

4.7.2. Validación de datos

Niveles y concentraciones

La validación tiene por objeto detectar los errores resultantes de la de observación, ingreso o procesamiento de datos de niveles y concentraciones (o parámetros de calidad del agua). Es posible distinguir tres tipos de errores: absolutos, relativos y físico- estadísticos.

- Los errores absolutos son datos o códigos que exceden los valores preestablecidos, por ejemplo, una coordenada geográfica más allá de las coordenadas límites de la jurisdicción o con una precisión menor o mayor a la requerida por la escala; o una cota que no corresponde a la zona del pozo. Una vez detectados los datos erróneos, ya sea visualmente o automáticamente (en la base de datos), se deben corregir.
- Los errores relativos incluyen:
 - A. Una gama prevista de niveles o concentraciones.

Al inicio de operación de un pozo y/o durante las etapas iniciales de desarrollo de la base de datos, se recomienda asignar límites de tolerancia bastante amplios, los cuales pueden ser acotados posteriormente, cuando se logre un mejor conocimiento estadístico de las variaciones del parámetro.

Si bien se requiere un análisis lo más completo posible de las series históricas, las gamas esperadas para el método A deberían ser calculadas para distintos intervalos de tiempo, incluido el intervalo de observación de los datos existentes, debido a que la varianza de los datos disminuye con el incremento de tiempo. Los niveles leídos se podrían comparar inicialmente con una gama esperada de valores para un período de tiempo determinado, por ejemplo, el mes en curso. En forma similar, al final de cada año hidrológico, el promedio para el año en curso se debe comparar con el promedio multianual a largo plazo. Esta técnica es de aplicación general en hidrología a todas las series de datos cronológicos.

- B. El cambio máximo esperado del caudal entre observaciones sucesivas.

Este método se basa en la comparación de cada dato con la observación precedente, y se aplica a las variables que muestren una correlación serial importante, como es el caso de los niveles de un pozo y sus concentraciones de sustancias o elementos en suspensión o disueltos.

- C. La diferencia máxima esperada en los niveles entre pozos cercanos.

Este método es una variación del método B, pero usa criterios de cambios aceptables en el espacio en vez de los cambios en el tiempo. Evidentemente, es particularmente efectivo para valores de niveles o concentraciones en pozos del mismo acuífero.

Complementariamente, otro control de calidad del dato es comparar el nivel y las concentraciones con las precipitaciones registradas en la cuenca hidrográfica, que, aunque no es una fórmula ideal, sí permite observar la coherencia entre ambos factores hidrológicos.

El análisis en conjunto de estos errores puede llevar al Inspector a eliminar un dato de caudal.

Validación de datos de laboratorio

Para los datos de calidad del agua subterránea se propone utilizar los mismos métodos de validación utilizados para aguas superficiales, tanto intra como inter laboratorios, tal como se describen en el Protocolo de Calidad del Agua.

Adicionalmente, se propone utilizar los siguientes criterios para validar los datos de los análisis de laboratorio:

- Balance iónico: si la diferencia entre aniones y cationes, expresados en miliequivalentes por litro es mayor del 10%, el análisis se desecha.
- Si el pozo no está nivelado con referencia al sistema de cotas del IGAC, con una precisión de 1 centímetro, el dato de nivel se desecha.

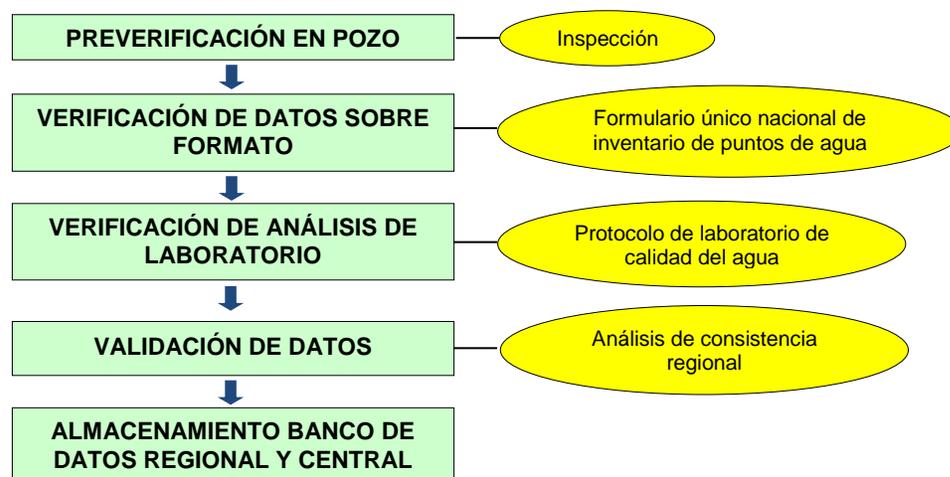
Otros procesos de validación de la información se llevan a cabo durante el proceso de almacenamiento. La figura 30 muestra el flujograma general de la validación

Determinación de la homogeneidad de las series de datos

Series mensuales y anuales

Los procesos hidrometeorológicos, así como otros tipos de procesos naturales, pueden presentar dos tipos de variaciones: variaciones naturales o aleatorias y variaciones causadas por la acción humana. Estos tipos de variabilidad se reflejan en las mediciones, esto es, en las estadísticas del comportamiento de las variables hidrometeorológicas. Para determinar si las variaciones que se presentan en una serie de información son aleatorias o se deben a causas “asignables”, como errores de medición u otros, se llevan a cabo análisis de homogeneidad, cuyo objeto es detectar no estacionariedades en las series. Este análisis puede enfocarse a determinar cambios en la media o en la variabilidad. También se puede realizar sobre los cambios en variables, como por ejemplo en los niveles o en las concentraciones, o en los atributos de una variable, como sería el caso de determinar en qué casos se alcanza o sobrepasa un valor dado.

Figura 30. Flujograma general de la validación de la información de pozos



Existen distintos métodos y niveles de profundidad en los análisis de homogeneidad. En los textos y estudios de hidrología se pueden encontrar diferentes métodos, tales como gráficas de series de tiempo, gráficas de simple y doble masa, gráficas de cuartiles, gráficas S-S, gráficas suavizadas y



otros. Los métodos también varían si se trata de detectar cambios en la media, en la tendencia, en la varianza o en la independencia de una serie. No obstante, para los fines del Programa Nacional de Monitoreo se propone utilizar un método sencillo que permita detectar si una serie presenta cambios no aleatorios, para proceder luego a corregirlos o eliminar los datos defectuosos, de ser el caso. Para este efecto se propone el método de las cartas de control, cuya descripción se puede encontrar en textos de hidrología y/o estadística. En cualquier caso, la aplicación de estos métodos debe integrarse al procesamiento automático de la información en el Banco de Datos central.

4.8. ALMACENAMIENTO

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

Como se anotó en la sección 4.6, el ingreso de los datos al sistema de almacenamiento se hace por primera vez, en las oficinas de las áreas operativas y esta operación está a cargo de los mismos inspectores de campo, los cuales recogen la información en terreno. La digitación de la información al disco duro del sistema de almacenamiento y operativo consiste en la grabación de los datos contenidos en los formatos o carteras diligenciadas en terreno y laboratorio, y en ella se cumple el primer control de calidad, como ya se anotó (ver sección 4.7).

El ingreso de datos al sistema puede variar en función del programa de que se disponga para el efecto, adoptado por la Oficina de Sistemas del IDEAM o de cada entidad operativa. La figura 31 muestra el flujograma general del almacenamiento.

4.9. DIFUSIÓN DE LA INFORMACIÓN

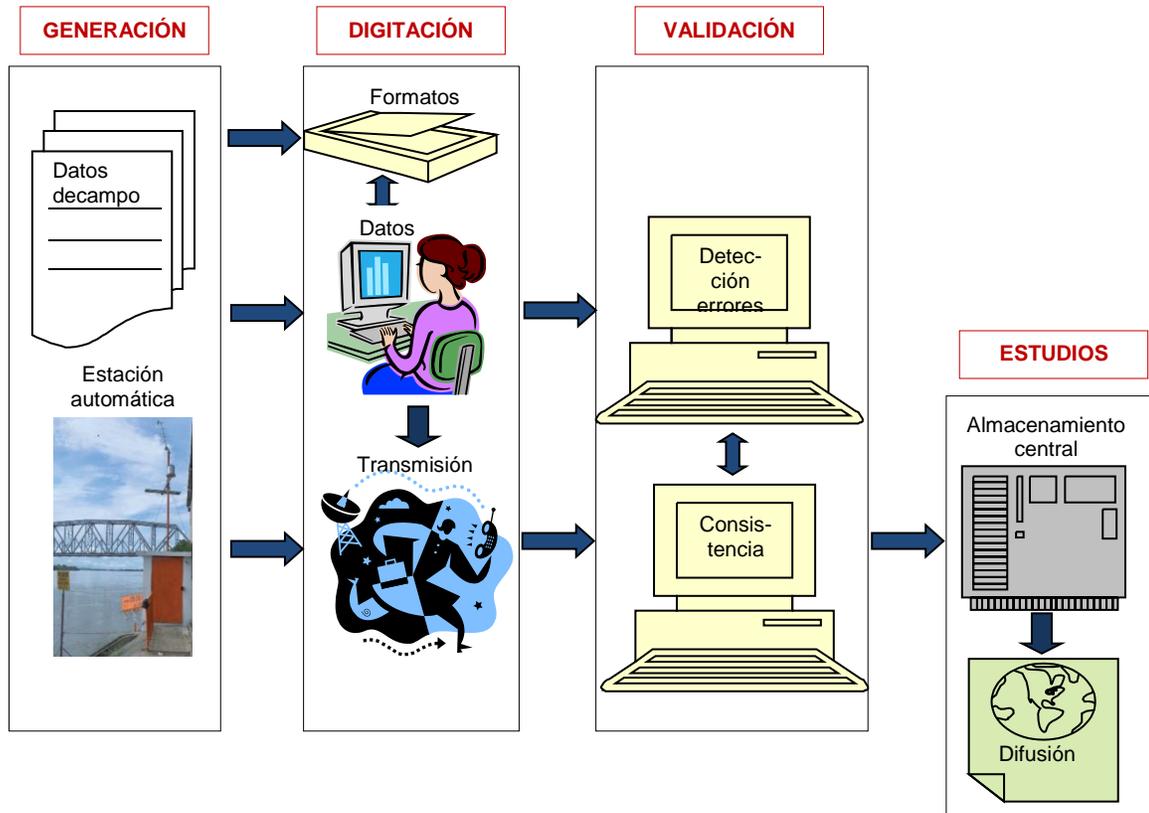
La difusión de los datos de aguas subterráneas se realizará conforme a las políticas de gestión de información que defina el Consejo Directivo de cada entidad, definiendo la disponibilidad de los diferentes tipos de datos asociados al monitoreo de aguas subterráneas, las estrategias de entrega de información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

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

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

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

Figura 31. Flujoograma general del almacenamiento de la información





INFORME FINAL

epam s.a. esp

Contrato No. 214 de 2010

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



INFORME FINAL

epam s.a. esp

Contrato No. 214 de 2010

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

ANEXOS



INFORME FINAL

epam s.a. esp

Contrato No. 214 de 2010

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



INFORME FINAL

epam s.a. esp

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

ANEXO 1. FORMATOS

Formato 1. Formulario Único Nacional de Inventario de Puntos de Agua

Formulario Único Nacional para Inventario de Puntos de Agua Subterránea. Includes sections for: 1. Información General, 2. Fuentes de Información, 3. Información del Punto, 4. Características Topográficas, Climáticas, Geomorfológicas y Geológicas, 5. Características de los Pozos y Aljibes.

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

Formato 1. Formulario Único Nacional de Inventario de Puntos de Agua (cont.)

Diseño del Pozo: Diámetro y ubicación de Filtros					
TRAMO	DIAMETRO	PROFUNDIDAD			
		D=	SE=	HASTA	
					m
					m
					m

Se anexa: Columna litológica Diseño del pozo Pruebas de bombeo Registros geofísicos Análisis químico

Características hidráulicas: Régimen de bombeo: _____ Horas / día _____ días / semana

Nivel medio del agua _____ m Tiempo de bombeo _____ Horas Tiempo desde el apagado de la bomba _____ minutos

Método de medida del nivel del agua: Sonda eléctrica Cinta métrica Estimado Transductor de presión-diver

Método de medida del caudal:

	Volumétrico (l/s)	Aforo volumétrico:			Caudal estimado: Volumen del sistema de almacenamiento m ³
		No.	VOLUMEN (l)	TIEMPO (s)	
Vertedero (l/s)					Tiempo de llenado _____ minutos
Microminimete (l/s)					
Estimado (l/s)					Caudal Estimado _____ l/s
Orificio (l/s)				Caudal (l/s): _____	
Manómetro					
Macromedidor					
Micromedidor					

6 CONSTRUCCIONES ADICIONALES DE LA CAPTACIÓN

Tipo de construcción	Díametro (m)	Largo (m)	Ancho (m)	Profundidad (m)	Capacidad (m ³)
Embalse					
Tanque					
Aberca					
Tubería		pulg			
Otro-Cual?					

7. CARACTERÍSTICAS DE LOS MANANTIALES

Tipo de manantial: Gateo Filtración Otro-Cual? _____

Permanencia: Perenne Estacional Intermitente Sin información

Medio de surgencia: Rasgo karstico Diaclasas o Fracturas Contacto Otro-Cual? _____

Observaciones: _____

8. PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS DEL AGUA

Método de muestreo: Manual Bombeo Otro-Cual? _____

Propiedades físico químicas: pH: _____ Conductividad Eléctrica (μS/cm): _____ Temperatura (°C): _____ SD²⁺ (mg/l): _____ Redox -En: _____

Propiedades Organolépticas: Color: Incoloro Amarillo Café Otro? _____ Apariencia: Clara Turbia Otra _____ Clor: Incolora Fetida Otra _____

Muestra para laboratorio: SI NO

Tipo de análisis: Físico-químico Microbiológico Isotópico

Lugar de muestreo: Boca de pozo Tanque Llave Nacimiento Otro

Problemas de calidad: _____

9. USOS DEL AGUA

Actividad económica:

Uso del agua	Descripción del uso del agua:	No. de usuarios	Tipo de Cultivo
Abastecimiento público			
Uso doméstico			
Agrícola	Área regada, ha		
Pecuario	Tipo de animales	Número de animales:	
Recreativo		Usuarios / año	
Industrial	¿Cual?		
Transporte			
Otro	¿Cual?		

Fuentes de abastecimiento

Fuente principal de abastecimiento: _____

Fuentes secundarias de abastecimiento: _____

Frecuencia de abastecimiento (racionamiento): _____



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

Formato 1. Formulario Único Nacional de Inventario de Puntos de Agua (cont.)

10. DIAGNÓSTICO SANITARIO DE LA CAPTACIÓN							
Existe una letrina			Distancia				
Charco de agua estancada					m		
Basura, criaderos o estiércol de ganado a su alrededor?					m		
Borde o grieta que permita el ingreso de agua superficial al mismo?	SI	NO			m		
Condición del punto							
Tiene cubierta adecuada			Piso de cemento alrededor de la captación		SI	NO	
Tiene sello sanitario			Cercos alrededor de la instalación adecuada		SI	NO	
Fuentes puntuales de contaminación:							
			Distancia, m				
	Cementerio						
	Estación de servicio						
	Lavadero de carros y motos						
	Pozo abandonado						
	Residuos sólidos						
	Residuos peligrosos						
	Campo de infiltración						
	Plantas de sacrificio						
	Lagunas de oxidación						
	Otro- Cual?						
Residuos sólidos:							
Origen	Doméstico	Industrial	Agrícola	Genadería	Hospitalario	Minero	Otro-Cual?
Disposición	Residuos especiales	Incineración	Compostaje	Botadero cielo abierto	Reciclaje	Otro-Cual?	
Observaciones							
11. DATOS GRAFICOS				Croquis - Acceso al pozo			
Fotos: _____		Fecha: _____					
Acceso al predio							
12.OBSERVACIONES GENERALES							



FORMULARIO ÚNICO NACIONAL PARA EL INVENTARIO DE PUNTOS DE AGUA SUBTERRÁNEA

INSTRUCTIVO PARA DILIGENCIAR EL FORMULARIO

INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES -IDEAM
Subdirección de Hidrología

INSTITUTO COLOMBIANO DE GEOLOGÍA Y MINERÍA- INGEOMINAS Subdirección de
Recursos del Subsuelo
MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL- MAVDT
Viceministerio de Ambiente

Bogotá, D.C., Octubre de 2009

INSTRUCCIONES PARA DILIGENCIAR EL FORMULARIO DE INVENTARIO DE PUNTOS DE AGUA SUBTERRÁNEA.

1. INFORMACIÓN GENERAL

Nombre del proyecto. El nombre del proyecto está relacionado con la finalidad u objetivo del mismo y por consiguiente su ubicación. Por ejemplo. Evaluación o Exploración de aguas subterránea en el Cañón de San Jacinto, Departamento de Bolívar. Nombre de la zona o subzona de estudio. Ejemplo. Subzona 1. Guanentá, Santander.

Diligenciado por. Nombre y Apellido de quien realiza el inventario.

Fecha. Día/mes/año de la visita.

Consecutivo: Corresponde al número de la plancha 1:25.000 más un número consecutivo en serie ascendente asignado a cada punto de agua en la medida que se realice el inventario en esa plancha. Ej. 128-III-C-125.

Tipo de punto. Seleccionar una de las tres opciones a la que se refiera.

Pozo. Agujero o perforación, excavado o taladrado en la tierra para extraer agua.

Aljibe. Excavación manual de gran diámetro, que alcanza la tabla de agua o nivel freático y se profundiza por debajo de esta para acumular agua subterránea que está disponible para ser bombeada.

Manantial. Surgencia superficial de agua de origen subterráneo que se produce a través de planos de estratificación, discontinuidades de las rocas como fracturas, grietas o cambios de litología en lugares donde la superficie topográfica corta al nivel freático.

Piezómetro. Pozo de observación en el que se pueden medir el nivel freático o la altura piezométrica, al igual que cualquier parámetro físico químico o bacteriológico de interés.

Condiciones del punto.

Productivo. Punto de agua en uso.

Reserva. Punto de agua habilitado que no se encuentra en uso en el momento.

Abandonado. Punto de agua no utilizado permanentemente.

Inactivo. Punto de agua no habilitado en el momento.

Sellado. Punto de agua no utilizado permanentemente pero debidamente clausurado (relleno con material impermeable y su sello).

Monitoreo. Punto de agua utilizado para medir niveles o calidad de agua subterránea.

Otro-Cuál.

2. FUENTES DE INFORMACIÓN.



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

Estudios anteriores. Al seleccionar esta fuente en observaciones referencie el estudio. **Información suministrada por.** Datos de la persona que proporciona la información en el momento del inventario.

Propietario Persona Natural. Información del dueño del predio.

Propietario Persona Jurídica. Información del dueño del predio.

3. INFORMACIÓN DEL PUNTO.

Legalización del punto. Trata de los puntos que no cuentan con concesión para su aprovechamiento o que por el contrario han recibido permiso por parte de la autoridad ambiental. **Identificación del punto.**

Plancha: Corresponde al número de la plancha 1:25.000 más un número consecutivo del punto de agua para la plancha específica. Ejemplo 135-II-A-25;135-IV-A-25.

Localización del punto. Consignar la información solicitada acerca del punto de agua. **Coordenadas.** Registrar los datos de coordenadas geográficas y/o planas. Elipsoide de referencia y/u origen de las coordenadas planas.

4. CARACTERÍSTICAS TOPOGRÁFICAS, CLIMÁTICAS, GEOMORFOLÓGICAS Y GEOLÓGICAS.

Topografía: Seleccione el rasgo morfológico sobre el cual se localiza el punto de agua. **Depresión.** Sector bajo de la superficie terrestre y rodeado de relieves montañosos o más altos. **Planicie.** Llanura, extensión de terreno nivelada y sin grandes accidentes. **Altiplanicie.** Relieve plano o suavemente ondulado situado a una altura considerable. **Piedemonte.** Zona de pendiente suave al pie de una cadena montañosa. Está constituida fundamentalmente por acumulaciones detríticas procedentes de la erosión de los relieves vecinos. **Ladera.** Declive de un monte o una montaña o relieve abrupto, parte lateral de un monte o montaña.

Colina. Elevación natural del terreno, menor que una montaña y de laderas suaves.

Geoforma: Consignar la forma del relieve en la cual se haya el punto de agua.

Abanico aluvial. Depósitos en abanico dejados por corrientes tributarias en valles de menor inclinación o en los contactos con las cuencas de sedimentación fluvial. Significado muy similar al de "alluvial cones"

Cauce aluvial. Lecho de los ríos y arroyos por donde corren las aguas.

Llanura aluvial. Zona llana que bordea un río y la cual ha sido formada por la depositación de aluviones.

Terraza. Diferentes niveles del terreno originados por la acción de los ríos

Duna. Formaciones sedimentarias de origen eólico formadas por materiales detríticos de grano fino (arenas). Pueden formarse en regiones interiores o en las costas. Presentan típicamente, una cara de barlovento, con menor pendiente, y una de sotavento, con mayor pendiente. En algunas costas pueden formarse cordones de dunas o sistemas dunares paralelos a la costa. Las dunas vivas o móviles son capaces de desplazarse. También llamadas médanos.

Dolina. Depresión a modo de boca redonda u ovalada, más ancha que profunda y sin desagüe visible, propia de las zonas calizas.

Playa. Ribera del mar, de un lago o de un río, con suelo arenoso y superficie plana y poco pendiente.

Condición climática. Se define como los períodos del año en los que las condiciones climáticas imperantes se mantienen en una determinada región, dentro de un cierto rango. En las regiones de la tierra cercanas al ecuador las estaciones son sólo dos, la estación seca y la lluviosa ya que en ellas varía drásticamente el régimen de lluvias, pero no así la temperatura.

Litología. Descripción del tipo de rocas o sedimentos aflorantes.

Unidad geológica. Nombre de la formación geológica sobre la cual se encuentra el punto de agua.

5. CARACTERÍSTICAS DE LOS POZOS Y ALJIBES

Se refiere a datos inherentes a la construcción del pozo y del aljibe.

Datos de la construcción Fecha. Fecha de la perforación. **Perforador.** Nombre del constructor

Diámetro exterior. Espacio anular externo de la tubería de revestimiento del pozo, dado generalmente en pulgadas.

Diámetro interior. Espacio anular interno del material de revestimiento del aljibe, dado generalmente en metros.



Diámetro de la perforación. Espacio anular de la perforación sin el revestimiento, dado generalmente en pulgadas.

Profundidad. Longitud o distancia vertical desde superficie hasta el fondo del pozo o aljibe dada en metros.

Largo. La dimensión más larga de un aljibe no redondo. **Ancho.** La dimensión más corta de un aljibe no redondo. **Está colapsado.** Profundidad a partir de la cual se obstruyó el pozo.

Está colmatado. Profundidad hasta la cual está sedimentado el pozo o aljibe. Depositación de partículas finas tales como arcillas o limo en la superficie y en los poros de un medio poroso permeable, por ejemplo el suelo, y que tiene como efecto una reducción de la permeabilidad.

Material de revestimiento.

Material con el que se entubó el pozo o recubrió el aljibe, según corresponda.

Acero y tipo. Al carbón por ejemplo.

Galvanizado. Hierro.

Ninguno. Hueco abierto sin revestir

Características de explotación

Método de extracción del agua: En general, una bomba se utiliza para incrementar la presión de un líquido añadiendo energía al sistema hidráulico, para mover el fluido de una zona de menor presión o altitud a otra de mayor presión o altitud.

Bomba sumergible. Es una bomba que tiene un impulsor sellado a la carcasa. El conjunto se sumerge en el líquido a bombear. La ventaja de este tipo de bomba es que puede proporcionar una fuerza de elevación significativa pues no depende de la presión de aire externa para hacer ascender el líquido. Bomba manual. Es un dispositivo que sirve para elevar el agua. El funcionamiento de las bombas manuales se basa en dos principios: la aceleración y el desplazamiento. Las bombas centrífugas aceleran el agua y le dan presión, mientras que en las bombas de pistón la presión se obtiene por el desplazamiento del agua.

Las bombas manuales más conocidas son las de pistón y la de tipo rosario.

La *Bomba de Pistón* cuenta con dos válvulas de retención que pueden ser hechas de cuero, jebes, bolillas o juntas metálicas. Al subir el pistón se abre la válvula de pie y el agua ingresa; bajamos el pistón y la válvula de pie se cierra y se abre la válvula superior expulsando el agua hacia la superficie.

La *Bomba Rosario* es útil cuando se requiere extraer agua de pozos de poca profundidad. Consiste en una cuerda con tapones cada cierto tramo, la que se hace girar con una manija. En la medida que gira la cuerda los tapones capturan una pequeña columna de agua que llevan hacia la superficie. **Molino de viento.** Aerogenerador accionando en forma mecánica un pistón. Es el tipo más corriente de aerogenerador eólico para bombear agua. El motor está conectado, directamente o a través de una caja de engranajes, por medio de un excéntrico y una varilla metálica que acciona el pistón de la bomba.

Compresor. El compresor de aire utiliza el aire comprimido para extracción del agua.

Surgencia natural. Fuente cuya agua proviene de un acuífero artesiano, generalmente a través de alguna fisura u otro tipo de abertura del lecho confinante que cubre el acuífero.

Profundidad del punto de succión (m): Dimensión desde la superficie hasta el punto de succión o aspiración del agua a través del sistema de bombeo instalado.

Características hidráulicas

Régimen de bombeo: Número de horas por día en las que se bombea el pozo o aljibe.

Nivel medido del agua (nivel de agua subterránea). Distancia desde el terreno hasta el punto donde aparece el agua, dado generalmente en metros. Elevación, en un lugar y momento dados del nivel freático o superficie piezométrica de un acuífero.

Los niveles de agua subterránea medidos en cualquier captación deberán ser reportados con respecto al nivel del terreno.

Método de medida: Entre los dispositivos de medida de los niveles, están: **Sonda eléctrica.** Medidor eléctrico de dos hilos que cierran circuito al tocar el electrodo el agua. **Cinta métrica.** El nivel del agua se mide desde la superficie con un indicador de profundidad. **Estimado.** Medida aproximada de la profundidad del nivel del agua.

Transductor de presión o Diver. Instrumentos para el monitoreo continuo de los niveles de agua subterránea en pozos o piezómetros. El sensor instalado a una profundidad en el pozo registra los cambios de presión ejercido por una columna de agua cuya longitud inicial está dada por la distancia entre el nivel estático inicial y la profundidad a la cual se instaló el sensor.



Medición de caudales

Volumétrico (l/s). Recipiente de capacidad conocida que se llena en un tiempo determinado. Medida dada generalmente en litros por segundo.

Vertedero (l/s). O aliviadero es una estructura hidráulica destinada a permitir el paso, libre o controlado, del agua en los escurrimientos superficiales o en la descarga de las aguas subterráneas. Medida dada generalmente en litros por segundo.

Micromolinete (l/s). O molinete enano, consiste básicamente de un arreglo geométrico de copas sujetas a un eje vertical que al ser introducido de forma normal al fluido en movimiento, gira un número de vueltas proporcional a la velocidad del fluido. Instrumento para medir la velocidad del agua en un punto. Este término se aplica tradicionalmente a instrumentos con cazoletas o hélices. Medida dada generalmente en litros por segundo.

Estimado (l/s). Cálculo aproximado del caudal. Medida dada generalmente en litros por segundo. **Orificio.** Aro instalado en la tubería de descarga de un pozo el cual permite medir el caudal del mismo a través de una ecuación que relaciona la altura piezométrica medida en la descarga y el caudal previamente calibrado en el laboratorio. Se utiliza en la descarga de pozos cuyo caudal es mayor de 10 l/s.

Manómetro (de burbuja). Manómetro que utiliza un sistema de gas para medir el nivel del agua. **Aforo volumétrico:** Medición de caudal en litros por segundo (l/s), resultado de la suma de varias mediciones.

Aforo de caudales. Conjunto de operaciones para determinar el caudal en un curso de agua para un nivel observado.

Caudal. Volumen de agua que fluye a través de una sección transversal de un río o canal en la unidad de tiempo. El caudal obtenido en el pozo principal se mide normalmente haciendo pasar el flujo por una restricción, para la cual se conoce la curva de calibración. En caso de no poder contarse con dispositivos semejantes, puede utilizarse un recipiente previamente graduado en el que se medirá el tiempo de llenado del mismo.

Caudal estimado. Resultado del volumen del sistema de almacenamiento y el tiempo de llenado del mismo.

6. CONSTRUCCIONES ADICIONALES DE LA CAPTACION.

Tipo de construcción.

Embalse. Emplazamiento, natural o artificial, usado para el almacenamiento, regulación y control de los recursos hídricos.

Tanque. Los **tanques de agua** son un elemento fundamental en una red de abastecimiento de agua potable, para compensar las variaciones horarias de la demanda de agua potable. Pueden ser públicos, cuando están localizados de forma tal en la ciudad que pueden abastecer a un amplio sector de esta; privados, cuando se encuentran al interior de las viviendas, o en el terreno de un edificio de apartamentos, y sirven exclusivamente a los moradores de este. Pueden estar enterrados, apoyados sobre el suelo o elevados. **Alberca.** Se refiere a un tipo de construcción bien excavada en tierra, bien realizada con fábrica de ladrillo, tapial o mampostería, en forma de estanque para almacenar agua, principalmente la destinada a regadío. Hoy en día, se construyen balsas de gran tamaño, con materiales modernos, para la distribución de agua tanto para regadío como para abastecimiento, a modo de pequeños embalses.

7. CARACTERÍSTICAS DE LOS MANANTIALES.

Tipo de manantial. De acuerdo con su modo de emerger a superficie y según la naturaleza de los conductos por los que corre el agua.

Goteo. Surgencia superficial de agua de origen subterráneo por medio de gotas.

Filtración. Cuando el agua se introduce en la tierra a través de arenas y gravas.

Permanencia. El caudal de agua depende de la estación del año y del volumen de las precipitaciones.

Manantial perenne. Es un manantial cuyo flujo de agua es continuo en el tiempo.

Manantial estacional. El manantial estacional es aquel que fluye solamente en condiciones de clima húmedo, con precipitación de lluvia abundante.

Manantial intermitente. También llamado manantial episódico o periódico es aquel cuyo flujo de agua normalmente ocurre en espacios cortos de manera más o menos regular.



Medio de surgencia. Según la naturaleza de los conductos por los que corre el agua. **Rasgo kárstico.** Son formas en la superficie que aparecen en regiones calizas como resultado del ataque químico del agua con anhídrido carbónico disuelto a las calizas, que provoca su destrucción. **Fractura.** O fisura, en los que el agua se aloja siguiendo diaclasas, fallas o planos de exfoliación. **Contacto.** Unión de dos unidades de permeabilidad diferente.

8. PARÁMETROS FÍSICO QUÍMICOS

Propiedades físico químicas:

pH. Concentración de hidrogeniones.

Conductividad eléctrica (uS/cm). Es la capacidad de un agua para conducir electricidad, medida en microsiemens por centímetro. La conductividad es una medida de la resistencia que opone el agua al paso de la corriente eléctrica entre dos electrodos impolarizables sumergidos en la misma. La conductividad del agua da una buena apreciación de la concentración de los iones de disolución y una conductividad elevada se traduce en una salinidad elevada o en valores anómalos de pH.

Temperatura (°C). Potencial calorífico referido a un cierto origen, por ejemplo la temperatura de fusión del hielo. Medida en grados centígrados.

Sólidos disueltos totales. El agua previamente filtrada se evapora en estufa a 105°C durante 4 h, por pesada se determina el total de sólidos disueltos. Unidades en g o mg/l.

Redox-Eh. Potencial redox (rH). Índice, análogo al pH, que proporciona una medida cuantitativa del potencial de oxidación o reducción de un medio.

Propiedades organolépticas: son el conjunto de descripciones de las características físicas que tiene la materia en general, como por ejemplo su sabor, textura, olor color. Todas estas sensaciones producen al comer una experiencia agradable o desagradable.

Color. Capacidad de absorber ciertas radiaciones del espectro visible. Hay que distinguir lo que se llama color aparente, el que presenta el agua bruta y el verdadero, que es el que presenta cuando se le ha separado la materia en suspensión. Se mide el color en unidades de Pt-Co. **Apariencia.** La turbidez de un agua es provocada por la materia insoluble, en suspensión o dispersión coloidal. Es un fenómeno óptico que consiste esencialmente en una absorción de luz combinado con un proceso de difusión. La mayoría de las aguas residuales industriales tienen valores elevados de turbidez. La turbidez se mide en unidades nefelométricas de turbidez (NTU o UNF) por medida de la intensidad de la luz dispersada o en mg de SiO₂/l.

Olor. El olor y sabor están en general íntimamente relacionados. Existen solamente cuatro sabores fundamentales: ácido, salado, amargo y dulce, los olores pueden ser mucho más específicos. Las medidas de olores y sabores son estimativas, mediante procesos de dilución.

9. USOS DEL AGUA Descripción del uso del agua.

Abastecimiento público: sea urbano o rural, escriba el número de habitantes.

Uso Doméstico. Usan el agua menos de 10 usuarios. Escriba el número de usuarios.

Agrícola. El riego es la aplicación artificial de agua a terrenos con fines agrícolas. Contiene el área regada y el tipo de cultivo.

Pecuario. Número de animales que beben de la captación de agua y tipo de animales.

Industrial. Tipo de industria que utiliza el agua de la captación.

Recreativo. Tipo de fuente de recreación y usuarios por año.

Transporte. Agua utilizada para transporte de minerales y sustancias tóxicas.

10. DIAGNÓSTICO SANITARIO DE LA CAPTACIÓN

Residuos sólidos: Es cualquier objeto, material, sustancia o elemento sólido resultante del consumo o uso de un bien en actividades domésticas, industriales, comerciales, institucionales, de servicios, que el generador abandona, rechaza o entrega y que es susceptible de aprovechamiento o transformación en un nuevo bien, con valor económico o de disposición final. **Residuos domésticos.** La generación de residuos domésticos varía en función de factores culturales asociados a los niveles de ingreso, hábitos de consumo, desarrollo tecnológico y estándares de calidad de vida de la población. Los sectores de más altos ingresos



generan mayores volúmenes per cápita de los residuos, y estos residuos tienen un mayor valor incorporado que los provenientes de sectores más pobres de la población.

Residuos industriales. La cantidad de residuos que genera una industria es función de la tecnología del proceso productivo, calidad de las materias primas o productos intermedios, propiedades físicas y químicas de las materias auxiliares empleadas, combustibles utilizados y los envases y embalajes del proceso.

Residuo peligroso. Son residuos que por su naturaleza son inherentemente peligrosos de manejar y/o disponer y pueden causar muerte, enfermedad; o que son peligrosos para la salud o el medio ambiente cuando son manejados en forma inapropiada.

Residuos hospitalarios. La composición de los residuos hospitalarios varía desde el residuo tipo residencial y comercial a residuos de tipo médico conteniendo sustancias peligrosas.

Residuos mineros. Los residuos mineros incluyen los materiales que son removidos para ganar acceso a los minerales y todos los residuos provenientes de los procesos mineros.

Lagunas de Oxidación o Estabilización. Son excavaciones de poca profundidad en el cual se desarrolla una población microbiana compuesta por bacterias, algas y protozoos que conviven en forma simbiótica y eliminan en forma natural patógenos relacionados con excrementos humanos, sólidos en suspensión y materia orgánica, causantes de enfermedades tales como el cólera, el parasitismo, la hepatitis y otras enfermedades gastrointestinales. Es un método fácil y eficiente para tratar aguas residuales provenientes del alcantarillado sanitario.

Campo de oxidación o infiltración. Es una unidad de la fosa séptica donde se consigue oxidar el agua servida y eliminar por infiltración. Para lograr un óptimo funcionamiento del campo de oxidación, debe escogerse el camino con este objeto, realizando una prueba de infiltración, consiste en hacer varias excavaciones en el área determinada, todas estas de 30 x 30 cm. de sección por la profundidad proyectada para las zanjas de absorción (será menor que 90 cm). El campo de infiltración debe ubicarse aguas abajo del tanque séptico y de la trampa de grasas y debe ubicarse en suelos que permitan una absorción del agua residual a fin de no contaminar las aguas subterráneas.

Residuos agrícolas, forestales. Se conocen como residuos agrícolas y forestales, todos aquellos que se generan a partir de cultivos de leña o de hierba y los producidos en el desarrollo de actividades propias de estos sectores.

Residuos ganaderos. Son los producidos por los propios animales al usar la biomasa vegetal como alimento. Este tipo de residuo se incluye dentro del grupo de la biomasa animal, y puede ser originada por un animal vivo o uno muerto. En el primer caso, dan lugar a los estiércoles, purines o camas, y en el segundo, a los residuos de matadero. El aprovechamiento de estos residuos con fines energéticos necesita un tratamiento previo de descomposición de la materia orgánica en unas condiciones de operación específicas, y se obtiene lo que se conoce como biogás y que se utiliza como combustible.

Disposición:

Residuos especiales. Se refiere a residuos hospitalarios y peligrosos.

Compostaje. El compostaje o "composting" es el proceso biológico aeróbico, mediante el cual los microorganismos actúan sobre la materia rápidamente biodegradable (restos de cosecha, excrementos de animales y residuos urbanos), permitiendo obtener "compost", abono excelente para la agricultura.

Reciclaje. Una de las alternativas posibles para solucionar el problema de la contaminación ambiental que origina la basura, es el reciclaje o reciclamiento de materiales de desecho como el papel, el cartón, el vidrio, los metales y los alimentos. Es un proceso que consiste en someter de nuevo una materia o un producto ya utilizado a un ciclo de tratamiento total o parcial para obtener una materia prima o un nuevo producto.

Botadero a cielo abierto. Lugar donde se arrojan los residuos a cielo abierto en forma indiscriminada sin recibir ningún tratamiento sanitario. Sinónimo de vertedero, vaciadero o basurero.

Incineración. Es la combustión completa de la materia orgánica hasta su conversión en cenizas, usada sobre todo en el tratamiento de basuras. Tanto la incineración, como otros procesos de tratamiento de basuras a altas temperaturas son descritos como "tratamiento térmico".



INFORME FINAL

epam s.a. esp

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

Formato 2. Formato típico para informe de inspección

Formulario de inspección de pozos con secciones para: Datos Generales, Materiales, Instrumental y Pozo, Reparaciones, Prueba de Pozo de Control, y Datos de Observador/Revisor.



BIBLIOGRAFÍA

ALLER, L., BENNETT, T., HACKETT, G., PETY, R., LEHR, J., SEDORIS, H., NIELSEN, D., Y DENNE J. Handbook of suggested practices for the design and installation of ground-water monitoring wells. Dublin, Ohio: National Water Well Association. 1989.

BATISTA, E. Necesidad de la divulgación hidrogeológica para una óptima gestión de los recursos hídricos: El coste de la ignorancia y falta de información. En: Groundwater and Human Development. Barcelona. 2002

CEPIS, OPS, UK OVERSEAS DEVELOPMENT ADMINISTRATION. Monitoreo de la calidad de las aguas subterráneas: una evaluación de métodos y costos. Lima. 2001.

DINAMA. 2004. Guía para la toma, conservación y transporte de muestras de agua subterránea. Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente. Uruguay.

DOMENICO, P Y SCHWARTZ, F. W. 1998. Physical and chemical hydrogeology. Wiley, 502 pp.

EPA. 1985. Groundwater Monitoring Strategy. US Environmental Protection Agency. Washington.

EVERETT, L.G. 1983. Groundwater monitoring. Gen. Elec. Comp. New York.

FOSTER, S.; CAMINERO, D. 1994. Monitoreo de la calidad de las aguas subterráneas. Una evaluación de métodos y costos. CEPIS, British Geological Survey, OMS, OPS.

HEFNI, K. 1998. Groundwater monitoring of natural and artificial replenishment of aquifers and guidelines for special purpose network planning. Technical reports in hydrology and water resources. No. 58. WMO/TD - No.888.

HUGUETT, *et. al.* 1985. Mapa Hidrogeológico de Colombia. Escala 1:2.500.000. Ingeominas. Bogotá.

IAN. 1977. Hidrología Isotópica en Colombia - Instituto de asuntos Nucleares Bogotá.

ICONTEC. Guía para el monitoreo de aguas subterráneas GTC 30. Bogotá. 1996.

ICONTEC. (1996). Guía para el muestreo de aguas subterráneas NTC-ISO 5667-11. Bogotá. 1996

ICONTEC. Especificaciones técnicas para la construcción de un pozo de monitoreo para aguas subterráneas. NTC 3948. Bogotá. 1996.

ICONTEC. Guía acerca del muestreo de agua subterránea en sitios contaminados. NTC-ISO-5667-18. Bogotá. 2003.

IDEAM. Estudio Nacional del Agua. Bogotá. 2010.

IDEAM. Formulario Único Nacional de Inventario de Puntos de Agua. Consultable en página: <http://institucional.ideam.gov.co/descargas?com=institucional&name=pubFile465&downloadname=>



Formulario%20de_Inventario_Puntos_de_agua.pdf

KEHEW, A.E. Applied Chemical Hydrogeology. Prentice Hall. 368 pp. 2001.

MUSIKAR, R. Redes cuantitativas de seguimiento de las aguas subterráneas. En: Groundwater and Human Development. Barcelona. 2002.

NIELSEN, D. Practical handbook of ground-water monitoring. (2a. ed.) Chelsea, USA: Lewis Publishers, Inc. 1991.

MUSIKAR, R. Redes cuantitativas de seguimiento de las aguas subterráneas. En Groundwater and Human Development. 2002.

ORGANIZACIÓN METEOROLÓGICA MUNDIAL OMM. Guía De Prácticas Hidrológicas: Adquisición y Proceso de Datos, Análisis, Predicción y Otras Aplicaciones, OMM No. 168, Quinta edición. Ginebra. 1994.

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

TIMLIM, R., EVERETT, L. Establishment of Groundwater Quality Monitoring Programmes. Proc. of a Symposium of the American Water Resources Association Minneapolis. USA. 1978.

TORO, L. E., M. L. PERALTA, D. L. HERNÁNDEZ, B. E. ROJAS. M. A. ROBINSON, R. NEWBALL, C. A. HINCAPIÉ, A. G. PADILLA, H. I. GACHA, G. A. MYLES, T. S. WILLIAMS, 1999. Plan de manejo de las aguas subterráneas de la isla de San Andrés, 2000 - 2009. Documento interno de CORALINA. San Andrés. 2000.

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

VARELA, M. Redes de observación y control de aguas subterráneas. España. 2000.

VARGAS, M.C., BOBADILLA, L. s.f. Guías para el monitoreo de calidad de aguas subterráneas. Ingeominas. Sin publicar.

VARGAS, O. Propuesta para la formulación, diseño e implementación de la Red básica nacional de seguimiento y muestreo de aguas subterráneas. IDEAM. Bogotá. 2001.

VARGAS, N. Monitoreo de aguas subterráneas. Subdirección de Hidrología, IDEAM. Bogotá. 2004.

VARGAS, O. Las aguas subterráneas también son nuestra responsabilidad. Primer taller de socialización Programa Nacional de Monitoreo del Recurso Hídrico. IDEAM. Bogotá. 2010.

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

VRBA, J.; SOBLSEK. P. Groundwater monitoring. En: Geology and the Environment, an International Manual in Three Volumes. UNESCO. UNEP. Paris. 1988.



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

VRBA, J. The role of groundwater Quality Monitoring in the Strategy of Groundwater protection. Proceedings of the XXX IAH Congress. Balkema/Rotterdam. 2000.

VRBA, J. Groundwater Quality Monitoring Networks. Praga. 2002.

WARD, R.C. Regulatory Water Quality Monitoring. Water Res. Bull 15. 1979.

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

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

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

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



INFORME FINAL

epam s.a. esp

Contrato No. 214 de 2010

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