



**GOBIERNO DE CHILE
MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS
DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS
DIVISIÓN DE ESTUDIOS Y PLANIFICACIÓN**

CRITERIOS PARA IMPLEMENTACIÓN DE REDES DE MONITOREO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

INFORME TÉCNICO

SDT N° 420

REALIZADO POR:

División de Estudios y Planificación

Santiago, Diciembre 2019

INDICE

1 INTRODUCCIÓN	3
1.1 OBJETIVOS.....	4
1.1.1 Objetivo General.....	4
1.1.2 Objetivos Específicos.....	4
2 SÍNTESIS BIBLIOGRÁFICA	5
2.1 DIAGNÓSTICO Y CLASIFICACIÓN DE SECTORES ACUÍFEROS, 2009.	5
2.1.1 Objetivos del estudio.....	5
2.1.2 Metodología	5
2.2 DISEÑO ÓPTIMO DE UNA RED DE MONITOREO PIEZOMÉTRICA PARA EL SISTEMA ACUÍFERO DE VALLES CENTRALES DE OAXACA, 2010.	6
2.2.1 Objetivos del estudio.....	6
2.2.2 Metodología	7
2.3 MEJORAMIENTO Y AMPLIACIÓN DE RED DE AGUAS SUBTERRÁNEAS, REGIONES VII A X, DGA, 2010.....	8
2.3.1 Metodología	8
2.3.2 Criterios generales para la definición de una nueva red:	8
2.4 DIAGNÓSTICO DE LA RED DE AGUAS SUBTERRÁNEAS REGIÓN DEL LIBERTADOR BERNARDO O` HIGGINS, 2011, DGA, SIT 227.	9
2.4.1 Objetivo del estudio	9
2.4.2 Metodología	9
2.4.3 Limitaciones de la red.....	10
2.4.4 Criterios de selección para realizar modificaciones a la red	10
2.5 PROPOSED GROUNDWATER MONITORING NETWORK, EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY, 2011.	10
2.5.1 Selección de sitios para el monitoreo de aguas subterráneas	10
2.5.2 Red propuesta.....	11
2.5.3 Frecuencia de la toma de muestras	12
2.5.4 Calidad del agua subterránea	12
2.6 MÉTODO PARA EL DISEÑO ÓPTIMO DE REDES DE MONITOREO DE LOS NIVELES DE AGUA SUBTERRÁNEA, UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE MÉXICO, 2011.....	13
2.6.1 Procedimientos.....	13
2.6.2 Marco estadístico:	14
2.6.3 Marco de modelación:.....	15
2.6.4 Metodología de diseño optimo espacio-temporal de una red de monitoreo piezométrica 16	16
2.6.5 Caso de estudio sintético	18
2.6.6 Resultados	18
2.6.7 Conclusiones	18
2.7 ANÁLISIS CRÍTICO, RED DE NIVELES DE AGUAS SUBTERRÁNEAS DEL ACUÍFERO DE COPIAPÓ, DGA, 2012.....	19
2.7.1 Metodología	19
2.7.2 Propuesta de una red mejorada	20
2.7.3 Conclusiones	21

2.8 ANÁLISIS CRÍTICO DE LAS REDES HIDROMÉTRICAS, REGIONES V A VII Y REGIÓN METROPOLITANA, DGA, 2013.	22
2.8.1 Idoneidad referida a ubicación	22
2.8.2 Análisis por completitud de datos.....	23
2.8.3 Propuesta de red aguas subterráneas	23
2.9 ANÁLISIS CRÍTICO DE LAS REDES HIDROMÉTRICAS, ZONA SUR, DGA, 2014.....	24
2.9.1 Pasos identificados	24
2.9.2 Evaluación de la red actual.....	24
2.9.3 Propuesta de red hidrométrica	25
3 SÍNTESIS DE CRITERIOS PARA ESTABLECER REDES DE MONITOREO DE NIVELES DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	27
3.1 CRITERIO ESPACIAL	27
3.2 CRITERIO GEOESTADÍSTICO.....	27
3.3 CRITERIO ESTADÍSTICO.....	28
4 CONCLUSIONES	29
5 BIBLIOGRAFÍA	30

ILUSTRACIONES

Figura 1. Diseño utilizando modelos numéricos, método de Herrera y Pinder.... 17

TABLAS

Tabla 1. Recomendación de densidad de monitoreo (km ² /punto) en acuíferos. ...	6
Tabla 2. Métodos de optimización de monitoreo a largo plazo por niveles de complejidad	8
Tabla 3. Datos sobre monitoreo en estamos miembros de la EEA.....	12

1 INTRODUCCIÓN

El acceso al agua en calidad y cantidad es una preocupación a nivel mundial, ya que esta es impulsora del desarrollo productivo de cualquier sociedad. Las variaciones tanto en cantidad como en calidad son procesos que toman largos periodos, sin embargo, en lapsos más o menos extensos, cambios puntuales que no tienen un adecuado monitoreo, pueden alcanzar áreas significativas sin que se detecten impactos sobre los acuíferos.

El monitoreo de las aguas subterráneas es una de las acciones más importantes para determinar la disponibilidad y la evolución de estas, el cual debe realizarse constantemente por periodos largos de tiempo. Los resultados de dichos análisis servirán para establecer y mejorar las estrategias y políticas de protección, conservación y aprovechamiento del recurso hídrico.

El desarrollo de programas que permitan monitorear la respuesta de un acuífero y su tendencia en cuanto a calidad y niveles a lo largo del tiempo son indispensables para lograr una gestión adecuada del recurso hídrico subterráneo. Sin embargo, los recursos económicos son una limitante en la recopilación de información que permita estimar con certeza la evolución de estos parámetros.

Se requiere de métodos para el diseño de redes de monitoreo de niveles y calidad del agua subterránea que faciliten utilizar los recursos disponibles de manera efectiva, ya que contar con información espacio-temporal suficiente y adecuada, evitando duplicidad de esfuerzos y reduciendo costos, es indispensable.

El presente informe se vincula con la Estrategia Nacional de recursos hídricos a partir de los ejes:

- Gestión eficiente y sustentable:

Donde uno de los temas planteados es “establecer una política que incentive la gestión integrada de los recursos hídricos (GIRH)”, la cual debe considerar tanto el agua subterránea como superficial, las formas y los ciclos de interacción entre ambas, entre otros aspectos. Así, la GIRH exige contar con un conocimiento profundo de la disponibilidad y calidad del agua, de las condiciones en que se aprovecha ésta y de los objetivos de cada cuenca. Una vez establecido lo anterior, se pueden identificar las acciones y medidas deseables y viables para cada cuenca en particular, a través de instancias de coordinación y participación entre los actores involucrados.

- Enfrentar la escasez:

Existen varias zonas del país en la cuales durante los últimos años se ha experimentado situaciones de sequía, para las cuales se propone, entre otras acciones la conducción de caudales desde cuencas con disponibilidad del recurso hacia zonas del país que presentan escasez.

- Equidad social:

El reto en este eje es el abastecimiento de agua potable a las comunidades rurales semi concentradas, mejorando la calidad de vida de estas.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo General

Recopilación de criterios para la elaboración e implementación de redes optimas de monitoreo de niveles y calidad de aguas subterráneas.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Identificar los criterios utilizados en los diferentes estudios realizados por la DGA sobre redes de monitoreo.
- Valorar criterios internacionales implementados en redes de monitoreo.
- Disponer de una compilación de criterios que sustenten futuros análisis para el diseño de redes de monitoreo de niveles de aguas subterráneas.

2 SÍNTESIS BIBLIOGRÁFICA

Se presenta en esta sección un resumen de las principales fuentes de información consideradas de experiencias internacionales y nacionales sobre el monitoreo de aguas subterráneas, a fin de dar una visión global a la Dirección General de Aguas y orientar la toma de decisiones en este tema.

Se ordena este apartado cronológicamente:

2.1 Diagnóstico y clasificación de sectores acuíferos, 2009.

2.1.1 Objetivos del estudio

El estudio tuvo por motivación central desarrollar las bases metodológicas para la caracterización, en términos de calidad química, de los cuerpos de aguas subterráneas del país, de modo de establecer con posterioridad criterios para su control, gestión y protección.

Se realizó además una propuesta de monitoreo para los acuíferos en estudio basados en bibliografía especializada, así como en la experiencia del consultor.

2.1.2 Metodología

Establecen criterios de monitoreo para redes de calidad de aguas subterráneas que se recogen a continuación y que son de interés para el análisis de criterios para establecer redes de monitoreo de niveles.

Es posible establecer recomendaciones respecto a la densidad de puntos de muestreo, considerando tanto la representatividad espacial como los impactos antrópicos reflejados en el grado de explotación del acuífero.

Se plantea una clasificación de la densidad de puntos de muestreo en función de la condición del acuífero (Tabla 1), pudiendo ser este sobreexplotado o sustentable según se describe a continuación:

- Sobreexplotado
 - Niveles piezométricos poseen una tendencia temporal sostenida a la disminución
 - Poseen limitaciones a la explotación según resoluciones de la DGA.
- Sustentable:
 - Niveles no han disminuido en el tiempo
 - Niveles muestran un comportamiento más o menos constante en el tiempo.
 - No posee limitaciones a la explotación según resoluciones de la DGA.

Tabla 1. Recomendación de densidad de monitoreo (km²/punto) en acuíferos.

Condición del acuífero		Óptima	Regular	Deficiente
Sin intrusión salina	Sobreexplotada	Menor a 25*	Entre 25 y 150	Mayor a 150
	Sustentable	Menor a 100*	Entre 100 y 200	Mayor a 200
Con intrusión salina	Sobreexplotada	Menor a 5**	Entre 5 y 15	Mayor a 15
	Sustentable	Menor a 10**	Entre 10 y 20	Mayor a 20

Los puntos de control deben ser distribuidos convenientemente en el área de estudio de modo de permitir análisis espaciales de los datos. Se clasificó la distribución espacial en: localizada, heterogénea y homogénea, según se muestra a continuación estableciendo que es deseable que una red de monitoreo sea homogénea.

- Localizado:
 - Puntos de control concentrados en un área muy pequeña con respecto al total del área del acuífero.
- Heterogénea:
 - Distribución no localizada y distribuida en diferentes densidades espacialmente.
- Homogénea:
 - Distribución con densidades más o menos constantes en todo el espacio del acuífero.

Las recomendaciones no deben aplicarse ciegamente, sino que deben considerar el modelo conceptual del funcionamiento del agua subterránea en el acuífero (RENTIER, y otros, 2006), es decir tomar en consideración las complejidades del acuífero y sus características geológicas e hidrogeológicas.

2.2 Diseño óptimo de una red de monitoreo piezométrica para el sistema acuífero de valles centrales de Oaxaca, 2010.

2.2.1 Objetivos del estudio

El objetivo general se basó en el diseño de una red óptima de monitoreo de los niveles piezométricos del agua subterránea del acuífero Valles Centrales de Oaxaca.

Los objetivos específicos fueron:

- Obtener información piezométrica y de propiedad hidrogeológicas a través de diferentes técnicas y métodos de campo.
- Realizar un modelo geo-estadístico, para obtener un variograma que represente la correlación espacial de los niveles piezométricos.
- Definir los puntos de estimación y de muestreo que permitan diseñar la red óptima de monitoreo.

2.2.2 Metodología

El diseño de monitoreo óptimo de agua subterránea a largo plazo, puede realizarse utilizando una variedad de enfoques. La eficacia y ventajas de los enfoques y técnicas generales dependerán de varios factores, entre los cuales se pueden mencionar:

1. La escala del programa de monitoreo (local, intermedio o regional).
2. El objetivo del programa de monitoreo (ambiental, detección o monitoreo para la limpieza y restauración).
3. El tipo de datos (estratigrafía superficial, niveles de agua o química del agua subterránea).
4. La naturaleza del proceso contaminante.
5. El estado estacionario vs la naturaleza transitoria de las propiedades cualitativas del agua subterránea.
6. Las metas cambiantes de un programa de monitoreo a largo plazo.
7. Las consideraciones institucionales, legales, entre otras.

La Tabla 2, presenta una clasificación basada en los niveles de complejidad, cantidad de datos o información requerida.

Tabla 2. Métodos de optimización de monitoreo a largo plazo por niveles de complejidad

Método	Cantidad de datos o información		
	Pocos	Intermedios	Muchos
Métodos basados en reglas			
Hidrogeológico	X		
De tendencias basados en reglas	X	X	
Métodos estadísticos			
Comparación de estadísticas	X	X	X
Detección de la tendencia	X	X	
Métodos geo estadísticos			
Método híbrido hidrogeológico-geo estadístico		X	X
Métodos probabilísticos			
Del filtro de Kalman			X
De simulación probabilística		X	X
Jerárquico		X	
Métodos de optimización matemática			
		X	X

2.3 Mejoramiento y ampliación de red de aguas subterráneas, regiones VII a X, DGA, 2010.

2.3.1 Metodología

Se recopiló toda la información disponible para los pozos ubicados en las regiones de estudio, se generó perfiles hidrogeológicos a fin de determinar las unidades captadas por los pozos y los niveles.

Posteriormente se realizó las equipotenciales aun teniendo en cuenta que las mismas no son representativas ya que no fueron medidas en un momento homogéneo.

2.3.2 Criterios generales para la definición de una nueva red:

- Que el pozo se ubique en una zona de fácil acceso.
- Se privilegió que el pozo sea de propiedad fiscal.
- Que el pozo se ubiquen cerca de los centros poblados y en los acuíferos definidos como importantes.
- Que el pozo tenga una profundidad mínima entre 15 y 50 m.
- Que el pozo tenga una productividad mayor a 10 l/s, de modo que no fuera una noria.
- Que el conjunto de pozos se distribuyan homogéneamente en cada región.

- Que se localicen lejos de las zonas de recargas importantes (ríos, esteros, etc.)
- En los casos de que el pozo escogido pertenezca a la fuente del CPA, se privilegió que el caudal de agua subterránea constituido fuera importante; ello debido a que la única información que se dispuso para estos pozos fue la coordenada, el propietario y el caudal.

Dicha red se compuso por grupo de pozos en sectores específicos. Es decir, en la definición de la red (antes de ir a terreno), se estableció que cada uno de los pozos estaría compuesto por un grupo de pozos, de modo que en la campaña de terreno se tuviera la posibilidad de escoger más de uno, en caso de que el pozo visitado no existiera, o no dieran el permiso, o no se pudiera medir, etc.

Con el objetivo de verificar en terreno los permisos, accesos, y posibilidad de medición de los pozos propuestos para que formen parte de la red de medición de agua subterránea, se llevó a cabo una campaña de terreno en cada una de las regiones en estudio.

Podría ser conveniente que en los sectores específicos donde se localizan pozos de privados que abastecen agua potable o empresas sanitarias, que gran parte del día se encuentran bombeando, se debiera considerar construir piezómetros para medición de niveles estáticos.

2.4 Diagnóstico de la red de aguas subterráneas región del Libertador Bernardo O`Higgins, 2011, DGA, SIT 227.

2.4.1 Objetivo del estudio

Efectuar un diagnóstico de la situación de la red de aguas subterráneas de la Región, desde el punto de vista de su operación y representatividad del acuífero.

2.4.2 Metodología

Se recopilan los antecedentes de los criterios utilizados en 1987 para el establecimiento de la red de monitoreo:

- el de eliminar los pozos repetitivos y cercanos,
- los que carezcan de registro continuo, o por inhabilitación del pozo.
 - Como resultado, se propuso ampliar la red 37 a 78 puntos de control, la cual hasta la fecha (2011) se ha mantenido.

2.4.3 Limitaciones de la red

- En terreno se identifican recurrentes problemas de accesibilidad al recinto de algunos puntos de control.
- No siempre se tiene un conocimiento acabado del régimen de bombeo de los pozos de control, lo cual lleva a incertidumbre en el momento de la medición respecto a si se trata de la medición del nivel estático o dinámico.
- Es recurrente el atrapamiento del instrumento de medición (pozómetro) entre los cables de los pozos que poseen bomba y que no tienen línea de aire.

2.4.4 Criterios de selección para realizar modificaciones a la red

Se propone los siguientes criterios de selección para evaluar y mejorar la red de monitoreo de niveles:

- Representatividad de los puntos de control en los acuíferos definidos por la DGA.
- Representatividad de los puntos de control según el grado de explotación y áreas de restricción.
- Accesibilidad a los puntos de control.
- Longitud y calidad del registro de niveles, continuidad y caracterización de la evolución temporal del nivel estático.

2.5 Proposed groundwater monitoring network, European Environment Agency, 2011.

2.5.1 Selección de sitios para el monitoreo de aguas subterráneas

Cuando se diseña una red de monitoreo de aguas subterráneas en cuanto a calidad y cantidad se deben tener en cuenta dos características importantes:

- El lento movimiento del agua subterránea con tiempos de residencia largos.
- El grado considerable de interdependencia entre la fisicoquímica y la química del agua y el material del acuífero.

El espaciamiento entre pozos de observación de calidad depende de la estrategia que se requiera, ya sea entre pozos regionales o nacionales, entre redes principales y temporarias, etc. Sin embargo dependiendo el fin para el cual la red será usada se debe aplicar el mismo criterio a todos los pozos.

La densidad de la red de observación en aguas subterráneas depende de:

- Tamaño del área o país.

- La complejidad geológica e hidrogeológica del área.
- El entorno geológico e hidrológico y el tamaño de los principales acuíferos.
- El uso del suelo.
- El acceso a las zonas de monitoreo y la posibilidad de acordar con los propietarios de las tierras.
- Existencia de otros sistemas de monitoreo.
- Objetivos y límites de tiempo de la red.
- Limitaciones financieras para el establecimiento de la red y la toma de muestras de agua.

Las necesidades generales para una red de monitoreo son:

- Se deben monitorear todos los principales acuíferos, la definición de los mismos depende de la información geológica y el conocimiento de los recursos hídricos de la zona.
- La distancia entre los pozos de observación dependerá de las condiciones geológicas.
- La red de monitoreo debiera estar basada en pozos de monitoreo existentes en el área de estudio, de los cuales se posible extraer información hidrogeológica; esto reducirá el costo en la instalación de pozos de observación.

Las zonas con alta capacidad de infiltración deben ser monitoreadas con mayor frecuencia.

Una estación de monitoreo de calidad de aguas debe ser capaz de identificar la composición general del agua subterránea con diferente tipo de contaminantes.

Es importante confirmar si los pozos elegidos en la red de monitoreo de la EEA, fueron diseñados y construidos de la misma manera, ya que solo así será posible comparar los resultados de todos los estados miembros.

2.5.2 Red propuesta

Para aguas subterráneas se propone lo siguiente:

1. La selección de estaciones de monitoreo debe ser basada en la red existente nacional.
2. Todos los acuíferos importantes a nivel nacional deben ser cubiertos de ser posible, la importancia de los acuíferos debe ser definida en cuanto a calidad, cantidad, extensión, uso actual o futuro del mismo.
3. Las estaciones de monitoreo seleccionadas dentro de estos acuíferos deben estar distribuidas en un patrón más o menos geométrico, y como una

regla, con una densidad de al menos 1 sitio de monitoreo por cada 20-25 km² de acuífero.

4. En casos especiales una red de monitoreo de densidad inferior es aceptable. Esto en sitios de grandes estructuras hidrogeológicas similares con bajos impactos, lo cual podría ser considerado para áreas kársticas.

Se muestra en la Tabla 3 el resumen de las medidas utilizadas en los estados miembros de la EEA.

Tabla 3. Datos sobre monitoreo en estados miembros de la EEA.

País	Número total de estaciones de monitoreo			Área total de agua subterránea (km ²)			Densidad de estaciones de monitoreo (Nº/km ²)		
	Medio poroso	Medio kárstico	Otro medio	Medio poroso	Medio kárstico	Otro medio	Medio poroso	Medio kárstico	Otro medio
Austria	1600	450		17000			11		
Dinamarca	1100			43216			39		
Finlandia	20		30	35		30	2		1
Francia	16112	2490	20480						
Alemania	2378	80	327	45900	13200	32245	19	165	190
Holanda	375		5	35000			93		
Noruega	21								
Portugal	74								
España	1147	408	1377	79258	54628	38644	69	134	28
Reino Unido	346	270	1920	13534	11004	75219	39	41	39

Modificada de: Proposed groundwater monitoring network, European environment agency.

El objetivo es diseñar un red de monitoreo estadísticamente representativa de la calidad y cantidad del agua subterránea. Por lo que los datos de la red de monitoreo presentada en la tabla 1, deberá ser evaluada estadísticamente. Estaciones de referencia deberán estar ubicadas en sitios donde no haya influencia de bombeo y otras actividades antropogénicas.

2.5.3 Frecuencia de la toma de muestras

Para una red de monitoreo de vigilancia, una frecuencia inicial de monitoreo de 2 veces por año puede ser aceptable. Idealmente un muestreo debe corresponder a la época de mayor nivel del agua subterránea, un segundo monitoreo cuando el nivel corresponda al menor, sin embargo se recomienda analizar las directrices para cada tipo de estrato.

2.5.4 Calidad del agua subterránea

El monitoreo del agua subterránea se puede dividir en 7 grupos, los cuales son:

1. Parámetros descriptivos

2. Iones mayores
3. Parámetros adicionales
4. Metales pesados
5. Sustancias orgánicas
6. Pesticidas
7. Microbios

2.6 Método para el diseño óptimo de redes de monitoreo de los niveles de agua subterránea, Universidad Autónoma de México, 2011.

El empleo del método de Herrera y Pinder (Herrera, 1998) para el diseño óptimo de redes de monitoreo de agua subterránea tiene varias ventajas. Por un lado, permite seleccionar tanto ubicaciones como tiempos de monitoreo de forma óptima además, con la información obtenida de la red de monitoreo, permite hacer estimaciones en espacio y tiempo, y utiliza un modelo de flujo y transporte, el cual sintetiza el conocimiento de las características del acuífero, de la dinámica del flujo subterráneo y de la problemática de calidad del agua subterránea que se tenga, así como del conocimiento de las leyes de la física.

Se presenta un caso sintético en el que la red se diseña para un solo tiempo, suponiendo que el flujo está en estado estacionario. Los resultados presentados indican que la metodología propuesta por Herrera y Pinder para el diseño de redes de monitoreo tiene buenas perspectivas para aplicarse exitosamente al diseño de redes de monitoreo de los niveles del agua.

2.6.1 Procedimientos

El método de Herrera y Pinder se propuso originalmente para monitoreo de calidad de agua y se divide en:

- Estimar la varianza del error de la estimación que se obtendría si se tomaran muestras de agua en diferentes pozos y tiempos de monitoreo.
- Escoger las posiciones y tiempos de monitoreo que minimizan una función de la varianza del error de la estimación, con los cuales se definen la red de monitoreo y su programa de muestreo.

En este trabajo se prueba una modificación de ese método para diseñar redes de monitoreo de los niveles del agua subterránea. Dicha modificación consiste en emplear la carga hidráulica en vez de la concentración, y por tanto un modelo de flujo en vez de un modelo de transporte, como en los dos procedimientos descritos anteriormente.

Tres puntos de vista han influenciado en el diseño de redes de monitoreo:

- En el primero de ellos, que llamamos marco hidrológico, la red y su programa de muestreo se definen por consideraciones que toman en cuenta solamente las condiciones hidrológicas del sitio, sin recurrir a técnicas estadísticas o probabilísticas avanzadas.
- El segundo propone el análisis de datos dentro de un marco estadístico y define la red de muestreo basado en inferencias obtenidas de los datos, éste se llama marco estadístico.
- Al último punto, el marco de modelación, en donde se utilizan modelos matemáticos del agua subterránea para determinar posiciones y frecuencias de muestreo.

2.6.2 Marco estadístico:

- Rouhani (1985): aumenta una red de monitoreo agregando muestras de pozos en lugares que minimizan la varianza del error de la estimación de una variable, calculada por medio de kriging. No involucra la frecuencia temporal del muestreo.
- Samper y Carrera (1990): presentan una comparación de diferentes métodos para el diseño de redes de observación basados en la implementación del kriging.
 - Método de inclusiones sucesivas: se prueban uno a uno y se selecciona el que minimiza la varianza.
 - Intercambios sucesivos óptimos: entre un conjunto dado de elementos para encontrar la mínima varianza. Este método aunque sub óptimo da buenos resultados, además de ser una metodología muy económica.
 - Enumeración total: se analiza por subconjuntos, hasta encontrar la incertidumbre deseada.
 - "Rama y limite": al contrario del anterior.
- Cameron y Hunter (2000): propusieron un método para reducir la redundancia espacial y temporal por medio de dos algoritmos.
- Nuñez et al. (2004): buscan optimizar redes de monitoreo del agua subterránea, considerando una reducción en la redundancia espacial y/o temporal.
- Kumar et al. (2005): diseñaron una red de monitoreo de la carga hidráulica basándose en la teoría de las variables regionalizadas.
- Faisal et al. (2007): optimizaron una red de monitoreo de carga hidráulica para estimación de balance de aguas subterráneas.

2.6.3 Marco de modelación:

- Al parecer, *Loaiciga (1989)* fue el primer autor que propuso un método para el diseño espacio-temporal de redes de monitoreo del agua subterránea en el que la redundancia espacial y temporal de una red de monitoreo se analizaron en conjunto. El método combina kriging con una ecuación de transporte estocástica.
- Para la optimización de la red, *Loaiciga* busca determinar dónde y cuándo muestrear, para minimizar la variancia del error de la concentración estimada (obtenida del sistema de kriging espacio-temporal) en las posiciones de interés, sujeto a constricciones de costo e insesgo. La determinación de un plan de muestreo óptimo se plantea como un problema de programación entera mixta.
- *Yangxiao et al. (1991)* combinaron el procedimiento de estimación de parámetros propuesto en un trabajo previo (*Van Geer et al., 1991*) con un método para el diseño de redes de monitoreo de los niveles del agua subterránea. El objetivo del diseño de la red de monitoreo es observar los cambios espaciotemporales de los niveles del agua causados por la extracción de agua subterránea.
- Se utiliza un modelo de flujo determinista, al que se le suma un error incierto con correlación espacial. Los autores proponen utilizar un Filtro de Kalman para estimar los parámetros de la ecuación de flujo (llamados parámetros deterministas) y los del modelo de la matriz de covarianza del error (llamados parámetros estocásticos). La calibración se realiza para un periodo en el que las condiciones estacionarias se cumplen y en la que todas las matrices necesarias en el algoritmo del Filtro de Kalman no cambian con el tiempo.
- *Herrera (1998)* propuso una metodología para el diseño óptimo espacio-temporal de redes de monitoreo de la calidad del agua subterránea. El método combina un Filtro de Kalman estático con un modelo de transporte estocástico para predecir la variancia del error de las concentraciones estimadas.
- Posteriormente, *Herrera et al. (2001)* aplicaron la metodología propuesta por *Herrera (1998)* en el diseño de una red de monitoreo de la calidad del agua para el acuífero Toms. Y en *Herrera y Pinder (2005)* incluyeron, además de la variancia, al coeficiente de variación como una medida de la incertidumbre.
- *Zhang et al. (2005)* diseñaron una red de monitoreo óptima de la calidad del agua subterránea, combinando un Filtro de Kalman y un algoritmo genético para reducir al máximo el coeficiente de variación en posiciones y tiempos establecidos.

2.6.4 Metodología de diseño óptimo espacio-temporal de una red de monitoreo piezométrica

El método que se propone es adecuado para optimizar redes de monitoreo de largo plazo, en casos en los que el acuífero ha sido investigado ampliamente y se cuenta con un modelo de flujo para el mismo.

La metodología se divide en dos procedimientos:

- 1) uno que se usa para estimar la carga hidráulica (en lo siguiente h) y la incertidumbre del error de esta estimación cuando se tienen datos de h en diferentes pozos y tiempos de monitoreo,
- 2) un método que escoge las posiciones óptimas de los pozos y los tiempos de muestreo que minimicen la predicción de la incertidumbre de h obtenida en el paso 1, con los cuales se definen la red de monitoreo y su programa de muestreo.

El algoritmo iterativo de optimización para la selección de las posiciones y tiempos de muestreo se explica diagramáticamente en la **Figura 1**.

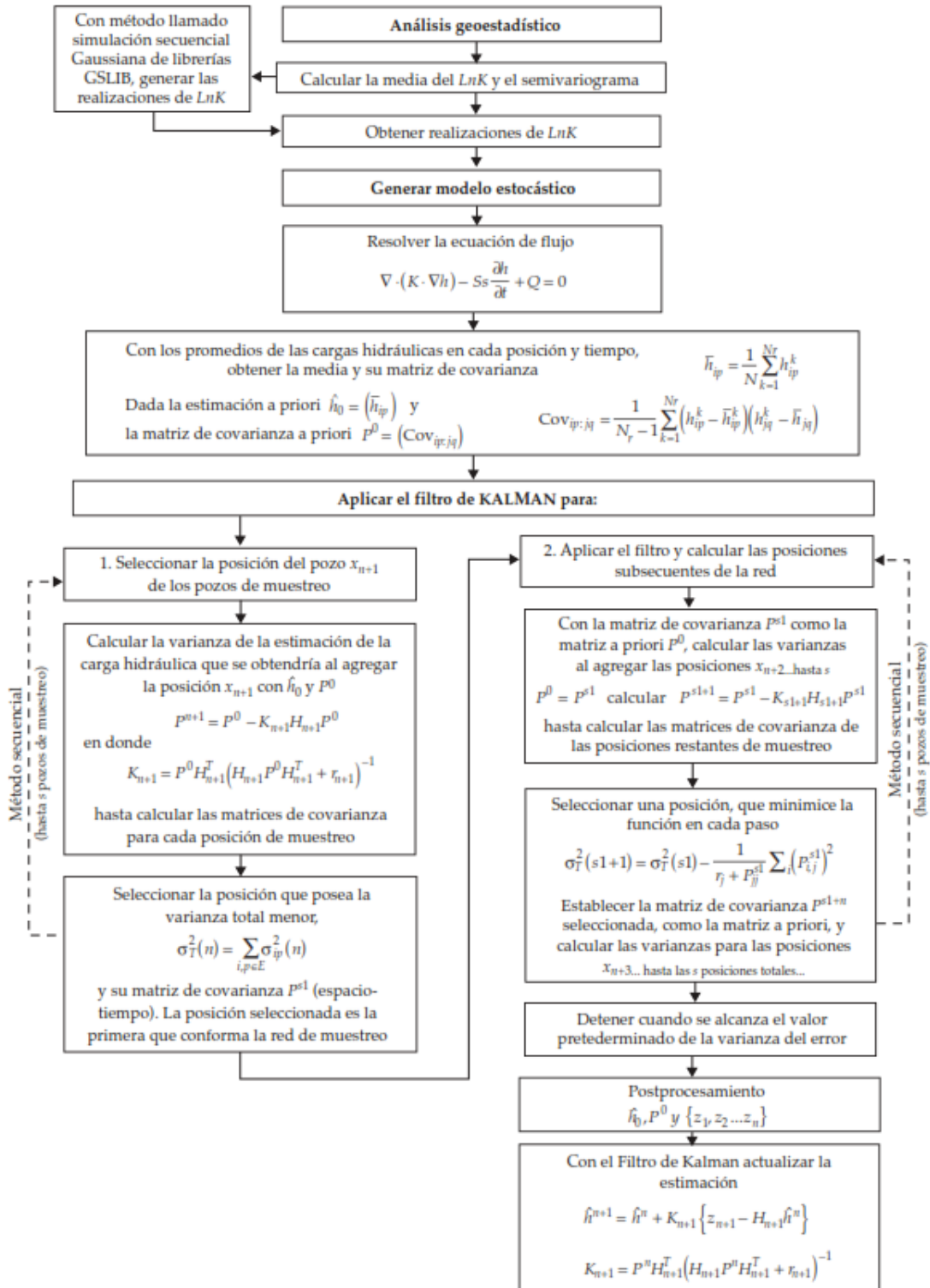


Figura 1. Diseño utilizando modelos numéricos, método de Herrera y Pinder.

2.6.5 Caso de estudio sintético

Se probó la metodología en un caso basado en una representación simplificada del acuífero del Valle de Querétaro.

Se rediseñó una red de monitoreo de los niveles del agua subterránea, suponiendo que los cambios en los mismos son insignificantes. Para esto se utilizó un modelo numérico de flujo en estado estacionario.

El objetivo del diseño de la red de monitoreo de los niveles del agua subterránea consistió en seleccionar, de entre 33 pozos preexistentes, aquellos que no dieran información redundante para la estimación de h en todo el acuífero. De acuerdo con este objetivo se estimará h en todo el acuífero, dándole el mismo peso a todas las zonas.

2.6.6 Resultados

Al utilizar una red de 22 pozos se obtiene una estimación con errores similares a los obtenidos con los 33 pozos, esto indica que los once pozos con orden de selección de 23 a 33 se pueden considerar como redundantes.

Los resultados de la piezometría indican que con 22 pozos obtenemos una representación piezométrica muy parecida a la real, con errores de estimación del orden de 1.92 a -1.33 metros, y con un error cuadrático medio estándar de 0.97, muy cercano a 1.

2.6.7 Conclusiones

El diseño de la red de monitoreo piezométrica para este caso de estudio mediante el método de Herrera y Pinder es satisfactorio, y se tienen buenas perspectivas para aplicar exitosamente esta metodología al diseño de redes de monitoreo de los niveles del agua subterránea en casos reales.

El modelo estocástico de flujo es una valiosa herramienta para evaluar la incertidumbre en las estimaciones del modelo, haciendo la metodología muy efectiva en la selección de las posiciones y los tiempos de muestreo que minimizan la incertidumbre de la estimación.

La metodología es capaz de sugerir en qué zonas se requiere la construcción y/o habilitación de pozos de monitoreo que aporten datos de carga hidráulica para lograr una mejor estimación en la zona de estudio.

Además de utilizar criterios de optimización, al aplicar este método a casos reales, se deben utilizar indispensablemente criterios hidrogeológicos.

2.7 Análisis crítico, red de niveles de aguas subterráneas del acuífero de Copiapó, DGA, 2012.

El objetivo de este estudio fue realizar un análisis crítico a la actual red de observación de niveles que tiene la DGA, de tal forma evaluar si los puntos que hoy en día se miden, tienen representación espacial y temporal del acuífero de Copiapó. En caso que no la tenga, se debe proponer una red mejorada, de menor, igual o mayor tamaño al actual, pero con mejor representación de la red existente.

2.7.1 Metodología

- Se inició la con la descripción de los 6 sectores considerados originalmente, usando información tanto de la red vigente, como de pozos que están fuera de uso para efectos de la red de vigilancia, pero para los que se dispone de información histórica, ya que en algún momento fueron parte de la red de vigilancia.
- Posteriormente se realizó una visita a terreno, a fin de caracterizar el entorno de los pozos con el fin de conocer el sector controlado por cada uno de los pozos. El trabajo consistió en determinar las coordenadas y las cotas de los pozos de la red de medición.
- Para cada uno de los pozos en grandes rasgos se hace una gráfica del nivel evaluando de esta manera el descenso del nivel, se identifica cuales no están en funcionamiento ya que no disponen de vía de aire para realizar monitoreo, se identifica la profundidad, etc.
- Se realiza un análisis de representatividad, confiabilidad y diagnóstico de la red de monitoreo:
 - Operación de la red: esta se monitorea dependiendo de la disponibilidad presupuestaria y de personal de la DGA.
 - Análisis de representatividad: se realiza comparando las densidades de muestro por sector ($\#/km^2$), y comparando esto con lo recomendado por la Agencia Europea de Medioambiente (1 pozo por cada 20/25 km^2)
 - Análisis de la información de niveles: realizo una compilación de datos, calculando la desviación y variación media de los niveles (entre otros), a fin de caracterizar la tendencia de los niveles.
 - Análisis de confiabilidad: esta depende del uso del pozo (niveles dinámicos), presencia de pozos secos o sin acceso.

2.7.2 Propuesta de una red mejorada

Como regla general, para proponer la nueva red se tendrán las siguientes consideraciones:

- En cada sub-sector se tendrá al menos 1 pozo en uso, con el fin de comparar los niveles pseudo-estáticos con los niveles estáticos de los pozos netamente de observación.
- En las zonas en que hay pozos secos, se debe profundizar lo existente, y en caso en que esto no se pueda, se deben construir pozos de observación de mayor profundidad a la actual.
- Tal como se indicó en el diagnóstico geológico y geomorfológico, se requiere que los pozos se encuentren más dispersos, ya que los flujos laterales son importantes. Por otra parte, en lo que respecta a la frecuencia de medición, las características geológicas del acuífero permiten tener una frecuencia de medición uniforme.

Con el objetivo de obtener información de mejor calidad con el mismo costo o incluso menor costo, se desarrolla esta componente del estudio en la que se determina si existen pozos redundantes en la red, es decir, pozos que pueden eliminarse sin disminuir la calidad de la información representativa de los procesos que ocurren en la zona. Con este fin se propone usar el método estadístico de las Componentes Principales (Análisis de Componentes Principales) PCA por su sigla en inglés.

De acuerdo a esta metodología se busca determinar la existencia de "clusters" o agrupaciones de pozos. Estas agrupaciones de pozos son las que se requiere redefinir en la red ya sea eliminando uno o más pozos. Los criterios para eliminar pozos son: primero los que están secos o sin acceso, luego los que tienen registros cortos, y luego pozos con gran longitud pero que en definitiva son redundantes, es decir, pozos que aportan el mismo grado de información.

Para la aplicación de la metodología seleccionada al análisis de la red en su totalidad requiere que los datos se analicen desde diferentes puntos de vista: agrupación de pozos por sectores, agrupación de pozos por uso (observación y en uso propiamente tal), y agrupación de pozos por condición actual (secos).

El protocolo de trabajo propuesto es:

- El proceso se aplica sólo para los pozos de observación que no presentan problemas de acceso o profundidad (al menos actualmente).
- Dada la escala, se identifican los pozos que forzosamente deben estar en la red, para eliminarlos del gráfico, ampliarlo y determinar cuáles pozos deben ser eliminados de la red. Luego se repite el proceso hasta que se determina que no haya pozos redundantes.

- En segundo lugar el proceso presentado en las Etapas 1 y 2 se aplica a los pozos secos. Si bien es cierto estos pozos no son representativos en la actualidad, en el caso de aquellos que tienen suficiente longitud, lo que conviene es ubicar pozos más profundos en sus cercanías, de modo de asimilar los pozos nuevos con los antiguos. De esta manera se puede mantener una red capaz de medir los descensos por un tiempo mayor, pero sin perder la información histórica disponible.
- Al igual que se hizo con los pozos de observación y secos, se aplica la metodología a los pozos en uso. Esto se hace con el mismo objetivo de mantener pozos secos, no perder la historia de los pozos.
- Posteriormente, el proceso se aplica a cada uno de los sectores: usando la sectorización original, y no la modificada, ya que en general la cantidad de datos por sector en la nueva situación es muy reducida, lo que hace poco confiable el análisis de redundancia.

2.7.3 Conclusiones

- Utilizar como reemplazo pozos de riego que para aquellos pozos de observación que dejaron de ser útiles.
- Se encuentra que en muchos de los pozos, el nivel está por debajo de la profundidad de perforación en algún momento, por lo que estos son considerados como pozos inadecuados, por estar captando un acuífero superficial que podría haber sido sobre explotado.
- No utilizar pozos que no cuentan con derechos de agua ya que mantenerlos o incorporarlos a la red de monitoreo podría entenderse como validar su uso ilegal.
- Valorar el acceso a cada pozo, dependiendo de las condiciones viales y meteorológicas es fundamental; así mismo depende de la voluntad de los propietarios de los pozos que conforman la red.
- Se hace notar que uno de los criterios de trabajo para la proposición de mejoramientos a la red sería propender a tener una densidad de estaciones relativamente homogénea a lo largo del área de estudio. Ahora bien, debe tenerse en cuenta además que la densidad necesaria para la red depende en un rango de factores, incluyendo densidad de pozos de extracción, pendiente del terreno y la napa y los objetivos del monitoreo, por ejemplo cerca de un pozo de agua potable o un humedal significativo debe contar con una densidad mayor que en un gran llanura con bajo desarrollo del recurso.
- Es probable que en las partes altas de la cuenca se necesite una mayor densidad de pozos porque la situación es más crítica. Lo anterior hace

considerar que la densidad de la red propuesta no debería ser uniforme, sino que debería mantener aproximadamente la proporción actual entre los diferentes sectores, aunque no necesariamente las densidades actuales.

- Si bien dentro de la unidad de depósitos fluviales se pueden observar intercalaciones de depósitos finos entre granulometrías más gruesas, no se considera que la distribución de los sedimentos sea una variable que controle, por sí sola, la variación de los niveles freáticos. Por lo tanto, el tipo de material presente en el acuífero no constituye, por sí mismo, una variable que permita definir diferencias en la frecuencia de monitoreo de los pozos que integran la red, lo que en definitiva implica que la red pueda ser monitoreada con una sola frecuencia de medición.
- La metodología de series discontinuas es de mejor calidad y aplicabilidad que la metodología de series continuas.

2.8 Análisis crítico de las redes hidrométricas, regiones V a VII y Región Metropolitana, DGA, 2013.

2.8.1 Idoneidad referida a ubicación

En lo esencial, este análisis se realiza con base a la cartografía generada al georeferenciar las estaciones catastradas y utilizando las coberturas de cuencas, subcuencas y acuíferos que posee la DGA para las cuatro regiones.

- Se compara el emplazamiento del pozo de medición con los acuíferos delimitados por la DGA y si cada uno de ellos está suficientemente cubiertos con la red de pozos.

En cuanto a las estaciones sedimentarias, éstas no se detallan mayormente por cuanto la toma de muestras es posible realizar en cualquier punto que se decida.

Este análisis consiste en precisar si los pozos que forman parte de la red de aguas subterráneas están emplazados en acuíferos definidos por la DGA. Sobre la base de la cartografía SIG generada para las estaciones de medida existentes, se contrastó con las definiciones espaciales de acuíferos que utiliza la DGA para determinar si existen pozos que no estén ubicados en zonas acuíferas.

Se comprobó que todos los pozos están situados en acuíferos delimitados por la Dirección General de Aguas, por lo que las estaciones son idóneas en cuanto a ubicación espacial. Este análisis no cuestiona que la cantidad sea excesiva o mínima, por lo que la densidad de estaciones no es materia de este capítulo.

La comprobación se encuentra en los mapas adjuntos en los cuales se puede apreciar que cada Estación de Aguas Subterráneas se emplaza dentro de un acuífero. No se incluye un Anexo especial ya que es redundante con respecto a los mapas generados y a los listados de la red de pozos.

2.8.2 Análisis por completitud de datos

Como criterio estadístico de evaluación de la calidad de los datos se usa una valoración de completitud. Esta busca señalar la calidad de la información recogida en las estaciones en función de la presencia de medidas mensuales en un periodo determinado. Un resultado se califica como bueno cuando supera el 90% de presencia de datos, mientras que es regular cuando esta fluctúa entre el 65% y el 90% (incluyendo ambos límites) y es malo cuando presenta un indicador inferior a 65%. De esta manera, el patrón de evaluación aumenta su escala y es posible acercarse a criterios estadísticos robustos de margen de error (90%).

Además, se definen los siguientes conceptos:

- % completitud: número de fechas con datos válidos / total de fechas. Se usa para estimar la calidad del dato (valoración de completitud), indicando el porcentaje de meses con datos válidos para el periodo total.
- Ratio completitud: número de datos válidos / número de datos faltantes. Busca medir cuántos meses con datos válidos existen en relación a meses que carecen de totales válidos.

2.8.3 Propuesta de red aguas subterráneas

La ubicación espacial de estaciones de pozos indica que en las regiones V, VI y RM existen mediciones en todos los acuíferos definidos en los estudios de la Dirección General de Aguas, no obstante, estos datos pueden ser utilizados parcialmente o con restricciones en la formulación de modelos, en cuanto a que la mayoría de los sondajes son de explotación y no miden nivel estático.

Hubo consenso en las Direcciones Regionales que se debe modernizar esta red transformando los pozos de explotación en pozos de observación, para lo cual se propone construir una batería de Piezómetros en reemplazo de los actuales.

Si bien lo ideal es que la totalidad de los puntos actualmente medidos sean transformados en pozos de exploración, se propone en este estudio una primera etapa que considere un tercio de los actuales sondajes y obviamente, manteniendo la medición del resto de los pozos.

Esta propuesta se basa en lo siguiente:

- Presupuestariamente es posible de abordar con un plan de inversión a mediano plazo.
- No exista variación espacial del punto de control con los pozos actualmente medidos para la comparación de la data.

- La posibilidad cierta que los propietarios de los terrenos autoricen gratuitamente la construcción de un piezómetro en sus terrenos, sin que se recurra a la figura de la expropiación.
- Que cada acuífero controlado mantenga una cantidad mínima de pozos de observación de utilidad para la modelación de acuíferos.

Al menos se ha considerado un piezómetro por acuífero o más en el caso de que estas unidades abarquen superficies mayores, manteniendo la distribución actualmente vigente de la red de aguas subterráneas.

Se propone considerar un piezómetro por acuífero identificado en este estudio y de los cuales ya se encuentran ejecutados 2: Linares y Parral.

2.9 Análisis crítico de las redes hidrométricas, Zona Sur, DGA, 2014.

2.9.1 Pasos identificados

Para el desarrollo del proyecto, se estableció una actividad, consistente en una serie de campañas de terreno, con el objetivo de levantar las estaciones de niveles piezométricos, operadas por la DGA.

De las estaciones levantadas, se solicitó a cada región, específicamente a las áreas de hidrología respectivas, la información dependiendo del tipo de estación del instrumental que presentan las variables controladas y el tipo de registro-transmisión.

2.9.2 Evaluación de la red actual

La evaluación de la red actual se basó en resolver inquietudes:

- Si las estaciones y su distribución permiten obtener información para el otorgamiento de derechos (Necesidades del Departamento de Estudios y Proyectos y del Departamento de Administración de Recursos Hídricos).
- Si es posible obtener un balance hídrico de alguna cuenca en particular.
- Si es posible con la red de estaciones es posible determinar o prever eventos extremos.

Para esto se analizó:

- La idoneidad por emplazamiento e infraestructura de acuerdo a la información levantada en cada una de las fichas, cartografía generada al geo referenciar las estaciones y utilizando coberturas de cuencas y acuíferos.
- Idoneidad de las variables: El alcance de esta consultoría permite determinar que las variables medidas en cada una de las estaciones sean

suficientes para caracterizar las cuencas y acuíferos. No obstante, se hace un análisis de sensibilidad hasta donde es posible de realizar y que se relaciona con la cantidad de registros de cada estación y por lo tanto, si la calidad del dato es idóneo cuantitativamente.

La red de pozos se evaluará con los registros de niveles medidos en los controles que efectúan los funcionarios en las respectivas regiones.

La red de aguas subterráneas de la zona sur, tiene su nacimiento entre los años 2012 y 2013. Además, el BNA no cuenta con información de estadísticas para la red de aguas subterráneas. Por lo que el análisis de completitud de datos no se realizó para esta red.

Sin embargo, cabe señalar que para el criterio estadístico de evaluación de la calidad de los datos, se debe utilizar una valoración de completitud. Esta busca señalar la calidad de la información recogida en las estaciones, en función de la presencia de medidas mensuales en un período determinado.

- % completitud: Número de fechas con datos válidos / total de fechas. Se usa para estimar la calidad del dato (valoración de completitud), indicando el porcentaje de meses con datos válidos para el periodo total.
- Ratio completitud: Número de datos válidos / número de datos faltantes. Busca medir cuántos meses con datos válidos existen en relación a meses que carecen de totales válidos.
- Tecnología empleada en las estaciones: Se considera la instalación de transductores de presión. Sensores con almacenamiento de información hasta que esta sea bajada por un controlador de la DGA a un computador portátil.

2.9.3 Propuesta de red hidrométrica

La red piezométrica tiene por objetivo, la estimación y control de los recursos hídricos subterráneos a partir de la generación de información de niveles, que son la entrada para modelos de simulación hidrogeológica. En general, la red piezométrica debe ser tal que sea densa en sectores de alto impacto, es decir, con una alta demanda, o con afloramientos.

Los Criterios que se utilizaran para la propuesta de mejoramiento de la red de aguas subterráneas serán los siguientes:

- Control en la salida del acuífero o en este caso cuenca hidrográfica.
- Control de concentración de pozos de usuarios.

Se propone además que en las zonas de alta concentración de usuarios, Fiscalización haciendo uso de sus atribuciones pida los registros de operación de

los pozos, y con el fin de controlar la veracidad de la información entregada implemente pozos de observación estratégicamente ubicados.

Se debe priorizar:

- Regiones sin red de aguas subterráneas.
- Concentración de usuarios en regiones con red de aguas subterráneas.
- Cierres de cuencas.

3 SÍNTESIS DE CRITERIOS PARA ESTABLECER REDES DE MONITOREO DE NIVELES DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

La discusión sobre los artículos y estudios previamente presentados se centra en básicamente dos tipos de criterios, un criterio estadístico-geoespacial y un criterio basado en la distribución subjetiva. De los 9 estudios analizados, 6 corresponden con criterios estadísticos geoespaciales y 3 a criterios de distribución espacial.

Se hace una síntesis de los principales estudios, resaltando aquellos criterios utilizados que deben ser considerados:

3.1 Criterio espacial

La selección de la densidad de una red de monitoreo debe estar vinculada al fin para el cual se está monitoreando (calidad o niveles) y hacia la escala espacial que se quiera priorizar, una vez definido esto se deberá aplicar el mismo criterio a todos los pozos (ya que solo así será posible comparar los resultados).

Se hace referencia en la importancia de definir la red con base a las condiciones geológicas del área a monitorear (ej.: Zonas con alta capacidad de infiltración deben ser monitoreadas más intensivamente, estructuras hidrogeológicas similares con bajos impactos, áreas kársticas, etc.).

Algunas de las recomendaciones de este criterio es establecer las estaciones de monitoreo dentro de los acuíferos distribuidas en un patrón más o menos geométrico, y como una regla, con una densidad de al menos 1 sitio de monitoreo por cada 20-25 km² de acuífero.

Se indica además que para establecer una nueva red de monitoreo se debe comprender que la ubicación sea:

- Zona de fácil acceso.
- De propiedad fiscal.
- Cerca de los centros poblados y en los acuíferos definidos como importantes.
- Profundidad mínima entre 15 y 50 m.
- Productividad mayor a 10 l/s, de modo que no fuera una noria.
- Distribución homogéneamente en cada región.
- Lejos de las zonas de recargas importantes (ríos, esteros, etc.).

3.2 Criterio geoestadístico

Para el diseño óptimo de una red de monitoreo de niveles de agua subterránea se identifica que este criterio tiene varias ventajas:

- Permite seleccionar tanto posiciones como tiempos de monitoreo de forma óptima, además, con la información obtenida de la red de monitoreo, permite hacer estimaciones en espacio y tiempo, y utiliza un modelo de flujo y transporte, el cual sintetiza el conocimiento de las características del acuífero, de la dinámica del flujo subterráneo y de la problemática de calidad del agua subterránea que se tenga, así como del conocimiento de las leyes de la física.

El método que se propone es adecuado para optimizar redes de monitoreo de largo plazo, en casos en los que el acuífero ha sido investigado ampliamente y se cuenta con un modelo de flujo para el mismo.

La metodología es capaz de sugerir en qué zonas se requiere la construcción y/o habilitación de pozos de monitoreo que aporten datos de carga hidráulica para lograr una mejor estimación en la zona de estudio. Además de utilizar criterios de optimización, al aplicar este método a casos reales, se deben utilizar indispensablemente criterios hidrogeológicos.

3.3 Criterio estadístico

El procedimiento identificado consistió básicamente evaluar si los puntos que hoy en día se miden, tienen representación espacial y temporal del acuífero, adicionalmente, se realizó un análisis de representatividad, confiabilidad y diagnóstico de la red de monitoreo, considerando:

- Operación de la red: monitoreo depende de la disponibilidad presupuestaria y de personal de la DGA.
- Análisis de representatividad: se realiza comparando las densidades de muestro por sector ($\#/km^2$), y comparando esto con lo recomendado por la Agencia Europea de Medioambiente (1 pozo por cada 20/25 km²).
- Análisis de la información de niveles: se realizó una compilación de datos, calculando la desviación y variación media de los niveles (entre otros), a fin de caracterizar la tendencia de los niveles.
- Análisis de confiabilidad: esta depende del uso del pozo (niveles dinámicos), presencia de pozos secos o sin acceso.

Y por último se realiza un análisis a fin de determinar pozos redundantes en la red, mediante el método estadístico de las componentes principales (PCA).

Además, se observa que en algunos estudios se realizó una recopilación de información en campañas de terreno como de escritorio para lo que se analizó la idoneidad por emplazamiento e infraestructura, idoneidad de las variables mediante un análisis de sensibilidad de acuerdo a la cantidad de datos por estación

4 CONCLUSIONES

Una red óptima de monitoreo, busca mediante diversos métodos, ajustar la distribución espacial de la red, la frecuencia y el número de variables a medir, de tal manera que partiendo de la información disponible, pueda obtenerse una red con el número menor posible de puntos de observación.

En el método definido como criterio espacial, la red y su programa de muestreo se definen por consideraciones que toman en cuenta por lo general solamente las condiciones físicas del sitio, sin recurrir a técnicas estadísticas o probabilísticas avanzadas ni incorporar la hidrogeología.

Mientras que el método geoespacial utilizar a un modelo de flujo y transporte a fin de generar el diseño óptimo de una red de monitoreo.

La red debe estar en función del tipo y volumen de datos requeridos, y varía considerablemente en cuanto al aspecto de gestión de que se trate, pero inevitablemente también dependerá de los recursos financieros disponibles y del nivel de riesgo que se esté dispuesto a correr.

Es importante tener en cuenta que el número de pozos que conformarán la red final de monitoreo estará definida por la autoridad, estatal, o en su caso por los usuarios potenciales del agua subterránea, como empresas que requieran de algún monitoreo de nivel del agua en sus instalaciones.

5 BIBLIOGRAFÍA

- Ground water level monitoring and the importance of long term water level data, 2001.
- Diagnóstico y clasificación de sectores acuíferos, 2009, DGA, SIT 183.
- Diseño óptimo de una red de monitoreo piezométrica para el sistema acuífero de valles centrales de Oaxaca, 2010.
- Mejoramiento y ampliación de red de aguas subterráneas, regiones VII a X, 2010, DGA, SIT 223.
- Diagnóstico de la red de aguas subterráneas región del Libertador Bernardo O`Higgins, 2011, DGA, SIT 227.
- Método para el diseño óptimo de redes de monitoreo de los niveles de agua subterránea, Universidad Autónoma de México, 2011.
- Proposed groundwater monitoring network, European environment agency, 2011.
- Análisis crítico, red de niveles de aguas subterráneas del acuífero de Copiapó, 2012, DGA, SIT 298.
- Análisis crítico de las redes hidrométricas, regiones V a VII y Región Metropolitana, 2013, DGA.
- Plan de mejoramiento para la red de niveles de Copiapó, 2013, DGA, SDT 342.
- Análisis crítico de las redes hidrométricas, Zona Sur, 2014, DGA, SIT 344.