



ZONA DE PROTECCION DE POZOS: UNA HERRAMIENTA PARA LA GESTION DE ACUIFEROS

GONZALO LOBOS Y CARLOS ESPINOZA

División de Recursos Hídricos y Medio Ambiente, Departamento de Ingeniería Civil
Universidad de Chile, Casilla 228-3, Santiago, Chile
Fono: (56 2) 678 4390, Fax: (56 2) 6894171
globos@ing.uchile.cl , espinoza@ing.uchile.cl

RESUMEN

La zona de protección de pozos delimita un área en el entorno de un pozo en la cual, de forma graduada, se restringen o prohíben las actividades susceptibles de contaminar las aguas subterráneas. Este artículo muestra las técnicas disponibles para su determinación y las consideraciones que se deben tener al momento de dicha determinación. Mediante la utilización de un modelo numérico de reciente data, Interactive Groundwater, IGW, (<http://www.egr.msu.edu/~lishug/research/igw/>) se determinan zonas de protección para un sistema dado, realizando comparaciones entre los resultados obtenidos al incorporar el efecto de la variabilidad espacial de la conductividad hidráulica o heterogeneidad.

La zona de protección de pozos constituye una herramienta muy adecuada, aunque no la única, para una mejor gestión de los recursos hídricos subterráneos y debe ser motivo de discusión al interior de diversos agentes ligados al aprovechamiento y gestión de los recursos subterráneos.

ABSTRACT

A well protection zone defines an area in which some potential or actual activities are restricted due to the possibility of groundwater contamination. This article shows some available techniques for the determination of the well protection zone, their limitations and strengths. In addition, some considerations that should be taken into account during the application of these techniques are also discussed in this paper. A recently developed numerical software, Interactive Groundwater IGW (<http://www.egr.msu.edu/~lishug/research/igw/>), was used to compute the well protection zone for a homogeneous aquifer. At the same time this numerical tool was used to incorporate the effect of the spatial variability of hydraulic conductivity upon the size and extent of the well protection zone.



ZONA DE PROTECCION DE POZOS: UNA HERRAMIENTA PARA LA GESTION DE ACUIFEROS

1 Introducción

Las particulares características de las aguas subterráneas, hacen que se mantengan protegidas de la contaminación externa. Sin embargo, tal particular condición puede transformarse en una desventaja, ya que la “invisibilidad” de los ambientes subterráneos permite que se generen procesos de contaminación gradual sin que sean detectados a tiempo, y en consecuencia, la recuperación de los acuíferos resulta compleja, de alto costo económico y en muchos casos irreversible.

En nuestro país se constata un fuerte agotamiento de los recursos hídricos superficiales de la Región Metropolitana al norte, lo que obliga a recurrir a las fuentes subterráneas para abastecer la creciente demanda por agua.

En Chile las aguas subterráneas representan un porcentaje importante en el abastecimiento de agua potable, es así como a nivel urbano un 40% del agua potable es captada desde fuentes subterráneas, mientras que a nivel rural el porcentaje prácticamente se duplica (77%). Dado el agotamiento de las fuentes superficiales se prevé un incremento en la presión sobre los acuíferos, esencialmente para fines potables, aunque no exclusivamente, ya que también se visualizan otros usos como el industrial y minero.

En este contexto se torna relevante la protección de los acuíferos. En este sentido la Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA) desarrolló la Norma de Emisión de Residuos Líquidos a Aguas Subterráneas, la cual fue publicada en el Diario Oficial el 17 de enero de 2003 y cuyo objetivo es prevenir la contaminación de las aguas subterráneas, mediante el control de la disposición de los residuos líquidos que se infiltran a través del subsuelo al acuífero.

Cabe señalar que durante el proceso de discusión de la norma, una aspiración de algunos sectores, especialmente de las empresas sanitarias, fue la inclusión de las áreas de protección de las captaciones de agua potable en el mencionado cuerpo legal. Esta solicitud no fue acogida por CONAMA, ya que la legalidad vigente en Chile no permite este tipo de instrumentos al interior de una norma de emisión. Sin embargo, la autoridad ambiental reconoce la necesidad de avanzar en diferentes herramientas, adicionales a las normas de emisión, para la protección de los acuíferos.

Por otra parte, la Norma Chilena NCh 777 b establece que con el fin de evitar el deterioro de la calidad de las aguas subterráneas se establecerá un área de un mínimo de 100 m² en torno a la captación en que se prohibirá la instalación de cualquier actividad (prohibición absoluta). Además, la norma indicada menciona que la autoridad competente prohibirá el establecimiento y operación de actividades que efectúen descargas al suelo o subsuelo de efluentes contaminantes. El área especial de prohibición corresponderá al área de alimentación de las captaciones de agua potable definida por tiempos de viaje que aseguren que el eventual contaminante no afectará la calidad del agua de la captación.

Es en este contexto, que la zona de protección de captaciones de agua subterránea se convierte en un tema de interés, que debe ser discutido al interior de los sectores ligados a la administración y aprovechamiento de los recursos hídricos.



Este artículo describe el concepto de zona de protección de pozos, presenta una revisión de distintas normativas y metodologías utilizadas para su determinación, y finalmente muestra una aplicación a un caso ficticio, en el cual se incluye el efecto de la variabilidad espacial de la formación acuífera en la determinación de la zona de protección de un pozo de bombeo.

2 Zona de Protección de Pozos

2.1 Aspectos Generales

La zona de protección delimita un área en el entorno del pozo en la cual, de forma graduada, se restringen o prohíben las actividades susceptibles de contaminar las aguas subterráneas. Al establecer una zona de protección es necesario encontrar un equilibrio entre una protección adecuada y suficiente del recurso, y el respeto, en la medida de lo posible, de la actividad socioeconómica del área circundante.

La Environmental Protection Agency (EPA) reconoce una amplia gama de metodologías para la determinación de zonas de protección de pozos. El documento EPA-440/5-93-001 entrega las pautas para la delimitación de áreas de protección de pozos. Dichas metodologías van desde métodos analíticos hasta complejos modelos numéricos de transporte de contaminantes.

La elección de uno u otro método dependerá de la experiencia del usuario, recursos e información de terreno disponible y grado de confianza deseado. El método elegido para la delimitación del área de protección de pozos determinará la cantidad y calidad de la información requerida.

2.2 Metodologías

A continuación se entrega una breve reseña de los métodos que la EPA ha identificado para la delimitación de áreas de protección de pozos:

Radio Fijo Arbitrario: Es un método simple de aplicar y generalmente de bajo costo. Consiste en determinar una distancia alrededor del pozo, la cual se utiliza para definir la zona de prevención de accidentes alrededor del pozo en todo tipo de acuíferos y condiciones de flujo. Este método no se basa en un conocimiento acabado del acuífero o del pozo en cuestión, sino que las distancias están determinadas por las regulaciones del lugar en que se desea aplicar el método.

Radio Fijo Calculado: Corresponde a un método relativamente simple, utilizado para determinar áreas circulares definidas por el tiempo que demorará en llegar al pozo en cuestión el agua subterránea. Mediante esta técnica se determina un círculo en que el radio de éste se basa en el tiempo de viaje al pozo. Los datos necesarios para este método son: tasa de bombeo, porosidad del acuífero, longitud de las cribas y tiempo de viaje seleccionado. La expresión que determina el radio fijo calculado es:



$$r = FS \cdot \sqrt{\frac{Q \cdot t}{n \cdot H \cdot \pi}} \quad (1)$$

donde:

- r : Radio Fijo Calculado (m)
- FS : Factor de Seguridad (1.3 cuando se conocen bien todos los parámetros, 1.5 cuando hay incerteza en algún parámetro)
- Q : Tasa de Bombeo (m³/año)
- t : Tiempo de Viaje elegido (2 años, 5 años, etc.)
- n : Porosidad del acuífero
- H : Longitud de las cribas (m)
- π : 3.141593

Formas Variables Simplificadas: Esta metodología implica generar un conjunto de formas que representen una serie de condiciones hidrogeológicas y de bombeos. Las formas variables son determinadas calculando la distancia en dirección del gradiente y límites laterales alrededor del pozo según ecuaciones analíticas tales como las ecuaciones de flujo uniforme. Luego la forma apropiada es seleccionada de acuerdo a las características hidrogeológicas y de bombeo, orientando la forma alrededor del pozo de acuerdo a los patrones de flujo del sistema. Este método es sencillo de aplicar y en comparación con el método del Radio Fijo Calculado sólo requiere, adicionalmente, de parámetros hidrogeológicos básicos.

Modelos Analíticos: Esta metodología utiliza las ecuaciones de flujo y de transporte de contaminantes para aguas subterráneas. Dichas ecuaciones, generalmente, son sencillas de resolver, sin embargo, requieren de parámetros del acuífero, el cual es considerado homogéneo.

A continuación se comentan brevemente los softwares basados en modelos analíticos y semianalíticos que ha desarrollado la EPA.

- **WHPA, versión 2.2.** Es un modelo semianalítico de flujo. Fue diseñado por la EPA para ayudar a las comunidades en la delineación de áreas de protección de pozos. Por sus características es adecuado para las situaciones en que el contaminante es conservativo. Posee cuatro módulos, de los cuales tres delimitan la zona de captura en dos dimensiones, mientras que el cuarto módulo realiza un análisis de incertidumbre de la zona de captura delimitada.
- **WhAEM,** reemplaza y mejora a WHPA 2.2, corresponde a un modelo analítico desarrollado para determinar zonas de captura de acuerdo a tiempos de viaje en sistemas hidrogeológicos simples en acuíferos confinados o libres. Sin embargo, se requiere que el usuario posea conocimientos de la zona ya que se requiere la aplicación de criterios hidrogeológicos al momento de ingresar la información al software.



Mapeo Hidrogeológico: Esta metodología identifica las características físicas e hidrogeológicas que controlan el flujo del agua subterránea. Las fronteras físicas del flujo de agua subterránea pueden incluir los contactos geológicos que forman los límites del acuífero, fallas o zonas de fractura y rasgos topográficos que pueden funcionar como divisorias de agua. Las características hidrogeológicas incluyen ríos, canales y lagos que pueden funcionar como límites del sistema de flujo. La determinación de la vulnerabilidad de los acuíferos es una técnica que no produce áreas de protección, sin embargo, combinada con el conocimiento del flujo del sistema acuífero permite identificar zonas sensibles a la contaminación dentro del área de captura de los pozos en cuestión. La información requerida para esta metodología incluye mapas topográficos, fotografías aéreas, mapas e informes geológicos e hidrogeológicos, descripciones de sondajes, reconocimiento de terreno, pruebas de bombeo.

Modelos Numéricos: Los modelos numéricos pueden ser usados para representar con un grado de exactitud adecuado sistemas con una hidrogeología compleja. Algunos modelos pueden usar modelos analíticos para describir el transporte de contaminantes, añadiendo el modelo de flujo numérico que incluye los procesos de advección y dispersión. Estos modelos requieren de una cantidad considerable de información, particularmente si tienen componentes analíticos. Además el operador de estos modelos debe poseer un grado de entrenamiento suficiente lo cual encarece la aplicación de estos modelos. MODFLOW y FLOWPATH son ejemplos de este tipo de modelos.

2.3 Normativa Internacional

Además de la selección de la metodología a utilizar para delimitar las diferentes zonas de protección de pozos, se requiere de una reglamentación respecto del tamaño y actividades prohibidas para cada una de las zonas delimitadas. Así por ejemplo el sistema de protección propuesto por el Instituto Tecnológico Geominero de España (ITGE) propone dividir el entorno de las captaciones en tres zonas, graduadas de mayor a menor riesgo e importancia, en cuanto a las restricciones de actividad a imponer. Estas zonas se clasifican en: a) zona inmediata o de restricción absoluta; b) zona próxima o de restricciones máximas; y c) zona alejada o de restricciones moderadas.

La propuesta del ITGE da respuesta a la interrogante que se refiere a las restricciones en cada área, sin embargo no entrega luces referentes al tamaño de cada una de estas zonas. Una respuesta a esta última interrogante la entrega el Servicio Geológico de New Jersey, el cual desarrolló las pautas para delimitación de áreas de protección de pozos (2003). En dicho documento se señalan tres zonas de protección para los pozos basadas en los tiempos de viaje hacia el pozo:

Zona 1	=	2 años (730 días)
Zona 2	=	5 años (1826 días)
Zona 3	=	12 años (4384 días)



La definición de los diferentes tiempos de viaje se basa en criterios de persistencia de virus y bacterias en aguas subterráneas, además de la capacidad de reacción de los organismos competentes.

3 El Rol de la Heterogeneidad del Sistema en la Determinación de la Zona de Protección

Los sistemas naturales presentan gran variabilidad en los parámetros que los caracterizan, así se comprueba que la conductividad hidráulica y la porosidad son parámetros que presentan importantes variaciones espaciales en un acuífero. Dicha variabilidad incide en forma directa sobre la dispersión de contaminantes en los ambientes subterráneos. En general, los estudios de terreno indican que la dispersión real de una pluma contaminante es muy superior a aquella estimada utilizando valores que tradicionalmente son aceptados para la dispersividad longitudinal y lateral.

Dada esta situación, se hace necesario establecer una forma diferente de manejar parámetros tales como la conductividad hidráulica, con el fin de realizar predicciones más cercanas a la realidad, ya que el método tradicional subestima la extensión de una pluma y por lo tanto también subestimaré la zona de protección de pozos.

La distribución espacial de la conductividad hidráulica, K , en un sistema acuífero real es caracterizada mediante su media geométrica, K_G , y la varianza del logaritmo natural de K , $\sigma^2_{\ln(K)}$ o σ_Y^2 . Es así como un sistema homogéneo posee una varianza igual a cero, mientras que sistemas acuíferos heterogéneos poseen valores entre 0.5 y 2.0 para dicho parámetro (Domenico and Schwartz, 1998).

Para estudiar el efecto de la heterogeneidad espacial o variabilidad natural del sistema acuífero sobre los límites de la zona de protección se recurrió a la generación de acuíferos sintéticos (técnicas geoestadísticas), para los cuales se verificó que la conductividad hidráulica promedio (media geométrica) sea similar a la del sistema homogéneo utilizado inicialmente. Las técnicas que se utilizan para este tipo de análisis pueden ser revisadas en Tompson et al. (1996). En este tipo de análisis se supone que la conductividad hidráulica se puede representar como un proceso estocástico, cuyas características principales son conocidas a partir de un estudio de terreno. Siguiendo las experiencias al respecto, se ha supuesto que la conductividad hidráulica puede ser representada como una variable aleatoria que sigue una distribución Lognormal.

Para este análisis se ha supuesto que la variabilidad de la formación acuífera se puede describir con una varianza entre 0.9 y 2.0, lo que supone un rango de valores de K coincidente con información bibliográfica para sistemas acuíferos en Estados Unidos y Europa. La distribución espacial de conductividad hidráulica se incorpora a un modelo de simulación numérico que permite determinar la distribución espacial de la velocidad de Darcy, la que en definitiva se utiliza en el modelo de simulación de transporte para la determinación de la zona de protección.

Estudios de terreno que han sido desarrollados en los EEUU y Canadá han permitido estimar los valores de la varianza de la conductividad hidráulica para un número limitado de suelos. La Tabla 1 presenta un resumen de los valores para tres de las zonas experimentales más conocidas a nivel mundial (Domenico and Schwartz, 1998).



Tabla 1 Valores Experimentales de la Varianza del Logaritmo de K (σ_Y^2)

Sitio	Varianza Log(K)
Borden, Canadá	0.29
Cape Cod, Massachussets, EEUU	0.26
Columbus, Ohio, EEUU	2.8

4 Determinación de Zonas de Protección Mediante Modelación Numérica

Con el fin de comparar las zonas de protección determinadas mediante diferentes supuestos, a continuación se realiza su determinación mediante el uso del software IGW. El caso base que servirá para comparar las diferentes zonas de protección calculadas consiste en un sistema de 5000 m de largo por 5000 m de ancho, la conductividad hidráulica es uniforme en todo el sistema e igual a 6 m/día, el gradiente hidráulico es del 1% y existe un pozo de bombeo con un caudal de extracción uniforme de 25 l/s. La dirección de flujo es de izquierda a derecha.

La Figura 1 muestra la zona de protección determinada para un tiempo de viaje de 12 años, las dimensiones aproximadas de dicha zona son: 1300 m de largo y 550 m de ancho.

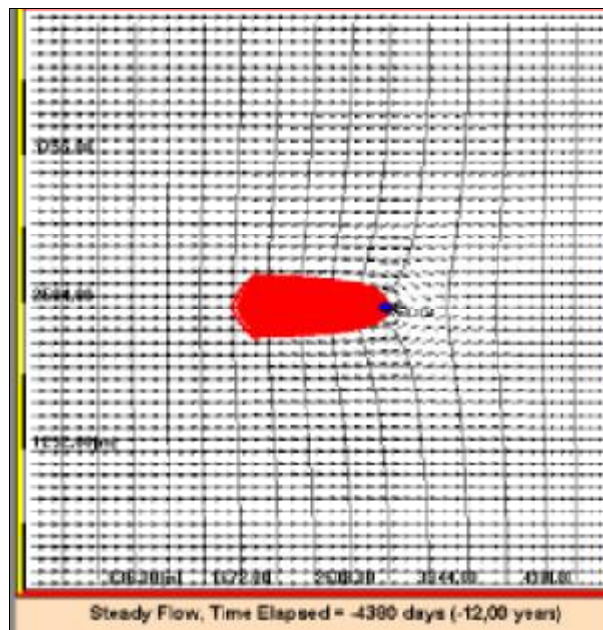


Figura 1 Zona de Protección Asociada a 12 años de Tiempo de Viaje (Caso Base)

La Figura 2 muestra dos realizaciones distintas para un sistema no homogéneo, con varianza 0.9 y demás características similares al caso anterior. Se puede apreciar que la zona de protección ya no es uniforme y alcanza un largo de aproximadamente 1600 m (300 m mayor al caso base).

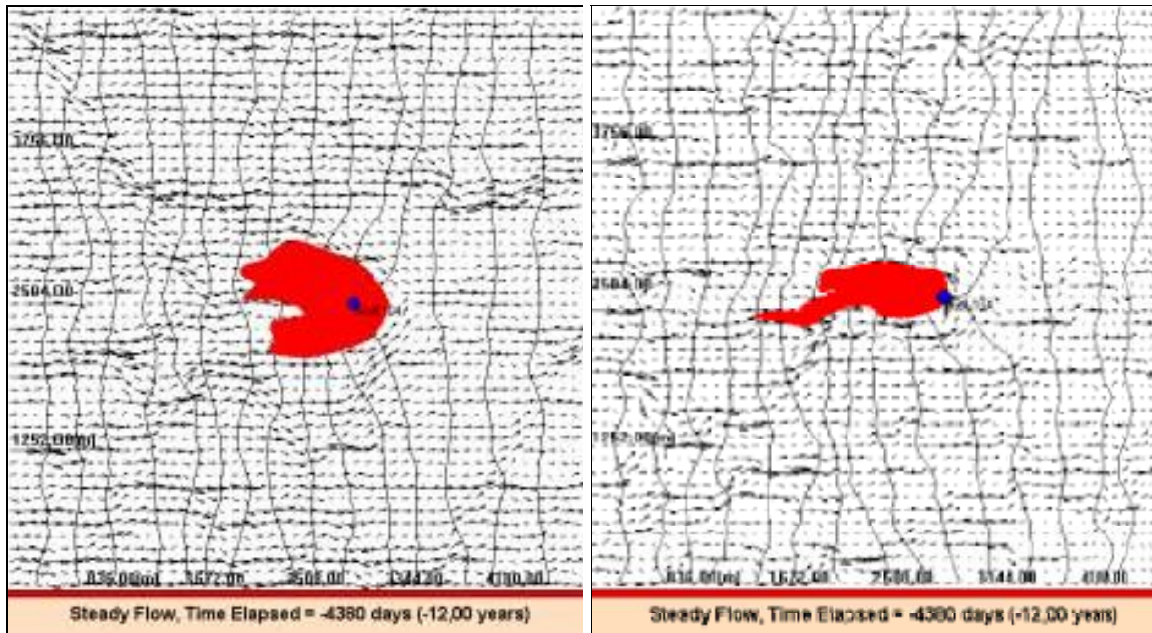


Figura 2 Zona de Protección para un Acuífero no Homogéneo (Varianza, $\sigma_Y^2 = 0.9$)

La Figura 3 muestra dos realizaciones distintas para un sistema no homogéneo, con varianza 2.0 y demás características similares al caso anterior. Se puede apreciar una mayor irregularidad de la zona de protección, cuyo largo máximo alcanza aproximadamente los 1400 m.

El análisis de los resultados presentados en las figuras sugiere que las áreas de protección, determinadas considerando heterogeneidad en las formaciones acuíferas, difieren tanto en la dirección longitudinal como en la transversal con respecto al caso base. En general, se puede observar que las zonas de protección presentan formas irregulares que, probablemente, se deben a la existencia de rutas preferenciales de flujo producto de considerar variabilidad en la conductividad hidráulica, además se puede apreciar que en la dirección longitudinal son más extensas, mientras que en el sentido transversal pueden ser más o menos extensas que las del caso base. Lo anterior otorga relevancia a la heterogeneidad de las formaciones acuíferas, ya que al no considerarla siempre se está subestimando, al menos en la dirección longitudinal, la zona de protección. Por lo tanto, se sugiere que la zona de protección que se adopte esté formada por la superposición de los resultados entregados por varias ejecuciones del modelo considerando al sistema acuífero como heterogéneo, ya que de esta forma se estará en un caso más conservador y por lo tanto de mayor protección para las captaciones.

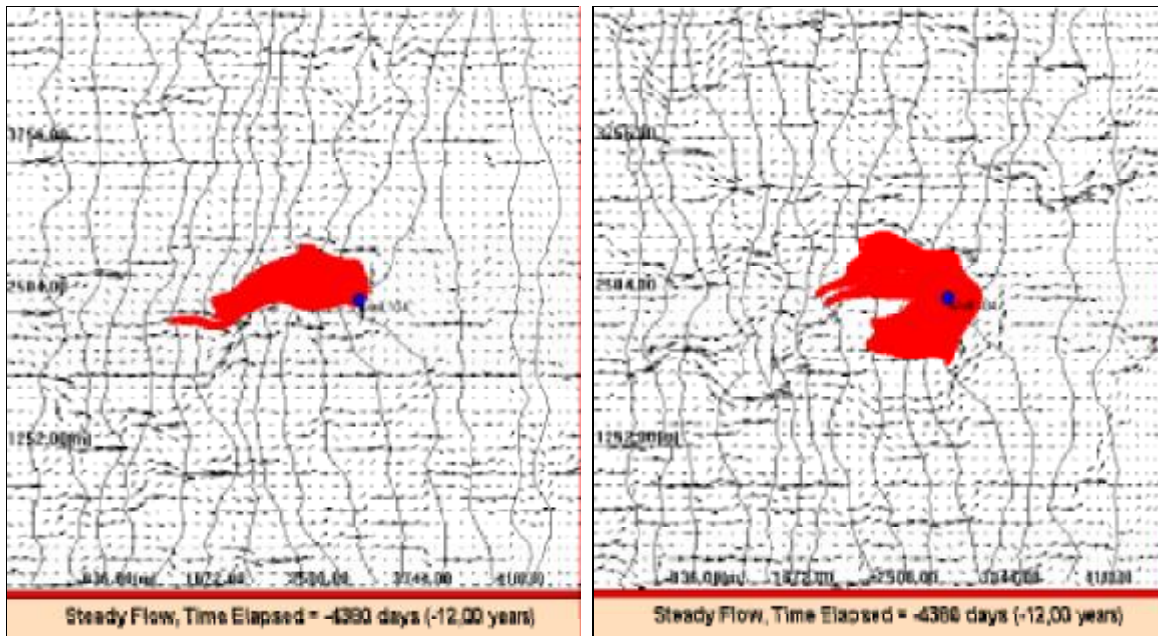


Figura 3 Zona de Protección para un Acuífero no Homogéneo (Varianza, $\sigma_Y^2 = 2.0$)

5 Conclusiones

A partir de este trabajo se pueden establecer las siguientes conclusiones:

- La zona de protección de pozos es una herramienta útil, aunque no la única, para la protección las aguas subterráneas.
- Existen una serie de metodologías para el cálculo de zonas de protección de pozos, dependiendo de la metodología empleada será el tipo y cantidad de información que se requiera.
- La heterogeneidad juega un rol preponderante al momento de determinar la zona de protección, ya que el caso homogéneo, en general, entrega zonas de protección menores al caso heterogéneo. Por lo tanto, el caso heterogéneo corresponde a una situación más conservadora.
- Diferentes realizaciones para un sistema de igual varianza entrega resultados diferentes, por lo tanto, desde un punto de vista conservador, se deberá adoptar como zona de protección el área encerrada por la envolvente de las diferentes áreas pertenecientes a cada realización.
- En nuestro país se torna relevante el desarrollo e implementación de este tipo de herramientas de gestión para la protección de los recursos subterráneos, debido al aumento de la presión sobre éstos.
- La implementación de zonas de protección, en muchas ocasiones, no sólo requerirá de la solución de los aspectos hidrogeológicos propios, sino que también de otros elementos como es el ordenamiento territorial, ya que en muchos casos el área de protección abarcará más allá de los límites del predio en que se encuentre la captación.



6 Referencias

Aguas Subterráneas: Retos y Oportunidades por M. Ramón Llamas "et al". España, Ediciones Mundi Prensa, 2001.

Decreto N° 46/2002. Norma de Emisión de Residuos Líquidos a Aguas Subterráneas. Diario Oficial de la República de Chile, Santiago, Chile, 17 de enero de 2003.

Domenico, P. and F. Schwartz. Physical and Chemical Hydrogeology. Wiley, 1998.

Espinoza, C.. Variabilidad Espacial de las Formaciones Acuíferas. Efecto sobre el Movimiento de Aguas Subterráneas y el Transporte de Contaminantes en Acuíferos. XXVII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Porto Alegre

Gelhar, L. Stochastic Subsurface Hydrology. Prentice may, 1993.

Instituto Nacional de Normalización (Chile). Agua Potable-Fuentes de Abastecimiento y Obras de Captación-Parte 2: Captación de Aguas Subterráneas. NCH 777/2: of 2002. Santiago, Chile. 2002.

New Jersey Geological Survey. Guidelines for Delineation of Well Head Protection Areas in New Jersey. New Jersey, 2003. [fecha de consulta: agosto, 2003]. Disponible en: < [http:// www.state.nj.us/dep/njgs/whpaguide.pdf](http://www.state.nj.us/dep/njgs/whpaguide.pdf) >

Orrego, J. El Estado de las Aguas Terrestres en Chile: Cursos y Aguas Subterráneas. Santiago, Terram Publicaciones, 2002.

Shu-Guang Li, Qun Liu, Huasheng Liao and Qinsheng Huang. [fecha de consulta: Agosto 2003]. Disponible en: <<http://www.egr.mse.edu/~lishug/research/igw/>>

Tompson, A.F.B., A.L. Schafer, and R.W. Smith, Impacts of physical and chemical heterogeneity on cocontaminant transport in a sandy porous medium, *Water Resources Research*, 32(4), 1996.

Wyoming Department of Environmental Quality, Water Quality Division. Methods for The Delineation of Welhead Protecction Areas (WHPAs) [fecha de consulta: Agosto 2003]. Disponible en: <[http:// www.wrds.uwyo.edu/wrds/deq/whp/whpappd.html](http://www.wrds.uwyo.edu/wrds/deq/whp/whpappd.html)>