

USO DE SISTEMAS DE INFORMACION GEOGRÁFICOS PARA LA DETERMINACION CUALITATIVA DEL RIESGO DE CONTAMINACION DE ACUIFEROS

JOSÉ F. MUÑOZ P., Dr. Ing.(1)
EDUARDO ABUJATUM G., Ing. Civil(1)

Se presenta una metodología para evaluar el riesgo de contaminación de fuentes de agua subterránea utilizadas para el suministro de agua potable. El método propuesto, basado en el método paramétrico de puntuación GOD (Foster e Hirata, 1991) consiste en estimar de una manera cualitativa la vulnerabilidad del acuífero, la carga potencial de contaminante que puede ingresar a él y las zonas de captura de las fuentes de agua subterránea. La vulnerabilidad del acuífero se obtiene mediante herramientas de sistemas de información geográficos (SIG) considerando los siguientes parámetros: **G** (modo de ocurrencia del acuífero), **O** (litología sobre el acuífero), **D** (profundidad de la napa subterránea). La carga contaminante se caracteriza de acuerdo a su grado potencial de contaminación y a su ubicación espacial sobre el acuífero. Las zonas de captura de los pozos utilizados con propósitos de agua potable, se determinan en base a un modelo numérico que simula el comportamiento del acuífero, considerando su funcionamiento en régimen permanente. Finalmente el riesgo de contaminación de los pozos se determina en forma cualitativa (bajo, intermedio, alto y extremo) analizando y superponiendo los índices de vulnerabilidad con los distintos agentes que pueden descargar contaminantes en las zonas de captura de los pozos. La metodología se ha aplicado a los acuíferos del Gran Santiago y del valle de la ciudad de Copiapó.

(1) Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Pontificia Universidad Católica de Chile. Av. Vicuña Mackenna 4860. Santiago, Chile.

1. Introducción.

El problema de la contaminación de las aguas subterráneas, se ha agudizado enormemente en muchos países en el último decenio y en algunos ya ha alcanzado un carácter de urgencia. Como una forma de solucionar en forma correcta el problema del saneamiento de las aguas potables en las zonas "críticas", la valoración del riesgo de contaminación de los acuíferos representa, por lo tanto, un instrumento imprescindible (Nicoletti y Spandre, 1996). Con el propósito de comprender el significado correcto de los conceptos que se utilizan para caracterizar el riesgo de contaminación de un acuífero se consideran las siguientes definiciones:

-Vulnerabilidad de un acuífero, que se entiende como la susceptibilidad natural que presenta el medio a la contaminación y está determinada por las características intrínsecas del acuífero.

-Riesgo de contaminación de un acuífero, que se entiende como la

severidad de las consecuencias de una contaminación específica que pueda sufrir un acuífero y que depende no sólo de la vulnerabilidad sino también de la existencia o no de una carga contaminante que pueda ingresar al ambiente subsuperficial. Es importante dejar en claro la diferencia entre vulnerabilidad y riesgo, porque el riesgo de contaminación está determinado no sólo por las características intrínsecas del acuífero, las que son relativamente estáticas, sino también por la existencia de actividades potencialmente contaminantes, las que son esencialmente dinámicas.

-Riesgo de contaminación de un pozo o fuente de agua subterránea, que se entiende como la posibilidad de que una determinada carga contaminante ingrese al acuífero y sea conducida hacia las zonas donde se explota el agua subterránea. La evaluación del riesgo de contaminación de una fuente de agua potable, permitirá determinar si un episodio de contaminación podría dañar la calidad del agua de esa fuente. Se entiende entonces que el impacto producido por una contaminación específica en un acuífero depende no sólo de la vulnerabilidad sino también de la magnitud del episodio de contaminación, del tipo de explotación que se efectúa al acuífero y del valor y uso que se le da al recurso.

Entonces, es posible tener una vulnerabilidad alta en un acuífero, sin tener riesgo de contaminación si no existe una carga contaminante significativa; y tener un alto riesgo de contaminación en presencia de una baja vulnerabilidad, si la carga contaminante es excepcional (Lobo-Ferreira J.P. y M. Oliveira, 1997).

También, es importante reconocer que el riesgo de contaminación de un acuífero será distinto para diferentes cargas contaminantes. Tiene entonces mas sentido hablar de riesgo de contaminación en relación a una clase de contaminante particular, tal como los nutrientes orgánicos, metales pesados, patógenos, etc., y crear mapas de riesgo de contaminación del acuífero o de la fuentes de agua subterránea frente a cargas contaminantes específicas o grupos de contaminantes con propiedades similares.

En este artículo se presenta una metodología para evaluar el riesgo de contaminación de fuentes de agua subterránea utilizadas para agua potable, frente a distintas cargas contaminantes, y se aplica a las ciudades de Santiago y Copiapó. El riesgo de contaminación de una fuente de agua subterránea se determina a partir de una superposición gráfica o digital de tres características espaciales: a) vulnerabilidad del acuífero, b) cargas contaminantes que pueden ingresar al acuífero y c) zonas de captura de los diferentes pozos o grupos de pozos que son utilizados para el abastecimiento de agua potable, generando mapas a escala 1:25.000 o 1:50.000 para representar cada una de las características consideradas.

La herramienta de SIG constituye un aporte fundamental para determinar la cobertura espacial de la primera de estas características (vulnerabilidad del acuífero) puesto que ésta, a su vez, depende de la indexación de tres propiedades espaciales (G: modo de ocurrencia del acuífero, O : litología sobre el acuífero y D : distancia al agua subterránea).

2. Vulnerabilidad intrínseca de un acuífero.

La evaluación de la vulnerabilidad de un acuífero, tiene como objetivo determinar zonas que sean mas vulnerables a la contaminación que otras. La vulnerabilidad

intrínseca de un acuífero es una propiedad relativa, no medible y sin dimensión. La precisión de la estimación de la vulnerabilidad depende de la cantidad y calidad de la información disponible para representar el área de estudio.

Diversas metodologías se han propuesto en los últimos años para evaluar la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos, entre las que se destacan por sus aplicaciones a casos reales, los métodos paramétricos GOD (Foster e Hirata, 1991), DRASTIC (Aller et al., 1985) y también el método SINTACS (Civita, 1994). El éxito de estos métodos se debe a su relativa simplicidad de aplicación en situaciones muy diferentes entre si, y al hecho de que las numerosas aplicaciones efectuadas han permitido un ajuste de los sistemas haciéndolos suficientemente seguros. Sin embargo hay que decir que son modelos esencialmente cualitativos mas que estrictamente cuantitativos.

En el caso de la aplicaciones a las ciudades de Copiapó y Santiago, se decidió usar el método GOD para evaluar la vulnerabilidad del acuífero debido principalmente a que dicho método tiene una estructura simple y práctica que lo hace superior a los otros métodos para interpretar los resultados.

El método GOD estima la vulnerabilidad del acuífero a través de la multiplicación de tres fases discretas representadas por tres distintas coberturas de información espacial, las cuales son **G**: tipo de acuífero, **O**: litología y grado de consolidación de los estratos ubicados encima de la zona saturada, **D**: profundidad de la napa freática.

La primera fase corresponde a la identificación del tipo de ocurrencia de las aguas subterráneas (G) y su clasificación dentro de un rango de 0 a 1. El tipo de ocurrencia varía desde la inexistencia de acuífero, pasando por acuíferos surgentes, confinados, semiconfinados, libres cubiertos a libres.

La segunda fase corresponde a la caracterización de los estratos encima de la zona saturada del acuífero (O). Esta se puede hacer en términos de dos características: (i) el grado de consolidación y, de esta forma, la presencia o ausencia de permeabilidad por fisuración y (ii) el carácter litológico, e indirectamente de esta forma, la porosidad relativa, permeabilidad y contenido de humedad o retención específica de la zona no saturada. Mediante esta información se puede obtener un valor en una escala 0,4 a 1,0.

La tercera fase consiste en la determinación de la profundidad de la napa freática, para el caso de acuíferos libres, o la profundidad del techo para el caso de acuíferos confinados. Según el valor de esta profundidad (D), la tercera componente toma un valor entre 0,4 y 1,0.

El producto de estas tres componentes espaciales representa la variación espacial del índice de vulnerabilidad, que tiene un valor que varía entre 0 y 1, que indica desde una vulnerabilidad despreciable hasta una extrema.

Una limitación reconocida del método GOD es la no incorporación del papel de los suelos en la mitigación de vulnerabilidad, especialmente en zonas rurales donde existen fuentes agrícolas de contaminación. Foster e Hirata (1991) consideraron esta omisión durante la elaboración del manual CEPIS, pero en consulta con otros investigadores, decidieron omitir el parámetro debido al hecho de que muchos países no tienen cobertura nacional de mapeo de suelos, ni siquiera a nivel de reconocimiento. Por tanto, el incluirlo habría obstaculizado el empleo del método en muchos ambientes hidrogeológicos. Sin embargo, la intención no es hacer caso

omiso de este tipo de datos cuando se disponen.

En este caso, se define una cuarta fase que corresponde a la clasificación del tipo de suelo (S). Dependiendo entonces del tipo de suelo en cuestión, y por lo tanto de su capacidad de dejar pasar los contaminantes, esta cuarta componente tomará un valor entre 0,5 y 1,0. Cabe destacar, que para las zonas urbanas el valor que se considera es 1,0 puesto que se supone inexistente esta capa de suelo o que simplemente el contaminante es depositado bajo ella. Bajo este nuevo escenario, el producto de las cuatro componentes espaciales: G,O,D y S representa la variación espacial del índice de vulnerabilidad.

Las herramientas de SIG constituyen un gran aporte para la estimación de la vulnerabilidad del acuífero mediante el método GOD (o GODS si se incorpora la variable S) el que se materializa a través de las siguientes cinco etapas principales:

- a) Ingreso al sistema de la cobertura espacial de tipo de acuífero (G); en los casos prácticos de estudio mediante digitalización manual de dicha capa de información, la cual consiste en elementos tipo polígono. Posterior rasterización de está cobertura vectorial seguido de asignación a cada celda del índice correspondiente (0 a 1).
- b) Ingreso al sistema de la cobertura espacial de litología de la zona no saturada (O); en las aplicaciones en estudio mediante digitalización manual de dicha capa de información, la cual también consiste en elementos tipo polígono. Posterior rasterización de está cobertura vectorial seguido de asignación a cada celda del índice correspondiente (0,4 a 1).
- c) Ingreso al sistema de la cobertura espacial de distancia al agua subterránea (D); en el caso práctico de la ciudad de Copiapó mediante digitalización manual de curvas de isoprofundidad del agua subterránea, la cual consiste en elementos tipo línea. Posterior rasterización de esta cobertura vectorial seguido de interpolación espacial. Finalmente, reclasificación de la matriz resultante de distancia al agua subterránea en el rango 0,4 a 1. En la aplicación correspondiente a Santiago, primero, se digitalizó manualmente las curvas de nivel y cotas características del terreno. Paralelamente, se ingresó información de la altura del nivel de agua subterránea en un vasto conjunto de pozos. Posteriormente, ambas capas vectoriales de información fueron rasterizadas y sometidas independientemente a interpolación espacial. Finalmente, se sustrajo la matriz de altura de agua subterránea a la matriz de altura del nivel de terreno (ambas medidas respecto a la misma referencia) resultando una matriz de distancia al agua subterránea medida desde el nivel de terreno, la que fue por último reclasificada en el intervalo 0,4 a 1.
- d) Ingreso al sistema de la cobertura espacial de tipo de suelo (S); en el caso práctico del acuífero del Gran Santiago mediante digitalización manual de dicha capa de información, la cual consiste en elementos tipo polígono. Posterior rasterización de está cobertura vectorial seguido de asignación a cada celda del índice correspondiente (0,5 a 1). En el caso de la aplicación al acuífero de la ciudad de Copiapó se omitió esta cuarta variable (S) por no disponerse de antecedentes.
- e) Obtención de la matriz índice de vulnerabilidad GOD (o GODS si

corresponde) mediante la multiplicación (superposición) de las matrices G, O y D (y S si corresponde) resultando una matriz cuyos valores varían entre 0 y 1, la cual al ser reclasificada en dominios de diferente cuantía se obtiene una zonificación del índice de vulnerabilidad desde despreciable hasta extrema.

3. Carga contaminante.

A diferencia de lo que sucede con la vulnerabilidad, la literatura especializada no presenta muchos métodos para evaluar y sistematizar la carga potencialmente contaminante dirigida al subsuelo. El único método que cuenta con una estructura bien elaborada y definida para evaluar sistemáticamente la carga contaminante, es el descrito por Foster e Hirata en 1991. Este método se desarrolló para evaluar el riesgo de contaminación a partir de la vulnerabilidad del acuífero estimada mediante el método GOD. Los otros métodos que aparecen en la literatura no tienen asociado una estructura bien definida y consisten básicamente en recomendaciones de cómo clasificar la carga contaminante.

El método descrito por Foster e Hirata se basa en la identificación de un conjunto de características para las distintas componentes de la carga contaminante: tipo de fuente (puntual o difusa), tipo de contaminante (clasificación) y características de interacción con el medio de transporte (atenuación, degradación, persistencia, movilidad, etc.), intensidad, ubicación y forma de la depositación del contaminante, y duración de la aplicación del contaminante. Este esquema permite obtener un valor entre 0 y 1 para cada clase de carga contaminante (hidrocarburos, agroquímicos, desechos líquidos industriales, etc.).

Desde un punto de vista teórico, y suponiendo una disponibilidad óptima de información, esta metodología permitiría evaluar cuantitativamente la carga contaminante. Sin embargo, en la mayoría de los casos, como lo son el de las ciudades de Santiago y Copiapó, no se dispone de la información completa para la obtención de índices realmente confiables.

Alternativamente, la metodología propuesta en este trabajo consiste en identificar y clasificar las potenciales fuentes de contaminación, labor destinada a ubicar espacialmente las actividades potencialmente contaminantes y obtener como resultado planos temáticos en papel transparente de las distintas actividades contaminantes, que se pueden superponer con el plano de vulnerabilidad a fin de obtener una idea del riesgo de contaminación de las aguas subterráneas debido a las diferentes actividades potencialmente contaminantes que se desarrollan. Las herramientas de SIG también constituyen una ayuda en este caso, en lo que respecta al ingreso de la información referente a las distintas actividades potencialmente contaminantes (en los casos bajo estudio mediante digitalización manual) y posterior superposición (digital o gráfica) de cada una de ellas con la cobertura espacial de vulnerabilidad del acuífero.

4. Riesgo de contaminación.

La definición de la forma en que interactúan la carga contaminante y la vulnerabilidad es en sí la metodología para evaluar el riesgo.

El método propuesto por Foster e Hirata (1991), considera la determinación del

riesgo de contaminación del agua subterránea mediante la multiplicación del índice de vulnerabilidad (valor entre 0 y 1) calculado a través del esquema GOD (o GODS) y el índice de carga contaminante (valor entre 0 y 1) obtenido en base al esquema propuesto por los mismos autores. El producto de estos índices se clasifica en 5 tipos, dependiendo del valor obtenido: riesgo extremo, elevado, moderado, bajo y muy bajo.

Ciertos tipos de carga contaminante, como aquellos que contienen contaminantes altamente móviles y persistentes o los dispuestos bajo la napa freática, ocasionan un alto riesgo de contaminación del acuífero, en forma casi independiente de su vulnerabilidad. En todas las otras circunstancias, la interacción (multiplicación) entre las componentes de carga contaminante y vulnerabilidad determinan el riesgo de contaminación. Foster e Hirata (1991) proponen un método gráfico de interacción entre ambas componentes y que consiste básicamente en un gráfico de dos entradas en las que están representadas la vulnerabilidad y la carga contaminante y según el lugar en el espacio en que se intercepten ambas resultará un cierto grado de riesgo.

No obstante en muchos casos prácticos, como son el de las dos aplicaciones en estudio, no es posible disponer de la información suficiente para determinar con algún grado de seguridad el índice de carga contaminante, por lo que no es posible aplicar directamente dicha metodología.

En forma alternativa, en este trabajo se determina el riesgo de contaminación cualitativamente. El esquema propuesto considera el tratamiento de las fuentes potencialmente contaminantes que se estiman relevantes por separado de modo que la resultante está dada por un conjunto de coberturas espaciales representativas de todas y cada una de las categorías contaminantes consideradas, en formato gráfico (mapas en papel transparente) o digital, que son superpuestas en forma independiente (de manera gráfica o digital) a la cobertura de vulnerabilidad, determinada a través del esquema GOD (o GODS), con el fin de estudiar la distribución espacial del riesgo de contaminación del acuífero por un contaminante específico. Las herramientas de SIG constituyen una ayuda en este caso, en lo que concierne a la superposición digital de cada una de las coberturas de carga contaminante con la cobertura espacial de vulnerabilidad del acuífero. Cabe señalar que, dependiendo de la profundidad de los resultados que se pretenda obtener, esta puede ser una superposición simple (gráfica en pantalla) como también una integración física y topológica de capas de información (aspecto primordial dentro de un SIG).

Por otra parte, respecto de la metodología para evaluar el riesgo de contaminación de las fuentes de agua subterránea para agua potable, el esquema propuesto considera la determinación mediante una modelación hidrogeológica de las zonas de captura de las captaciones de agua subterránea y posterior contraste en forma gráfica o digital de dicha información con las coberturas espaciales de vulnerabilidad intrínseca del acuífero y de diversas categorías de contaminantes potenciales consideradas.

5. Aplicaciones.

5.1. Acuífero de la ciudad de Copiapó.

La zona de estudio comprendió el acuífero del valle del río Copiapó, desde aproximadamente la junta con la quebrada Carrizalillo por aguas arriba hasta la angostura conformada por los cerros Pichincha y Bramador por aguas abajo. Como resultado de la aplicación del método GOD, resultó que la vulnerabilidad intrínseca determinada para el acuífero de la zona de Copiapó varía entre baja y extrema, no identificándose ninguna área de vulnerabilidad despreciable. La clase de vulnerabilidad más común en el área de estudio es la moderada, lo que implica que toda el agua subterránea de la zona de estudio es potencialmente vulnerable a ser contaminada, si se dan las condiciones adecuadas.

Se identificaron una serie de actividades potencialmente contaminantes en la zona de estudio, entre las cuales las principales son: saneamiento in situ, actividades mineras y actividades agrícolas.

Considerando la vulnerabilidad del acuífero y las diversas actividades contaminantes que se desarrollan en la zona, se pudo concluir que en términos generales el acuífero del valle del río Copiapó -en la zona de estudio- presenta un riesgo de contaminación significativo por una o más actividades potencialmente contaminantes. Al respecto, en la Figura 1 se presentan los principales relaves mineros existentes en la zona sobre el mapa de vulnerabilidad del acuífero.

En relación a los recintos de pozos para producción de agua potable actualmente en operación, se estableció que todos presentan un riesgo importante de contaminación. En este sentido, en la Figura 2 se muestra las zonas de captura de dichas plantas sobre el mapa de vulnerabilidad del acuífero.

5.2. Acuífero del Gran Santiago.

La zona de estudio abarcó un gran sector del acuífero de Santiago, desde el río Maipo por el sur hasta el sector de la comuna de Quilicura por el norte y desde el bloque preandino por el este hasta alrededor de la longitud del Aeropuerto Comodoro Arturo Merino Benítez por el oeste.

La evaluación de la vulnerabilidad de los acuíferos se llevó a cabo mediante el esquema GODS resultando que la mayor parte de la zona de estudio muestra una vulnerabilidad despreciable, baja o moderada. No obstante, existen áreas de vulnerabilidad alta y extrema que son en general de poca extensión.

Las fuentes de contaminación principales del acuífero identificadas y analizadas son: a) saneamiento in situ, b) cultivos agrícolas, c) actividades industriales, d) disposición de residuos sólidos y e) cursos superficiales.

A partir de la vulnerabilidad del acuífero y las diferentes actividades contaminantes existentes, se pudo concluir que en términos generales diversos sectores del acuífero del Gran Santiago presentan un riesgo de contaminación importante por una o más actividades potencialmente contaminantes.

Respecto de las plantas de pozos para producción de agua potable actualmente en operación, se estableció que varias presentan un riesgo importante de contaminación.

6. Conclusiones.

- a) Se propone un esquema para la determinación del riesgo de

contaminación de las fuentes de agua subterránea para agua potable, el que resulta adecuado a la realidad de un país en vías de desarrollo. Dicha metodología consiste en la determinación y comparación de la vulnerabilidad de los acuíferos, las cargas potencialmente contaminantes a la napa subterránea y las zonas de captura de las fuentes de agua subterránea para agua potable.

b) Las herramientas de SIG constituyen un apoyo primordial, primero, para estimar la vulnerabilidad del acuífero mediante el esquema GOD (o GODS si se considera la variable S), y segundo, para la superposición digital de las distintas coberturas de carga contaminante con el mapa de vulnerabilidad del acuífero a fin de conocer el riesgo de contaminación del acuífero para cada una de dichas actividades potencialmente contaminantes.

c) La metodología propuesta se aplicó satisfactoriamente a los acuíferos del Gran Santiago y del valle del río Copiapó en el sector de la ciudad homónima resultando riesgos de contaminación significativos para algunos de los recintos de pozos localizados en la primera y todas las plantas de pozos ubicadas en la segunda.

Bibliografía

Aller, L., T. Bennett, J.H. Lehr y R. Petty, 1985. DRASTIC: A standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic settings.

US-EPA Report 600/2-85/018.

Civita, M., 1994. Le carte della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento: teoria e pratica. Pitagora Editrice Bologna. 325 pp.

Foster, S.S.D. y R.C.A. Hirata, 1991. Determinación del riesgo de contaminación de aguas subterráneas. CEPIS, Lima, Perú.

Lobo-Ferreira, J.P. y M. Oliveira, 1997. Drastic groundwater vulnerability mapping of Portugal. XXVII IAHR Congress, San Francisco. pp 132-137.

Nicoletti, F.P. y R. Spandre, 1996. Valoración del riesgo de Contaminación de las aguas subterráneas por nitratos mediante el uso de los modelos paramétricos Drastic y Sintacs. Ingeniería del agua. Vol 3 No. 4 diciembre, pp 7-24.





