

Informe de TNO

“Fortalecimiento de los Estudios Hidrogeológicos del SENASA”

Estudio del Acuífero Patiño – Informe técnico 2.8:

Riesgos de polución en el Area Piloto

Fecha

Febrero del 2001

Autor

Carlos E. Molano C.

Netherlands Institute of
Applied Geoscience TNO
P.O.Box 6012
2600 JA Delft
The Netherlands
www.nitg.tno.nl

Código del proyecto

005.50363

Código del contrato

Contrato No 28/2000

Contratante

Servicio Nacional de Saneamiento Ambiental (SENASA)

All rights reserved.

No part of this publication may be reproduced and/or published by print, photoprint, microfilm of any other means without the previous written consent of TNO.

In case this report was drafted on instructions, the rights and obligations of contracting parties are subject to either the Standard Conditions for Research Instructions given to TNO, or the relevant agreement concluded between the contracting parties.

Submitting the report for inspection to parties who have a direct interest is permitted.

© 1998 TNO

Netherlands Institute of Applied Geoscience TNO has main offices in Delft and Utrecht and branch locations in Heerlen, Nuenen and Zwolle.

The Institute is the central geoscience institute in the Netherlands for information and research on the sustainable management and use of the subsurface and its natural resources.

Netherlands Organization for
Applied Scientific Research TNO

The standard Conditions for Research Instructions given to TNO, as filed at the Registry of the District Court and the Chamber of Commerce in The Hague shall apply to all instructions given to TNO.

Resumen

Dentro del proyecto “Fortalecimiento de los Estudios Hidrogeológicos del SENASA” está contemplado el Estudio del Acuífero Patiño a través de una “Zona Piloto”. En la misma, una parte importante es la determinación del riesgo de polución, que eventualmente pueda causar la degradación de la calidad del agua subterránea.

En la zona piloto se determinó una fuente potencial de contaminación difusa (areal) correspondiente a la infiltración de aguas servidas y un total de 65 fuentes puntuales de contaminación potencial correspondiente a industrias, estaciones de servicio, lavanderías, talleres, zonas de desechos sólidos, terminales de autobuses, subestaciones eléctricas, desechos hospitalarios y cementerios.

Se incluye también el grado de vulnerabilidad del acuífero a ser impactado, utilizando dos metodologías para su cuantificación, obteniendo con ambos procedimientos resultados similares, teniendo un acuífero con vulnerabilidad predominantemente moderada. Sin embargo, hay que anotar que en general los acuíferos menos vulnerables, una vez contaminados son más difíciles de restaurar. Por otra parte, una fuente de contaminación potencialmente peligrosa, aún en un acuífero con vulnerabilidad moderada, tiene un riesgo alto, más si es un acuífero que se explota intensamente.

La información obtenida es aproximada, ya que no se cuenta con datos sobre los vertimientos con la intensidad de la carga contaminante. Con el tiempo se debe complementar la información con datos esenciales que por razones técnicas, de tiempo y dificultades del acceso a la información son difíciles de obtener hoy en día.

Contenido

Resumen i

Lista de figuras	iii	
1	Introducción	1
2	Metodología	2
2.1	Bases conceptuales del riesgo de contaminación	2
2.2	Determinación de la carga contaminante.....	3
2.3	Determinación de la vulnerabilidad del acuífero	4
3	Fuentes potenciales de contaminación.....	7
3.1	Fuentes Dispersas (aguas servidas).....	7
3.2	Fuentes Puntuales	8
4	Vulnerabilidad del acuífero.....	14
4.1	Mapa de vulnerabilidad “GOD”	14
4.2	Mapa de vulnerabilidad “DRASTIC”	16
5	Riesgo de contaminación	19
6	Conclusiones	21
7	Recomendaciones	23
7.1	Deficiencia de la información del tipo de vertimientos	23
7.2	Pozos de monitoreo.....	23
7.3	Modelos de flujo y transporte	24
8	Referencias.....	25

APÉNDICES

Apéndice A.	Procedimiento del índice de vulnerabilidad “GOD”
Apéndice B.	Procedimiento del índice de vulnerabilidad “DRASTIC”
Apéndice C.	Inventario de fuentes potenciales de contaminación
Apéndice D.	Índice de vulnerabilidad “GOD” para la Zona Piloto
Apéndice E.	Índice de vulnerabilidad “DRASTIC” para la Zona Piloto

Lista de figuras

Figura 2-1:	Cuenca hidrográfica de la Zona Piloto.	2
Figura 3-1:	Fuentes potenciales de contaminación.....	9
Figura 4-1:	Profundidad a la tabla de agua.....	15
Figura 4-2:	Mapa de vulnerabilidad “GOD”	16
Figura 4-1:	Mapa de vulnerabilidad “DRASTIC”	18
Figura 5-1:	Mapa de riesgo de contaminación de aguas subterráneas.....	20

Lista de tablas

Tabla 3-1: Distribución de fuentes puntuales de contaminación	8
---	---

1 Introducción

Este informe hace parte del Volumen 2 “Estudio del Acuífero Patiño”, informe técnico final del proyecto “Fortalecimiento de los Estudios Hidrogeológicos del SENASA” (FEHS). Los otros volúmenes tratan el banco de datos hidrogeológicos y las metodologías y capacitación del Departamento de Recursos Hídricos.

El riesgo que tiene un acuífero a ser contaminado depende básicamente de dos factores: la vulnerabilidad del acuífero a ser contaminado, y la presencia de fuentes de contaminación.

Por otra parte, la importancia de la determinación del riesgo de polución en el acuífero a través de la vulnerabilidad del acuífero a ser impactado, y a la determinación de fuentes potenciales de contaminación radica en los siguientes aspectos principales:

- El Acuífero Patiño es la fuente principal de abastecimiento de agua potable e industrial en la Zona Piloto, sobre el cual hay asentamientos urbanos de importancia; por lo tanto, la prevención del deterioro de la calidad del agua subterránea debe recibir una atención detallada, evaluando sus condiciones geoambientales.
- El inventario de fuentes potenciales de contaminación es la forma de tener un conocimiento primario directo del tipo de contaminación potencial, a que el acuífero pueda ser sometido.
- Generalmente la remediación de aguas subterráneas contaminadas son muy costosas, de alto nivel tecnológico y toman tiempo (con frecuencia decenas de años), y en ocasiones imposibles de mitigar por el tiempo y costo excesivo, o la impracticidad técnica de su rehabilitación. De ahí que la prevención del deterioro de la calidad del agua sea una necesidad prioritaria.

Agradecimientos

Se agradece al grupo del Departamento de Recursos Hídricos del SENASA, en particular al supervisor del área: Armindo Brites, por su gran apoyo en campo. Finalmente el apoyo y colaboración de Jac van der Gun de TNO.

2 Metodología

La metodología de análisis del riesgo de polución se aplica únicamente a la Zona Piloto del Acuífero Patiño, correspondiente a las cuencas hidrográficas de los Arroyos Ñemby, Mbocayaty y Pai Nú, (Figura 2-1). Sin embargo la metodología aquí empleada se puede extender a la demás área del Acuífero Patiño.

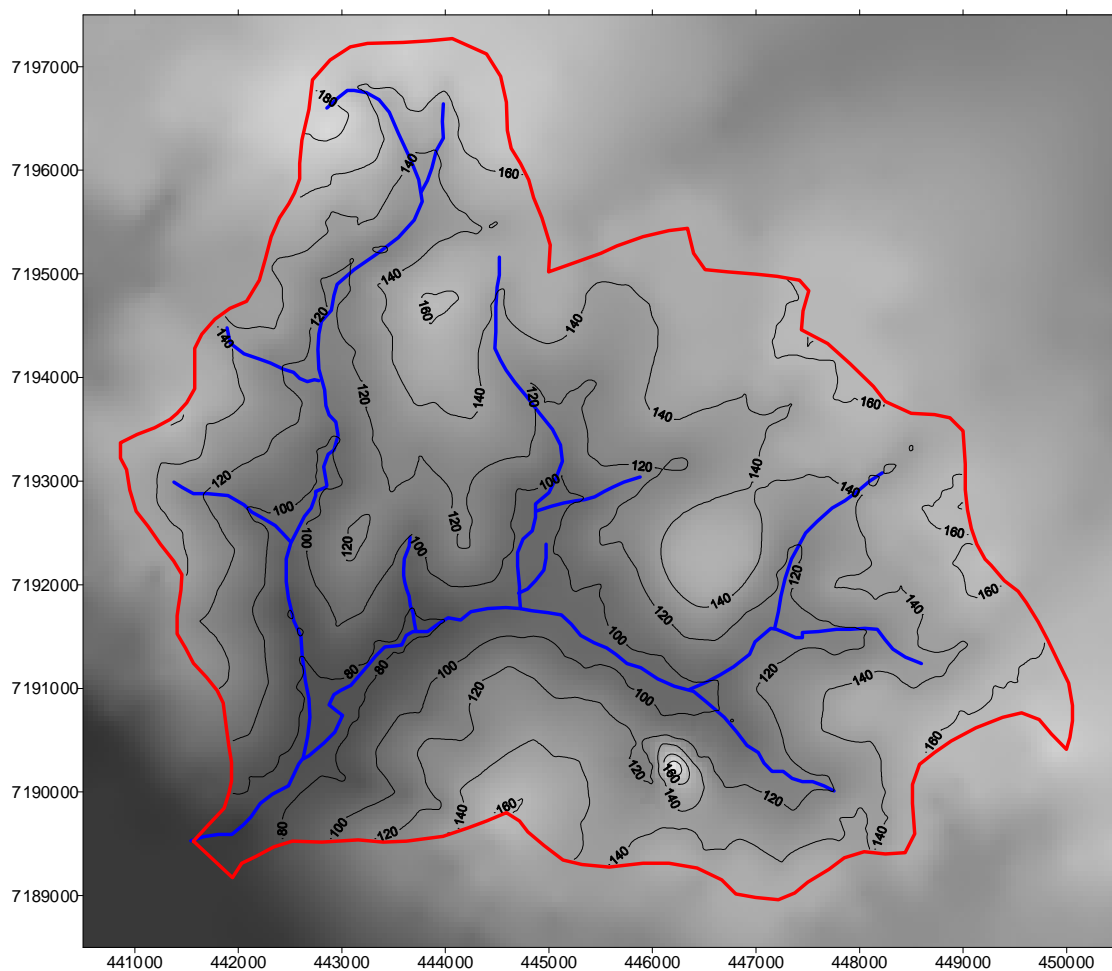


Figura 2-1: Cuenca hidrográfica de la Zona Piloto.

2.1 Bases conceptuales del riesgo de contaminación

El riesgo de contaminación de las aguas subterráneas es el resultado de la interacción entre la carga contaminante y la vulnerabilidad del acuífero (Foster e Hirata, 1988).

La carga contaminante es aquella carga que causa ó tiene un potencial de causar impacto en el medio ambiente subsuperficial, como resultado de fenómenos naturales y/ó actividades humanas.

La vulnerabilidad es la característica intrínseca que tienen los acuíferos y suelos como medios protección de los fenómenos adversos naturales y humanos.

2.2 Determinación de la carga contaminante

Con base en el concepto de riesgo se debería caracterizar en detalle la carga contaminante, pero su determinación no es tan sencilla y directa, ya que una caracterización completa involucra la obtención de información aún no disponible, generalmente costosa de obtener, la cual está fuera del alcance del presente estudio. Sin embargo, se dan algunos lineamientos con base en las fuentes potenciales de contaminación teniendo en cuenta que una caracterización exige determinar los siguientes factores:

1. El tipo y clase de carga contaminante
2. La intensidad de la carga contaminante
3. El modo de disposición de la carga contaminante
4. El tiempo de aplicación de la carga contaminante

(1) Tipo y clase de carga contaminante

Hay diverso tipo de contaminantes, varios sufren degradación ó transformación como resultado de actividades biogénicas, físicas y químicas; algunos contaminantes volátiles se degradan en presencia de oxígeno. Su decrecimiento y retención también dependen de las características físicas y químicas del medio poroso involucrado, sin embargo este efecto se puede representar (en forma generalizada) como parte la vulnerabilidad del acuífero.

Los principales contaminantes que predominan en las aguas subterráneas son los metales pesados, los químicos orgánicos, y otras sustancias como fertilizantes y pesticidas, bacterias y virus.

(2) Intensidad de la carga contaminante

Tiene relación con la concentración del contaminante y con la tasa volumétrica a la cual se infiltra en el subsuelo; es decir depende de las condiciones geomorfológicas i físicas del suelo y de la hidrología del área; sin embargo también este efecto se caracteriza en forma generalizada en la vulnerabilidad del acuífero.

(3) Modo de disposición de la carga contaminante

El modo de disposición en el suelo también influye, si es una contaminación puntual, difusa, ó lineal; también si se dispone sobre la superficie del terreno ó directamente en el subsuelo, de las precauciones y controles en su disposición. Depende también de la carga hidráulica aplicada al contaminante, incluyendo la infiltración a partir de la precipitación.

(4) Tiempo de aplicación

Se refiere al intervalo de tiempo en que la fuente contaminante actúa. Puede ser instantánea en el caso de accidentes, permanente en el caso de desechos urbanos sin alcantarillado ó zonas de riego agrícola, intermitentes, temporales.

2.3 Determinación de la vulnerabilidad del acuífero

La determinación de la vulnerabilidad del acuífero se hace considerando los planteamientos presentados en los numerales anteriores mediante procedimientos que caracterizan la sensibilidad del acuífero a ser adversamente afectado por una carga contaminante.

Como resultado final se tienen mapas de vulnerabilidad, dando valores a los atributos que caracterizan la sensibilidad del acuífero a la contaminación. Este tipo de mapas son muy útiles, pero se deben tomar como mapas cualitativos ó semicuantitativos, ya que dependen del valor del atributo asignado a la característica hidrogeológica; por otra parte la característica hidrogeológica puede ser difícil de determinar ó estimar, teniendo asignaciones de carácter aproximado, con frecuencia de carácter subjetivo, estimados por la calificación que dé el hidrogeólogo.

Existen varios procedimientos para la determinación de la vulnerabilidad del acuífero (Jaroslav y Zaporozec, 1994), algunos muy complejos que exigen el conocimiento detallado del acuífero. Para el presente estudio se utilizaron dos procedimientos que se basan fundamentalmente en conceptos hidrogeológicos generales: el procedimiento con el acrónimo GOD (ó DIOS), y el procedimiento con el acrónimo DRASTIC. A continuación se dá un resumen de estas metodologías.

2.3.1 Procedimiento “GOD”

El procedimiento GOD (por sus siglas en inglés Groundwater occurrence, Overlying lithology, Depth to groundwater table), llamado también DIOS (Distancia a la tabla de agua subterránea, Ocurrencia del agua subterránea, Substrato litológico), fue propuesto por Foster (1987), y en el Apéndice A se dá el gráfico base para su determinación. Tiene en cuenta los siguientes tres atributos hidrogeológicos:

(1) Ocurrencia del agua subterránea.

Básicamente la ocurrencia consiste en el tipo de acuífero, teniendo asignación de atributos dentro de un rango entre cero (0) y uno (1). Cero para ocurrencia nula, hasta uno para acuíferos no confinados (libres ó de tabla de agua) permeables; valores intermedios se presentan para acuíferos surgentes, confinados, semiconfinados y libres cubiertos.

(2) Sustrato Litológico

El sustrato litológico se refiere a las condiciones geohidráulicas de la zona no saturada, determinando los atributos con respecto a la porosidad, conductividad hidráulica, retención específica; también incluye el grado de consolidación, teniendo en esta forma la presencia ó ausencia de fisuras. La escala de atributos está entre 0.4 para suelos residuales arcillosos, hasta 1.0 para gravas aluviales, calizas blandas y rocas duras fisuradas.

(3) Distancia (profundidad) a la tabla de agua

Finalmente se tiene la profundidad a la tabla de agua en acuíferos no confinados ó profundidad al techo del acuífero en confinados, teniendo una escala entre 0.4 para profundidades mayores a 100 m hasta 1.0 para profundidades menores a 2 m.

El grado de vulnerabilidad resulta de la multiplicación de los valores de los índices anteriores, teniendo resultados que van desde 0 con vulnerabilidad despreciable, hasta 1 con vulnerabilidad extrema

2.3.2 Procedimiento “DRASTIC”

El procedimiento DRASTIC (por sus siglas en inglés: Depth to Water, Net Recharge, Aquifer Media, Soil Media, Topography, Impact of Vadose Zone, Hydraulic Conductivity), fue propuesto por Aller et al (1987), y en el apéndice B se dá un resumen de su metodología de aplicación.. Tiene en cuenta los siguientes siete factores:

(1) Profundidad a la tabla de agua

Se le asigna un atributo entre 1 para profundidades mayores a 30.4 m hasta 10 para profundidades menores a 1.5 m.

(2) Recarga

Se le asigna un valor entre 1 para recargas menores a 51 mm/año, hasta 9 para recargas mayores a 250 mm/año.

(3) Material del acuífero (litología)

Se le asigna un valor entre 1 para medios poco permeables (arcillas, lutitas) hasta 10 para medios muy permeables (calizas carsticas).

(4) Material del suelo

Se le asigna un valor entre 1 para arcillas no dispersivas, hasta 10 para gravas ó cuando hay ausencia de suelo.

(5) Morfología (pendiente topográfica)

Se le asigna un valor entre 3 para pendientes superiores a 12% hasta 10 para terrenos bastante planos con pendientes inferiores al 2%.

(6) Impacto de la zona vadosa

Se le asigna un valor entre 1 para arcillas y limos, hasta 10 para medios muy permeables (calizas carsticas).

(7) Conductividad hidráulica del Acuífero

Se le asigna un valor entre 1 para conductividades hidráulicas menores a 4.1 m/d hasta 8 para conductividades hidráulicas mayores a 81.5 m/d.

A los valores de los atributos anteriores se les da un factor de ponderación que está entre 1 y 5 según el parámetro sea menos ó mas significativo.

Finalmente se suman los 7 atributos anteriores ya corregidos por su factor de ponderación, teniendo como resultado el índice de vulnerabilidad con valores que están entre 26 para acuíferos poco vulnerables hasta 220 para acuíferos con vulnerabilidad extrema.

3 Fuentes potenciales de contaminación

Como se mencionó en el capítulo anterior la caracterización detallada de una carga contaminante es un proceso largo y costoso, sin embargo se puede llegar a una aproximación inicial mediante la identificación de las fuentes potenciales de contaminación. Por otra parte, los requerimientos para su caracterización no deben perderse de vista, ya que en el futuro se requerirá un conocimiento más detallado de la carga contaminante que puede llegar al subsuelo, incluyendo el muestreo de efluentes, inspección de procesos, monitoreo cerca de las fuentes de contaminación, cuantificación de la retención en el suelo, dispersión en los acuíferos, etc.

Las fuentes potenciales de contaminación se clasificaron en (i) fuentes dispersas y (ii) fuentes puntuales. Pueden existir otros tipos de fuentes intermedias ó de tipo lineal (por ejemplo ríos y tuberías), y algunas puntuales pueden considerarse dispersas dependiendo de la escala; pero a nivel de la Zona Piloto se pueden clasificar en dispersas y puntuales.

3.1 Fuentes Dispersas (aguas servidas)

Como fuente de carga contaminante dispersa se considera que exclusivamente la contaminación por aguas servidas (aguas negras) es la fuente potencial principal de contaminación dispersa, ya que no existe alcantarillado. La zona piloto ha tenido importantes desarrollos urbanos, en donde la carga cloacal es importante. Sin embargo, sin una investigación específica es imposible de determinar su influencia en el acuífero (Foster e Hirata, 1988).

3.1.1 Contaminación potencial de la carga contaminante cloacal

Para tener una aproximación general sobre el potencial de la contaminación de la contaminación cloacal, se utiliza la propuesta por los mismos autores (Foster e Hirata, 1988), en donde asignan un potencial de contaminación de la carga cloacal entre bajo, medio y alto con base en (i) la extensión cubierta por alcantarillado y (ii) la densidad de población. Para la Zona Piloto se considera que no hay ninguna cobertura de alcantarillado y la densidad de población es media, teniendo una potencialidad “alta” de contaminación por aguas negras (cloacales).

3.1.2 Componentes principales de la carga contaminante cloacal

Los principales componentes que se podrían encontrar por contaminación de aguas servidas son (i) nutrientes y sales y (ii) bacterias patógenas y virus.

El nitrógeno depositado por la carga cloacal es en general alto, y puede estar representado por contenidos altos de nitratos. También es corriente la presencia de coliformes fecales y números variables de organismos patógenos dependiendo de la salud de la población.

También es de esperarse la presencia de carbón orgánico disuelto (COD) con compuestos halogenados sintéticos por el uso de solventes, desinfectantes y desodorantes. Es frecuente también el uso de cloración en los sistemas de abastecimiento de agua subterránea en la Zona Piloto; con los anteriores compuestos se podrían generar haloformos tóxicos que son relativamente persistentes y muy dañinos para la salud.

3.1.3 Eventos históricos

Teniendo la Zona Piloto una potencialidad alta de la contaminación cloacal, es de esperarse que se halla presentado en el pasado y tenga un chance alto de ocurrir en el futuro. Desafortunadamente no hay estadísticas sobre la ocurrencia de este tipo de contaminación y por razones de seguridad, protección y privacidad, si ha ocurrido no se conoce, ya que normalmente se presentan obstáculos en obtener dicha información. Sin embargo, durante los inventarios realizados varias personas hicieron comentarios sobre la existencia unos tres casos en donde hubo este tipo de contaminación. Aún hoy en día en uno de los pozos profundos persiste esta contaminación y es de esperarse que en varios esté ocurriendo, pero por el tipo de información requerida, usualmente hay renuencia de los propietarios a suministrar este tipo de datos.

3.2 Fuentes Puntuales

Las fuentes puntuales de contaminación identificadas en la Zona Piloto se agruparon en 10 categorías, las cuales se presentan en la Tabla 3-1.

Tabla 3-1: Distribución de fuentes puntuales de contaminación

Fuente Puntal	No. de fuentes
1. Basureros	4
2. Cementerios	3
3. Centros de salud	1
4. Desechos Hospitalarios	1
5. Industrias	24
6. Subestaciones eléctricas	3
7. Lavanderías	3
8. Estaciones de Servicio	17
9. Terminal de ómnibus	6
10. Talleres	3

El listado de estas fuentes potenciales de contaminación se incluyen en el Apéndice C, y su localización se presentan en la Figura 3-1

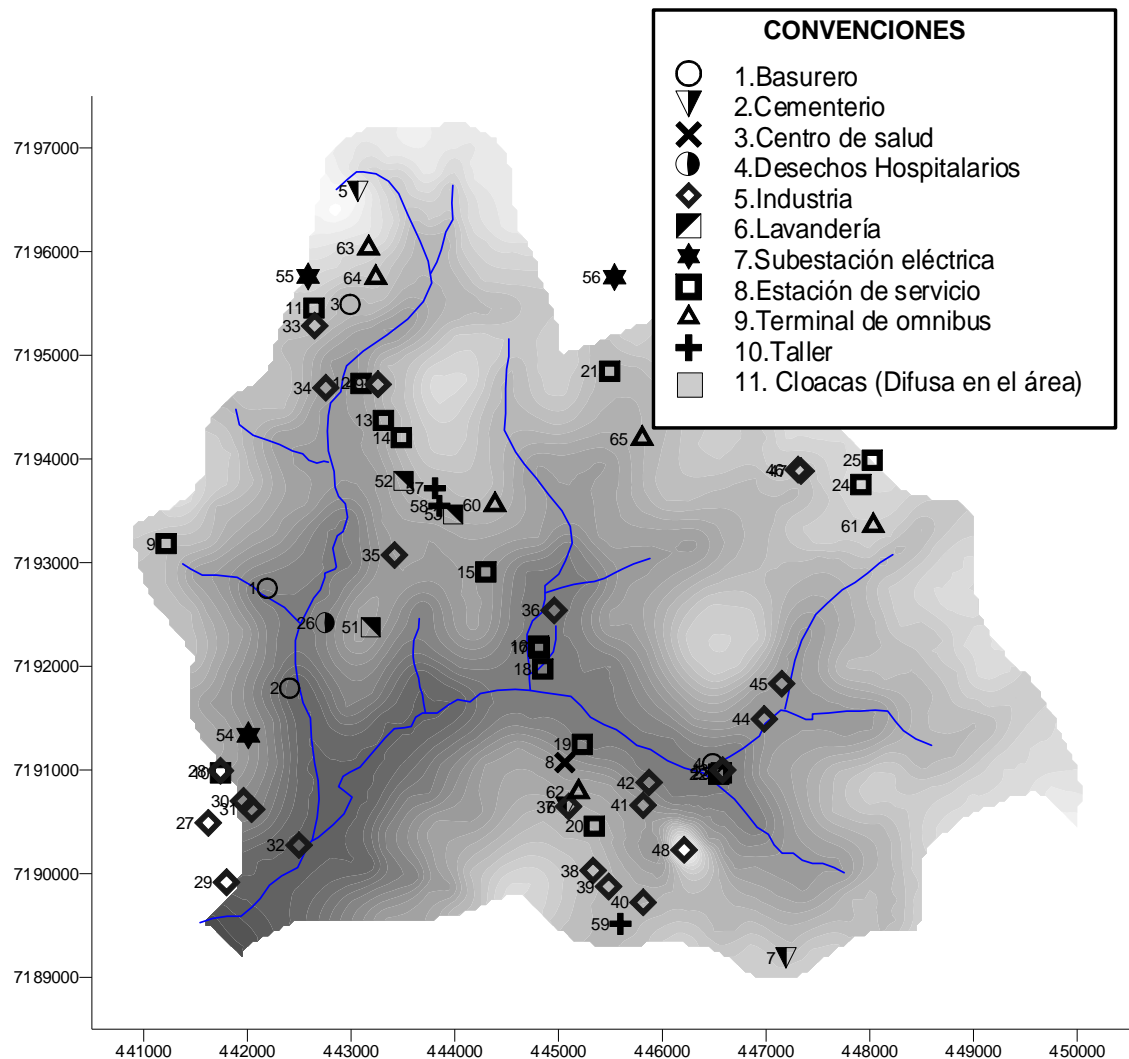


Figura 3-1: Fuentes potenciales de contaminación

3.2.1 Basureros y cementerios (disposición de desechos sólidos)

En área de estudio se localizaron cuatro (4) zonas de desechos de basuras municipales y tres (3) zonas de cementerios. Se incluyen los cementerios ya que también se pueden considerar como una forma de disposición de residuos sólidos.

Los residuos domésticos municipales, se tratan más como basureros que rellenos sanitarios, ya que su único tratamiento en algunos casos es conformar los residuos domésticos con suelo. A nivel local se pueden comportar como zonas de fuentes difusas, pero a nivel de la cuenca piloto como puntuales. También se presenta el hecho que los habitantes ribereños cercanos a los cauces depositen su basura sobre los mismos.

Para conocer en detalle el impacto de los basureros sobre el agua subterránea sería necesario determinar (i) el caudal del lixiviado generado y (ii) la composición del lixiviado.

En general las zonas de disposición de desechos sólidos de tipo municipal, presentan gran cantidad de nutrientes, sales, y en menor proporción compuestos orgánicos sintéticos, metales pesados y patógenos fecales. Usualmente el tipo de residuos peligrosos no es frecuente como sucede en desechos de tipo industrial.

Adicionalmente los cementerios pueden generar una sustancia denominada “cadaverina”, que en concentraciones altas puede ser dañina para la salud humana.

Se puede como forma inicial tener un índice del peligro potencial entre bajo, moderado y alto, de acuerdo al tipo de residuo en función de la precipitación anual. Para residuos municipales residenciales con lluvias mayores a 1000 mm/año, se considera “moderado”; por lo tanto este es el “índice de peligro potencial” para la Zona Piloto.

3.2.2 Centros de salud y desechos hospitalarios

En la Zona Piloto se localizó un centro de salud y un sitio de tratamiento y disposición de desechos hospitalarios. Este tipo de residuos se consideran generalmente como residuos peligrosos.

Se incluye el centro de salud, como punto potencial aunque, no es de esperarse en él contaminación por desechos hospitalarios, ya que estos se llevan al sitio de tratamiento y disposición.

En zonas de disposición de residuos peligrosos como los hospitalarios no solamente es necesario el conocimiento del proceso, tipo, concentración y caudal del efluente, sino también el monitoreo en el subsuelo. Este sistema de recolección, tratamiento y disposición lo opera una empresa privada, y no se tiene información sobre su tratamiento y disposición. Sin embargo, se sabe que hay una selección de residuos e incineración de (parte de) los mismos.

Los residuos hospitalarios tienen usualmente farmacéuticos con componentes de químicos orgánicos e inorgánicos. En general la carga de sales y nutrientes es alta, se presentan también metales pesados y orgánicos sintéticos, y hay un riesgo alto de tener patógenos y elementos radioactivos.

3.2.3 Industrias y fábricas

Una buena parte de focos de contaminación potencial son las industrias y fábricas, teniendo en el área de estudio un total de 23 industrias identificadas (Apéndice C).

Las actividades industriales presentan también problemas en la determinación de su carga contaminante, ya que existen diversas actividades industriales en el área, las cuales generan también un diverso tipo de efluentes, hay variabilidad en los niveles tecnológicos, generalmente falta control de calidad y análisis químicos, hay variabilidad en el manipuleo y disposición, incluyendo prácticas clandestinas.

A pesar de las limitaciones anteriores, la localización de las mismas como fuentes potenciales es importante, y por otro lado, varios tipos de los componentes de las cargas contaminantes son similares.

Las cargas contaminantes de las industrias generalmente tienen cargas con sales, nutrientes, materia orgánica, hidrocarburo, patógenos, metales pesados y orgánicos sintéticos.

3.2.4 Lavanderías

Solamente se identificaron 3 lavanderías en la zona de estudio. Por su tipo de carga efluente se les asocia también a los talleres, terminales de autobuses y en ocasiones con estaciones de servicio.

Los efluentes de esta actividad generalmente son peligrosos; se presentan altos niveles de metales pesados, siendo el plomo y el zinc, los más usuales. Generan también fenoles, hidrocarburos aromáticos como el benceno, etilbenceno y tolueno los cuales tienen incidencias peligrosas en la salud. También se encuentran en los efluentes otro tipo de hidrocarburos aromáticos policíclicos y alifáticos halogenados (como el tricloroetileno), que tienen un impacto muy alto en las aguas subterráneas por generar también problemas serios en la salud.

3.2.5 Subestaciones eléctricas

Se identificaron 3 subestaciones eléctricas en la zona de estudio. Las subestaciones eléctricas generan productos de hidrocarburo como efluente. Generalmente los

transformadores a base de aceite tienen compuestos orgánicos, algunos muy peligrosos para la salud, como los “pcb” (policlorinados bifenilos). Ante este hecho hoy en día los fabricantes de este tipo de aceite no los hacen a base de pcb como se hacían en el pasado reciente.

3.2.6 Estaciones de servicio, talleres y terminales de ómnibus

Este último grupo es muy importante como puntos potenciales de contaminación, por el tipo de carga que eventualmente puede llegar al subsuelo, la cual generalmente es de origen orgánico (de hidrocarburos), con frecuencia muy peligrosa para la salud.

En total se identificaron 16 estaciones de servicio, 6 terminales de ómnibus y 3 talleres de importancia. Existen talleres más pequeños en el área, que a nivel puntual tal vez no tengan relevancia, pero a nivel agregado puede que produzcan algún impacto. Generalmente se localizan sobre las vías principales en donde se localizan también la mayoría de las estaciones de servicio.

Las operaciones de estaciones de servicio, pueden generar fugas de tanques, derrames operacionales y accidentales que de ocurrir tienen un chance alto de llegar a las aguas subterráneas. En la mayoría de los países se tienen pozos de observación y de monitoreo para detectar eventuales fugas, sin embargo en la zona de estudio no se tiene conocimiento que haya este tipo de monitoreo.

Los talleres también generan productos de hidrocarburo, en ocasiones más degradado que el de las estaciones y por lo tanto menos peligroso. Los terminales de ómnibus usualmente tienen talleres, lavado y algunos tanques de suministro de combustibles, por lo tanto también pueden generar cargas contaminantes de hidrocarburos. En zonas de talleres y de lavado también es frecuente que se generen cargas con metales pesados.

Los productos de hidrocarburo, algunos son inmiscibles (líquidos de la fase no acuosa), menos pesados que el agua, parte de estos se retienen en la zona no saturada, y migran hacia la tabla de agua durante mucho tiempo (en ocasiones decenas de años), otros flotan sobre el agua teniendo un impacto alto en pozos someros; otros son más pesados que el agua, también sufren retención en la zona no saturada, pero cuando migran penetrarán dentro del acuífero y son un riesgo aún para pozos profundos; otra parte de los hidrocarburos entran en solución con el agua, que en concentraciones aún pequeñas pueden tener riesgo en la salud.

Los compuestos de hidrocarburos más peligrosos son los llamados BTEX (Bencenos, Toluenos, Etilenos y Xilenos), ya que se han encontrado enfermedades cancerígenas

asociadas a estos productos, aun en concentraciones muy bajas, pero durante consumos prolongados, tal como sucede en los sistemas de abastecimiento público.

4 Vulnerabilidad del acuífero

De acuerdo como se indicó en el capítulo 2, se consideraron dos metodologías de análisis para determinar la vulnerabilidad del acuífero: el sistema “GOD” y el sistema “DRASTIC”. La determinación de los parámetros de vulnerabilidad de ambos sistemas se basaron fundamentalmente en el inventario de pozos (Molano, 2001).

4.1 Mapa de vulnerabilidad “GOD”

Para el sistema “GOD” se utilizó la información obtenida con los inventarios, en donde los datos utilizados se incluyen en el Apéndice D. Se consideraron los siguientes parámetros para la zona de estudio:

(1) Ocurrencia del agua subterránea.

Como valor general para todo el acuífero se escogió un valor de 0.6 correspondiente a un acuífero de tabla de agua cubierto, ya que generalmente se presentan las areniscas del Acuífero Patiño desde la superficie hasta la tabla de agua, pero con arcillas y limos en sus primeros metros. En zonas surgentes la metodología sugiere valores menores, sin embargo, en el área de estudio la surgencia que se presenta generalmente está asociada a niveles acuíferos más profundos, y por otra parte se tienen valores menos conservativos en la vulnerabilidad. Sin embargo, en los mapas de vulnerabilidad se delimita la zona de recarga y descarga (con base en la superficie piezométrica generada con el inventario de pozos, y con modelos preliminares de simulación).

(2) Sustrato Litológico

El sustrato litológico también se consideró constante para todo el acuífero en la zona de estudio, escogiendo un valor de 0.7 correspondiente a areniscas.

(3) Distancia (profundidad) a la tabla de agua

La profundidad a la tabla de agua se determinó con base en los niveles de agua medidos (Apéndice D) e interpolados con base en el programa SURFER (véase Figura 4-1).

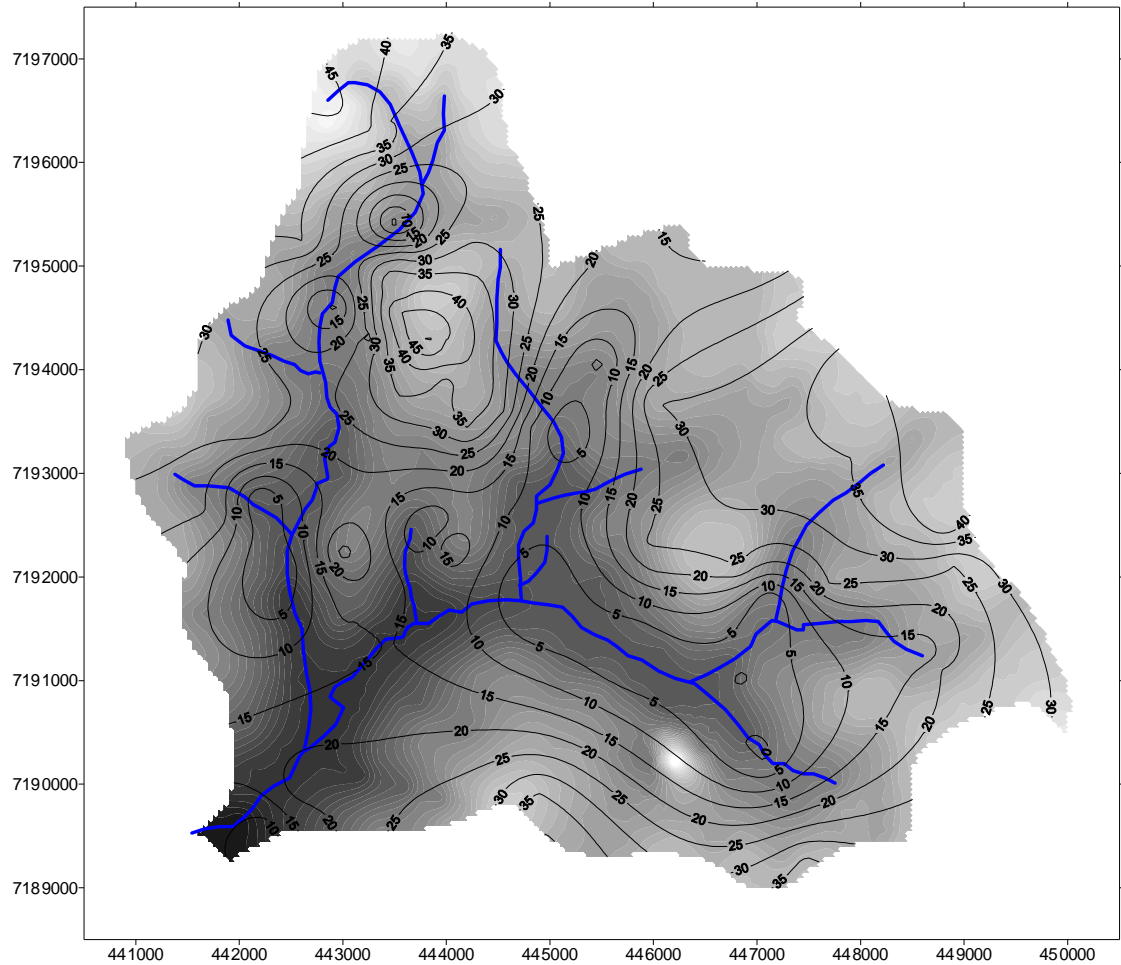


Figura 4-1: Profundidad a la tabla de agua

El grado de vulnerabilidad resulta de la multiplicación de los valores de los índices anteriores, teniendo el mapa de vulnerabilidad que se presenta en la figura Figura 4-2

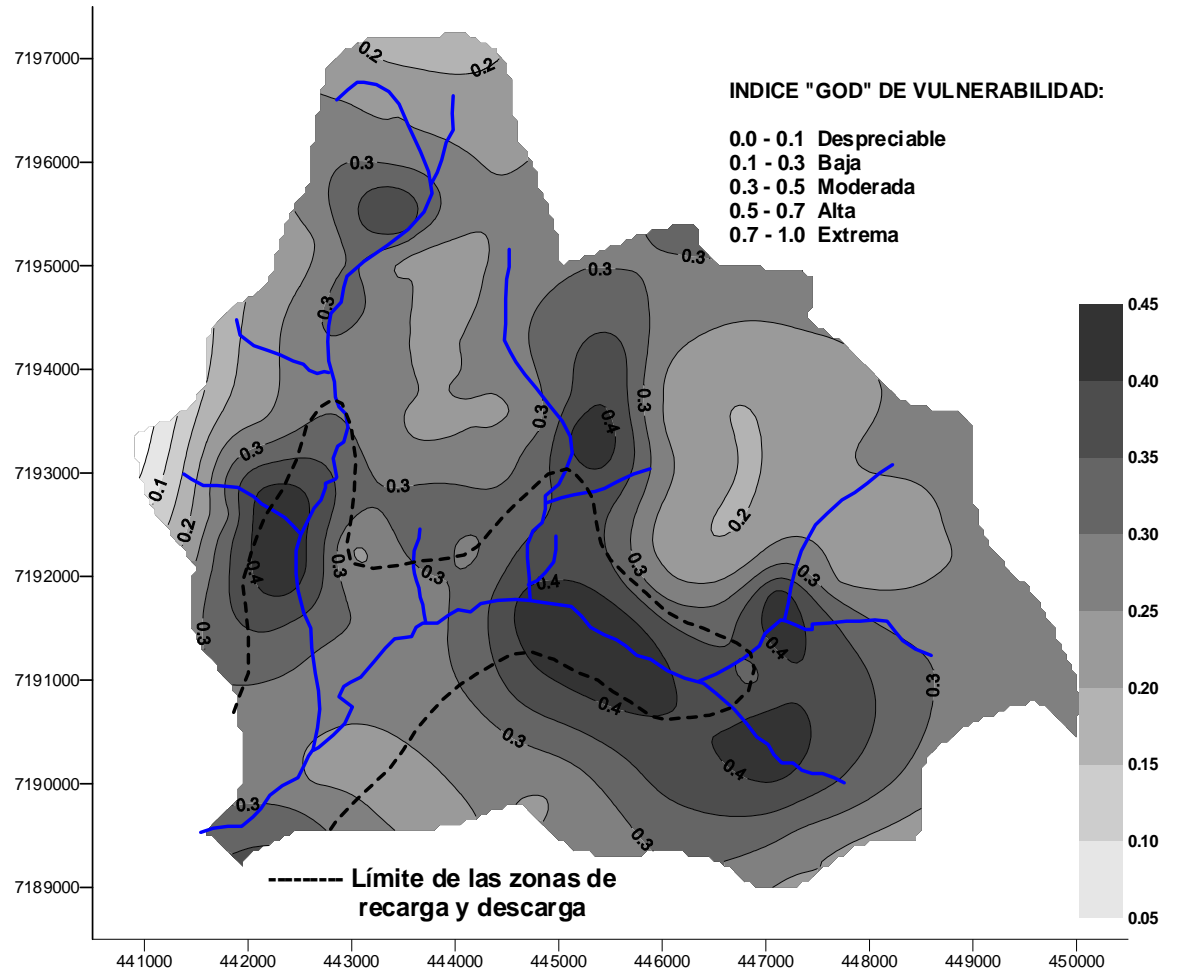


Figura 4-2: Mapa de vulnerabilidad "GOD"

Como se puede observar la vulnerabilidad del acuífero a la contaminación varía entre baja y moderada.

4.2 Mapa de vulnerabilidad "DRASTIC"

Para el sistema "DRASTIC" se utilizó también la información obtenida con los inventarios, en donde los datos utilizados se incluyen en el Apéndice E. Se consideraron los siguientes atributos hidrogeológicos para la zona de estudio:

(1) Profundidad a la tabla de agua

El índice para la profundidad a la tabla de agua también se determinó con base en los niveles de agua medidos (Apéndice D) e interpolados (Figura 4–1).

En el apéndice C se incluyen los índices de profundidad entre 1 y 10 para los niveles de agua medidos ó estimados.

(2) Recarga

La recarga estimada del acuífero está entre 200 a 300 mm/año, por lo tanto se le asignó un promedio de 250 mm/año, lo que corresponde a un índice de 8 para zonas de recarga. Para las zonas de descarga se le asignó un índice de 1. Esta delimitación se efectuó con base en el límite de recarga-descarga, también con ayuda del programa SURFER.

(3) Material del acuífero (litología)

Para el material del acuífero se asignó un valor de 6 correspondiente a areniscas.

(4) Material del suelo

Para el tipo de suelo se le asignó un valor de 6 correspondiente a limos arenosos.

(5) Morfología (pendiente topográfica)

Para los valores de la morfología del terreno se hizo uso de la topografía del terreno (Figura 2–1), calculando la pendiente con base en las opciones de cálculo del programa SURFER.

(6) Impacto de la zona vadosa

La zona vadosa es del mismo material del acuífero compuesto por areniscas, de manera que se le asignó un índice de 6.

(7) Conductividad hidráulica del acuífero

Dado que las conductividades hidráulicas reportadas y calculadas son menores a 4.1 m/d se le asignó un valor de 1 a este atributo.

Adicionalmente, se combinaron los factores anteriores utilizando los siguientes valores de ponderación: 5 para la profundidad, 4 para la recarga, 3 para el tipo de acuífero, 2 para el tipo de suelo, 1 para la morfología del terreno, 5 para el tipo de zona vadosa y 3 para la conductividad hidráulica. Finalmente la suma de los parámetros ponderados se presenta en el mapa de vulnerabilidad “DRASTIC” de la figura Figura 4–3.

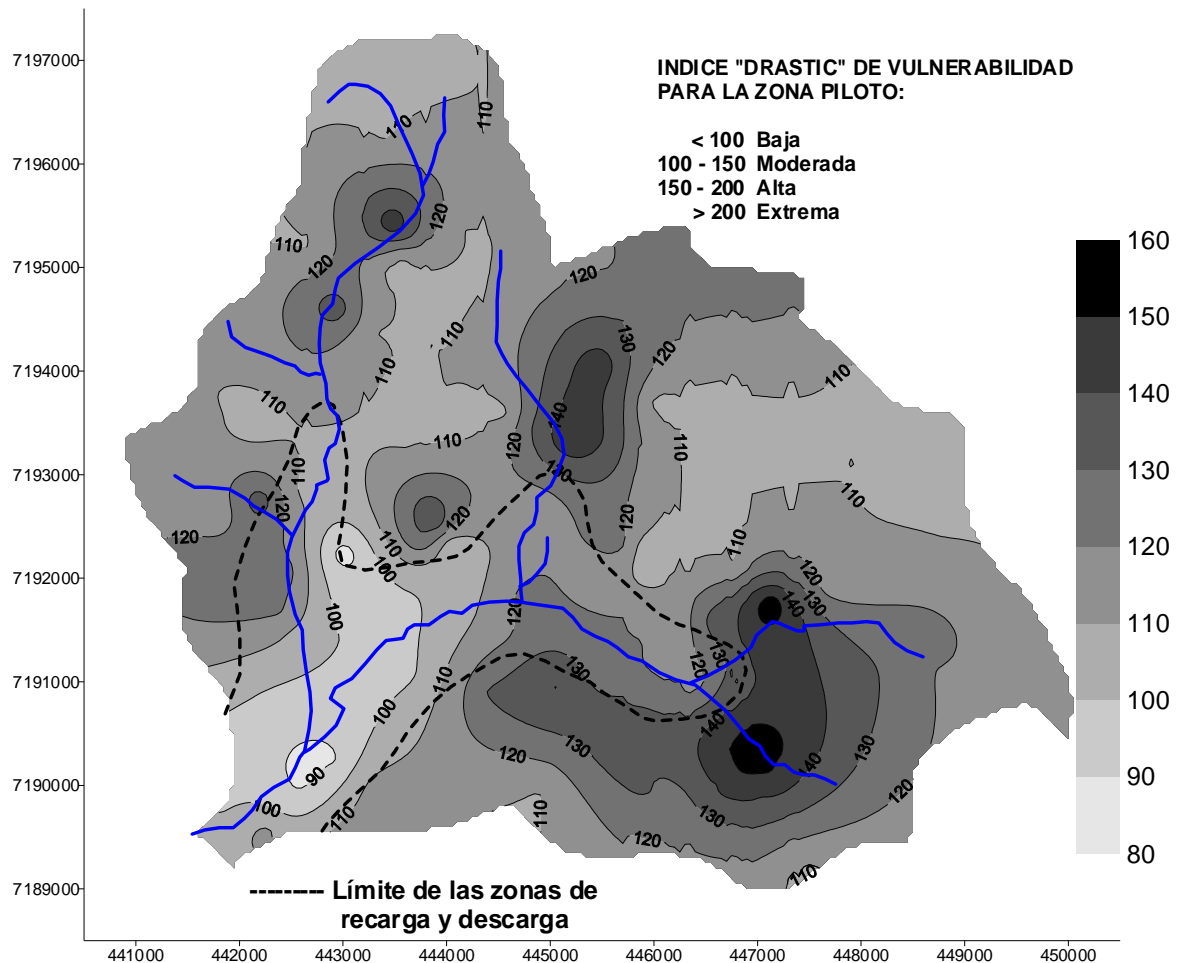


Figura 4-3: Mapa de vulnerabilidad "DRASTIC"

Como puede observarse, con el sistema DRASTIC se obtiene una vulnerabilidad del acuífero de moderada a baja, con algunos puntos locales de alta.

Hay diferencias entre ambos sistemas (GOD y DRASTIC) para la estimación de la vulnerabilidad del acuífero; sin embargo, ambos dan en general índices de bajos a moderados, predominando en el GOD tanto el moderado como el bajo, y en el DRASTIC el moderado.

5 Riesgo de contaminación

Como se mencionó en los capítulos anteriores se debe cuantificar la carga contaminante que está llegando al subsuelo para evaluar el riesgo. Sin embargo, en forma preliminar se puede hacer un mapa de riesgo superponiendo las fuentes puntuales potenciales de contaminación y los mapas de vulnerabilidad. Se excluye la contaminación por fuentes cloacales dado que se considera difusa a lo largo de todo el acuífero, con un potencial alto.

Se ha utilizado el mapa de vulnerabilidad DRASTIC para este análisis, dado que incluye más atributos de medida que el GOD, y se considera que puede ser más relevante para este estudio.

Idealmente se debería jerarquizar también las fuentes potenciales de contaminación de bajas a altas de acuerdo a la carga contaminante, pero no se dispone aún de esta información. Sin embargo se les asignó igual ponderación, considerando solo su posición geográfica.

Finalmente haciendo una delimitación de 4 categorías de riesgos: bajo, moderado, alto y extremo, con ayuda del programa SURFER, se obtiene el mapa de riesgos a la contaminación de aguas subterráneas, el cual se presenta en la Figura 5-1. Puede observarse que aproximadamente un 60% del área tiene un bajo riesgo a la contaminación y un 40% un riesgo moderado (incluyendo un área pequeña con riesgo alto). De manera que en esta última área es donde se deben orientar los esfuerzos para conocer detalladamente los efluentes de cargas puntuales contaminantes, ejercer un control y si es el caso una remediación.

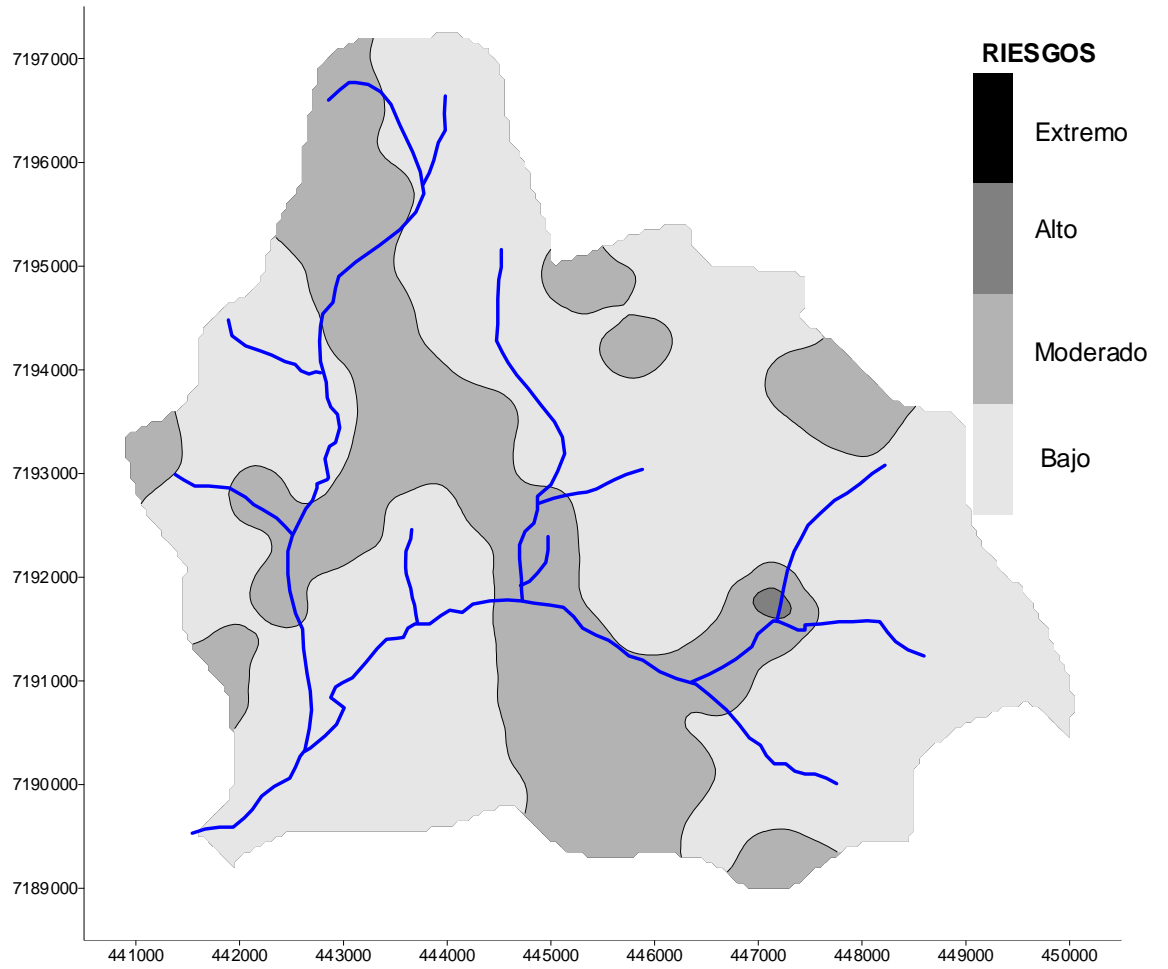


Figura 5-1: Mapa de riesgo de contaminación de aguas subterráneas.

6 Conclusiones

- Se cuenta con dos mapas de la vulnerabilidad del acuífero a la contaminación teniendo una vulnerabilidad moderada a baja, predominando la moderada en el área de la Zona Piloto.
- Se tiene un inventario del tipo de fuentes potenciales de contaminación con su localización espacial, teniendo una fuente de contaminación difusa de aguas servidas (cloacales ó negras), y un total de 65 fuentes puntuales de contaminación potencial correspondiente a industrias, estaciones de servicio, lavanderías, talleres, zonas de desechos sólidos (basureros), terminales de autobuses, subestaciones eléctricas, desechos hospitalarios y cementerios.
- Se cuenta con un mapa de riesgos de contaminación de aguas subterráneas, teniendo riesgos predominantemente bajos y medios.
- Con el uso extensivo del agua subterránea en la zona de estudio como fuente de abastecimiento doméstico e industrial, teniendo 165 pozos profundos y 23 zonas de pozos excavados someros, las fuentes de contaminación son una amenaza potencial para el acuífero, aun con su vulnerabilidad moderada. (Casos históricos aislados confirman esta conclusión).
- Por las características de la ausencia del sistema de alcantarillado, las posibilidades de contaminación de la carga cloacal es alta. Con una vulnerabilidad baja a moderada del acuífero, el riesgo de contaminación cloacal es medio a alto.
- Las posibilidades de contaminación por basureros y cementerios es moderada desde el punto de vista de aguas subterráneas; con la vulnerabilidad baja a moderada del acuífero, también es de esperarse un riesgo bajo a moderado de contaminación por lixiviados de zonas de desechos sólidos municipales.
- Las cargas contaminantes potenciales de las industrias, incluyendo los desechos hospitalarios, generan usualmente elementos muy dañinos para la salud (metales pesados, nutrientes, sales, patógenos, orgánicos sintéticos, materia orgánica), y por lo tanto se deben considerar como cargas peligrosas. Una vez más, con la vulnerabilidad baja a moderada del acuífero es de esperarse un riesgo de contaminación media a alta, localizada fundamentalmente en la zona de recarga.
- El resto de focos potenciales de contaminación (lavanderías, subestaciones eléctricas, talleres, terminales de ómnibus y estaciones de servicio) tienen productos

de hidrocarburos, incluyendo aromáticos, alifáticos halogenados, BTEX, los cuales en cantidades mínimas, pero continuas, tienen efectos muy nocivos en la salud.

- Por las características de la información requerida sobre productos que potencialmente puedan contaminar las aguas subterráneas, no existe información sobre el tipo de efluentes, su concentración, su caudal.

7 Recomendaciones

7.1 Deficiencia de la información del tipo de vertimientos

Se recomienda la adquisición de datos con respecto a vertimientos.

No se conoce nada respecto al tipo y clase de cargas contaminantes, su concentración, ni la cantidad de efluencia (intensidad, caudal, volúmenes) de estas cargas. Mucho menos de los tipos de vertimientos, la eficiencia de los procesos de remoción y mejoramiento del efluente en los vertimientos.

Desafortunadamente este tipo de información solo es posible con una reglamentación que incluya medidas de sanción (multas, cierre temporal y definitivo de instalaciones, remediaciones, etc). Una labor de este tipo es un proceso que puede demorar, pero que el personal directivo de SENASA puede ir gestando.

Al mismo tiempo se puede ir efectuando una labor de divulgación por medio de las municipalidades para que por lo menos (así sea en forma preliminar) las industrias den alguna información sobre el tipo de vertimiento y disposición de desechos, eficiencias en la remoción, calidad y cantidad de los efluentes finales.

7.2 Pozos de monitoreo

Se recomienda establecer una red de pozos de monitoreo

Una forma de conocer el estado de la calidad del agua subterránea, es mediante pozos de monitoreo someros (hasta la tabla de agua). También sirven como medios de alarma cuando se presente algún evento de contaminación, y además ayudan a definir la gravedad de la contingencia y el tipo de remediación a seguir.

Es difícil dar el número de pozos de monitoreo requeridos, ya que depende de las condiciones hidrogeológicas y geoambientales de cada punto; sin embargo, como mínimo cada fuente puntual de contaminación debería tener tres pozos de monitoreo (uno aguas arriba de la dirección del gradiente y dos aguas abajo). La labor de construcción debe ser por parte de los propietarios de las fuentes potenciales de contaminación, y el monitoreo por parte de la autoridad ambiental local.

Durante el presente proyecto se construyeron 10 pozos de observación, que constituyen un red inicial de monitoreo.

7.3 Modelos de flujo y transporte

Se debe adquirir modelos de flujo de agua subterránea y transporte de constituyentes químicos.

Los resultados de la vulnerabilidad del acuífero, junto con los inventarios de pozos realizados son ya un sistema que se pueden utilizar como una herramienta de control; por ejemplo, ante un derrame de algún producto contaminante, se puede estimar cual puede ser el impacto en el acuífero, ver la dirección posible del contaminante y los pozos que se podrían ver afectados. Sin embargo, existe incertidumbre en la respuesta del acuífero con toda su dinámica y en el poder de dispersión del evento, si eventualmente hay que sacar algún pozo de operación, si se podría extraer el contaminante, etc.

Por lo tanto es recomendable que en un futuro cercano SENASA adquiriera un modelo de flujo y transporte para simular su acuífero. Existen varios modelos en el mercado, sin embargo el modelo MODFLOW con los módulos de transporte DISPERSIVO (MT3D) transporte advectivo (MODPATH) son alternativas bastante completas con capacidades gráficas e interacción con sistemas de información geográfica.

8 Referencias

- Aller L., Bennet T., Lehr J.h., Petty R.J., y Hackett G.1987. DRASTIC: a standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings. U.S. Environmental Protection Agency, Ada, OK, EPA/600/2-87-036, 455 p.
- Foster, S. y R. Hirata, , 1988. Determinación del riesgo de contaminación de aguas subterráneas. Cepis, Lima.
- Foster, Stephen, 1987. Fundamental concepts in aquifer vulnerability pollution risk and protection strategy. En “Vulnerability of Soil and Groundwater to Pollutants”(W. Van Duijvenbooden y H.G. van Wageningh, eds.), TNO Committee on Hydrological Research, La Halla. Proceedings and Information No. 38, p 69-86.
- Molano, C., 2000. Estudio del Acuífero Patiño, Informe técnico 2.5: Inventario de pozos y manantiales en la Zona Piloto.
- SENASA, 1999. Banco de datos de pozos perforados por SENASA, Publicación Técnica No. 2, Asunción, Paraguay.
- Surfer, 1996. Surface Mapping System, ver 6.04. Golden.
- Van Overmeeren, R.A., 2000. Estudio del Acuífero Patiño, Informe técnico 2.4: Investigación geoeléctrica en una zona piloto.
- Vrba, Jaroslav y Alexander Zaporozec (Editors), 1994. Guidebook on Mapping Groundwater Vulnerability. IAH, Vol.16 International Contributions to hydrogeology.

Apéndice A

**Apéndice A. Procedimiento del índice de vulnerabilidad
“GOD”**

Apéndice B

Apéndice B. Procedimiento del índice de vulnerabilidad “DRASTIC”

Apéndice B

MÉTODO DE EVALUACIÓN “DRASTIC” DE LA VULNERABILIDAD DE ACUÍFEROS

El método DRASTIC, al igual que otros métodos de caracterización de la vulnerabilidad de acuíferos tiene como objetivo llegar a un solo índice puntual con base en varios parámetros observables en el campo. Fue desarrollado en los EE.UU, y tiene la ventaja de que se ha aplicado y evaluado extensivamente en diferentes áreas.

Los factores que se toman en cuenta en DRASTIC son:

- D = Profundidad del nivel freático (**D**ept^h to water)
- R = Recarga (**R**echarge)
- A = material del acuífero (**A**quifer media)
- S = material del suelo (**S**oil media)
- T = pendiente topográfico (**T**opography)
- I = zona vadosa (**I**mpact of vadose zone)
- C = conductividad hidráulica (**C**onductivity)

Es relativamente fácil mapear estas características y sobre la base de los mapas se puede atribuir a cada punto, celda o zona elemental los valores para los diferentes factores DRASTIC. En la tabla siguiente se resumen los valores numéricos que tienen que asignarse en función de las características o condiciones observadas de los parámetros. El índice DRASTIC, finalmente, se calcula como la combinación lineal de los tanteos, de la siguiente manera:

$$\text{Índice DRASTIC} = C_D T_D + C_R T_R + C_A T_A + C_S T_S + C_T T_T + C_I T_I + C_C T_C$$

o, con los valores de los coeficientes C como se presentan en la tabla.

$$\text{Índice DRASTIC} = 5T_D + 4T_R + 3T_A + 2T_S + T_T + 5T_I + 3T_C$$

El mapa de vulnerabilidad presenta la variación espacial del índice. Cuanto más altos los valores del índice, es más alta la vulnerabilidad. Teóricamente, el índice DRASTIC puede variar entre los valores 26 (acuífero no vulnerable) y 220 (acuífero de vulnerabilidad altísima ó extrema). Tentativamente, los valores menores de 60 indican muy baja vulnerabilidad, los intervalos de 60-100 y de 100-140 corresponden respectivamente a la vulnerabilidad baja y mediana, y siguen las clases de 140-180 (alta vulnerabilidad) y 180-220 (muy alta vulnerabilidad).

Apéndice B

<i>Parámetro</i>	<i>Coficiente C_i de ponderación</i>	<i>Descripción de la clase</i>	<i>Tanteo T_i</i>
D (nivel freático)	5	(en pies bajo superficie - en m bajo superficie) 0-5 (0 - 1.5) 5-15 (1.5 - 4.6) 15-30 (4.6 - 9.1) 30-50 (9.1 - 15.2) 50-75 (15.2 - 22.8) 75-100 (22.8 - 30.4) >100 (>30.4)	10 9 7 5 3 2 1
R (recarga)	4	(en pulgadas por año - en mm por año) 0-2 (0 - 51) 2-4 (51 - 102) 4-7 (102 - 178) 7-10 (178 - 254) >10 (> 254)	1 3 6 8 9
A (material del acuífero)	3	lutitas masivas rocas metamórficas/ígneas capas delgadas de areniscas/calizas secuencias de lutitas areniscas masivas calizas masivas arenas y gravas basaltos calizas cársicas	2 3 4 6 6 6 8 9 10
S (material del suelo)	2	ausente o delgado grava arena turba arcilla dispersiva limo arenoso limo limo fino limo arcilloso lodo arcilla no dispersiva	10 10 9 8 7 6 5 4 3 2 1
T (pendiente topográfica)	1	(en %) 0-2 2-6 6-12 12-18 >18	10 9 5 3 1
I (impacto de la zona vadosa)	5	limo/arcilla lutita caliza arenisca alternancia de calizas/areniscas/lutitas arenas y gravas con limos y arcillas rocas metamórficas/ígneas arenas y gravas basaltos calizas cársicas	1-2 (1) 2-5 (3) 2-7 (6) 4-8 (6) 4-8 (6) 4-8 (6) 2-8 (4) 6-9 (8) 2-10 (9) 8-10 (10)
C (conductividad hidráulica del acuífero)	3	(en gpd/ft^2 - en m/día) 1 - 100 (0.04 - 4.1) 100 - 300 (4.1 - 12.2) 300 - 700 (12.2 - 28.5) 700 - 1000 (28.5 - 40.7) 1000 - 2000 (40.7 - 81.5)	1 2 4 6 8

Apéndice C

Apéndice C. Inventario de fuentes potenciales de contaminación puntual

Apéndice D

Apéndice D Índice de vulnerabilidad “GOD”

Apéndice E

Apéndice E Índice de vulnerabilidad “DRASTIC”