



FUNDAMENTOS DE LA CONTAMINACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS



Universidad Francisco
de Paula Santander

Vigilada Mineducación



Nelson Javier Cely Calixto
Gustavo Adolfo Carrillo Soto
Carlos Alexis Bonilla Granados

A decorative frame made of dotted lines, forming a large rectangle with inward-pointing corners, enclosing the title and authors.

FUNDAMENTOS DE LA CONTAMINACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

NELSON JAVIER CELY CALIXTO
GUSTAVO ADOLFO CARRILLO SOTO
CARLOS ALEXIS BONILLA GRANADOS

Cely Calixto, Nelson Javier, autor

Fundamentos de la contaminación de aguas subterráneas / Nelson Javier Cely Calixto, Gustavo Adolfo Carrillo Soto, Carlos Alexis Bonilla Granados -- Primera edición -- San José de Cúcuta : Universidad Francisco de Paula Santander ; Pamplona, Norte de Santander : Universidad de Pamplona ; Bogotá : Ecoe Ediciones, 2022

93 páginas. -- (Ingeniería, medioambiente, gestión de recursos naturales. Ingeniería civil, ingeniería ambiental, desarrollo sostenible, gestión de recursos hídricos, gestión de aguas subterráneas)

Incluye datos curriculares de los autores -- Incluye bibliografía

ISBN 978-958-503-433-4 -- 978-958-503-434-1 (e-book)

1. Aguas subterráneas - Contaminación - Fundamentos 2. Purificación de aguas subterráneas 3. Calidad del agua - Control 4. Ingeniería sanitaria I. Carrillo Soto, Gustavo Adolfo, autor II. Bonilla Granados, Carlos Alexis, autor

CDD: 628.168 ed.23

CO-BoBN - a1096470



Área: Ingeniería, Medioambiente, Gestión de recursos naturales

Subárea: Ingeniería civil, ingeniería ambiental, desarrollo sostenible, gestión de recursos hídricos, gestión de aguas subterráneas



**Universidad Francisco
de Paula Santander**

Vigilada Mineducación



© Nelson Javier Cely Calixto
© Gustavo Adolfo Carrillo Soto
© Carlos Alexis Bonilla Granados

© Universidad Francisco
de Paula Santander
Avenida Gran Colombia
No. 12E-96, Barrio Colsag
San José de Cúcuta - Colombia
Teléfono: 607 577 6655

© Universidad de Pamplona
Km 1 Vía Bucaramanga
Ciudad Universitaria
Pamplona - Norte de Santander
Teléfono: (57+7) 5685303

► Ecoe Ediciones S.A.S.
info@ecoeediciones.com
www.ecoeediciones.com
Carrera 19 # 63C 32, Tel.: 919 80 02
Bogotá, Colombia

Primera edición: Bogotá, julio del 2022

ISBN: 978-958-503-433-4
e-ISBN: 978-958-503-434-1

Directora editorial: Claudia Garay Castro
Coordinadora editorial: Paula Bermúdez B.
Corrección de estilo: María del Pilar Osorio
Diagramación: Natalia Herrera
Carátula: Magda Rocío Barrero
Impresión: Multi-impresos S.A.S.
Calle 76 # 24 - 37
Bogotá D.C. Colombia

*Prohibida la reproducción total o parcial por cualquier medio
sin la autorización escrita del titular de los derechos patrimoniales.*

Impreso y hecho en Colombia - Todos los derechos reservados

AGRADECIMIENTOS

A Dios Padre Todopoderoso.

A la Universidad Francisco de Paula Santander.

A la Universidad de Pamplona.

CONTENIDO

PRÓLOGO	XV
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 2. CICLO HIDROLÓGICO	3
2.1 Conceptos básicos del ciclo hidrológico	4
2.2 Proceso del ciclo hidrológico	4
2.3 Sistemas hidrológicos y su simulación	5
2.3.1 Sistemas hidrológicos.....	6
2.3.2 Modelos de simulación deterministas y estocásticos.....	6
2.3.3 Modelos de simulación analíticos y empíricos	7
CAPÍTULO 3. MONITOREO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS	9
3.1 Clasificación de los sistemas de monitoreo	10
3.1.1 Sistemas de monitoreo según su forma de monitoreo	10
3.1.2 Sistemas de monitoreo según su importancia relativa	11
3.2 Recolección de datos.....	12
CAPÍTULO 4. CAPTACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS	15
4.1 Pozos verticales.....	15
4.2 Pozos horizontales.....	16
4.3 Métodos de perforación.....	17

CAPÍTULO 5. CALIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA	21
5.1 Agua subterránea destinada al abastecimiento humano.....	22
5.2 Aguas subterráneas destinadas al riego.....	23
5.3 Agua subterránea destinada al abrevadero de ganado	26
5.4 Agua subterránea destinada a la industria.....	26
CAPÍTULO 6. CONTAMINACIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS	27
6.1 Aspectos básicos de la contaminación de aguas subterráneas	27
6.2 Mecanismos de introducción y propagación de la contaminación en el acuífero	29
6.2.1 Mecanismos de propagación a partir de la superficie	29
6.2.2 Mecanismos de propagación originados en la zona saturada	32
6.3 Fuentes potenciales de contaminación	34
6.3.1 Contaminación urbana o doméstica.....	34
6.3.2 Contaminación agrícola	36
6.3.3 Contaminación industrial	39
6.3.4 Contaminación inducida por bombeo	42
6.4 Principales contaminantes en las aguas subterráneas	43
6.4.1 Contaminantes químicos.....	44
6.4.2 Contaminantes biológicos.....	47
6.4.3 Contaminantes radioactivos	48
6.5 Procesos de transporte y atenuación de contaminantes.....	49
6.5.1 Procesos físicos.....	50
6.5.2 Procesos geoquímicos.....	52
6.5.3. Procesos bioquímicos	53
CAPÍTULO 7. PROBLEMAS AMBIENTALES Y ECONÓMICOS RELACIONADOS CON LA UTILIZACIÓN INTENSIVA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS	55
CAPÍTULO 8. BOMBEO Y TRATAMIENTO.....	57
8.1 Sistemas de bombeo convencional.....	58
8.2 Bombeo y tratamiento mejorado	62
8.3 Otras alternativas de limpieza para los acuíferos.....	64
8.3.1 Biorremediación <i>in situ</i>	64
8.3.2 Barreras reactivas permeables.....	66
CAPÍTULO 9. INSTRUMENTOS Y PRINCIPIOS ECONÓMICOS PARA LA GESTIÓN SOSTENIBLE DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS	71
9.1 Dimensiones económicas del agua subterránea.....	71
9.2 Factores económicos del uso y la contaminación del agua subterránea	74
9.2.1 Identificación de factores	74
9.2.2 El problema de la subvaloración.....	75
9.3 Valoración de las aguas subterráneas.....	76
9.3.1 ¿Por qué valorar las aguas subterráneas?	76

9.3.2	Cómo valorar el agua subterránea.....	77
9.3.3	Factorización de valores ecosistémicos	78
9.3.4	Estimación de riesgos, incertidumbres y plazos	78
9.3.5	Límites de la valoración	78
9.4	Instrumentos económicos para la protección y gestión de las aguas subterráneas.....	79
9.4.1	Alcance y relevancia de los instrumentos económicos	79
9.4.2	Imposición de cargos y gastos para restringir la extracción del agua subterránea.....	80
9.4.3	Mercados de aguas subterráneas para regular los derechos de uso y asignaciones o cuotas	80
9.4.4	Instrumentos económicos para el control del riesgo de	82
	contaminación de fuente puntual	82
9.4.5	Pagos por servicios ecosistémicos	82
BIBLIOGRAFÍA	85

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. El ciclo hidrológico	5
Figura 2. Pozo para el monitoreo de agua subterránea	10
Figura 3. Red de monitoreo de aguas subterráneas	12
Figura 4. Monitoreo tipo cuadrícula	13
Figura 5. Monitoreo por estratos	13
Figura 6. Pozos verticales.....	16
Figura 7. Pozos horizontales.....	17
Figura 8. Métodos de perforación	18
Figura 9. Agua contaminada con arsénico	21
Figura 10. Acceso al agua potable.....	23
Figura 11. Riego de cultivos	24
Figura 12. Contaminación por lixiviados.....	29
Figura 13. Contaminación por actividades agrícolas.....	30
Figura 14. Contaminación por aguas superficiales contaminadas.....	31
Figura 15. Contaminación por residuos domésticos	31
Figura 16. Pozo de inyección.....	32
Figura 17. Intrusión salina en acuíferos costeros	33
Figura 18. Suelo con pesticidas	38

Figura 19. Agua subterránea contaminada	44
Figura 20. Contaminación biológica de aguas subterráneas.....	47
Figura 21. Contaminantes radioactivos	48
Figura 22. Advección.....	50
Figura 23. Difusión.....	50
Figura 24. Dispersión mecánica longitudinal	51
Figura 25. Dispersión mecánica transversal.....	51
Figura 26. Estrategias de bombeo y tratamiento	59
Figura 27. Influencia de diferentes factores en la eficiencia del sistema	61
Figura 28. Conceptualización del bombeo pulsado	63
Figura 29. Degradación aeróbica	65
Figura 30. Ciclo de degradación anaeróbica	66
Figura 31. Funcionamiento de las barreras reactivas permeables.....	67
Figura 32. Barreras continuas.....	68
Figura 33. Barreras de embudo	68
Figura 34. Principios económicos de las aguas subterráneas.....	74
Figura 35. Identificación de factores	75
Figura 36. Pago de servicios ecosistémicos	83

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Comparación entre los métodos de perforación.....	19
Tabla 2.	Encuesta mundial de riego con agua subterránea	25
Tabla 3.	Riesgos sanitarios asociados con algunos contaminantes inorgánicos en aguas de abastecimiento	46
Tabla 4.	Principales agentes de contaminación microbiológica del agua	48
Tabla 5.	Propiedades y efectos de algunos radionucleidos sobre la salud	49
Tabla 6.	Costos económicos reales del agua	76



PRÓLOGO

Este libro es el resultado de una investigación científica en la cual se identifican los principios de la contaminación del agua subterránea, los diferentes mecanismos que influyen, así como los tratamientos y métodos utilizados para disminuir los niveles de contaminación y su gran impacto en el ecosistema.

El estudio se dirige principalmente a profesionales y estudiantes de Ingeniería Civil, Ingeniería de Saneamiento, Ingeniería Ambiental, entre otras. Así también es un material complementario de las clases universitarias que potencializan la comprensión de estos conocimientos.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

El agua es un elemento esencial y vital para la vida, por ello sus niveles de acceso y eficiencia en torno a la gestión son un referente del progreso social de las diferentes civilizaciones a través de la historia. Los seres humanos no solo la requieren para suplir sus necesidades básicas sino también para satisfacer los requerimientos que aparecieron conforme al desarrollo de la sociedad, los cuales debían ser saldados ya que la demanda del consumo aumentaba con el paso del tiempo (Argoytia, 2022).

Este contexto dio paso a la aparición de la hidrología como una ciencia con el fin de investigar y analizar el agua en sus múltiples facetas y alcanzar un mejor aprovechamiento de este recurso. La hidrología apareció en su faceta cualitativa a finales del siglo XIX y en la tercera década del siglo XX se consideró su aspecto cuantitativo, ya que las propiedades del agua pasaron a un segundo plano y empezaron con la medición y análisis de las propiedades mediante la recolección de datos estadísticos.

La hidrología es tan antigua como el hombre, ya que esta maneja el aprovechamiento del agua por parte del ser humano. Comprende el estudio del agua existente en la Tierra, aunque ha sido dividido en distintos contextos, por ejemplo: una de las reservas más grandes de agua en la Tierra es el océano, y la ciencia que lo estudia se conoce como oceanografía que no hace parte de la hidrología, ya que solo se enfoca en las aguas continentales. Un conocimiento distinto es el de las aguas que se forman al interior de la Tierra que son estudiadas por la vulcanología y otras ramas de la geología.

Un porcentaje del agua, cerca de un 0,001 % del total de agua, se encuentra en la atmósfera en estado gaseoso, ya sea como su componente o como partículas suspendidas en forma sólida o líquida. La ciencia que se ocupa del estudio de la atmósfera es la meteorología, sin embargo, la hidrología también estudia el origen del agua en la atmósfera (Davie y Quinn, 2019).

Todo lo anterior se relaciona con la distribución geográfica del agua en precipitación, la cantidad generada y la intensidad de las precipitaciones. Así mismo, abarca el agua atmosférica (mar o tierra), los movimientos a partir de un punto de origen a un punto de precipitación y el retroceso del agua la atmósfera mediante la evaporación.

La hidrología se divide en dos partes: la hidrología de superficie comprende la potamología, que estudia los ríos; la limnología que estudia los lagos y la criología estudia el agua sólida en estado de hielo o nieve. Por otro lado, la hidrología subterránea o también llamada hidrogeología estudia el origen, formación y movimiento de las aguas subterráneas.

El estudio hidrológico inicia cuando a través de una forma de precipitación el agua llega a la Tierra e inicia el ciclo del agua hasta llegar al proceso de evaporación y el líquido vuelve a ser parte de la atmósfera. De esta manera, la hidrología inicia cuando ha finalizado el proceso de meteorización y termina cuando inicia la meteorización.

CAPÍTULO 2

CICLO HIDROLÓGICO

El agua no se mantiene fija en la naturaleza. Posee un dinamismo regular, el cual se describe mediante varias etapas, que por su movimiento continuo se convierten en un ciclo que donde inicia, luego concluye (Cely-Calixto, Soto *et al.*, 2021).

El ciclo hidrológico se fundamenta en un sistema de transporte indeterminado e invariable. Este tipo de circulación presente en el ciclo se debe a dos razones:

1. El sol ofrece la energía necesaria para realizar la evaporación.
2. La gravedad de la Tierra permite que descienda el agua condensada y esto se conoce como precipitación y escurrimiento.

A través del ciclo del agua se provee de agua a las plantas, animales y los seres humanos. Este proceso se fundamenta en que toda gota de agua que caiga en cualquier momento atraviesa un circuito cerrado, es decir, inicia cuando la lluvia cae hasta que vuelva a ser lluvia. El trayecto culmina mediante múltiples opciones porque el ciclo hidrológico no tiene un solo camino como opción. Inicia en la nube que es el punto de partida, luego se inicia la precipitación mediante varias formas, y así comienza el ciclo (Maderey Rascon y Román, 2005).

2.1 Conceptos básicos del ciclo hidrológico

Algunos de los conceptos básicos del ciclo son:

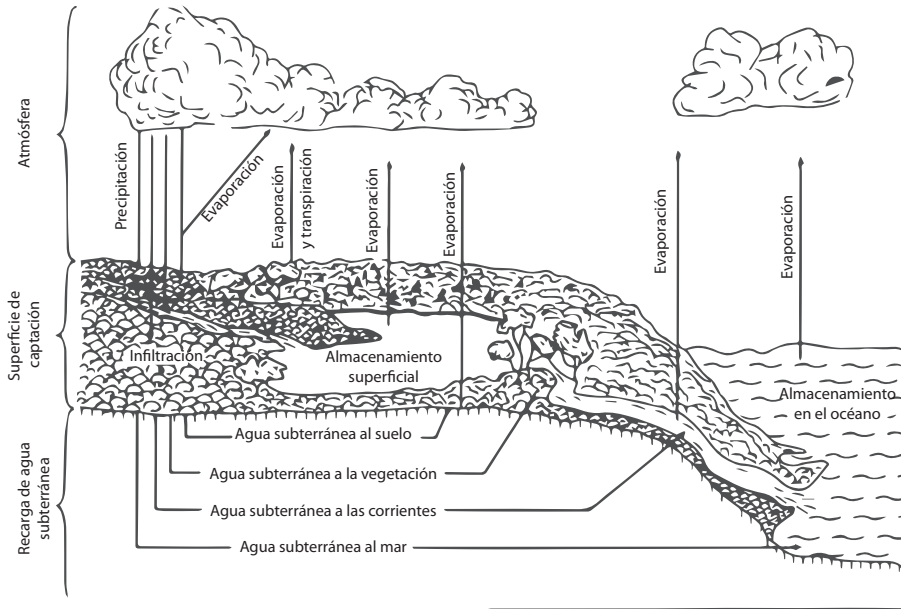
1. **Escorrimento sub-superficial:** es una fracción del agua en precipitación que se infiltra en el suelo y se mueve en la profundidad evitando llegar a la zona saturada y aparece de nuevo en la superficie.
2. **Escorrimento subterráneo:** cuando una fracción del agua en precipitación se infiltra y llega a la zona saturada, además de llenar los acuíferos.
3. **Escorrimento superficial:** es el paso del agua lluvia precipitada en la superficie desde una zona alta hasta una zona más baja por acción de la gravedad. Se deposita en cuencas hídricas.
4. **Evaporación:** es el paso del agua del estado líquido de la superficie terrestre al estado vapor, mediante la acción de la energía solar.
5. **Evapotranspiración:** es la suma de la pérdida de humedad de la Tierra por evaporación con la pérdida de agua por la transpiración de la flora.
6. **Infiltración:** cuando al precipitar el agua, cae al suelo y llena los poros o fisuras del suelo.
7. **Precipitación:** es el descenso del agua en estado sólido o líquido sobre la tierra. Esta es la encargada de formar espacios hídricos tales como ríos, aguas subterráneas, lagunas, entre otros. La estimación de la precipitación en una cuenca se mide a través de los registros pluviométricos.

2.2 Proceso del ciclo hidrológico

El ciclo hidrológico empieza evaporando el agua presente en los océanos, el vapor generado por la evaporación es trasladado por las masas de aire o más conocido como viento a los continentes. Según las condiciones climáticas, el vapor se condensa y se forman las nubes, las cuales crean las precipitaciones.

Ciertamente, no toda la precipitación llega al suelo, una parte se evapora a lo largo de su caída y otra parte se reserva (intercepción) en la vegetación, edificaciones, vías, entre otros. Después de un corto tiempo, esta regresa a la atmósfera en forma de vapor. El agua que llega a la superficie del suelo, una parte queda almacenada en las irregularidades como los huecos, también llamado almacenamiento en represas y retorna a la atmósfera mediante la evaporación (Aranda, 1984).

Figura 1. El ciclo hidrológico



Fuente: Maderey Rascón y Jiménez Román (2005).

El agua que llega al suelo recorre la superficie (lluvia en exceso) y se almacena en surcos limitados que al unirse forman arroyos y terminan desembocando en ríos, también llamado escurrimiento superficial; estos llevan el agua hasta los lagos o mares en donde el agua se evapora o se infiltra en la tierra.

Finalmente, un porcentaje de la precipitación llega hasta debajo de la superficie del suelo, proceso llamado infiltración, así se van llenando los poros y las grietas del terreno. Si el flujo del agua que se infiltra es exuberante, una parte baja hasta hacer parte del agua subterránea, y cuando el nivel de agua infiltrada es bajo, esta se retiene en una parte no saturada (humedad del suelo). Después, el agua vuelve a la atmósfera mediante la evaporación o la transpiración de la vegetación. En la práctica, es complicado separar estos fenómenos naturales, por tanto, se optó por unirlos mediante el término evapotranspiración.

2.3 Sistemas hidrológicos y su simulación

Con el paso del tiempo, las técnicas de medición de precipitaciones o caudales se han actualizado, aunque no todos los componentes del ciclo hidrológico pasaron por este cambio ya que se encuentran debajo del terreno. Procesos como la infiltración, flujo subterráneo y percolación se miden de manera remota, lo que genera dudas en torno al funcionamiento del ciclo hidrológico. Así mismo, los modelos hidrológicos se

toman como una herramienta para describir el funcionamiento y comportamiento de cada una de los componentes del ciclo hidrológico (Jódar-Abellán *et al.*, 2019). Los modelos hidrológicos son usados como instrumento de:

- » Planeación y ordenamiento territorial.
- » Predicción de flujos interiores y exteriores.
- » Predicción y prevención de inundaciones y fenómenos violentos relacionados con flujos de agua.
- » Desarrollo de modelos de precipitación y comportamiento del agua en el subsuelo.
- » Es un punto de partida para crear o mejorar otros procesos agrícolas, industriales o constructivos.

2.3.1 Sistemas hidrológicos

Los hidrólogos toman el ciclo hidrológico como un sistema efectivo, ya que a través de este concepto se crea un enfoque cuantitativo y racional. Esto se debe a que los hidrólogos no solo están interesados en estudiar las propiedades del agua, es decir, la parte cualitativa, sino también quieren estudiar y conocer las cantidades de agua usadas en cada periodo del proceso.

Un sistema hidrológico incluye la unión de un grupo de procesos físicos mediante un tipo de interdependencia que actúan sobre unas variables de entrada para transformarlas en variables de salida. En este tipo de sistemas cada uno de los elementos o series que lo conforman son producto de difíciles interrelaciones por una cantidad de factores con alta variabilidad espacial y temporal, ya que sus características no son medibles ni calculables.

Debido a la complejidad de estos sistemas, no es posible crear leyes específicas que describan en detalle los procesos hidrológicos naturales, por tanto, se usan modelos matemáticos que utilizan simulaciones para predecir y repetir su funcionamiento (Fuillerat Muriel, 2021).

2.3.2 Modelos de simulación deterministas y estocásticos

Existen dos tipos de enfoques para simular un sistema hidrológico: el modelo determinístico y el estocástico.

El modelo determinístico se aplica cuando sin importar el valor de la variable del tiempo, la respuesta dada a una entrada es la misma cuando el estado inicial del sistema es el mismo. El problema principal en este tipo de modelo es el ajuste de los parámetros que especifican el sistema (Hernández-Uribe *et al.*, 2017). El modelo estocástico se aplica para valorar los parámetros estadísticos que especifican la respuesta que da

el sistema para posteriormente crear un grupo de datos hidrológicos que no se diferencien de las series observadas (Velásquez Mercado, 2020).

Mediante un modelo determinístico se simula de forma continua durante determinado tiempo una serie de sucesos hidrológicos en intervalos cortos, y el modelo se comprueba mediante la serie de eventos observados. Mientras que, en el modelo estocástico no se pretende hacer una simulación de eventos continuos sino con series hidrológicas no observadas, pero, estas tienen igual probabilidad de que ocurran como las observables.

2.3.3 Modelos de simulación analíticos y empíricos

Un modelo empírico o también llamado “caja negra” está definido por datos de entrada y salida sin importar cómo funcionan internamente. Un ejemplo de este concepto sería el estudio de la relación entre la lluvia y el escurrimiento (Jimeno Sáez, 2018). A diferencia del modelo analítico o también llamado “caja blanca” es que este se fundamenta en ecuaciones de hidrodinámica y está formado por modelos de matemáticas de simulación en cuencas que tienen el fin de repetir procesos físicos implicados (De la Cruz-Courtois *et al.*, 2020).

CAPÍTULO 3

MONITOREO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

La supervisión y análisis de los recursos hídricos por medio de monitoreo se realiza con el fin de conocer y determinar las características físicas, químicas y biológicas del agua. El monitoreo es considerado un sistema técnico y científico que por medio de observación directa y muestreo nos permite relacionar las propiedades del agua subterránea con el suelo en el que se encuentra, y así establecer las condiciones en que se encuentran bajo la superficie terrestre (Vargas *et al.*, 2020) .

El estudio de las aguas subterráneas puede ser un proceso costoso debido a su alta complejidad, por ello, se debe determinar las zonas de medición y observación para obtener información que aporte valor, lo que se logra gracias a los sistemas y técnicas desarrolladas en el monitoreo. Para realizar monitoreo de las aguas presentes bajo la superficie terrestre, se debe definir el tipo de estudio a realizar, el personal técnico, los instrumentos a utilizar, el tiempo de duración y la zona donde se llevará a cabo el estudio (Katpatal *et al.*, 2018).

Figura 2. Pozo para el monitoreo de agua subterránea



Fuente: Gidahatari (s.f.).

3.1 Clasificación de los sistemas de monitoreo

Los sistemas de monitoreo de aguas subterráneas se clasifican:

- » Según su forma de monitoreo.
- » Según su importancia relativa.

3.1.1 Sistemas de monitoreo según su forma de monitoreo

Estos sistemas de monitoreo varían según su frecuencia o tiempo de estudio y de acuerdo con los puntos estratégicos donde se realice el monitoreo. Como dentro de la red acuífera existen ciertos puntos más representativos que otros y, de acuerdo con el objetivo del estudio, solo se harán mediciones en determinados puntos (Briseño-Ruiz *et al.*, 2011).

Los sistemas de monitoreo se dividen en:

- » Monitoreo por tendencia: se aplica en los puntos más representativos del sistema debido a que estos son las que predicen el futuro comportamiento del recurso hídrico, es decir, del comportamiento de estos puntos depende la evolución temporal del cuerpo hídrico.

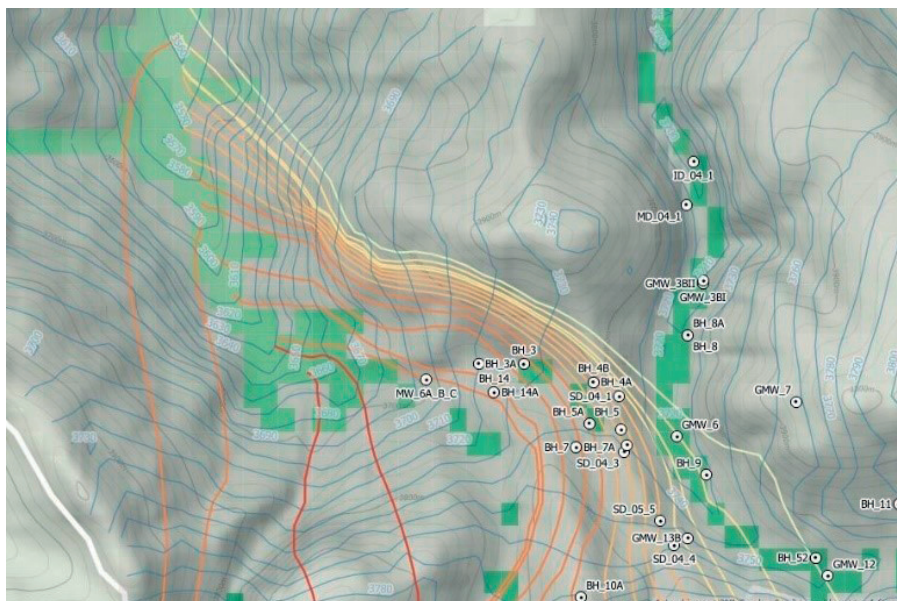
- » Monitoreo por vigilancia: se aplica en puntos poco representativos para el sistema de monitoreo, por tanto, cada vez que se realice un estudio, se debe analizar que no existan cambios abruptos en los parámetros de medición por algún factor que afecte o modifique las propiedades del acuífero.
- » Monitoreo para estudios especiales: se aplica para estudios especializados que requieren mayor cantidad de puntos de observación en zonas estratégicas para lograr el objetivo del estudio, de modo que no siguen un patrón de puntos.

3.1.2 Sistemas de monitoreo según su importancia relativa

Estos tipos de sistemas toman en cuenta la relevancia de los puntos de observación en relación con el tipo de agua adoptada, es decir, se analiza si en un punto el agua presente cumple con las condiciones necesarias para realizar el estudio (Foster y Gomes, 1989).

De acuerdo con las condiciones, se dividen en:

- » Redes de monitoreo no estresadas: es característico en puntos donde la presión no es alta, es decir, donde no hay bombeo constante sobre la superficie. De manera que en estos puntos no hay muchas posibilidades de que existan variaciones en los parámetros de medición.
- » Redes de monitoreo focalizadas: están localizadas sobre zonas que presentan mayor perturbación por diferentes factores, siendo el más común la intervención humana. Esta variación puede ocasionar cambios en las propiedades del acuífero o en el ecosistema presente.

Figura 3. Red de monitoreo de aguas subterráneas

Fuente: Gidahatari (s.f.).

3.2 Recolección de datos

Para obtener información representativa que sirva para identificar los posibles cambios a corto y largo plazo que se pueden presentar en el acuífero, es necesario realizar un buen muestreo en la zona que queremos estudiar. En los sistemas de monitoreo, cualquier método de muestreo es válido, siempre y cuando el procedimiento que se realice tenga un respaldo institucional e investigativo que certifique que la muestra tiene datos que aportan valor para el estudio (Advisory Committee on Water Information [ACWI], 2009).

Para que la muestra cumpla con esta certificación se deben considerar los siguientes aspectos:

- » Cantidad de puntos de monitoreo: el número de puntos en los que se realizará una medición depende de los parámetros a considerar en el estudio.

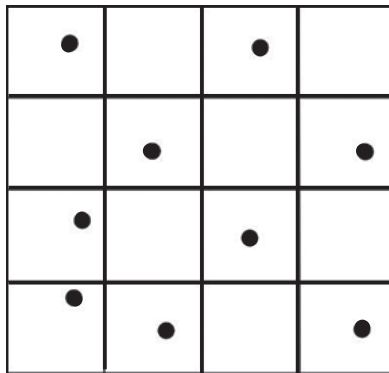
Comúnmente, las dimensiones o extensión del terreno es el parámetro más relevante a tener en cuenta. En la recolección de datos se busca obtener una distribución normal estadística, la cual exige mínimo una muestra de 30 datos, siendo esta una cantidad alta de puntos para áreas pequeñas, sin embargo, hay quienes plantean que por cada 100 km² debe

haber mínimo un pozo de medición, siendo este un valor pequeño para terrenos de gran extensión.

Por lo anterior, no hay un valor exacto de la cantidad de puntos que se deben tomar en la recolecta de datos, pero los expertos afirman que el rango debe estar entre 2 a 90 pozos por cada 1000 km² (Alley, 1993).

- » Localización de los puntos de monitoreo: la recomendación de los expertos es que los puntos se localicen por bloques en mallas, las cuales pueden ser:
 - Tipo cuadrícula, donde los puntos tengan una distribución uniforme que garantice abarcar la zona de mayor interés.

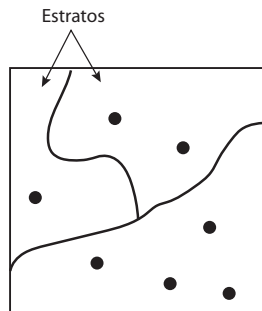
Figura 4. Monitoreo tipo cuadrícula



Fuente: elaboración propia.

- Tipo estratos, donde los puntos se ubican de acuerdo con los niveles estratigráficos presentes en la zona, de modo que se cubren las zonas más representativas de la región.

Figura 5. Monitoreo por estratos



Fuente: elaboración propia.

- » Frecuencia del monitoreo: la frecuencia se realiza en una región según el tipo de monitoreo. Claramente, una red de monitoreo focalizada tendrá mayor frecuencia de mediciones que una no estresada debido a que la medición constante nos ayuda a conocer los cambios que se presentan en el sistema, que, en su mayoría, son producidos por agentes externos como la manipulación del hombre.

Otro claro ejemplo se presenta con los sistemas de monitoreo por vigilancia cuando la recurrencia es menor debido que los puntos son poco relevantes, caso opuesto al monitoreo por tendencia, caso en que los puntos son representativos, por tanto, deben tener una constante medición para la obtención de datos.

Por otro lado, la frecuencia de medición también está dada por parámetros como la conductividad hidráulica, nivel de confinamiento y las características de flujo. Por ejemplo, un pozo confinado en suelos arcillosos tendrá menor conductividad hidráulica y mayor profundidad, de modo que las probabilidades de que sus propiedades varíen son muy bajas y la frecuencia de medición será poco constante (Lecocq *et al.*, 2017).

CAPÍTULO 4

CAPTACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

Cuando se habla de captación de aguas subterráneas, el método más conocido a nivel mundial es por medio de pozos verticales, por ser esta la principal herramienta utilizada. También se cuenta con los pozos horizontales que son por medio de galerías filtrantes y zanjas de drenaje (Cely-Calixto *et al.*, 2020).

Un pozo es una obra de gran complejidad que se ejecuta para obtener agua de los acuíferos y así cumplir una demanda determinada. Los pozos pueden tener una vida útil de varias décadas; cuando se agota el recurso se debe abandonar el pozo por medio del sellado (Martín, s.f.) .

En la selección del tipo de obra para la captación de agua subterránea es importante tener en cuenta algunas recomendaciones como las zonas costeras y cayos que cuentan con un nivel freático de poca profundidad y por eso se deben usar los pozos horizontales como las trincheras y drenes horizontales.

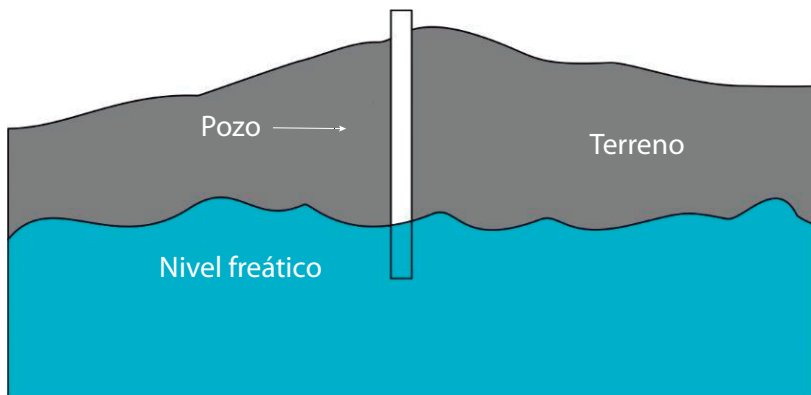
4.1 Pozos verticales

Algunos tipos de pozos son:

- » Abiertos, excavados o brocales: su construcción se hace principalmente de manera manual o muy poco mecanizada por medio de un diámetro relativamente grande (mayor de un metro). Su excavación debe alcanzar al nivel freático (en Derecho, s.f.).

- » Perforados o tubulares: también conocidos como pozos semisurgentes. Es el método más usado para la obtención de agua subterránea por medio de un diámetro reducido de 6 a 12 pulgadas. En su construcción se requiere el uso de máquinas perforadoras que cuentan con diversos sistemas dependiendo del material que se debe atravesar para llegar al acuífero (Ortega Sánchez y Delgado Zúñiga, 2021).

Figura 6. Pozos verticales

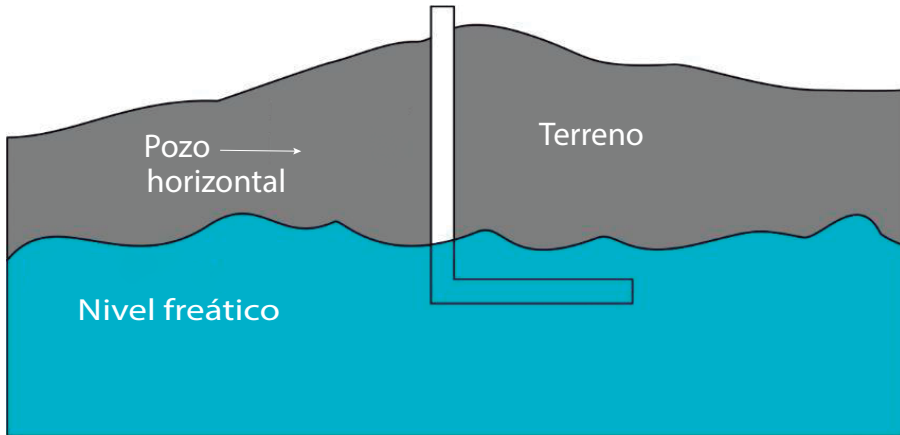


Fuente: elaboración propia.

4.2 Pozos horizontales

Cuando el nivel freático está a poca profundidad de la superficie del terreno se debe emplear una obra de pozos horizontales para la captación de aguas subterráneas de los acuíferos.

Este método es óptimo cuando se encuentra la cuña de intrusión salina a poca profundidad, ya que al usar un pozo vertical se puede llegar a este nivel y se podrá captar agua salada en vez de agua dulce (Luis, s.f.).

Figura 7. Pozos horizontales

Fuente: elaboración propia.

Las trincheras mencionadas son consideradas de penetración superficial. Para explotar el recurso se pueden seguir dos criterios:

1. Considerar la influencia del gradiente natural, es decir, la variación en la magnitud física y dirección de desplazamiento del agua en una cierta distancia.
2. Suponer que la zona que se va a captar se encuentra en una distancia suficientemente alejada de la costa.

Lo anterior será considerando que la superficie freática como la interfaz sean líneas horizontales. También pueden darse algunos problemas ambientales como eventos extremos, una tormenta tropical, además de las afectaciones que pueda ocasionar la misma obra (Storniolo y Trejo, 2018).

4.3 Métodos de perforación

Al elegir qué tipo de método usar para realizar la perforación se debe considerar:

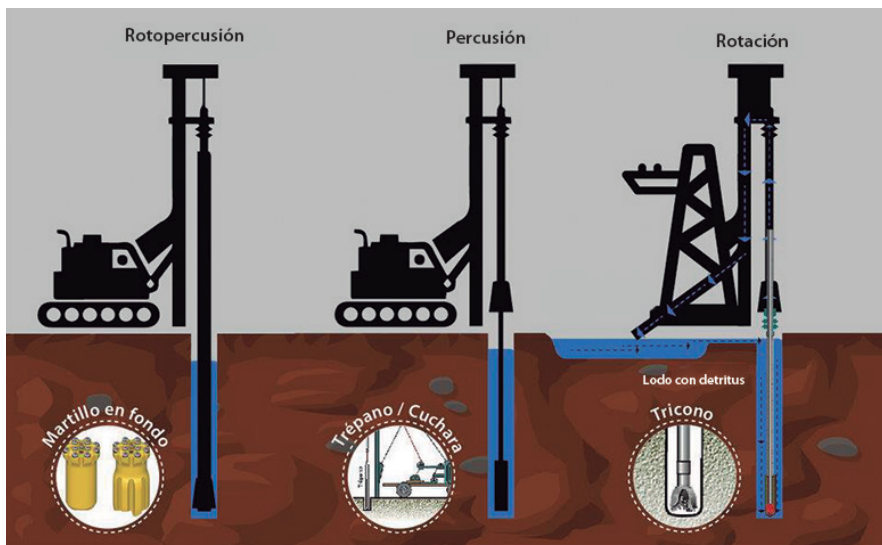
- » El tipo de material a atravesar
- » El caudal necesario para satisfacer la demanda
- » La profundidad del pozo
- » El diámetro de la perforación.

Además, tener en cuenta las ventajas de cada uno de los métodos, ya sea por la rapidez y facilidad para construir el pozo, los equipos que se requieren, la facilidad para penetrar el suelo, o elegir el método que genera una mejor protección contra la contaminación, entre otros.

Los métodos que se utilizan más en la actualidad son:

- » Perforación a percusión por cable: este procedimiento consiste en golpear repetidas veces sobre la roca con una herramienta pesada llamada trépano que es elevada y cae por efecto de la gravedad.
- » La perforación inicia con una tubería que sirve de guía y tiene una longitud inferior a los dos metros y un diámetro de perforación entre 700 a 800 mm, en caso de que el suelo sea inestable se utilizan tuberías auxiliares recuperables (Rocher y Salvo, 2014). Es importante el uso de agua para facilitar la recogida de los desechos de la roca, además del lodo generado por la combinación del agua con el suelo el cual se hace en un tiempo periódico determinado por la obra. Este método puede ser usado en suelos consolidados o no consolidados.

Figura 8. Métodos de perforación



Fuente: Hidroambiente (2020).

- » Perforación por rotación: consiste en el uso de una herramienta giratoria que desgasta la roca llamada tricono y en la cual el material triturado se extrae por medio del arrastre con agua o lodo. Este procedimiento es el más usado en la construcción de pozos especialmente en donde los suelos no son consolidados como la grava, arena o limos.
- » Perforación por rotopercusión: sirve en terrenos graníticos pues con este método resulta muy eficiente y por esto es muy utilizado.

Antes de que este procedimiento se utilizaba el método rotativo, pero tenía sus limitaciones porque no era recomendado hacer perforaciones en suelos consolidados; al incorporar el martillo de fondo más una unidad neumática o un compresor a los equipos de rotación se generó que su capacidad fuera apta para cualquier tipo de terreno (Casas Gonzáles, 2015).

Con la combinación del martillo de fondo y la percusión se realiza una perforación triturando y rompiendo el suelo; en este caso, no se necesita el uso de agua para retirar los escombros sino se sustituye por aire y un compresor que genera la suficiente potencia que sea capaz de mover el material cortado.

Este método cuenta con unas limitaciones que son: el tamaño del compresor, el tipo de martillo y la dureza de la roca.

En la Tabla 1 se presenta la comparación entre las ventajas de cada uno de los tipos de perforaciones antes mencionados:

Tabla 1. Comparación entre los métodos de perforación

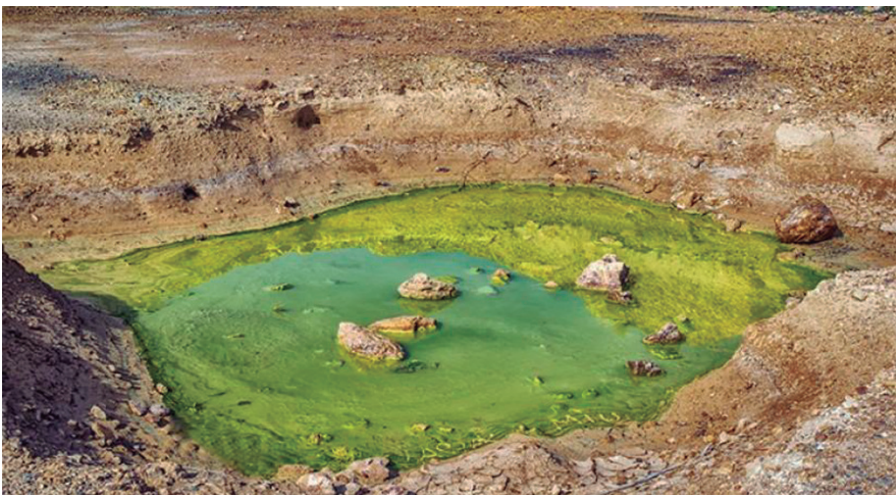
Comparación entre los diferentes métodos de perforación			
Ventajas	Método rotativo	Método por rotopercusión	Método por percusión
Tiempo empleado en perforar o avance	10 a 50 m/día	40 a 50 m/día	1 a 10 m/día
Tipo de material que puede atravesar	Terrenos sedimentarios	Principalmente rocas	Todo tipo de terrenos
Facilidad en determinar napas portadoras	Baja. Se enmascaran debido al uso de lodo de perforación	Alta. Se determinan fácilmente	Alta. Se determinan fácilmente
Tubería de maniobra	No necesita	Imprescindible en determinados materiales	Imprescindible en determinados materiales
Muestreo	Pobre	Regular	Bueno
Ventajas	Alcanza grandes profundidades y realiza pozos de gran diámetro	El más rápido en roca dura	Simplicidad del método adaptable a todo tipo de terrenos
Inconvenientes	Enmascara todos los aportes de agua	No perfora en materiales no consolidados	Avance lento en rocas duras
Calidad constructiva	Buena	Buena	Buena

CAPÍTULO 5

CALIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA

Todos reconocemos que el agua es la base de la vida en la Tierra, es nuestra fuente de supervivencia y la mejor aliada para nuestro metabolismo, entonces ¿por qué si es nuestra amiga la dañamos? Cada día, miles de residuos tóxicos son encontrados en las fuentes hídricas, causados principalmente por el crecimiento demográfico y la evolución que ha generado este crecimiento demográfico. Sin embargo, no solo se ha evidenciado esta contaminación en el agua, sino también en el aire y el suelo.

Figura 9. Agua contaminada con arsénico



Debido al crecimiento poblacional y al aumento en su demanda del agua, se ha requerido el uso de fuentes alternas para la obtención de agua, por lo tanto, aprovechar el recurso hídrico subterráneo es una solución eficiente que prolonga su sostenibilidad. Sin embargo, la contaminación ha generado que su consumo no sea apto debido a la presencia de contaminantes químicos como el arsénico (Huillca Lima y Apaza Mamani, 2019).

El arsénico es un elemento natural que se presenta en la Tierra, pero este elemento químico genera un impacto sobre la salud ambiental y animal. El vulcanismo terciario y cuaternario desarrollado en la cordillera de Los Andes es un proceso que se basa la creación natural de este elemento. En Argentina la presencia de arsénico en las aguas subterráneas está en un ámbito de 0,02 mg/l hasta 2,00 mg/l (González *et al.*, 2014). Ante esto, se han presentado diferentes técnicas para su tratamiento, entre ellas se mencionan: la coagulación-precipitación, adsorción, nanofiltración y osmosis inversa.

Uno de los métodos de gran impacto es la implantación de fitotecnologías que se basan en la utilización de plantas acuáticas para la absorción de los elementos tóxicos en aguas como el arsénico, mencionado anteriormente. Este proceso es a través de las raíces de las plantas y ha sido muy efectivo principalmente en las zonas rurales en donde se evidencia con mayor frecuencia este problema y su afectación en la población aledaña.

El jacinto acuático, la lenteja de agua y la azolla son las especies más estudiadas para su aplicación en la eliminación de toxinas en aguas subterráneas. El *E. crassipes* es la más destacada por sus resultados alentadores en la eliminación de arsénico, flúor y nitratos, ya que se ha demostrado que su tasa de eliminación es de 600 mg al día bajo condiciones de campo (Fernández-Polanco Íñiguez de la Torre, 2018).

De esta manera, el agua subterránea –a pesar de su contaminación y la afectación en zonas rurales por la falta de elementos para su tratamiento– ha sido un factor muy importante para la sustentabilidad de este recurso hídrico.

5.1 Agua subterránea destinada al abastecimiento humano

El 74 % de la población no tiene acceso al agua potable en el momento que lo requiere y sin contaminantes (WHO/UNICEF, 2020). Las razones principales son las desigualdades geográficas, culturales y económicas, que han provocado que en muchas partes se presenten enfermedades por el uso de estas aguas sin tratamiento debido a los factores mencionados anteriormente. Este es el caso de la esquistosomiasis, una enfermedad grave que ha afectado a más de 200 millones de individuos por la presencia de bacterias parasitarias retraídas en aguas infestadas (Organization World Health, 2019).

Figura 10. Acceso al agua potable

Fuente: Noticias ONU (2022).

El agua subterránea es un recurso que se ha convertido en una fuente importante de abastecimiento de agua potable en la provisión de las necesidades humanas, como en su consumo, en el sector agrícola y en el uso en actividades en las zona urbanas y rurales (Guzmán Soria *et al.*, 2010).

También tiene un papel fundamental en el desarrollo de regiones, debido a la falta de puntos de abastecimiento, por eso las empresas deben hacer exploración para generar puntos de abastecimiento y hacer su obtención superficial, debido a que cada vez se ve la dificultad de poder encontrar estos puntos de provisión (Cerón *et al.*, 2021a).

5.2 Aguas subterráneas destinadas al riego

Desde un punto mundial, la agricultura es el mayor extractor de recursos hídricos obtenidos de fuentes subterráneas, sin embargo, su gran uso ha causado el agotamiento de los acuíferos y la degradación ambiental, debido a que afectan la calidad del agua subterránea.

La gran mayoría de las actividades de la agricultura usan de fertilizantes y pesticidas, y por la descomposición de residuos orgánicos se han provocado deterioros en los acuíferos y hasta su irreversibilidad, ya que no se pueden utilizar nunca más debido a la imposibilidad de su descontaminación. Por lo tanto, cuando se habla de agua

para el riego, esto significa la composición mineral del agua, debido a su diferencia con el agua que es utilizada para el consumo humano (Matzeu *et al.*, 2017).

Figura 11. Riego de cultivos



Fuente: El mundo y sus plantas (2012).

El conocimiento de la calidad de agua para uso agrícola es de vital importancia y para esto se han establecido una serie de criterios para su clasificación, desarrollados por la FAO (Ayers y Westcot, 1994) y otros implementados por el Laboratorio de Riverside (Richards, 1990). Estos criterios son los siguientes:

1. La concentración total de sales solubles.
2. La concentración proporcional de sodio con respecto a otros cationes.
3. La concentración de boro, cloruro u otros elementos que puedan ser tóxicos bajo ciertas condiciones.
4. La concentración de bicarbonatos en relación con la concentración de calcio más magnesio.

Como se estableció anteriormente, el sector de la agricultura de regadío es el mayor extractor y consumidor de agua subterránea, estando casi en la mayor parte de la tierra que es utilizada para la cultivación equipada por agua de pozo (Foster *et al.*, 2018). India y china son las naciones con las mayores áreas en su utilización. Esto se ha podido comprobar con las encuestas y estudios que fueron realizados por la ONU-FAO y los cuales se evidencian en la Tabla 2.

Tabla 2. Encuesta mundial de riego con agua subterránea

Región	Riego con agua subterránea		Volumen de agua subterránea utilizado	
	Millones de hectáreas	Proporción del total	km ³ /a	Proporción total
Sur de Asia	48,3	0,57	262	0,57
Asia Oriental	19,3	0,29	57	0,34
Sudeste Asiático	1	0,05	3	0,06
Oriente Medio y Norte de África	12,9	0,43	87	0,44
América Latina	2,5	0,18	8	0,19
África subsahariana	0,4	0,06	2	0,07

Fuente: Siebert *et al.* (2010).

En el caso de Asia, con su crecimiento poblacional se ha dado la necesidad del uso intensivo de la tierra para la cosecha de alimentos y los pozos han sido un medio eficaz para cumplir con este objetivo. Por lo tanto, esto ha generado que se establezcan otros factores que afianzan su utilización, como:

- » Ayudas para la construcción de nuevas infraestructuras de pozos.
- » Transmitir el conocimiento hidrológico sobre el agua subterránea y el potencial para generar su aplicación.
- » Desarrollos en la aplicación técnica de bombas en pozos.
- » Generalizar la electrificación rural y el bombeo financiado para la energía eléctrica.

Entre los beneficios para la utilización de aguas subterráneas en la agricultura es el fácil acceso que se tiene de ella, además de su bajo costo y obtención de manera rápida. Para los agricultores se encuentra disponible por demanda, por lo que se les permite un mayor control de ella durante el año.

Gracias a estas fuentes y la gran demanda que hay en la agricultura, las comunidades rurales se han beneficiado. Además, en muchos países donde hay pobreza, es necesario tener estas fuentes de agua para asegurar un buen cultivo para la población. Estudios realizados en ocho países sobre el riego limitado en minifundios, revelaron que una gran cantidad de agricultores que tienen zonas pequeñas son atraídos al uso de estas fuentes de agua, debido a su facilidad en el cultivo (Foster *et al.*, 2012).

5.3 Agua subterránea destinada al abrevadero de ganado

El consumo de agua es vital para el sector ganadero. Todas las funciones vitales realizadas por el metabolismo de los seres vivos requieren de una buena fuente de energía para nutrirse y alimentarse. En este caso, de la calidad del agua que consumen los animales dependerá la producción de la leche o el engorde.

El uso de aguas subterráneas para el consumo de ganado es muy parecido al destinado para consumo humano: estas aguas deben tener propiedades físicas, biológicas y químicas óptimas que garanticen la salubridad del ganado, de modo que en ningún caso se afecte la vida del animal. Además, se debe tener en cuenta que la salubridad pública está en juego, puesto que, si se producen enfermedades en el ganado, esto afectará la calidad de la carne que sirve como alimento, y si esta no presenta condiciones de salubridad y control aptas para el consumo humano se puede ocasionar la transmisión y propagación de enfermedades que afecten directamente la salud humana (Tang *et al.*, 2021).

5.4 Agua subterránea destinada a la industria

El uso de aguas subterráneas en el sector de la industria depende del tipo de industria, debido a que no todos los procesos industriales requieren de los mismos estándares de calidad de agua; por tanto, las características físicas y químicas del agua subterránea son un factor determinante para definir su uso (Limaye, 2015).

Por otro lado, la localización de las zonas industriales es un aspecto que influye en el uso continuo o intermitente de las aguas subterráneas, ya que la mayoría de los sectores industriales presentes en una región están ubicadas en los cascos urbanos o en sus proximidades y, en este caso, lo más viable es abastecerse de agua por medio de redes de distribución.

CAPÍTULO 6

CONTAMINACIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

El agua subterránea nace de la lluvia, la cual se infiltra a través del suelo, ríos, lagunas y en los intersticios de formaciones geológicas compactas en roca-sedimento porosas (arenas, gravas, etc.) o fracturadas (calizas, areniscas, lavas, etc.) hasta conseguir una altitud impermeable y que no pueda decrecer. La superficie donde se contienen y se ceden estas aguas se denominan acuíferos (Verruijt, 2016).

Los acuíferos pueden tener longitudes laterales de cientos de metros si hablamos de un acuífero local y millones de metros si es regional. En este lugar se acumula el agua y poco a poco se mueve a favor del gradiente hasta encontrar un punto de salida a la superficie y convertirse en lechos de ríos, fuentes, manantiales, entre otros (Cely-Calixto, 2020).

El agua subterránea está ubicada abajo del nivel freático y llena al límite los poros y grietas del terreno, y después vuelve a la superficie de manera natural mediante manantiales y cauces fluviales. El movimiento de estas aguas en los acuíferos va desde el sector de recarga hasta el sector de descarga (Parra y Londoño, 2017).

6.1 Aspectos básicos de la contaminación de aguas subterráneas

La palabra *contaminación* es usada en la actualidad para expresar una realidad bastante alarmante en países desarrollados o en vía de desarrollo, por tanto, se entiende por contaminación hídrica a la alteración de la calidad del agua por acción

humana, haciendo que el agua quede en parte o totalmente inusable para consumo humano o cualquier actividad para la que estaba destinada (Abiriga *et al.*, 2020).

La calidad del agua depende de su punto de partida o nacimiento, por ejemplo, hay agua de carácter natural que no puede ser usada en ciertos contextos, como el agua de mar, la cual no sirve para consumo del ser humano, pero debido a su cantidad de sales, no significa que sea contaminada. El nivel de alteración del agua natural está regido por normas de calidad las cuales describen las condiciones ideales del agua y el uso para el que esté destinado (Ramírez, 2021).

Cabe recordar que el agua subterránea que se encuentra en manantiales o pozos solo tiene tres usos: suministro urbano, agrícola e industrial. En el caso del suministro del agua en áreas urbanas, cualquier tipo de afectación en el agua puede ocasionar daños graves a nivel de salud pública.

Las partículas que hacen parte de la contaminación suelen ser las mismas que contaminan el agua superficial, tales como sales normales, manera orgánica no biodegradable, nitratos, entre otros (Tabares Valencia, 2019). Aun cuando la clase de contaminante determina el tipo de contaminación y sus características, la calidad del flujo subterráneo en un medio poroso es igual a la contaminación de agua subterránea.

Existen tres ideas principales que resumen los fundamentos de la contaminación del agua subterránea y sus cuidados:

1. Las aguas subterráneas se encuentran mejor protegidas frente a la contaminación que las aguas superficiales. Sin embargo, esta protección puede verse afectada en cierto nivel por la aplicación directa de agentes contaminantes bajo la superficie llena del acuífero (Fraile *et al.*, 2021).
2. Después que el agente contaminante se agrega al flujo subterráneo, es muy complicado y costoso encontrarlo y saber cómo se desplaza, evoluciona y cómo suspenderlo antes de que llegue a pozos o sondeos. En la mayoría de los casos, es imposible eliminar la sustancia del medio permeable, por esto puede permanecer contaminado a corto y largo plazo (Santana Hinostroza, 2021).
3. Dados los dos puntos anteriores, se deduce que la mejor forma de eliminar las dificultades que genera la presencia de partículas contaminantes en el agua subterránea es evitar que estos elementos lleguen al acuífero mediante un ordenamiento del territorio, por medio de estudios geológicos, hidrogeológicos y de yacientes de contaminación. Estos estudios se deben hacer antes y durante el proceso de progreso agrícola y urbano (Foster *et al.*, 2003).

6.2 Mecanismos de introducción y propagación de la contaminación en el acuífero

Los mecanismos para que un agente contaminante llega al acuífero y se expanda en esa zona son complejos. Los criterios usados para clasificar estos mecanismos se pueden ampliar indefinidamente, sin embargo, se pueden definir como la clasificación del punto desde el cual se extiende el contaminante. Hay tres tipos de categorías de mecanismos:

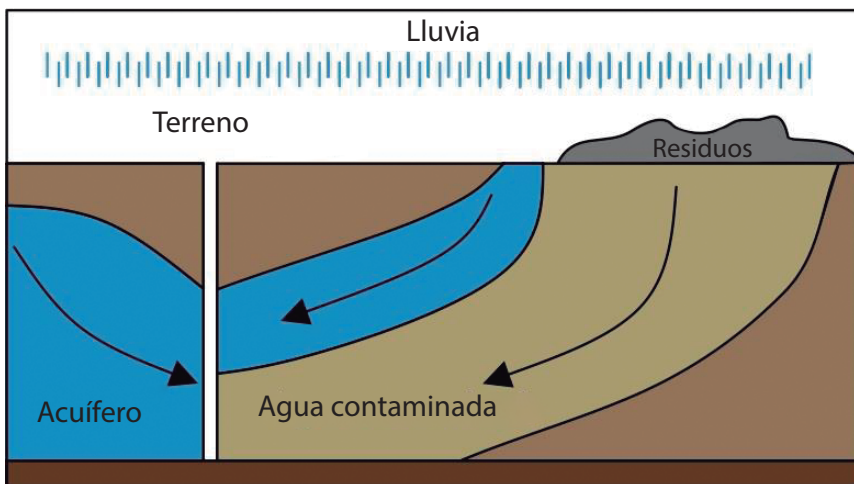
6.2.1 Mecanismos de propagación a partir de la superficie

A este grupo pertenecen cuando se trata de transporte de contaminantes de la superficie de un terreno mediante aguas de infiltración por el uso de fertilizantes o vertidos en el suelo y de infiltración de aguas de ríos debido a la acción humana.

- » **Contaminación de un acuífero por lixiviado de residuos depositados en superficie**

Esta ocurre cuando se eliminan residuos sólidos, transporte de agua de plantas de tratamiento hacia el lecho seco o almacenamiento de múltiples sustancias en la superficie. Si entre los residuos almacenados hay material soluble, este es lixiviado por acción del agua lluvia y se infiltra, llegando hasta la parte saturada para luego unirse al flujo subterráneo, y finalmente, llegar a una captación de agua subterránea (Chicana Gil y López Quiroz, 2021).

Figura 12. Contaminación por lixiviados

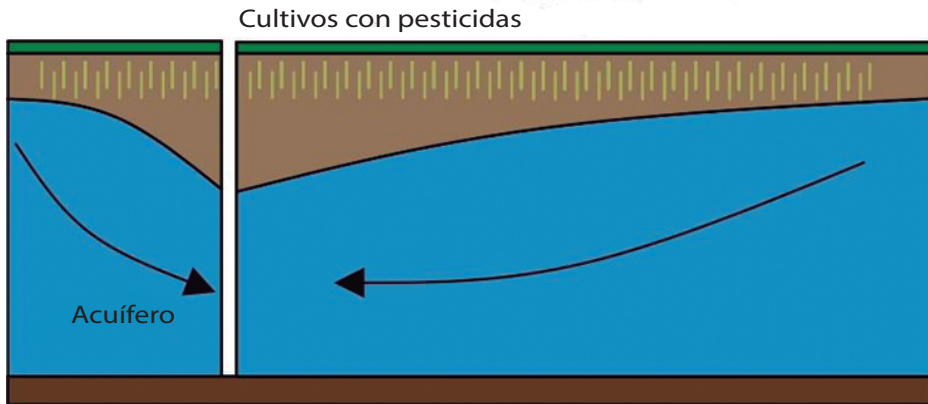


Fuente: elaboración propia.

» **Contaminación por actividades agrícolas**

Esta contaminación ocurre cuando al infiltrarse el agua, ya sea de lluvia o de riego, se disuelve el abono. Así que cuando se explota el acuífero con fines de abastecimiento, trae como consecuencia el posible riego con aguas contaminadas (Moradell y Renau-Pruñonosa, 2019).

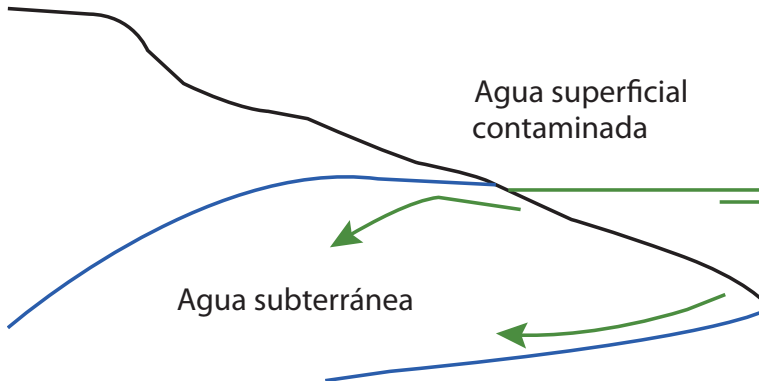
Figura 13. Contaminación por actividades agrícolas



Fuente: elaboración propia.

» **Contaminación por el flujo inducido de aguas superficiales contaminadas hacia un pozo**

Este tipo de contaminación ocurre por una alteración del flujo generada por la extracción de agua subterránea cerca de un río o canal que transporta aguas residuales urbanas o para cualquier uso. El bombeo existente genera un cambio de dirección en el flujo, permitiendo que en cierto lapso de tiempo de funcionamiento, el pozo reciba parte del agua contaminada que proviene de la superficie (An *et al.*, 2022).

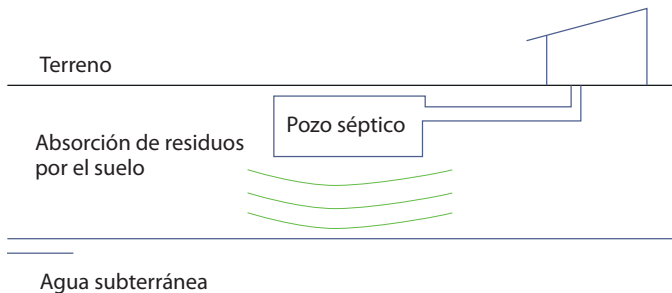
Figura 14. Contaminación por aguas superficiales contaminadas

Fuente: elaboración propia.

Aguas residuales domésticas

En el uso de aguas residuales domésticas se incluye el uso de pozos sépticos, reciclado de efluentes y todo sistema que trate y gestione aguas residuales de uso doméstico. Estos mecanismos son bastante riesgosos cuando existe una acumulación de estos sistemas en una superficie limitada por su condición hidrológica debido a la probabilidad de infiltración, en especial, en la zona donde ocurre la recarga del acuífero.

Independientemente de la absorción en el suelo y la mitigación de la contaminación en un área no saturada, se crea una amenaza en próximas recogidas de agua debido a la infiltración de sustancias que alcancen el nivel freático (Lledó, 2002).

Figura 15. Contaminación por residuos domésticos

Fuente: elaboración propia.

Embalsamiento superficial

El embalsamiento superficial es aplicable cuando existe almacenamiento de residuos líquidos de cualquier procedencia, que son sedimentados en excavaciones, graveras o vertederos supervisados.

La distribución geológica, la humedad y las coordenadas del punto de vertido con respecto a la topografía y el flujo subterráneo son los factores que describen el movimiento del lixiviado (Huaiquilaf, 2008).

6.2.2 Mecanismos de propagación originados en la zona saturada

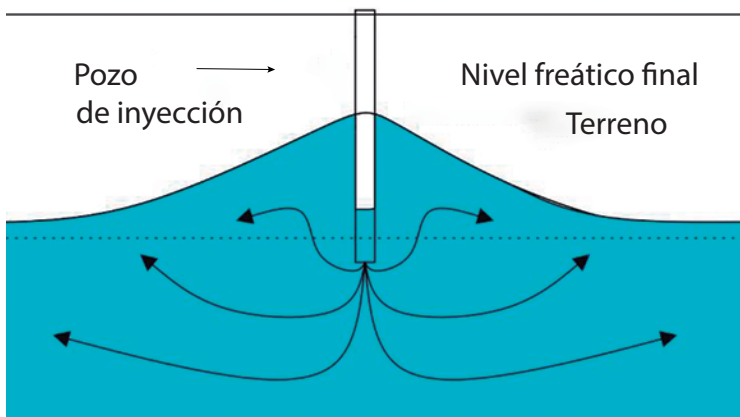
Entre los mecanismos de propagación en la zona saturada se encuentran:

» **Pozos de inyección**

Los pozos de inyección son sondeos usados para introducir de manera directa y eliminar aguas residuales industriales de agua salada proveniente de la industria minera, o agua que ha sido sometida a procesos térmicos.

Este mecanismo genera una amenaza directa hacia la calidad del agua subterránea, en particular, cuando los pozos no están diseñados y construidos para este fin, ya que cuando aparezcan agentes contaminantes en la zona de agua potable se va a filtrar como consecuencia de la fracturación hidráulica o transporte de agua salada a un acuífero de agua dulce (Retamal Salgado, 2011).

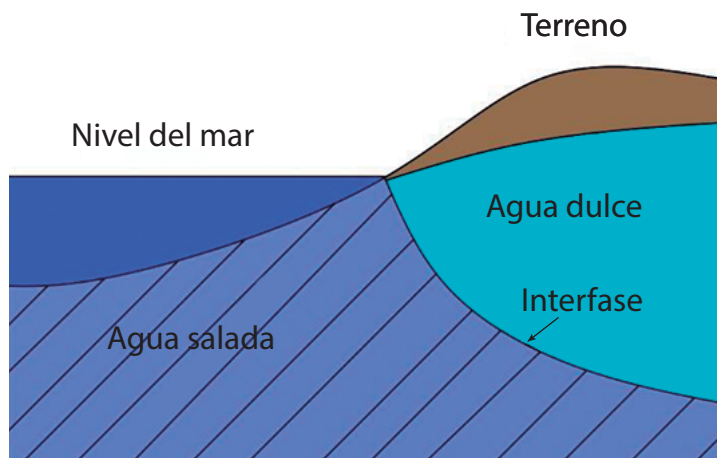
Figura 16. Pozo de inyección



Fuente: elaboración propia.

- » **Progresión de la intrusión salina por alteración del régimen de flujo**
Cuando existe un bombeo excesivo en un acuífero que está conectado con el océano o que haya una mala ubicación de las captaciones de la bomba en el acuífero, se genera la proliferación de una cuña de agua salada y tierra al minimizar el paso de agua dulce al océano.

Figura 17. Intrusión salina en acuíferos costeros



Fuente: elaboración propia.

Cuando el régimen de flujo se altera en el acuífero, en especial en zonas continentales, puede generar la filtración de agua contaminada natural hacia la parte de sondeos de captación. Esta situación ocurre generalmente en acuíferos detríticos que contienen materiales que se evaporan tales como yesos y sales. Cuando este tipo de intrusiones avanzan, con el tiempo generan el abandono de la captación contaminada (Pérez-Villarreal *et al.*, 2018).

Cuando ocurre lo mismo, pero en un foco, tal como un vertedero, en el cual solo se ve comprometido una zona específica, ubicada próxima al foco y se amplifica a favor del gradiente, nos referimos a una contaminación puntual.

La manifestación de autodepuración natural en el suelo, saturación y no saturación de una zona reducen el nivel de contaminación de tal forma que el foco se parece a una chimenea, en la cual su humo se transporta y se dispersa mediante el viento. Este tipo de contaminación se denomina penacho. Cuando se presenta el caso contrario, es decir, cuando el volumen del acuífero contaminado es mayor y el foco de contaminación no es específico, se denomina contaminación difusa (Pedrozo Acuña, 2021).

6.3 Fuentes potenciales de contaminación

La contaminación en el agua subterránea puede ser el resultado de eventos puntuales o difusos dependiendo de variables como el tiempo o el territorio. Aunque en su gran mayoría puede llegar a ser considerado un tipo de riesgo “inducido” ya sea causado de manera indirecta o directa por el ser humano antes que ser una causa propia de la naturaleza.

La calidad del agua en los acuíferos llega a deteriorarse por las contaminaciones que son generadas por el ser humano o la naturaleza o, en ciertos casos, donde ambos factores actúan en conjunto (Inyinbor Adejumoke *et al.*, 2018). En los siguientes enunciados se van a tratar fundamentalmente los tipos de contaminación causados por actividades del ser humano que se pueden agrupar de la siguiente manera:

- » Contaminación urbana o doméstica
- » Contaminación agrícola
- » Contaminación industrial
- » Contaminación inducida por bombeo

6.3.1 Contaminación urbana o doméstica

Este tipo de contaminación tiene dos clases de residuos fundamentales que son: residuos sólidos y residuos líquidos o aguas residuales urbanas; ambos contribuyen de manera directa en la calidad del agua de los acuíferos. También están los residuos gaseosos, pero estos actúan en una menor incidencia directa, aunque pueden afectar en las zonas urbanas al agua lluvia que es la principal fuente de recarga de los acuíferos (Cely-Calixto, Bonilla-Granados, *et al.*, 2021).

Teniendo en cuenta los contaminantes asociados, se puede decir que son de tipo orgánico y biológico causados por la presencia de fosas sépticas, alcantarillados, pozo negro y vertederos, entre otros. Además de los factores contaminantes antes mencionados también se debe tener en cuenta que existen los productos químicos de uso doméstico como los detergentes o pesticidas y los productos denominados farmacéuticos y de uso personal (Rivas y Pimiento, 2019).

Los vertederos urbanos se forman por desechos como el papel, metal, vidrio, madera, entre otros. Al menos un 60 % de todos estos residuos son domésticos y el otro 40 % son comerciales (López-Vega *et al.*, 2021).

Se considera que los vertederos controlados no generan contaminación, pero existen los no controlados que son colocados de manera furtiva y, con poca frecuencia, estos pueden contener materiales tóxicos y peligrosos que resultan altamente contaminantes para los acuíferos por estar sometidos a lixiviación generado por el agua lluvia junto con otros residuos líquidos (Hernández-Nazario *et al.*, 2018).

En relación con las fosas sépticas cuya función es la capacidad depuradora del suelo para degradar las aguas negras, en el caso del alcantarillado, la contaminación se debe a fugas en las tuberías o accidentes y se caracteriza por tener una composición orgánica. El origen del agua, en este caso, es de un 40 % procedente del WC; 30 % del aseo personal; 15 % de lavadoras y 10 % de cocinas (Rivera *et al.*, 2021).

La contaminación del agua en los acuíferos debido a las fosas sépticas es causada fundamentalmente por la presencia de excremento que frecuentemente contiene bacterias e incluso nitratos, incremento del contenido de sales totales y cloruros. Los nitratos suelen estar presentes cuando el contenido de las aguas negras se descarga de manera directa en zonas no saturadas lo que genera un ambiente oxidante (Bruning González, 2018; Méndez-Novelo *et al.*, 2012; Rivera *et al.*, 2021).

Las aguas residuales urbanas se eliminan por medio de las alcantarillas en ciertas poblaciones que cuentan con ella o, en la mayoría de los casos, se vierte directamente en los cauces fluviales sin ningún proceso previo de tratamiento de depuración del agua. También está el caso de lugares con poca población que, por lo general, son zonas agrícolas que proceden a eliminar estos residuos por medio de pozos negros, fosas sépticas, entre otros.

Los vertidos, en este caso, contienen sales minerales, restos de compuestos no biodegradados, materia orgánica, virus y microorganismos fecales en general. Además, el grado de tratamiento al que están sometidos antes de su vertido condiciona la carga contaminante que puede generar. El máximo riesgo que contienen estos vertidos por su alta contaminación corresponde a las aguas superficiales donde va a parar una cantidad grande de estas aguas, por ende, si existe una recarga de acuíferos por medio de aguas superficiales o el caso donde exista una conexión de acuífero-río existe un alto nivel de peligro por contaminación directa de las aguas subterráneas (Gaviria y Betancur, 2005).

Existe una variedad que causa un riesgo directo para el agua subterránea que se genera ya sea por las pérdidas en las redes de alcantarillado, la infiltración proveniente de fosas sépticas y los pozos negros, el vertido directo en cauces secos, entre otros; especialmente cuando hay una mala práctica de riego usando el agua de los acuíferos.

El riesgo aumenta considerablemente cuando el vertido por riego o las pérdidas son producidas en áreas hidrogeológicamente favorables a la infiltración. Aunque existe una gran variedad de compuestos orgánicos que llegan a ser absorbidos por el suelo y algunos generan reacciones químicas que transforman el nitrógeno orgánico en nitratos solubles, lo que aumenta el peligro de contaminación (Arteaga-Cortez *et al.*, 2019).

La lucha para mantener controlada y disminuir la contaminación urbana y doméstica se debe abordar en su doble vertiente de los residuos líquidos y sólidos

a través de políticas de prevención que impidan la llegada de los contaminantes a los acuíferos por medio de perímetros que protejan la captación más cerca de vertientes y desagües de efluentes. Además de mantener un control riguroso de las medidas ya existentes sobre los tratamientos previos a los vertidos de residuos líquidos y el correcto desplazamiento de los residuos sólidos que se realicen en un futuro (Cazorla, 2022).

6.3.2 Contaminación agrícola

Es muy probable que la causa principal por la cual las aguas subterráneas sufren un deterioro y desgaste en su calidad sea por los actos humanos, entre ellos, las prácticas agrícolas. A diferencia de otros tipos de contaminación, esta es causada por las actividades que se realizan, sin embargo, existen casos como los vertidos puntuales que son los desechos contaminantes que se producen en las granjas, pero en este caso, la contaminación agrícola contiene un carácter difuso (Grondona *et al.*, 2022).

Los elementos que más crean contaminación en esta parte específica del sector probablemente son los fertilizantes, o también se encuentran los pesticidas que generan una mayor contaminación y, de manera indirecta, están las prácticas de regado en las que se muestra la parte del reciclaje. Existen más tipos de contaminantes de un grado menor de preocupación como los vertidos de comida animal, la purina que se deja en esa superficie. Esto crea una contaminación y hay otro tipo de contaminación que son los residuos de cosechas (Gutiérrez Quiroz, 2019).

Los fertilizantes y especialmente los que están hechos a base de nitrógenos son los referentes a la contaminación en las aguas subterráneas, ya que estos son los compuestos más importantes. Comúnmente estos compuestos orgánicos se tienden a usar en forma de estiércol o úrea y están compuestos de $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$ y también en forma de compuestos inorgánicos como lo serían el amoníaco que está hecho de (NH_4OH) , el sulfato de amoníaco $[(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4]$, el carbonato de amoníaco $[(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3]$, el nitrato de amoníaco (NH_4NO_3) y otros muchos compuestos que se usan como fertilizantes (Calderón *et al.*, 2019).

La lixiviación se basa en la separación de una o varias sustancias que se encuentran en una matriz sólida, la lixiviación que se da en estos compuestos por el agua de lluvia o de riego incorpora principalmente NO_3^- , NO_2^- y NH_4^+ a las aguas de infiltración, sin embargo, estos dos últimos se dan en cantidades mucho menores y son inferiores al 1 % del nitrógeno total lixiviado (Ramírez *et al.*, 2022).

La concentración de nitrato en el agua alcanza zonas de saturación que dependen principalmente del contenido como el nitrógeno orgánico que procede naturalmente del suelo; el tipo, la cantidad y frecuencia en se deben aplicar los fertilizantes, además que naturalmente dependen de las condiciones físicas que se presenten

en el suelo y de otras condiciones externas como la pluviometría, la dotación de riego, entre otras.

Tal concentración de nitrato que se encuentra en las aguas subterráneas afectadas por las prácticas agrícolas tiene múltiples variaciones que están en función de las circunstancias anteriormente dadas. Por lo tanto, la distribución de los acuíferos libres, normalmente conservan una mejor relación con la profundidad de las captaciones dando paso a que la máxima concentración debe aparecer en la zona superior del lugar que se satura mientras que las mínimas se presentan en la zona inferior. Cuando el grosor en la parte saturada se aprecia de manera escasa, se crea con el tiempo un notable grado de homogeneización en la concentración.

Los nitratos se usan donde hay aprovechamiento agrícola intensivo, un problema que se incrementa en la extensión, así como en persistencia e intensidad. En países como España es una situación bastante inquietante porque este problema suele desarrollarse con mucha rapidez en muchas zonas como los lugares internos, cerca de las costas mediterráneas o áreas que no suelen ser comunes (Arauzo *et al.*, 2020).

El uso de algunos fertilizantes hechos de sulfato amónico $[(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4]$ cloruro potásico (KCl) o carbonato potásico (K_2CO_3), así como también los compuestos de fósforo (los cuales normalmente son poco movibles si no se llega a sobrepasar su utilidad para la capacidad de fijación del suelo y no se presentan cambios en la solubilidad de este) pueden conducir al incremento de la concentración en el sulfato, cloruros y fósforos que se encuentran en las aguas subterráneas. Sin embargo, los compuestos ya mencionados llegan a constituir un problema menor comparado con los nitratos (Briones Falla, 2020).

Figura 18. Suelo con pesticidas

Fuente: Díaz (2021).

Por otra parte, los pesticidas y otros productos fitosanitarios son contaminantes potenciales del agua subterránea. Estos lixiviados se transforman por agua de lluvia o de riego. De los compuestos más tóxicos son los pesticidas organoclorados porque estos tienen muchos efectos sobre los organismos. Debido a las propiedades de acumular los compuestos, estos han aumentado el nivel de restricción y hasta su prohibición por la baja solubilidad y que se absorbe principalmente por el suelo y así se limita la amenaza para construir aguas subterráneas (Godínez-García *et al.*, s.f.).

Los compuestos de organofosforados son fáciles de degradar y tienen un límite residual que es fácil de absorber. Esto parece un riesgo menor a pesar de que los pesticidas son menos conocidos (Sánchez *et al.*, 2016).

El vertido de residuos animales es otra posible causa de contaminación de acuíferos. La ganadería genera unos residuos líquidos y una materia orgánica que es una fuente principal de nitrógeno y de nitratos. Aunque se considera que estos residuos deben ser tratados para eliminar las sustancias contaminantes antes de ser vertido en el suelo, hay vertidos sin tratamiento que no son controlados y terminan en zonas inadecuadas y esto causa un aumento de la contaminación.

Los residuos sólidos generados por este tipo de actividad tienen una considerable demanda biológica de oxígeno, una mayor cantidad de sólidos en suspensión y concentraciones altas de coliformes fecales. Por tanto, el riesgo que causan las bacterias que provienen de las heces fecales del ganado es bajo por ser un material

biodegradable, además de la existencia de suelos que favorecen la depuración de heces debido al pasto que hay en el lugar.

Finalmente, el aumento de las sales es un factor que puede generar un deterioro en la calidad del agua de los acuíferos debido a la concentración de sal porque no son consumidas por las plantas que solo aprovechan una cantidad mínima de sales existentes. Por otro lado, se tiene la capacidad del agua usada para el riego de distribuir las sales en el terreno y lixiviar fertilizantes y pesticidas.

El riesgo de que aumente la cantidad de sales en el agua subterránea es debido a la práctica del reciclaje del agua que se usó para el riego porque esto genera el acumulo progresivo de las sales. Esta práctica causa un exceso de sodio en el terreno lo que modifica la estructura del suelo y con ello la permeabilidad. Se requiere un tratamiento que corrija este daño por medio de la aplicación de yeso que será el encargado de desplazar el sodio y restablecer la permeabilidad primitiva (Dickel, s.f.).

Los principales problemas de contaminación agrícola son:

- » La utilización incorrecta de los fertilizantes nitrogenados y fosforados en terrenos de riego que tienen un suelo permeable y acuíferos libres.
- » Un aumento excesivo de reciclado de agua subterránea en áreas de regadío intensivo.
- » Vertido de residuos animales sobre terrenos vulnerables sin un adecuado control.
- » Uso exagerado de pesticidas en el suelo permeable que cuenta con una escasa capacidad de absorción.

6.3.3 Contaminación industrial

La contaminación industrial es provocada en las aguas subterráneas debido a las diferentes actividades realizadas en el área de la industria, en donde esta presenta dos características principales que tienen un impacto notable en dicha área.

Por una parte, existe una gran cantidad de sustancias químicas inorgánicas que producen una variedad de agentes contaminantes en las aguas subterráneas y le generan daños graves. La otra característica es que la contaminación representa caracteres específicos que determinan cuáles son las funciones aplicadas en las distintas zonas industriales.

Estas características están asociadas con todos los procesos industriales que existen debido a que ejercen un cambio excesivamente estricto en la evolución tecnológica que economiza el mercado, la materia prima que se emplea, sufre daños graves y por supuesto, los productos que se encuentran en elaboración también son afectados por el tipo de contaminación que se esté presentando.

Las consecuencias que provoca la contaminación son variadas según el tipo de industria en donde se origine por la magnitud, la toxicidad y el riesgo contaminante que pueden ocasionar en áreas como: industrias petroquímicas, mineras, la producción de materiales y su manufactura. También se deben considerar los productos que son tóxicos y riesgosos (disolventes, inflamables, corrosivos y productos químicos diversos). A este tipo de sustancias se les debe aplicar tratamientos especiales con el fin de evitar daños que contaminen el medio ambiente (Hernández García *et al.*, 2017).

Una forma de la contaminación industrial son los residuos generados por los productos que son eliminados por medio de la atmósfera, el terreno, las aguas subterráneas, las pérdidas de elementos contaminantes que se encuentran almacenados o que son transportados y, por último, los accidentes de tanques y líneas de conducción.

No obstante, el derrame que producen las aguas residuales (daños en los alcantarillados o colectores) se presentan focos contaminantes a partir de actividades industriales o prácticas completamente inapropiadas que llevan a la contaminación de los suelos.

Otra fuente importante son los residuos de productos químicos como los líquidos que se convierten en compuestos tóxicos y peligrosos, ya que son insistentes y crecen en la matriz sólida del acuífero, es decir, que su degradación resulta ser más complicada de lo normal. En otras ocasiones, las aguas con altas concentraciones presentan características térmicas muy particulares o pueden tener concentraciones de sales inocuas (Tenorio Pinedo, 2020).

Existe un modo de eliminación que consiste en apartar todos los desechos encontrados en aguas superficiales e inyectando residuos que son provenientes de los acuíferos salinos y secos, donde su almacenamiento es transitado por medio de balsas o lagunas de evaporación y en excavaciones con un alto riesgo de extensión en dichos terrenos. El riesgo más grande se deriva de la inyección porque si no tiene una supervisión estricta y en una situación adecuada, el derrame que ocasionaría en las excavaciones puede alcanzar niveles freáticos muy altos en la zona del acuífero (Rojas Rodríguez, 2016).

Por otra parte, no es posible caracterizar este tipo de vertidos debido a que no posee una gran variabilidad en sus derrames. Sin embargo, se puede afirmar que las industrias que producen bebidas y alimentos son las empresas que más causan residuos líquidos con una alta demanda biológica de oxígeno en sólidos que se encuentran suspendidos y, a menudo, se encuentran muy elevados por su excesiva concentración de elementos orgánicos que están disueltos y por su alcalinidad (Van Hoof *et al.*, 2018).

Así mismo, otras industrias que provocan vertidos son las que fabrican pesticidas e insecticidas, ya que tienen un alto contenido de materia orgánica como el benceno, sustancias tóxicas y restos de insecticidas y pesticidas, por ejemplo: colorantes, sales de plomo, arsénico, titanio, entre otros.

En cuanto a los vertidos que ocasionan daños en la industria, también se pueden presenciar en los caudales de origen industrial, es decir, los sectores que se dedican a la fabricación de textiles, curtidos, químicos y alimentación que prácticamente están constituidos por más del 50 % (de Bogotá, 2020). Otra consecuencia que se presenta en los acuíferos a partir de los derrames de aguas residuales industriales es el cloruro, los metales pesados, disolventes organohalogenados e hidrocarburos que son los causantes de una alta contaminación en los acuíferos.

En el caso de los hidrocarburos, son muy comunes las fugas por la corrosión creada en los depósitos y por el rompimiento de tuberías. La magnitud representada por las fugas produce una variedad de daños. Estas son provocadas desde los reboses ocasionales que con el tiempo se vuelven constantes y, además, los grandes volúmenes de los vertidos accidentales. Identificar este tipo de compuestos no es sencillo, ya que la comercialización del producto ofrece una mezcla de grandes cantidades de especies que poseen un comportamiento distinto en el medio ambiente (Amaringo *et al.*, 2019).

En los países donde las fugas se presentan con mayor frecuencia por medio de compuestos originarios del petróleo y son una amenaza en proceso para la alta calidad que tienen las aguas subterráneas. La contaminación causada por estos derivados se diferencia de otras contaminaciones porque los productos tienen una densidad menor que el agua, que los hacen invisibles estando en ella. Debido a esto, su movimiento en el acuífero es producida en zonas exclusivas que no se encuentran saturadas ya que si comparamos este comportamiento con el petróleo (o sus derivados), este llega a su equilibrio en el límite superior de la zona que se encuentra saturada (Venegas Marín, 2017).

La situación real del petróleo con sus derivados ligeros como la gasolina comercial que está entre 20-80 mg/l (Martel-Valles *et al.*, 2017), la solubilidad que posee sobrepasa con mucha facilidad los niveles de concentración sobre el agua contaminada y como resultado directo de esta solubilidad es que pueden ser transportados los hidrocarburos solubles a distancias considerables en el acuífero.

Adicionalmente, hay otro inconveniente en este tipo de contaminación, cuando la parte superior del acuífero presenta cambios notorios en el ambiente químico y bioquímico en la zona donde se encuentran ubicados debido a una gran falta de oxigenación.

Principalmente, los residuos sólidos que tienen un alto potencial contaminante en el agua subterránea proceden de la explotación causada por el carbón o los depósitos

metálicos. Existen muchos métodos de explotación minera que permiten que la contaminación en el agua subterránea tenga una alta repercusión no solo durante la explotación, sino que se favorece la permanencia larga de la contaminación en las aguas subterráneas.

En las aguas subterráneas se pueden encontrar actividades que generan compuestos altamente peligrosos, provocados por los derrames intencionales y creando una forma sólida, líquida o semisólida de materiales fabricados en la industria como: la madera, el plástico, la goma, artículos para la piel que son derivados en el área de la minería. Por otra parte, entre las manufacturas están los explosivos, la química inorgánica, textiles, farmacéutica, plaguicidas y adhesivos que crean otro tipo de contaminación en el agua subterránea.

En conclusión, no se deben ignorar los compuestos industriales fabricados por tintorerías, talleres mecánicos, hospitales, fotoprocesado, compañías químicas, empresas de electroplatinado y refinerías de petróleo pues son, entre otros, los que más han producido contaminación en los acuíferos.

6.3.4 Contaminación inducida por bombeo

Las aguas con un alto grado de salinidad pueden entrar en los acuíferos de agua potable (agua dulce) causando su contaminación. Específicos o no, en los acuíferos continentales cualquier tipo de presencia de agua salina (procedentes de los suelos que contienen yeso o de la llegada de flujos de largo recorrido, por ejemplo) pueden generar contaminación (intrusión salina); en los acuíferos ubicados en las costas el contaminante principal es el agua de mar. Este caso se le conoce como intrusión marina.

La fusión de agua marina con el agua subterránea que se presenta en los acuíferos costeros genera una de las contaminaciones más frecuentes en estos lugares y a su vez es difícil de controlar. Por otro lado, aunque la intrusión salina es un problema de cierta dificultad en algunas zonas del interior, la intrusión marina tanto por la cantidad de veces que sucede como por los lugares donde suele suceder (zonas elevadas con mucha población, baja precipitación, lugares donde suele tener un alto índice de turismo, mayor presencia de la industria y producción agrícola y hay escasez cuando por falta de aguas superficiales permanentes) esto genera un problema de graves consecuencias. En los acuíferos costeros estando en condiciones naturales el agua marina (mucho más densa) suele irse hacia el fondo del agua quedando por debajo del agua dulce (mucho menos densa) y se crea una curia de agua salada que se va directo bajo tierra, por debajo del agua dulce. Entre esta y la parte superior de la cuña de agua salada se desarrolla una “interfase” de agua salobre.

La interfase se moviliza debido a que actúa como respuesta a las variaciones en el campo de presión de cada sistema. Cuando se establece el equilibrio, el agua del mar suele ser muy estática mientras que el agua dulce tiende a ir hacia el mar.

La introducción de la cuña instruida, respaldada sobre el acuífero, cambia inversamente a como se da la magnitud de flujo del agua potable hacia el mar y directamente proporcional con el espesor del acuífero. El proceso de la intrusión marina casi siempre se debe a algo específico –como las actividades que realizamos los humanos–, un ejemplo es el bombeo en exceso (Vargas Mora y Ramírez Martínez, s.f.).

Si un bombeo es muy frecuente, el flujo de agua que se dirige hacia el mar disminuye en gran medida. Esto genera que el avance de cuña tierra adentro sea mucho más demorado y lento. Si el flujo de agua potable que va hacia el mar se detiene, el agua salada intentará llenar todo el acuífero hasta el nivel del mar.

Si el bombeo continúa de manera prolongada, pero todavía hay cierto flujo de agua dulce que se dirige hacia el mar, se puede generar un abombamiento de la interfase (domo salino) y se podrá ver claramente el agua salada que se encuentra en el pozo de bombeo.

La contaminación por intrusión marina sucede en lugares particulares como las zonas costeras que son planas donde se pueden construir canales de drenaje que hacen la función de bajar el nivel freático para que disminuya el flujo de agua potable que se dirige hacia el mar y, por otro lado, permite una infiltración hacia el acuífero del agua de mar que va por ellos tierra adentro especialmente en situaciones de marea alta.

6.4 Principales contaminantes en las aguas subterráneas

Un problema ambiental es la contaminación de aguas subterráneas. Este afecta la supervivencia humana y se genera por la presencia de sustancias que se incorporan a los acuíferos y afectan las propiedades químicas del agua provocando que disminuya su calidad. Esta afectación es muy importante porque las aguas subterráneas son una fuente fundamental para el suministro de agua.

Figura 19. Agua subterránea contaminada

Fuente: Díaz (2021).

Por lo anterior, una causa principal de la contaminación en las fuentes de abastecimiento somos los humanos. La mayoría de los contaminantes se incorporan en los acuíferos por el proceso de infiltración, por tanto, es clave conocer cuáles son los principales contaminantes.

Se debe contar entre ellos a las distintas industrias; la agricultura que emplea sustancias como pesticidas, fertilizantes; la urbanización y su desarrollo, los sistemas sépticos y en caso de fallas técnicas, el enterramiento de basura y residuos; la construcción inadecuada, y la inyección de aguas grises son los principales causantes en la contaminación de las aguas subterráneas que han logrado la disminución de su calidad y una menor presencia.

6.4.1 Contaminantes químicos

La cantidad recomendada para el consumo humano es de 2g al día, ya que esta no crea consecuencias graves, mas la presencia de estos iones en ciertas concentraciones crea inconvenientes en el sabor que puede generar efectos fisiológicos, produciendo un sabor salado, que a pesar de no ser muy peligroso su consumo, el hacerlo constantemente sí puede generar efectos graves como la deshidratación, lo que conllevaría a la muerte (Galván, 2019).

El amonio (NH_4^+), nitrito (NH_2^-) y nitrato (NH_3^-), son los tres iones que se encuentran con mayor frecuencia en las aguas subterráneas, siendo los dos primeros lo más

inestables y eso se llegan a oxidar y convertirse en nitrato. Las cantidades excesivas del ion nitrato (NH_3^-), y su uso constante como en la preparación de biberones puede generar en los niños lactantes la metahemoglobinemia, un trastorno en la sangre por el cual no se puede reutilizar la hemoglobina, debido a la reducción de nitratos a nitritos efecto que crea la incapacidad del transporte de oxígeno.

La presencia de estos tres iones es un indicador de contaminación en el agua y cuando esto supone que proceden de la descomposición de materia orgánica, acompañada de microorganismos patógenos. Así mismo, la presencia de NH_4^+ y NO_2^- en las aguas subterráneas se puede dar por la presencia de materia orgánica, la cual generalmente se recoge por aguas de infiltración.

La presencia de este ion NO_3^- y sus elevados valores se han vuelto cada vez más preocupantes, debido a los efectos por su aparición en las aguas subterráneas y en la medida en que estas se han elevado en el número de captaciones utilizadas en el abastecimiento.

La materia orgánica biodegradable se puede descomponer de distintas maneras dependiendo del oxígeno que haya en el agua. Como la aeróbica que produce anhídrido agua, anhídrido carbónico, sulfatos, nitratos, entre otros, y la anaeróbica que produce metano, amonio, sulfuro de hidrógeno (SH_2), entre otros. Estos últimos producen olores repulsivos que se pueden dar cuando se encuentran próximos a alcantarillados con fugas.

En resumen, las posibles causas de la presencia de la materia orgánica en las aguas utilizadas para el abastecimiento es la presencia de olores, agentes patógenos que se nutren de ella, además de sustancias orgánicas no biodegradables que podrían causar enfermedades; sin embargo, hasta el día de hoy no se tiene información completa sobre ellas y por eso es importante su evaluación y desinfección.

Los metales pesados son otros elementos que pueden estar en las aguas subterráneas y que producen contaminación cuando se encuentran en niveles elevados. Estos son:

- » Al
- » C
- » Zn
- » Pb
- » Se
- » As
- » Cr
- » Fe
- » Mn

El Fe y el Mn presentes en el agua subterránea son indicadores de reducción en el acuífero, pero aun cuando se encuentren en niveles elevados no constituye problema en la salud debido a que el agua que tiene altos niveles tóxicos no es tolerable debido al sabor. Lo mismo ocurre con el Al y el Cu, pues con elevados valores poseen un sabor desagradable.

En otro caso, el plomo es peligroso cuando se encuentra en elevados niveles establecidos por las normas técnicas de regulación (RTS), ya que puede provocar enfermedades como la anemia, parálisis musculares, dolores abdominales, entre otros. Así mismo sucede con el Cr, un elemento muy tóxico y generalmente está presente en las áreas industriales. La mayoría de estos elementos son generados por vertidos industriales.

Otros contaminantes son las pesticidas que, aunque no son peligrosos en bajas concentraciones, aun así son indicadores de contaminación y se han vuelto motivo de investigación debido a la trascendencia de sus propiedades, como volverse nocivos por acumulación, la toxicidad que poseen, entre otros.

Tabla 3. Riesgos sanitarios asociados con algunos contaminantes inorgánicos en aguas de abastecimiento

Contaminante	Toxicidad para un individuo de 80 kg	Otros efectos
Arsénico	Dosis letal – 130 mg. Acumulativo	Posible cancerígeno en concentraciones menores
Bario	Dosis letal – 600 mg. Acumulativo	-
DBO	-	Alto DBO. Agua sin oxígeno. Olores por H ₂ S
Boro	Dosis letal - 5-20 g.	Náuseas y calambres intestinales en dosis menores
Calcio	-	Posibles cálculos biliares en elevadas concentraciones. No acumulativo
Cadmio	Dosis letal -9 g.	Acumulativo en hígado, riñón y páncreas.
Cloruros	-	Umbral de sabor 400 mg/l vómitos por altas dosis. Perjudicial en enfermedades del corazón
Cromo	Dosis letal -0,5 g.	Efectos corrosivos en el intestino. Posible cancerígeno
Cobre	-	Elemento esencial para la hemoglobina. Vómitos por elevadas concentraciones. No acumulativo
Fenoles clorados	-	Sabor desagradable en 0,001 mg/l
Cianuro	Dosis letal -50 mg.	-

Contaminante	Toxicidad para un individuo de 80 kg	Otros efectos
Hierro	-	Sabor desagradable en concentración mayor de 0,1 mg/l
Plomo	Veneno acumulativo	Sabor desagradable. Posiblemente relacionado con encefalitis en elevadas concentraciones
Magnesio	-	Sabor desagradable. Posiblemente relacionado con encefalitis en elevadas concentraciones

Fuente: Porras Martín *et al.* (1985).

6.4.2 Contaminantes biológicos

El problema principal de este tipo de contaminación es la posible propagación de enfermedades causadas por la presencia de materias fecales humanas o de origen animal, contaminación que ha sido difícil de resolver, pues resulta imposible controlar cada organismo patógeno presente en las aguas que son dirigidas al consumo humano.

Figura 20. Contaminación biológica de aguas subterráneas



Fuente: AGA (2012).

Por esta razón, se ha realizado el proceso para determinar el contenido del fluido de algunos grupos característicos de las aguas fecales con el objetivo de conseguir un margen de la presencia de los otros organismos asociados. Algunos de los agentes patógenos que hay en las aguas subterráneas están en la Tabla 4.

Tabla 4. Principales agentes de contaminación microbiológica del agua

Grupo	Agente	Enfermedad
Virus	Virus A de la hepatitis epidérmica coxsackia	Hepatitis epidérmica afecciones gastrointestinales
	Adenovirus	Conjuntivitis en las piscinas
Bacterias	<i>Salmonella typhi</i>	Fiebre tifoidea
	<i>Salmonella paratyphi</i>	Fiebres de paratíficas
	<i>Shigella disenteriae</i>	Disentería bacilar
	<i>Vibrio cholerae</i>	Cólera

Fuente: Porras Martín *et al.* (1985).

A pesar del peligro por la presencia de estos organismos en las aguas y su afectación en la salud humana, los mecanismos de autodepuración de los acuíferos y principalmente del suelo, han cumplido un gran papel en su eliminación.

Se basan fundamentalmente en la filtración y adsorción de bacterias. Para un mejor funcionamiento se debe tener en cuenta el tamaño de los organismos, la superficie de distancia que pueden recorrer y las condiciones a las que son expuestos. Con el fin de mantener la mayor seguridad se debe realizar un dote de perímetros.

6.4.3 Contaminantes radioactivos

Aunque no es muy frecuente la presencia de sustancias radioactivas en las aguas subterráneas, el riesgo de contaminación no es despreciable. Este tipo de contaminación es uno de los mayores retos planteados para la sociedad, debido al cuidado requerido para su eliminación y las consecuencias que tendría si esto no se realiza eficientemente.

Figura 21. Contaminantes radioactivos

Fuente: tomado de <https://www.freepik.es>

El ^3H ; ^{90}Sr ; ^{291}I ; ^{37}Cs ; ^{239}Pu ; ^{226}Ra son los seis radionucleidos que se encuentran en las aguas subterráneas y de los seis, cinco se presentan por la mala manipulación en los residuos radiactivos, por lo tanto, es importante conocer las características y su impacto en la salud, propiedades que se exponen en la Tabla 5.

Tabla 5. Propiedades y efectos de algunos radionucleidos sobre la salud

Radionucleido	Período radioactivo en años	Radiación principal	Órgano crítico	Período biológico	Concentraciones máximas permitidas
^3H	12,26	Beta	Todo el cuerpo	12 días	3×10^{-3}
^{90}Sr	28,1	Beta	Huesos	50 años	3×10^{-6}
^{120}I	$1,7 \times 10^7$	Beta, gamma	Tiroides	138 años	6×10^{-8}
^{137}Cs	30,2	Beta, gamma	Todo el cuerpo	70 días	2×10^{-3}
^{226}Ra	1,6	Alfa, gamma	Huesos	45 años	3×10^{-8}
^{239}Pu	24,4	Alfa	Huesos	200 años	5×10^{-6}

Fuente: Porras Martín *et al.* (1985).

6.5 Procesos de transporte y atenuación de contaminantes

Las aguas subterráneas normalmente mantienen un flujo subterráneo desde la zona de inducción del agua hasta la zona de descarga. Este flujo de agua se puede afectar por contaminantes que entran en el agua subterránea y son arrastrados y transportados en toda la zona donde fluye el agua.

El agua se infiltra por la superficie terrestre debido a las actividades humanas o aguas lluvias, pero al mismo tiempo, esto da paso a la inducción de agentes contaminantes los cuales afectan proporcionalmente la permeabilidad del acuífero y el gradiente hidráulico. La descarga de todas las aguas subterráneas se realiza en los ríos, mares, manantiales y pozos.

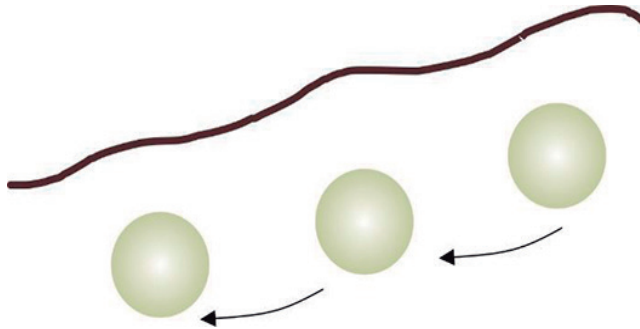
Cuando los contaminantes tienen interacción con el agua subterránea es posible llevar a cabo una serie de procesos de transporte y autodepuración que buscan reducir los efectos contaminantes sobre los acuíferos. Estos procesos se efectúan en diferentes etapas, y varían de acuerdo con el tipo de contaminante, entre ellos, los más comunes son:

6.5.1 Procesos físicos

Los principales procesos físicos que apalancan el proceso de contaminación del agua subterránea son:

- » **Advección:** este proceso se basa en la conducción del producto contaminante en el agua. Este arrastre de la sustancia a través del agua no es uniforme o constante puesto que, como se mencionó anteriormente, la introducción de sustancias tóxicas o contaminantes en el agua subterránea atraviesa por varios procesos los cuales varían la velocidad y la extensión del contaminante en el agua.

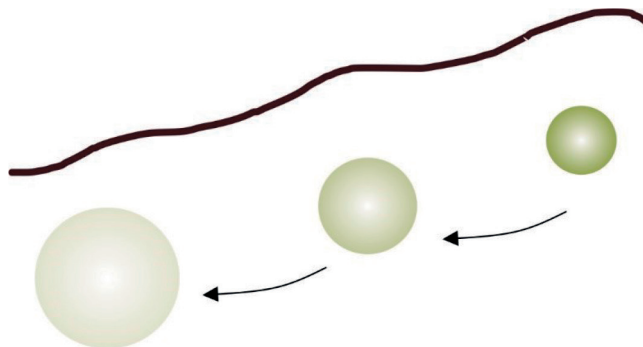
Figura 22. Advección



Fuente: elaboración propia.

- » **Difusión:** la difusión de una sustancia contaminante en el agua se lleva a cabo cuando las moléculas de la sustancia se agitan y tienden a moverse desde los puntos con mayor concentración hacia los puntos de menor concentración, es decir, la sustancia se expande de modo que alcanza a contaminar otras zonas que tenían una baja presencia.

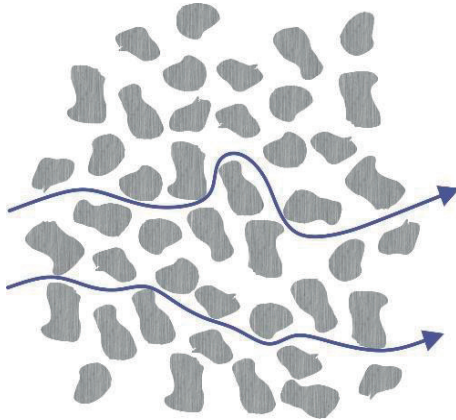
Figura 23. Difusión



Fuente: elaboración propia.

- » **Dispersión:** el proceso de dispersión de una sustancia en el agua se lleva a cabo cuando esta se esparce a través del todo el cuerpo hídrico. La dispersión puede desarrollarse de dos maneras diferentes:
 - **Dispersión mecánica longitudinal:** se efectúa cuando la sustancia fluye a través de un material poroso en el sentido del flujo del agua.

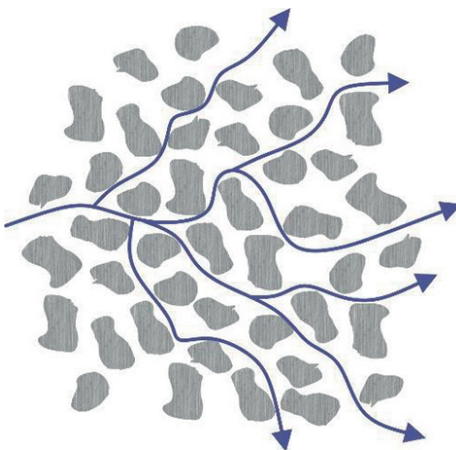
Figura 24. Dispersión mecánica longitudinal



Fuente: elaboración propia.

- **Dispersión mecánica transversal:** es propio de un flujo lateral, es decir, el contaminante se esparce de manera que cruza o atraviesa el sentido del flujo hídrico.

Figura 25. Dispersión mecánica transversal



Fuente: elaboración propia.

- **Filtración:** este proceso elimina superficialmente todos los contaminantes sólidos que se encuentran parcialmente suspendidos en el agua, sin embargo, muchas veces no es tan efectivo en condiciones inorgánicas.
- **Tráfico de sustancias gaseosas:** la circulación de gases ayuda a descomponer y disminuir la concentración de la sustancia contaminante y se efectúa mejor en condiciones orgánicas.

6.5.2 Procesos geoquímicos

Los principales procesos geoquímicos que apalancan el proceso de contaminación del agua son:

- » **Formación de complejos y fuerza iónica:** los pares iónicos surgen de la combinación entre iones con varias valencias (polivalentes), lo que produce una fuerza ionizante debido a los guiones que hay en la sustancia. La presencia de estas cantidades disueltas genera limitación en los procesos de oxidación y precipitación.
- » **Oxidación:** existen ciertas cantidades de sustancias y elementos que pueden presentar varios estados de oxidación sin alterar su movilidad, en este caso, el pH es uno de los factores potenciales que pueden afectar la movilidad de un elemento. Los suelos que tienen zonas con mayor cantidad de acuíferos que no poseen propiedades saturadas tienden a mantener condiciones oxidantes significativamente reductoras.
- » **Precipitación:** un elemento o constituyente puede precipitarse estando en una solución si cuenta con una cantidad suficiente. Todos los constituyentes pueden realizar una reacción de precipitación-disolución, pero por falta de cantidad no logran hacerlo.
- » **Neutralización:** cuando el pH de las aguas subterráneas es bajo estas tienden a ser más solubles y a tener mejor movilidad. En caso de que el pH oscile entre 6 y 9, este se vuelve relevante en cuestión de neutralización, pero sí la sustancia es muy ácida o alcalina, entonces, se debe neutralizar para mantener las propiedades del fluido.
- » **Absorción-desorción:** uno de los procesos más eficaces para reducir las sustancias contaminantes presentes en el agua, es la reducción iónica que tiene la finalidad de mantener temporalmente los cationes y aniones en superficies con propiedades arcillosas. Si el pH aumenta, la cantidad de cationes también lo hará proporcionalmente, de modo que, estos elementos absorbidos pueden regresar a la solución una vez los cuerpos hídricos vuelven a mezclarse con el cuerpo absorbente.

6.5.3. Procesos bioquímicos

- » Degradación biológica y absorción: la reducción biológica de sustancias contaminantes en las aguas subterráneas puede llevarse a cabo por medio de actividades biológicas. Entre ellas se encuentra la degradación que consta de la reducción de la materia organizada por procesos de asimilación y absorción.
- » Síntesis celular: el crecimiento de organismos se debe a la presencia de elementos que hacen posible la creación de condiciones óptimas para su desarrollo y reproducción. Los más relevantes son el nitrógeno, carbono y fósforo, de manera que es necesario retirarlos en su movimiento y transporte para garantizar la calidad del agua en los procesos bioquímicos (EPA, 1998).

CAPÍTULO 7

PROBLEMAS AMBIENTALES Y ECONÓMICOS RELACIONADOS CON LA UTILIZACIÓN INTENSIVA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El papel que cumple el agua subterránea en la naturaleza y para los seres humanos es muy importante ya que cubre servicios que nacen de su manifestación en humedales, ríos y áreas freáticas (Younger, 2007; Custodio, 2001, 2005b). Así mismo, es importante porque cubre las necesidades de los seres humanos de manera segura y económica en el contexto urbano e industrial. Este recurso hídrico es considerado un limitado y delicado, por tanto, debe ser gestionado de forma inteligente a través de la observación de los efectos de la explotación de un acuífero.

En un acuífero profundo, el efecto tarda en ser notorio, pueden ser décadas, debido a la inactividad que generan grandes volúmenes de agua. Para la explotación de forma inteligente, es necesario hacer un control de calidad de los niveles, la calidad química y el flujo del agua subterránea (Llamas y Martínez-Santos, 2005). El bombeo que generan los acuíferos reduce su nivel de agua y en los ríos hasta donde llegan sus descargas. De esta manera, se logra el equilibrio en un cierto tiempo cuando el bombeo es continuo.

Este efecto aparece con un poco de atraso y va aumentando conforme el tamaño del acuífero es mayor. Al extraer grandes volúmenes de agua subterránea, esta se puede aprovechar de mejor manera a nivel social, pero puede cambiar el ciclo hidrológico al reducir el nivel de agua y ya no transportará la misma cantidad de agua a los ríos o manantiales y se reducirá la evaporación en lugares que tienen el nivel freático cerca de la superficie del terreno.

El descenso de niveles puede producir el deterioro de la calidad del agua del acuífero por intrusión de agua del mar, o por la entrada de aguas subterráneas salinas o de calidad química deficiente. En muchos casos, en que la declinación del nivel ha sido significativa, se han generado subsidencias en el terreno de más de nueve metros, dejando como consecuencia daños en las estructuras lineales de los edificios o canales.

Para darle un uso adecuado al acuífero, se deben conocer sus propiedades físicas, su forma de recarga y descarga, y cómo es la respuesta de los niveles y la contribución subterránea del acuífero a los ríos por el bombeo.

Una recomendación es hacer una buena dirección de la red de observación a las características de cada tipo de acuífero y relacionarlo con la explotación que reciben. Esta red debe dar información sobre el nivel y la condición química del agua de las cuencas hídricas que están relacionadas con el acuífero. Estos modelos deben ser renovados cada vez que se generan desviaciones en los resultados al realizar la simulación, ya sea al inicio o cuando se amplifique el conocimiento hidrológico del acuífero.

Otro punto por analizar es la evaluación de las ventajas y desventajas de las múltiples alternativas para proporcionar agua y medidas para hacer las correcciones necesarias, pero sin aplazar para elegir otra cuenca hídrica que puede ser menos eficiente y más costosa.

Al desarrollar de manera incontrolada las aguas subterráneas se genera un alto costo que se debe considerar al valorar aspectos ambientales y económicos. Para reducir este impacto económico, se necesita del apoyo de entidades que hagan un seguimiento del comportamiento del acuífero y de la calidad del agua.

Acciones como el drenaje y la salinización del suelo y del agua generados por el riego con aguas superficiales generan efectos ambientales y económicos que están directamente relacionados con el uso excesivo. Esto es muy común en territorios áridos como Egipto, India, México y California. Estos problemas se han podido eliminar mediante la explotación de agua subterránea para así reducir el nivel freático (Sahuquillo y Lluria, 2003).

Un inconveniente que no permite la sostenibilidad de un acuífero es la mala calidad del agua. El problema más conocido y por el que más se ha trabajado es por el uso de fertilizantes y los agroquímicos que son aplicados en los cultivos. Otra causa posible es la explotación del ganado de manera extensiva o también los problemas por herbicidas en las vías de comunicación. Por ejemplo, el valor máximo permitido de un nitrato en el agua es de 50 mg/l en una superficie extensa.

CAPÍTULO 8

BOMBEO Y TRATAMIENTO

Todas las aguas subterráneas afrontan una gran problemática de contaminación, debido a que no están a la vista pasan desapercibidas y no se tienen en cuenta para realizarles un análisis y evaluación de las aguas que se encuentran en un ecosistema.

Las aguas que se encuentran bajo la superficie terrestre representan la mayor reserva de agua dulce sobre la faz de la Tierra, estas abarcan poco más del 95 % del total de las aguas disponibles para consumo humano. Además, su presencia en los ecosistemas es esencial para mantener un equilibrio ecológico en los lagos, ríos, humedales y manantiales (Cerón *et al.*, 2021b).

De esta manera, la presencia de metales pesados y sustancias contaminantes en los acuíferos es una problemática que se debe atender en el menor tiempo posible. La solución más práctica son los sistemas de bombeo y tratamiento de aguas subterráneas, los cuales representan una forma viable de mantener la integridad de los ambientes naturales, de modo que estos proporcionan limpieza de cualquier impureza que pueda llegar a alterar las características básicas de las aguas.

Ahora bien, el bombeo y tratamientos es un sistema que ha sido aplicado por diversidad de países en búsqueda de ecosistemas sostenibles, a los cuales se les pueda dar un aprovechamiento medurado, responsable y productivo; sin embargo, este ha sido puesto en tela de juicio por razones que abordaremos más adelante.

Los sistemas de bombeo y tratamiento se dividen en dos clases:

- » Sistemas de bombeo convencional
- » Sistemas de bombeo mejorado.

8.1 Sistemas de bombeo convencional

El objetivo principal del bombeo y tratamiento de agua convencional es remover y frenar cualquier tipo de contaminación que altere las propiedades de los acuíferos. Este sistema consiste en extraer las aguas contaminadas por medio de pozos ubicados estratégicamente y, posterior a ello, realizar un tratamiento de limpieza y depuración por medio de plantas de tratamiento en la superficie terrestre. Después de eliminar los contaminantes presentes en las aguas, estas son reintegradas al subsuelo por medio de un proceso de inyección.

En el diseño de un sistema de bombeo y tratamiento de aguas subterráneas es importante considerar el objetivo inicial del sistema; si este tiene como finalidad recuperar las condiciones de equilibrio y restaurar la integridad del subsuelo donde se encuentra el acuífero se deben desarrollar estrategias de bombeo que permitan realizar un tratamiento y adecuación del ecosistema para no crear un efecto adverso.

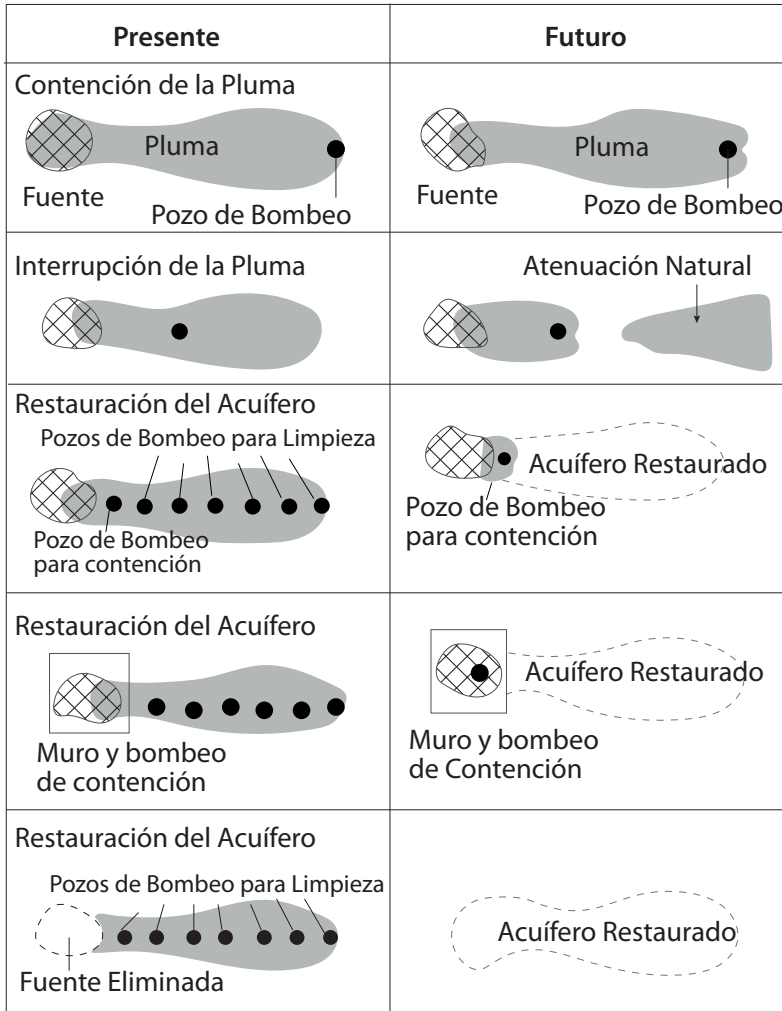
Por otra parte, si el objetivo del sistema de bombeo y tratamiento es la contención de un área contaminada para evitar futura expansión en todo el subsuelo y reducir el impacto ecológico, se deben implementar estrategias que eviten la agravación de las condiciones ecológicas en el caudal del agua y en la zona donde se concentran las sustancias contaminantes que se quieren contener.

En muchos casos, los sistemas de bombeo, según su finalidad, pueden ser mixtos, es decir, la combinación entre sistemas de bombeo que restauren los acuíferos y mantengan la contaminación concentrada en una determinada zona.

Cabe aclarar que la diferencia más significativa entre estos dos tipos de sistemas se encuentra en el diseño e implementación, debido a que si se procura remediar el cuerpo hídrico, es necesario trasladar la fuente de contaminación a través del bombeo de caudales, mientras que, si se desea mantener la zona de concentración contaminada no es necesario el bombeo de altos caudales sino que se bombean caudales pequeños de agua pero constantes, de modo que se evita el flujo de estas sustancias en el sentido que fluye el acuífero.

La Figura 26 muestra estrategias de bombeo y tratamiento en acuíferos con una proyección futura si el objetivo del sistema se logra. En este caso, es importante definir la “pluma” como la concentración de sustancias contaminantes en determinada zona, las cuales pueden aumentar (expandirse), mantenerse estables (mantenerse) o contraerse (reducción de la zona afectada).

Figura 26. Estrategias de bombeo y tratamiento



Fuente: EPA (1998).

La eficacia del bombeo está relacionada directamente con dos factores: el tipo de sustancias contaminantes y las propiedades hidrogeológicas del acuífero.

Las propiedades hidrogeológicas que impiden la puesta en marcha de manera eficaz del bombeo son dos: la presencia de rocas fracturadas y la heterogeneidad del acuífero.

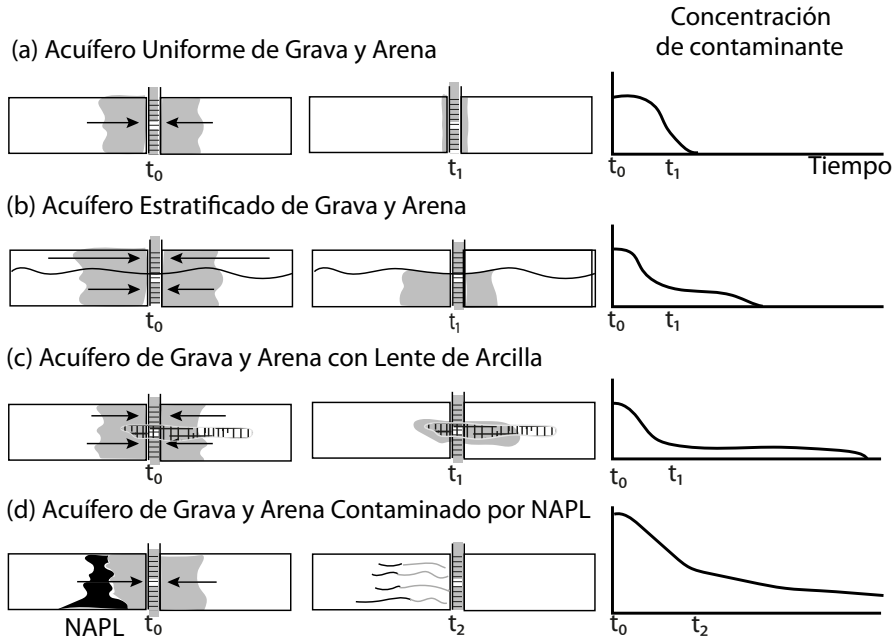
Un cuerpo hídrico se define heterogéneo cuando su capacidad de transportar agua varía en diferentes sentidos, es decir, el agua puede fluir lateralmente, verticalmente, o en ambos sentidos. Así mismo, las sustancias contaminantes se desplazan con

mayor frecuencia en zonas de alta permeabilidad, esto debido a que en terrenos permeables los contaminantes pueden fluir con mayor facilidad a través de los poros del terreno a velocidades superiores que las que se presentan en promedio en el acuífero.

De esta manera, el agua contaminada se desvía hacia las zonas con mayor conductividad por sus propiedades porosas, mientras que por el proceso de difusión se desplaza hacia zonas de menor permeabilidad, después de que el agua queda libre de cualquier sustancia contaminante. Por su parte, los contaminantes realizan el proceso inverso y se movilizan hacia zonas de baja permeabilidad donde se encuentran con el agua limpia, este ciclo se repite constantemente lo que genera que las zonas poco permeables se conviertan en foco de contaminación difícil de depurar.

Así mismo, bajo la superficie se encuentran gran cantidad de rocas fracturadas que por sus propiedades sirven como almacenamiento de contaminantes a gran escala, es decir, en sus poros y fracturas guardan contaminantes que por medio del bombeo son difíciles de extraer.

Es de anotar que, bajo la superficie terrestre se encuentran contaminantes con propiedades de precipitación o absorción, es decir, estos elementos se desplazan hacia la parte inferior del acuífero y en el momento del bombeo su extracción es casi imposible, por esta razón, no se pueden retirar en su totalidad y luego del proceso para mantener el equilibrio químico en el agua, estos ascienden y contaminan nuevamente el cuerpo hídrico, de manera que la eficacia del proceso de bombeo y tratamiento no es la óptima. En respuesta a este fenómeno, se han desarrollado tecnologías que combinan el bombeo y el tratamiento de aguas para combatir este tipo de fenómenos que obstaculizan y afectan la implementación adecuada del sistema.

Figura 27. Influencia de diferentes factores en la eficiencia del sistema

Fuente: EPA (1998).

En la Figura 27 se observan los resultados de hacer bombeo y tratamiento de aguas a diferentes tipos de acuíferos.

- Esta gráfica presenta los resultados de implementar el sistema en un acuífero en condiciones ideales, es decir, alta permeabilidad y uniformidad con presencia de sustancias contaminantes disueltas.
- En esta sección se observa lo que sucede cuando hay presencia de diferentes estratos en el acuífero, es decir, no hay uniformidad y por tanto hay presencia de conductividades variadas, reconociendo la conductividad inferior como menor comparada con la capacidad de depuración en la superior.
- Cuando hay presencia de suelos altamente porosos e impermeables como la arcilla, la limpieza del acuífero es más lenta.
- Los contaminantes que no se encuentran en condiciones totalmente acuosas representan una fuente de contaminación a largo plazo, en este caso, se evidencia la presencia de un líquido en su fase no acuosa, y por esto, toma más tiempo en disolverse y se obstaculiza el proceso de bombeo y tratamiento.

Como se explicó anteriormente, el bombeo es un sistema que debe combatir la existencia de condiciones desfavorables para un funcionamiento correcto, más aún existen dos fenómenos de suma importancia en el análisis de la implementación del sistema, estos son: el rebote y la cola.

El rebote se presenta cuando se detiene el proceso de bombeo, de manera que la concentración de contaminantes aumenta por causa de la difusión, disolución y desorción, lo que produce un efecto contrario al deseado. Por otro lado, la cola es el efecto obtenido cuando el sistema está en funcionamiento que se caracteriza por la disminución de la tasa de eliminación de contaminantes presentes en el agua, es decir, se mantiene relativamente constante, así que, sigue descontaminando la zona, pero el porcentaje de limpieza es muy bajo.

De esta manera, se puede afirmar que para que el sistema realice una limpieza óptima es recomendable efectuar el bombeo lo antes posible, en situaciones en que se contaminen las aguas subterráneas, puesto que entre más rápido se actúe, mayores serán las probabilidades de realizar una limpieza eficaz al acuífero, evitando que las sustancias contaminantes se disuelvan en zonas lejanas y con propiedades poco permeables, ya que las zonas poco permeables se consideran como fuentes potenciales de contaminación.

El bombeo y tratamiento de aguas subterráneas es un sistema que ha sido fuertemente cuestionado debido a que en muchas zonas resulta muy complejo e, incluso, es imposible lograr la limpieza de los acuíferos en tiempos razonables; muchas veces, estos tiempos pueden durar décadas, lo que no resulta muy viable.

Por otro lado, el hecho de ser un proceso lento a lo largo de los años, esto se traduce a altos costos. El mantenimiento del sistema y los costos de operación resultan poco atractivos como método de limpieza del agua potable según la relación costo-beneficio.

No obstante, existen estrategias para aumentar la eficacia del sistema; el bombeo y tratamiento de aguas subterráneas se puede combinar e implementar con sistemas de remediación que adaptan medidas para obtener mayor productividad que reducen los costos y el tiempo de operación necesario para obtener resultados considerables. A esto se le conoce como bombeo y tratamiento mejorado.

8.2 Bombeo y tratamiento mejorado

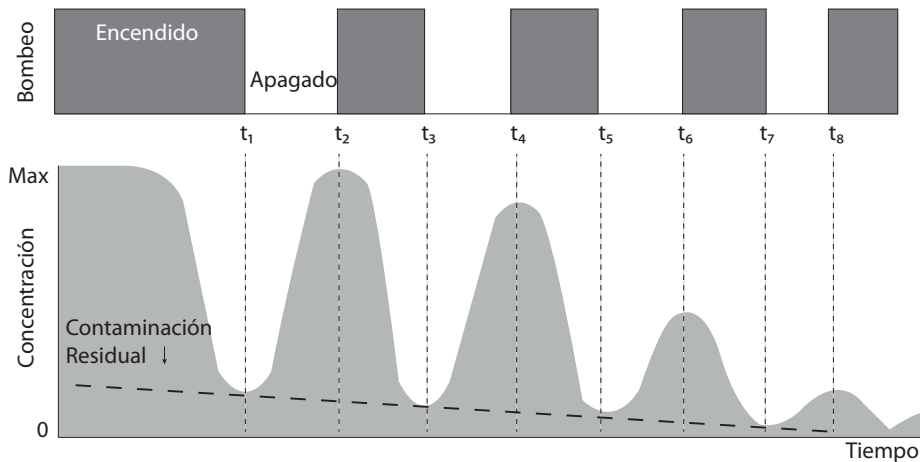
Con el fin de aumentar la eficacia de los sistemas de bombeo y tratamiento como sistemas de remediación, se han implementado mecanismos que mejoran su aplicabilidad en los acuíferos. La estrategia más utilizada es el *bombeo pulsado*, que se basa en bombear las aguas subterráneas por intervalos de tiempo intermitentes, es decir, se alternan los intervalos de bombeo con periodos de descanso.

Esta estrategia permite extraer con mayor facilidad los contaminantes presentes en el agua porque en el proceso de bombeo las concentraciones de contaminantes disminuyen por la tendencia a precipitarse y/o absorberse en el suelo debido a su poca homogeneidad, por esta razón, no se logra extraer la totalidad de los contaminantes a través del bombeo.

Cuando el bombeo se detiene por intervalos cortos de tiempo, estos contaminantes vuelven a aumentar su concentración en las aguas limpias que se encuentran mayormente alejadas, en este instante se debe reanudar el proceso de bombeo para lograr extraer estas sustancias que no se pudieron depurar, y así extraer una mayor cantidad de contaminantes.

La Figura 28 ilustra el concepto del bombeo pulsado. Se observa que cada vez que el sistema se apaga presenta bajas concentraciones de contaminantes, pero una vez se enciende de nuevo, las concentraciones aumentan y se extraen mayores concentraciones de contaminantes que en al final de la etapa anterior. Este proceso permanece constante hasta lograr una limpieza y remediación óptima del acuífero.

Figura 28. Conceptualización del bombeo pulsado



Fuente: EPA (1998).

Variedad de estudios realizados después de este hallazgo afirman que el bombeo pulsado sería una solución viable y sostenible para mejorar la eficacia del bombeo y tratamiento de aguas subterráneas. Dentro de las afirmaciones más contundentes e importantes se encuentran las siguientes:

- » Si ponemos a prueba el bombeo pulsado y el bombeo continuo con el mismo caudal de agua, el bombeo pulsado tardará más tiempo en limpiar el acuífero de las sustancias contaminantes, sin embargo, el tiempo de

bombeo neto será menor comparado con el tiempo requerido en el bombeo continuo.

- » Para volúmenes de agua iguales, el bombeo continuo logra extraer mayor cantidad de masa contaminante.
- » Si el periodo de descanso se extiende mucho, el bombeo pulsado no logrará extraer mayor cantidad de contaminante que el bombeo continuo, esto se debe a que los procesos de difusión y dilución producen una disminución de la concentración del contaminante en relación con el tiempo.

En conclusión, los sistemas de bombeos pulsados son eficaces en aspectos de tiempo y economía, ya que se reducen los tiempos de operación y los costos de mantenimiento. Sin embargo, antes de implementarlos deben realizarse estudios previos para evitar fugas de contaminantes durante los periodos de descanso (Porras Martín *et al.*, 1985).

8.3 Otras alternativas de limpieza para los acuíferos

Así como los sistemas de bombeo, existen otros sistemas que permiten realizar limpieza de acuíferos, que son los siguientes.

8.3.1 Biorremediación in situ

Como es conocido, bajo la superficie terrestre hay presencia de microorganismos que se alimentan de materia orgánica para realizar sus procesos vitales, y dentro de esta materia orgánica se encuentran los contaminantes presentes en las aguas subterráneas, de modo que los microorganismos como bacterias, hongos y protozoos pueden llegar a ser un recurso aprovechable para el tratamiento de los acuíferos.

La presencia de microorganismos en el subsuelo depende de la cantidad de carbono orgánico existente en la zona, esto es porque el carbono es un elemento fundamental para el desarrollo y reproducción de estos microorganismos.

La biorremediación es un proceso que se fundamenta en dos tipos de bacterias: las aeróbicas y anaeróbicas.

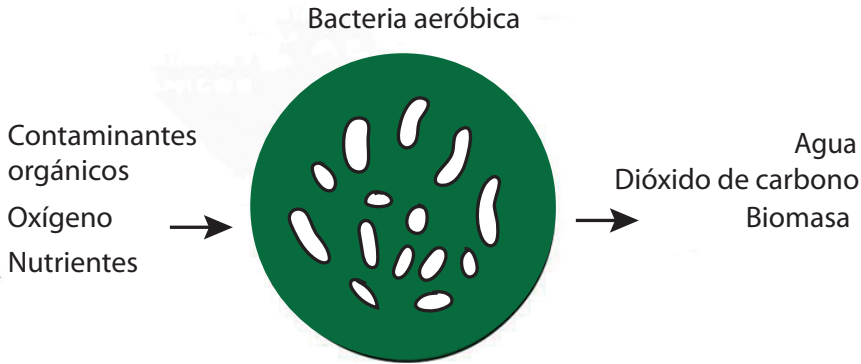
- » Bacterias aeróbicas: estas requieren la presencia de oxígeno para respirar y desarrollarse, de manera que sin este elemento la degradación de contaminantes no se podría llevar a cabo.

En primer lugar, la materia orgánica es oxidada mientras el oxígeno disminuye hasta formar dióxido de carbono, entonces, además de

producir dióxido de carbono también se produce energía para los microorganismos, los cuales desarrollan nuevas células para sí mismos.

Aparte de ello, las bacterias aeróbicas no solo requieren de oxígeno para sus procesos vitales, sino también de los nutrientes necesarios para la síntesis de nuevas células tales como el nitrógeno y el fósforo.

Figura 29. Degradación aeróbica



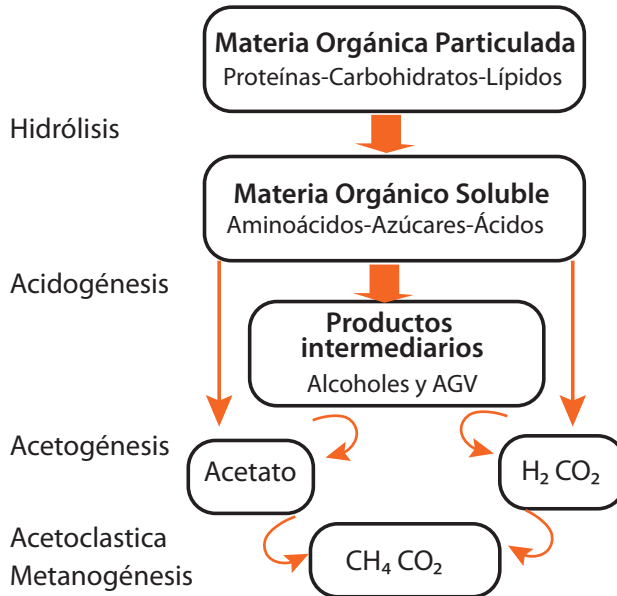
Fuente: elaboración propia.

- » Bacterias anaeróbicas: este tipo de microorganismos no requiere del oxígeno como un elemento necesario para sus procesos vitales, y utilizan otras sustancias para la degradación de la materia orgánica y la producción de energía.

La degradación anaeróbica se divide en las siguientes fases:

- Hidrólisis: en esta etapa los microorganismos excretan enzimas celulares que rompen las moléculas catenarias para convertirlas en moléculas asimilables para los microorganismos.
- Acidogénesis: en esta fase los microorganismos con propiedades acidogénicas transforman las moléculas que fueron divididas en cadenas cortas en ácidos grasos.
- Acetogénesis: durante este periodo, los ácidos grasos son convertidos en ácidos acéticos.
- Metanogénesis: finalmente, en esta etapa, los microorganismos metanogénicos utilizan el ácido acético producido en la acetogénesis, el hidrógeno y el dióxido de carbono para producir metano y dióxido de carbono.

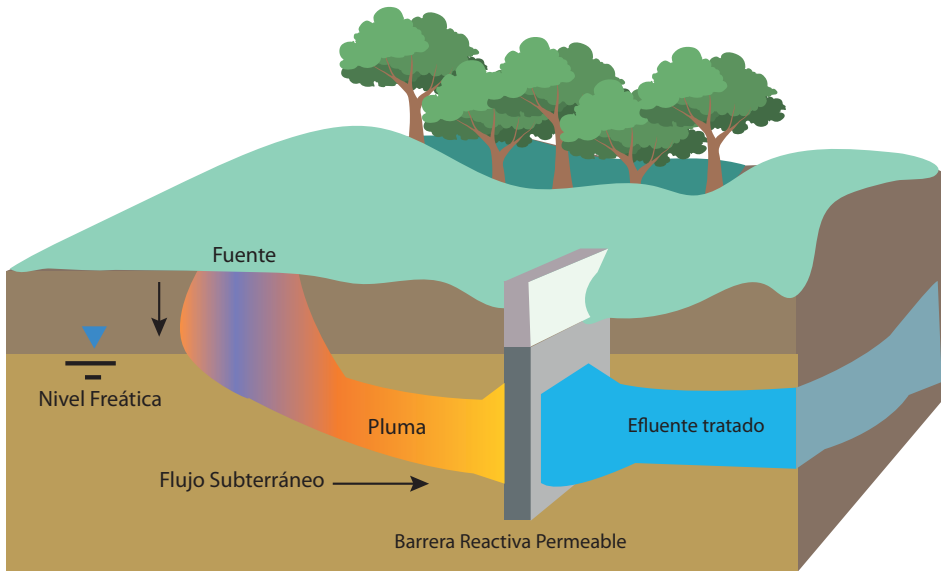
Figura 30. Ciclo de degradación anaeróbica

Fuente: Simonetti *et al.* (2015).

En síntesis, el tratamiento de aguas subterráneas por medio de la biorremediación depende del grado de toxicidad que presenta el medio, debido a que muchos organismos no soportan las altas concentraciones de contaminantes tóxicos en sus procesos vitales, entonces, para mantener la población de microorganismos, ya sea aeróbicos o anaeróbicos, se debe contar con un grado de concentración límite y estable, es decir, si el nivel de contaminación en el medio está por debajo o por encima del nivel permitido por la población de microorganismos, la biorremediación no tendrá lugar y se debe implementar otro sistema de limpieza en el acuífero (Ferrera-Cerrato *et al.*, 2006).

8.3.2 Barreras reactivas permeables

Este sistema está constituido por barreras que se implantan bajo la superficie terrestre con el fin de eliminar contaminantes en las aguas subterráneas. Su funcionamiento se basa en el aprovechamiento del caudal hidráulico natural, el cual atraviesa una pared permeable que tiene materiales reactivos, y estos al ponerse en contacto con contaminantes ajenos al agua reaccionan y atrapan cualquier sustancia química dañina o la transforman en algún elemento inocuo.

Figura 31. Funcionamiento de las barreras reactivas permeables

Fuente: EPA (1998).

Este tipo de alternativas en el tratamiento y limpieza de los acuíferos es muy acogido debido a su eficacia y economía, ya que no requiere de ser operada y el costo de mantenimiento es muy bajo comparado con otros sistemas de remediación (Alonso *et al.*, 2002).

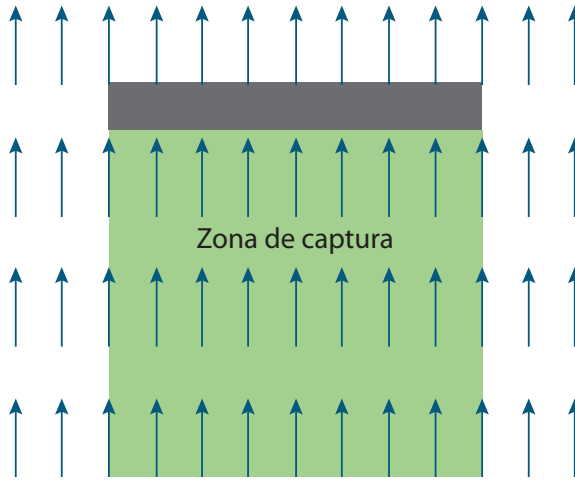
Los sistemas de tratamiento de barreras permeables pueden usar dos tipos de conformación:

- » Barrera continua
- » Barrera de embudo

Barreras continuas

La configuración de barreras continuas está estructurada por una pared con propiedades permeables que permiten el flujo de agua a través de ella, la cual se instala perpendicular al sentido de flujo del agua, de manera que su función es frenar el flujo para poder retener cualquier sustancia contaminante.

Figura 32. Barreras continuas

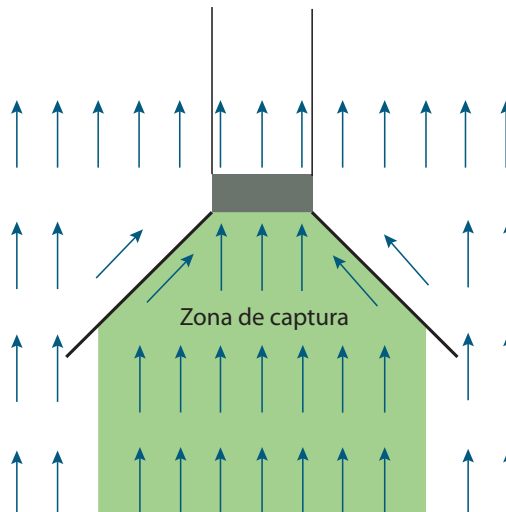


Fuente: elaboración propia.

Barreras de embudo

A diferencia de las barreras continuas, las de tipo embudo son impermeables, de manera que el flujo continuo de agua a través de ella es poco, lo que produce un efecto de encausamiento del agua hacia los elementos reactivos que depuran o transforman los contaminantes.

Figura 33. Barreras de embudo



Fuente: elaboración propia.

Ahora bien, el tipo de reactivos que se implementan en las barreras depende del tipo de remediación que se quiera llevar a cabo en el acuífero, pero, generalmente, estos elementos reactivos combinan procesos físicos, químicos y biológicos para hacer la limpieza.

En la mayoría de los casos, los elementos reactivos se instalan en recámaras, con la finalidad de que puedan cambiarse de manera más práctica cuando cumplen su vida útil. A la hora de sustituir los elementos reactivos por unos nuevos, se tiene en cuenta si estos ya están agotados y si la permeabilidad de la pared ha disminuido, para así conocer en qué medida la limpieza del agua desgasta estos materiales y qué elementos son los más absorbentes.

El uso de barreras reactivas para la limpieza y remediación de contaminantes en aguas subterráneas dispone de diversas ventajas comparado con otros sistemas, entre las más importantes resaltan las siguientes:

- » El impacto ambiental es poco o nulo debido a que no necesita la instalación del sistema sobre la superficie.
- » Las probabilidades de una falla son muy bajas, ya que este sistema no requiere de componentes mecánicos para su funcionamiento.
- » No precisa energía eléctrica para su funcionamiento.
- » No se hace extracción del cuerpo hídrico, por tanto, no se afecta el caudal.

Sumado a lo anterior, las barreras reactivas no alcanzan a cubrir la totalidad del acuífero, es decir, su alcance es limitado y solo se puede implementar en aguas subterráneas de poca profundidad (EPA, 1998).

CAPÍTULO 9

INSTRUMENTOS Y PRINCIPIOS ECONÓMICOS PARA LA GESTIÓN SOSTENIBLE DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

La gestión del agua subterránea tiene un objetivo que es la explotación del recurso hídrico de los acuíferos por el cual se consigue un desarrollo de las actividades económicas, pero también ha causado que se pierda una parte del medio ambiente y se genere una creciente escasez relativa por diversos factores económicos, sociales y naturales.

El objetivo de los instrumentos económicos es llegar a inducir cambios en la conducta de los agentes consumidores del recurso hídrico. Hasta el momento se considera una ventaja las recaudaciones financieras que pueden usarse en el desarrollo tecnológico y científico. La perfección de las infraestructuras o el mejoramiento de la gestión del recurso, sin embargo, con el hecho de pagar por el uso del agua no se recuperan los acuíferos ni se mantiene la cantidad existente del recurso, y por ello, se debe contar con políticas que mantengan su transparencia, que regulen el consumo y que su principal objetivo sea recuperar las fuentes de agua dulce (Ochoa, 1995).

9.1 Dimensiones económicas del agua subterránea

El agua subterránea ha dejado de tener buenos estándares en ciertas áreas como en las zonas húmedas y en gran parte de las zonas desérticas. La principal causa es que los Gobiernos han fallado al tratar de controlar la extracción de las aguas en estas zonas provocando una sobreexplotación que lleva a la degradación en el

medio ambiente y esto crea impactos en terceros, como en los acuíferos, los cuales ya no cuentan con una protección efectiva contra la contaminación.

Otra razón económica es que los usuarios específicos del agua subterránea no han tenido que pagar el “costo real económico” por el consumo del agua de los acuíferos, y las personas que contaminan el agua no han tenido que costear los gastos que se requieren para la limpieza de las aguas contaminadas.

Darle un valor al agua subterránea no es tan relevante y sobre todo cuando el agua es abundante, pero cuando esta baja su calidad, y así mismo, el agua de calidad empieza a escasear y por esto se pueden tener una cantidad de demandas, el costo del agua subterránea se incrementa. Por lo anterior, se debe mirar cómo hacer un mejor uso y manejo del agua, en qué tiempos se debe usar y en cuáles no, y darle un valor por su uso.

Es posible mejorar el uso de las aguas subterráneas a través de principios económicos que sirvan para implementar las decisiones. Ampliar el conocimiento sobre el trato que se realiza sobre las aguas subterráneas y los gastos económicos que se emplean es una forma de ayudar a los Gobiernos, incluyendo a los usuarios, que aprendan a dar un mejor uso de las aguas subterráneas y optimizar las aplicaciones de los mecanismos económicos, estos son instrumentos que sirven para promover los incentivos y desincentivos económicos para el manejo sostenible de las aguas provenientes de los acuíferos.

La aplicación de los principios económicos para un mejor manejo y trato de las aguas subterráneas se beneficia a través del conocimiento de:

- » Los factores socioeconómicos que causan las demandas de agua subterránea y de la contaminación que se genera en los acuíferos.
- » Principios y métodos útiles para la evaluación de los requerimientos de las aguas subterráneas.
- » Incentivos y políticas económicas que promuevan una buena gestión de las aguas subterráneas procurando que sean sostenibles.

Los principios y los instrumentos económicos son aplicaciones importantes para el manejo en la política en cuanto a la gestión sostenible que se debe realizar de las aguas subterráneas. Así mismo, se requieren los mecanismos y medidas que regulen y se adapten a la hidrogeología institucional del lugar en donde se implemente.

Con el fin de que los mecanismos económicos tengan un buen impacto en el manejo de las aguas subterráneas, se entregará en paquetes junto con las otras herramientas y las medidas que se exponen para los acuíferos, así como los procesos que se adapten al entorno donde se va a realizar el manejo de las aguas subterráneas.

La subvaloración que se realiza en los recursos de las aguas subterráneas se debe a problemas de extracción excesiva, bajo rendimiento en el uso del agua y un inadecuado uso del agua tanto individual como comunitaria para proteger su calidad, sin embargo, es incorrecto pensar que únicamente los problemas de escasez de las aguas subterráneas se deben atender mediante el uso de instrumentos económicos como el aumento en el costo de extracción o consumo y por la descarga de contaminantes.

Puesto que el uso del agua es esencial en el desarrollo de muchas áreas como el desarrollo urbano, el desarrollo agrícola y muchas de las actividades en la industria. De hecho, muchos de los consumidores y contaminantes de las aguas subterráneas pueden ser indiferentes con el aumento del costo de los recursos.

En resumen, para promover el correcto uso y manejo sostenible junto con los cuidados efectivos de la calidad de las aguas subterráneas, se requiere de los siguientes elementos económicos y financieros:

- » Hacer una evaluación clara y realista de los beneficios de los recursos sostenibles de agua subterránea para los seres vivos que se encuentran en el lugar y para el bienestar del ser humano. Además, se incluyen los ecosistemas del medio ambiente en los lugares de recarga y descarga de agua subterránea.
- » Encontrar una concurrencia y equilibrio entre la conservación del agua subterránea y el desarrollo económico, al disminuir la tasa de explotación de los recursos y conseguir un mejor manejo de las aguas subterráneas.
- » Incorporar más recompensas económicas positivas para fomentar el cuidado y manejo de las aguas subterráneas a nivel de la política nacional, y a nivel local por medio de pagos por el uso, el implemento de sanciones por las acciones de contaminación, y el uso de los servicios ecosistémicos para la recarga de acuíferos.
- » Uso financiero para la aplicación de medidas determinadas en el manejo y protección.

Debido a la creciente escasez del recurso hídrico por factores económicos, sociales y naturales, se requiere la creación de una nueva visión sobre su gestión. Uno de los principales enfoques se fundamenta en el valor económico y la calidad, enfoque que ha sido aplicado en diferentes países ayudando en su desarrollo al ser más concreta su utilidad.

Figura 34. Principios económicos de las aguas subterráneas

Fuente: tomado de <https://www.freepik.es>

9.2 Factores económicos del uso y la contaminación del agua subterránea

9.2.1 Identificación de factores

Una herramienta esencial para detectar la causa del agotamiento de las fuentes y la disminución de su calidad es mediante la valoración de factores socioeconómicos, una gran herramienta cuando se intenta implementar soluciones efectivas y que afiancen su sostenibilidad. Para esto, es de vital importancia lo siguiente:

- » La agricultura extensiva de regadío es la actividad en que hay un mayor consumo del recurso y a su vez genera la contaminación.
- » La urbanización e industria: un usuario que es esencial, pero a la vez es contaminante.

El costo en relación con las fuentes alternativas de suministro es el factor que controla la explotación de aguas subterráneas debido a los beneficios que ha traído esta fuente secundaria en las épocas de sequía, cuando los costos se distorsionan de una forma leve. Hay que tener en cuenta, si las políticas tanto públicas como privadas son los obstáculos para la implementación de medidas sobre la gestión del agua subterránea.

Figura 35. Identificación de factores

Fuente: tomada de <https://www.freepik.es>

Muchas veces, el sector más beneficiado por las políticas establecidas por el Gobierno es el sector agrícola debido al aporte económico que realiza al país. Algunas de estas medidas establecidas pueden dificultar su manejo como las siguientes:

- » Protección de los precios en los cultivos que consumen agua
- » Subsidios para la implementación de pozos de agua
- » En las áreas de riego, las tarifas fijas de electricidad
- » Subsidio para aquellos productos agroquímicos que presentan un peligro para las aguas subterráneas.

Es fundamental hacer la pregunta ¿Cuál es el equilibrio entre los beneficios económicos y los costos ambientales que generan ciertas actividades?, esto con la finalidad de establecer enfoques eficaces sobre guardar el agua subterránea, pues muchas de estas actividades presentan tanto sus pros como sus contras, ya que a pesar de que genera una gran economía para el país también produce costos elevados en la contaminación (Llamas y Custodio, 1999).

9.2.2 El problema de la subvaloración

En muchas ocasiones, el agua subterránea tiende a ser subvalorada. Esto se debe a los beneficios de su utilización o extracción –muchas veces innecesarias– y las cuales luego no son recompensadas, pues los usuarios solo pagan una pequeña parte de todo lo que implica su mantenimiento. En la Tabla 6 se evidencia el “costo

económico real” del uso del agua subterránea que incluye el capital, las operaciones y la gestión para su mantenimiento.

Tabla 6. Costos económicos reales del agua

		Costos del suministro de agua			Costos de oportunidad	Costos de externo
Costos de extracción de agua subterránea	Enteramente económicos	Costo de capital	Costo de operación y Mantenimiento O&M		Recursos costos	Valor perdido de usos alternativos (presente-futuro)
	Pagado por los usuarios	Costo de capital (Crédito a veces subsidiado)	Costo de O&M (Energía a veces subsidiado)	Recursos costo Administrativos		

Fuente: elaboración propia.

El término “externalidades” es utilizado por los economistas para determinar los costos. Estas externalidades con referencia al uso del agua se presentan cuando las personas utilizan el recurso hídrico y generan una contaminación ambiental, sin hacerse responsable por esos daños ni generando una compensación por el mismo.

Por lo tanto, las externalidades negativas, en resumen, la extracción, utilización y manejo del agua subterránea, es decir, sin hacerse cargo de todos los costos que conllevan sus acciones. De igual manera, cuando se hace un mal manejo del suelo y causa un impacto negativo en la calidad del agua subterránea.

Como conclusión, la infravaloración del agua subterránea está dada por las malas decisiones y el uso inadecuado del recurso hídrico, la mala información y la ignorancia sobre los costos reales por su utilización, así como los costos sociales pueden llevar a la creación de escenarios no sostenibles.

9.3 Valoración de las aguas subterráneas

9.3.1 ¿Por qué valorar las aguas subterráneas?

El ponerle un valor económico al recurso es una herramienta guía que ayuda al conocimiento de los usos prioritarios del agua y así establecer un mecanismo de cómo manejarlo de una manera parcial, por esta razón, el valor otorgado por

varias personas a estas fuentes hídricas se basa en distintos factores. Se requiere diferenciar entre:

- » Los flujos de aguas subterráneas
- » Las reservas de aguas subterráneas.

Desde una visión económica, es de vital importancia conocer cuáles reservas de agua generan un mayor rendimiento monetario con el fin de distinguir los beneficios y costos de su uso.

La mayoría sostiene que, al ponerle un precio monetario al uso de las aguas subterráneas se privatizará el acceso a los pobres, cuando esto sea mediante un cargo promedio gravado y los subsidios se pueden incorporar a las estructuras tarifarias, es decir, si se pide el aumento del volumen en un pozo del agua en una aldea, esto aumentaría los costos de bombeo y, por lo tanto, se beneficiaría a los pobres.

9.3.2 Cómo valorar el agua subterránea

La valoración de las aguas subterráneas es un tema complejo debido a los diferentes regímenes de extracción, la carga de contaminación y los impactos socioeconómicos que estos conllevan, factores que se encuentran fuera de los mercados formales y, por lo tanto, no se tiene cómo acceder a este conocimiento. De esta manera, para hacer su valoración se necesita de las habilidades especializadas de hidrogeólogos y economistas ambientales.

Por lo anterior, se debería hacer la valoración del agua desde una perspectiva del usuario como un agricultor de riego y también de quienes formulan las políticas sobre la sostenibilidad y los beneficios como el Ministerio del Medio Ambiente. Esto se debe a que cada uno presenta una visión diferente sobre el uso del agua subterránea.

Ciertamente, mientras los usuarios solo se preocupan por los beneficios que provee su utilización para la producción y el consumo humano, los tomadores de decisiones públicas se dedican a establecer políticas que beneficien a toda la sociedad en conjunto, por ello, debe considerar una serie de costos y beneficios de todos sus usos.

En conclusión, la mejor manera para valorizar el agua es desde un punto de vista financiero, con el fin de tomar en cuenta lo que se podría hacer con el recurso, es decir, los beneficios que genera y los servicios que brinda, por lo tanto, el valor del agua se deriva de sus posibles usos.

9.3.3 Factorización de valores ecosistémicos

Varios de los ecosistemas de tierras bajas presentan una dependencia en la descarga natural de las aguas subterráneas y, como se estableció anteriormente, el agua subterránea tiene valor por su buen funcionamiento y utilización, además de los productos que proveen como los peces, combustibles, entre otros, productos cuyo valor depende de factores como la magnitud, el tipo y sus características.

9.3.4 Estimación de riesgos, incertidumbres y plazos

Aunque la mayoría de los recursos naturales como las aguas subterráneas son renovables, existen otros que no lo son, y su explotación genera que se vuelvan irreversibles, haciendo de vital importancia el tener en cuenta los costos adicionales que genera el uso de un recurso en extinción.

La forma de manejar el tiempo en un análisis es a partir de la aplicación de una tasa de descuento que brindará costos y beneficios a las generaciones futuras.

Para valorar el costo que conlleva el uso del agua subterránea se deben considerar los costos adicionales asociados y también analizar si existe un beneficio para las generaciones futuras cuando se consideran las reservas estratégicas como una fuente alternativa de agua potable.

La valoración del agua que se encuentra en los acuíferos debería basarse en el tiempo, despreciando el hecho de que sea renovable o no, ya que se genera un acumulo de cálculos sobre el flujo del costo y los beneficios que llegan a ser de un tiempo muy prolongado.

9.3.5 Límites de la valoración

A pesar de que las técnicas citadas anteriormente presentan errores, estas proporcionan una estrategia para la mejora de la valoración en cuanto a los recursos de aguas subterráneas.

- » No obstante, estos métodos presentan graves debilidades en cuanto a los resultados de las investigaciones y evaluaciones encaminadas a hacer un mejor manejo del recurso.
- » La valoración del agua subterránea depende de la manera en que los usuarios pueden pagar y acceder a los mercados de gran valor.
- » Los valores que se asignan al agua subterránea están sometidos a varios factores además de los económicos, por esta razón, la mayoría de los métodos no logran reflejar con exactitud los valores para un buen abastecimiento.

- » Los métodos de valoración que se basan en la producción exigen de otros insumos críticos además del agua subterránea lo que dificulta poder determinar su valor real.
- » La valoración no considera los valores de los servicios ecosistémicos, por lo tanto, la variabilidad de las valoraciones del agua subterránea puede ser alta debido a la variación espacial en el largo tiempo.

9.4 Instrumentos económicos para la protección y gestión de las aguas subterráneas

9.4.1 Alcance y relevancia de los instrumentos económicos

Existen diversos tipos de instrumentos económicos que se utilizan para que los usuarios, contaminadores y proveedores de servicios ecosistémicos estimulen y adopten de forma voluntaria un comportamiento para el beneficio de la sociedad o que se ajuste a sus políticas.

Los instrumentos económicos que pueden ser incentivados para que las aguas subterráneas tengan eficiencia en el momento de ser utilizados, se basa en su contribución de acuerdo con el manejo sostenible existente. De esta manera, se busca reducir cualquier tipo de riesgos, impactos negativos y conflictos sociales, pues su principal razonamiento es la reacción que el humano presenta por la economía.

Pese a las dificultades para la valoración precisa de los recursos, existe un margen que permite la aplicación de instrumentos económicos en su administración, ya que esto ayuda a que la personas asuman los costos económicos de sus acciones y así poder persuadirlos de eliminar esas prácticas dañinas.

Las distintas aplicaciones de instrumentos económicos se han complementado con otro tipo de orientación, en otras palabras, es posible brindar estímulos al momento de aplicarlos en las leyes y regulaciones existentes. No obstante, para el impulso necesario y eficiente de la gestión sostenible por medio de las aguas subterráneas, se debe aplicar instrumentos económicos que hacen parte de los controles regulatorios y de participación social.

La imposición de cargos y costos es uno de los instrumentos económicos implementados para controlar la extracción y contaminación con la finalidad de ejercer un control. Pero, además de las sanciones financieras y sociales, se debe implementar un sistema obligatorio de medición con el fin de desalentar las diversas actividades que ofrecen servicios socioeconómicos con límites y que generan grandes daños ambientales. Es necesario también ser más conscientes con aquellos que se dedican a cuidar y preservar las tasas de recarga y calidad del agua subterránea.

Tiene una mediana importancia los análisis sobre implementar instrumentos económicos que evalúen los costos y beneficios, el cual debe tomar en consideración la capacidad organizacional (la administración, el monitoreo y la aplicación de la ley) y los costos repetitivos a largo plazo, lo que puede ser relativamente sencillo, pero en el momento de evaluar los beneficios se vuelve más difícil.

9.4.2 Imposición de cargos y gastos para restringir la extracción del agua subterránea

Tarifas de uso y extracción directa que requiere el recurso

Una metodología eficiente para asegurar el uso de este recurso hídrico es la obligación de cargos o tarifas por sustraer agua subterránea, valor que debe ser pagado según el volumen de su extracción.

9.4.3 Mercados de aguas subterráneas para regular los derechos de uso y asignaciones o cuotas

En ocasiones, se impulsa la idea de hacer “mercados de agua” para que el manejo del recurso sea más eficiente. En este caso, podría realizarse un aporte en el momento de asignar el agua a usos de mayor valor donde hay una aceptación de todas las zonas y así promover el incremento económico con el fin de disminuir la tensión social. Sin embargo, estos mercados no van a reducir la cantidad de extracción ni el consumo diario de dicho recurso.

En cambio, su implementación establece la gestión de los recursos de aguas subterráneas que posee un límite sobre el volumen total a obtener, lo que sería de gran utilidad debido a que habría un control y serviría como herramienta para su gestión y, por lo tanto, evitaría el desperdicio del recurso.

La definición de “mercados de agua” no se refiere al traspaso del suministro o entrega de títulos de propiedad, sino el realizar asignaciones y comercialización, siendo un propósito de forma gradual para introducir la creación de “mercados de agua subterránea”. Por lograr esto, hay que tener en cuenta lo siguiente:

- » En primer lugar, hay que establecer un sistema que permita realizar y obtener la medición del uso de las aguas subterráneas, además de determinar los derechos de uso de los usuarios, mientras se ajustan a las nuevas reglas que se van a implantar.
- » Segundo, una vez realizado el sistema y que funcione a la perfección, proceder a que los derechos de uso del agua subterránea sean comerciables.

Por otra parte, el trato de los derechos de agua subterránea solo tendrá efectividad si se basa en una administración pública y sólida que se maneje dentro del marco

regulatorio de la gestión de dichos recursos. No es un mecanismo que va a reemplazar la regulación del recurso, sino un aporte que requiere de un esfuerzo adicional en términos de administración pública a cambio de generar beneficios económicos que son de ayuda a la sociedad.

El objetivo principal de estos proyectos es minimizar el consumo de las aguas subterráneas para afianzar su sostenibilidad.

Usualmente, el objetivo es minimizar el consumo de las aguas subterráneas en pro de la sustentabilidad a largo plazo del recurso, su uso y el de los ecosistemas acuáticos donde el negocio de los derechos de aguas subterráneas conforma mecanismos que garantizan el acceso al recurso. El mercado solicita una regulación efectiva para que este objetivo se concrete en unión con la protección de los usuarios legalmente inscritos y los ecosistemas acuáticos que dependen de sí mismos, los cuales son:

- » Mediante normas uniformes debidamente publicadas se busca disminuir la transferencia de los derechos de aguas subterráneas a unidades hidrogeológicas específicas y a usos específicos con el fin de que tanto el consumo como la carga de contaminación no tengan un aumento excesivo.
- » Mediante evaluaciones, se debe cuidar de los usuarios legales que existen (incluyendo el medio ambiente acuático).
- » Finalmente, en forma regular, se debe aplicar una reducción del volumen de los derechos del uso de los beneficiarios.

Hay una gran cantidad de países como en la Unión Europea, los EE. UU. y Australia (Córdova Bojórquez, 2021; Gimena, s.f.) que han intentado introducir el comercio de derechos o asignaciones de uso a las aguas subterráneas como una estrategia que ayude en la gestión de dichos recursos. Los pasos para su aplicación serían:

- » Establecer una “disposición pública” de información sobre los volúmenes y las tendencias comerciales con la finalidad de agilizar el comercio.
- » Incentivar el comercio momentáneo de las asignaciones de uso de agua subterránea, ya que, cuando es factible, estas transacciones son más sencillas de procesar y son de gran utilidad para evaluar y promover la transferencia permanente de los derechos de uso de agua subterránea.
- » Mantener una “reserva de recursos” tales como el caudal ambiental.
- » Garantizar que la valoración de los recursos disponibles de aguas subterráneas identifique la interconectividad con los sistemas de aguas superficiales, asegurando la firmeza de la interacción entre el uso de agua subterráneas y superficiales.

- » Especificar una provisión indispensable en las condiciones de sequía, pues en presencia de estos efectos, ya generados por el planeta, el volumen con respecto a los derechos proporcionales deben ser más severos.
- » Tener el apoyo de procedimientos adecuados de trazabilidad y monitoreo para mantener una estimación continua de las modificaciones al extraer y usar el agua subterránea.

9.4.4 Instrumentos económicos para el control del riesgo de contaminación de fuente puntual

El principio económico más utilizado para limitar la contaminación de la fuente puntual de agua es el de “Quien contamina paga”. De acuerdo con este principio a una industria se le cobra por la cantidad de contaminación del agua que produce, entonces, cuanto menos contamina, menos paga; y, así contrariamente, el que más contamina más paga.

Se ha establecido como alternativa, la aplicación de “permisos para contaminar”, lo que le permitiría a las industrias vender su asignación a otros con el impulso de prevenir la contaminación, sin embargo, la carga probatoria de contaminación es costosa y al no saber con exactitud el tiempo que ha pasado antes de que la contaminación se manifestara en el sistema de acuíferos, este tipo de comercio no se podría emplear con tanta sencillez debido a la necesidad de hacer una protección preventiva de los acuíferos.

Por ende, en el caso de las aguas subterráneas, el principio de “Quien contamina paga” se debe interpretar como el “contaminador potencial paga los costos de la protección requerida por el acuífero”, los cuales varían dependiendo del espacio del suelo. En estas zonas de protección, se aplican una serie de herramientas regulatorias con el objetivo de evitar las actividades peligrosas. En conclusión, es más recomendable introducir incentivos económicos para los contaminadores y así optimizar su manejo o tratamiento.

9.4.5 Pagos por servicios ecosistémicos

Los pagos por servicios ecosistémicos para afianzar los servicios hidrológicos han sido muy utilizados últimamente en los humedales o pastizales. Este tipo de procedimiento incluye a las hidroeléctricas, consumidores o usuarios industriales quienes realizan pagos a los grupos responsables del manejo de estos ecosistemas como las autoridades de las áreas protegidas.

Figura 36. Pago de servicios ecosistémicos

Fuente: tomado de <https://www.freepik.es>

El objetivo de este proyecto es dar a conocer a los usuarios que manejan las tierras o recursos y cuyas acciones no son reconocidas por la prestación de los servicios y por lo tanto no son recompensadas. Esto provoca que los usuarios tengan un menor estímulo para desarrollar las prácticas sostenibles, a pesar de que su aporte es beneficioso. Por lo tanto, estos pagos tienen la finalidad de recompensar esos esfuerzos. Algunos ejemplos son:

- » En los países de la UE como Alemania, Reino Unido y Dinamarca se han realizado acuerdos para beneficiar a los propietarios de tierras quienes usan en su cultivo las zonas de captación mediante agua subterránea, de acuerdo con la introducción de nuevas prácticas agrícolas.
- » Otro ejemplo es el desarrollo de un mercado de servicios ecosistémicos de aguas subterráneas.

BIBLIOGRAFÍA

- Abiriga, D., Vestgarden, L. S., y Klempe, H. (2020). Groundwater contamination from a municipal landfill: Effect of age, landfill closure, and season on groundwater chemistry. *Science of the Total Environment*, 737, 140307.
- Advisory Committee on Water Information (ACWI). (2009). *A National Framework for Ground-Water Monitoring in the United States*.
- AGA. (2012). *El Gobierno aprueba el proyecto de real decreto que modifica el reglamento del dominio público hidráulico y establece las normas aplicables al tratamiento de las aguas residuales urbanas*.
- Alley, W. M. (1993). *Regional ground-water quality*. John Wiley & Sons.
- Alonso, C. V., Lahoz, C. G., Delgado, R. A. G., Maroto, J. M. R., y Herruzo, F. G. (2002). Barreras reactivas para el tratamiento de aguas subterráneas contaminadas. *Ingeniería Química*, 394, 500-509.
- Amaringo, F., Narváez, J. F., Gómez-Arguello, M. A., y Molina, F. (2019). Contaminación en agua y sedimentos por hidrocarburos aromáticos policíclicos: Revisión de la dinámica y los métodos analíticos. *Gestión y Ambiente*, 22(1), 129-140.
- An, Y., Yan, X., Lu, W., Qian, H., y Zhang, Z. (2022). An improved Bayesian approach linked to a surrogate model for identifying groundwater pollution sources. *Hydrogeology Journal*, 30(2), 601-616. <https://doi.org/10.1007/s10040-021-02411-2>

- Aranda, D. F. C. (1984). *Procesos del ciclo hidrológico*. UASLP.
- Arauzo, M., Valladolid, M., y García, G. (2020). *Cartografía de la vulnerabilidad de las aguas subterráneas a la contaminación por nitratos de fuentes difusas en la cuenca del río Ebro (NE de España)*.
- Argoytia, L. L. (2022). El valor del agua. *Ecofronteras*, 33-36.
- Arteaga-Cortez, V. M., Quevedo-Nolasco, A., Valle-Paniagua, D. H. del, Castro-Popoca, M., Bravo-Vinaja, Á., y Ramírez-Zierold, J. A. (2019). Estado del arte: una revisión actual a los mecanismos que realizan los humedales artificiales para la remoción de nitrógeno y fósforo. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 10(5), 319-343.
- Briones Falla, J. J. T. (2020). *Comparación de dos fertilizantes (Nitrato de potasio y Sulfato de potasio) y su influencia en el rendimiento del cultivo de arroz (Oryza sativa), variedad Tinajones en el valle de Zaña*.
- Briseño-Ruiz, J. V., Herrera-Zamarrón, G. del S., y Júnez-Ferreira, H. E. (2011). Método para el diseño óptimo de redes de monitoreo de los niveles del agua subterránea. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 2(4), 77-96.
- Bruning González, M. B. (2018). *Estudio del aporte de carga de nutrientes por fuentes contaminantes y análisis de escenarios de descontaminación mediante un modelo de calidad de aguas en el Lago Villarrica*.
- Calderón, F. E. J., Guerra, J. W. C., y Lucio, D. A. O. (2019). Impacto ambiental provocado por el inadecuado uso de fertilizantes químicos en cultivos de maíz. *UNESUM-Ciencias. Revista Científica Multidisciplinaria*, 3(1), 61-72.
- Casas Gonzáles, R. A. (2015). *Proceso constructivo de la perforación de pozos para agua potable por método de percusión y rotativo*. https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UUNI_9c34813359d6e4a6b51cc5a41853e56c
- Cazorla, M. I. T. (2022). Recogida y tratamiento de las aguas residuales urbanas. El caso de España. *Revista IUS*, 16(49).
- Cely-Calixto, N. J. (2020). Physical controls in the simulation of hydraulic networks in buildings using Epanet 2.0 software. *Journal of Physics: Conference Series*, 1708(1), 012028.
- Cely-Calixto, N. J., Bonilla-Granados, C. A., y Rojas-Suárez, J. P. (2021). Statistical analysis of wastewater monitoring for maximum peak factor estimation. *Journal of Physics: Conference Series*, 1981(1), 012013.
- Cely-Calixto, N. J., Carrillo-Soto, G. A., y Bonilla-Granados, C. A. (2020). Optimization of a storm drainage network using the storm water management model software in different scenarios. *Journal of Physics: Conference Series*, 1708(1), 012030.
- Cely-Calixto, N. J., Soto, G. A. C., y Becerra-Moreno, D. (2021). Validation of the modified Témez rational model in the watersheds of Norte de Santander, Colombia. *Journal of Physics: Conference Series*, 2073(1), 012017.

- Cerón, L. M., Sarria, J. D., Torres, J. S., y Soto-Paz, J. (2021a). Agua subterránea: tendencias y desarrollo científico. *Información Tecnológica*, 32(1), 47-56.
- Cerón, L. M., Sarria, J. D., Torres, J. S., y Soto-Paz, J. (2021b). Agua subterránea: tendencias y desarrollo científico. *Información Tecnológica*, 32(1), 47-56.
- Chicana Gil, D. A., y López Quiroz, E. J. (2021). *Revisión sistemática de los impactos de la contaminación de aguas subterráneas producidas por lixiviados de vertederos municipales*. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/77281>
- Collazo Caraballo, M. P., y Montaña Xavier, J. (2012). *Manual de agua subterránea*. http://www.ose.com.uy/descargas/reclutamiento/ci_0006_16_manual_agua_subterranea.pdf
- Córdova Bojórquez, G. (2021). Asimetrías institucionales y sociales en el manejo del agua subterránea para agricultura en la frontera México-Estados Unidos. *Región y Sociedad*, 33.
- Davie, T., y Quinn, N. W. (2019). *Fundamentals of Hydrology*. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780203798942>
- De Bogotá, C. de C. (2020). *Clasificación Industrial Internacional Uniforme de todas las actividades económicas Revisión 4 adaptada para Colombia CIU Rev. 4 AC/ (2020)*.
- De la Cruz-Courtois, O. A., Guichard, D., y Arganis, M. L. (2020). Funciones analíticas a partir de un modelo estocástico de las extracciones de una presa hidroeléctrica después de la temporada de lluvias. *Ingeniería del Agua*, 24(4), 235-253.
- De Miguel, Á., Lado, J. J., Martínez, V., Leal, M., y García, R. (2009). El ciclo hidrológico: experiencias prácticas para su comprensión. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 17(1), 78-85.
- Díaz, R. (2021). *El 83 % de los suelos agrícolas de España tienen restos de pesticidas*. <https://verdeyazul.diarioinformacion.com/el-83-de-los-suelos-agricolas-de-espana-tienen-restos-de-pesticidas.html>
- Dickel, Ms. A. V. (s.f.). *Relatorio de Impacto Ambiental*.
- El mundo y sus plantas. (2012). *Agua subterránea*. <https://elmundoyusplantas.blogspot.com/2012/10/agua-subterranea.html#.YpfNIKiZO5d>
- En Derecho, L. (s.f.). *Gestión de las aguas subterráneas y su aprovechamiento: enfoque específico del sistema empleado para el control legal de la perforación de pozos, en las zonas costeras del cantón de Carrillo, Guanacaste (período 1998-2010)*.
- EPA. (1998). *Permeable reactive barrier technologies for contaminant remediation*. <https://acortar.link/NXVPNh>
- Fernández-Polanco Íñiguez de la Torre, M. (2018). *Depuración de las aguas residuales urbanas con filtro de macrofitas en flotación*. <https://uvadoc.uva.es/handle/10324/31211>

- Ferrera-Cerrato, R., Rojas-Avelizapa, N. G., Poggi-Varaldo, H. M., Alarcón, A., y Cañizares-Villanueva, R. O. (2006). Procesos de biorremediación de suelo y agua contaminados por hidrocarburos del petróleo y otros compuestos orgánicos. *Revista Latinoamericana de Microbiología*, 48(2), 179-187.
- Foster, S., Hirata, R., Gomes, D., Delia, M., y Paris, M. (2003). *Protección de la calidad del agua subterránea*. Banco Mundial.
- Foster, S., Pulido-Bosch, A., Vallejos, Á., Molina, L., Llop, A., y MacDonald, A. M. (2018). Impact of irrigated agriculture on groundwater-recharge salinity: A major sustainability concern in semi-arid regions. *Hydrogeology Journal*, 26(8), 2781-2791.
- Foster, S. S. D., y Gomes, D. C. (1989). Monitoreo de la calidad de las aguas subterráneas; una evaluación de métodos y costos. En *Monitoreo de la calidad de las aguas subterráneas; una evaluación de métodos y costos* (p. 111). <https://pesquisa.bvsalud.org/portal/resource/pt/lil-146773>
- Foster, S., y Shah, T. (2012). Groundwater and irrigated agriculture: making a beneficial relationship more sustainable. *Global Water Partnership-Perspectives Paper*.
- Fraile, D. B., Ruiz, T. G., Rivera, R. J., Peris, P. M., y Prendes, E. (2021). Análisis y evaluación de las alternativas de protección de las aguas subterráneas durante las operaciones de extracción de los residuos (alquitranes ácidos) en una laguna de Arganda del Rey (Madrid). *Residuos*, 132(4), 399-419.
- Fuillerat Muriel, M. (2021). *Revisión de los modelos matemáticos aplicados a la gestión de recursos hídricos o cuencas*. <https://ebuah.uah.es/dspace/handle/10017/49411>
- Galván Marante, M. C. (2019). *_Iodo y flúor en sales comestibles comerciales. Evaluación del riesgo tóxico_*. [Trabajo de grado]. Universidad de La Laguna. <https://riull.ull.es/xmlui/bitstream/handle/915/16039/Iodo%20y%20flour%20en%20sales%20comestibles%20comerciales.%20Evaluacion%20del%20riesgo%20toxico..pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Gaviria, J. I., y Betancur, T. (2005). Una caracterización de carga contaminante a los acuíferos libres del Bajo Cauca antioqueño. *Gestión y Ambiente*, 8(2), 85-102.
- Gidahatari. (s.f. a). *¿Cómo diseñar una red de monitoreo de agua subterránea?* <https://www.iagua.es/blogs/gidahatari/%C2%BFcomo-disenar-una-red-de-monitoreo-de-agua-subterranea>
- Gidahatari. (s.f. b). *Implementación de redes de monitoreo de agua subterránea*. <https://gidahatari.com/ih-es/implementacion-redes-monitoreo-aguas-subterraneas>
- Gimena, E. C. (s.f.). *Explotación intensiva y minera de las aguas subterráneas: situación general y particular de España: ¿una bendición o una calamidad?* <https://rac.es/ficheros/doc/01201.pdf>

- Godínez-García, A., Hernández-Morales, M. G., Guijosa-Guadarrama, S., y Díaz-Tecanhuey, P. J. (s.f.). *Métodos de remediación para la remoción de pesticidas en aguas residuales Medio ambiente*. <https://acortar.link/ZdJZt1>
- González, A., Ingallinella, A. M., Pacini, V., Fernández, R., Sanguinetti, G., y Quevedo, H. (2014). *Remoción de arsénico (As) y fluoruros (F-) en aguas subterráneas mediante coagulación, adsorción y doble filtración*. <http://rephip.unr.edu.ar/handle/2133/7142><http://rephip.unr.edu.ar/handle/2133/7142>
- Grondona, S., Massone, H., González, M., y Bedmar, F. (2022). Evaluación del peligro de contaminación del agua subterránea en áreas agrícolas. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 38, 111-125.
- Gutiérrez Quiroz, A. F. (2019). *Mejoramiento de la planta de tratamiento de aguas residuales "San José" para su reuso con fines agrícolas-Chiclayo-2015*. Descripción: Mejoramiento de la planta de tratamiento de aguas residuales José Gálvez - V.M.T. (concytec.gob.pe)
- Guzmán Soria, E., De la Garza Carranza, M. T., Hernández Martínez, J., Rebollar Rebollar, S., González Razo, F. D. E. J., y García Salazar, J. A. (2010). *Análisis econométrico sobre el consumo de agua subterránea por el sector agropecuario en Guanajuato, México*. <http://ri.uaemex.mx/handle/20.500.11799/38102>
- Hernández-Nazario, L., Benítez-Fonseca, M., y Bermúdez-Torres, J. M. (2018). Caracterización fisicoquímica de la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos del vertedero controlado en el Centro Urbano Abel Santamaría de Santiago de Cuba. *Tecnología Química*, 38(2), 369-379.
- Hernández-Uribe, R. E., Barrios-Piña, H., y Ramírez, A. I. (2017). Análisis de riesgo por inundación: metodología y aplicación a la cuenca Atemajac. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 8(3), 5-25.
- Hernández García, F.J., Buitrón Méndez, G., López-Vázquez, C.M, y Cervantes Carrillo, F. J. (2017). *Tratamiento biológico de aguas residuales: principios, modelación y diseño*. IWA Publishing.
- Hidroambiente. (2020). *Métodos de perforación*. <https://www.hidroambientecr.com/notas/metodos-de-perforacion>
- Huaiquilaf, B. C. (2008). Contaminación de aguas subterráneas por hidrocarburos líquidos livianos en fase no acuosa. *Ciencia, Ahora*, 22, 20-29.
- Huillca Lima, M., y Apaza Mamani, L. (2019). *Evaluación de la concentración de arsénico en aguas subterráneas para consumo humano en la Asociación Nueva Jerusalén, Juliaca-Puno*. <https://repositorio.upeu.edu.pe/handle/20.500.12840/2611>
- Iagua. (2020). *Un nuevo mapa revela el alcance del riesgo de arsénico en las aguas subterráneas de todo el mundo*. <https://www.iagua.es/noticias/europa-press/nuevo-mapa-revela-alcance-riesgo-arsenico-aguas-subterraneas-todo-mundo>
- Inyinbor Adejumo, A., Adebisin Babatunde, O., Oluyori Abimbola, P., Adelani Akande Tabitha, A., Dada Adewumi, O., y Orefo Toyin, A. (2018). Water

- pollution: effects, prevention, and climatic impact. *Water Challenges of an Urbanizing World*, 33, 33-47.
- Jimeno Sáez, P. (2018). *Simulación de procesos hidrológicos utilizando técnicas de machine learning y modelos hidrológicos*. <http://repositorio.ucam.edu/handle/10952/3381>
- Jódar-Abellán, A., Pla, C., y Valdés-Abellán, J. (2019). *Los modelos hidrológicos como sistemas de soporte en la toma de decisiones. Evolución histórica*. <https://acortar.link/0g3sdw>
- Katpatal, Y. B., Rishma, C., y Singh, C. K. (2018). Sensitivity of the Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) to the complexity of aquifer systems for monitoring of groundwater. *Hydrogeology Journal*, 26(3), 933-943. <https://doi.org/10.1007/s10040-017-1686-x>
- Lecocq, T., Longuevergne, L., Pedersen, H. A., Brenguier, F., y Stammer, K. (2017). Monitoring ground water storage at mesoscale using seismic noise: 30 years of continuous observation and thermo-elastic and hydrological modeling. *Scientific Reports*, 7(1), 1-16.
- Limaye, S. D. (2015). A geoethical approach to industrial development of georesources and groundwater use: The Indian experience. *Geological Society, London, Special Publications*, 419(1), 13-18.
- Llamas, R., y Custodio, E. (1999). Aguas subterráneas. *Revista Cidob d'afers Internacionals*, 35-57.
- Lledó, L. C. (2002). Contaminación de las aguas subterráneas: tipo doméstico e industrial. *IGME, Ed. Presente y futuro de las aguas subterráneas en la provincia de Jaén. Vol. Madrid*, 149-156.
- López-Vega, M. E., Ramírez-González, S., y Santos-Herrero, R. (2021). Predicción de la generación de lixiviados en rellenos sanitarios de residuos sólidos urbanos en la ciudad de Santa Clara, Cuba. *Tecnología Química*, 41(1), 47-59.
- Luis, E. C. J. (s.f.). *Tipos de captación de agua subterráneas*.
- Maderey Rascón, L. E., y Román, J. (2005). *Principios de hidrogeografía. Estudio del ciclo hidrológico*. UNAM. <https://es.slideshare.net/carlospulache/2-principios-de-hidrogeografia>
- Martel-Valles, J. F., Cuevas-González, E., Benavides-Mendoza, A., Valdez-Aguilar, L. A., y Foroughbakhch-Pournavab, R. (2017). Distribución mineral de plantas de tomate irrigadas con agua contaminada con benceno, diesel y gasolina. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 4(10), 21-30.
- Martín, J. A. I. (s.f.). *Captaciones subterráneas/Perforación y equipamiento de sondeos para captación de aguas subterráneas*. <https://acortar.link/nAhKae>

- Matzeu, A., Secci, R., y Uras, G. (2017). Methodological approach to assessment of groundwater contamination risk in an agricultural area. *Agricultural Water Management*, 184, 46-58.
- Méndez-Novelo, R. I., Chan-Gutiérrez, E. A., Castillo-Borges, E. R., Vázquez-Borges, E. R., y Espadas-Solís, A. E. (2012). Digestión anaerobia de efluentes de fosas sépticas. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 13(3), 339-349.
- Moradell, I., y Renau-Pruñonosa, A. (2019). Contaminación de aguas subterráneas. Algunos ejemplos. *Enseñanza de las Ciencias de La Tierra*, 27(1), 3.
- Noticias ONU. (2022, abril). *Las aguas subterráneas pueden ser la solución a las crisis hídricas si se gestionan correctamente*. <https://News.Un.Org/Es/Story/2022/03/1505842>
- Ochoa, P. T. (1995). *Estudio del alto Guadalentín desde la perspectiva económica de la gestión del agua subterránea*. EDITUM.
- Organization World Health. (2019). *Progress on household drinking water, sanitation and hygiene 2000-2017: Special focus on inequalities*. World Health Organization.
- Ortega Sánchez, R. F., y Delgado Zúñiga, J. S. (2021). *Evaluación hidrogeológica para captación de aguas subterráneas mediante perforación de pozo tubular en la APV Nuevo Amanecer comunidad campesina y Yanama Ayllomayo distrito Zurite-provincia Anta-región Cusco*. <http://repositorio.unsaac.edu.pe/handle/20.500.12918/5982>
- Parra, N. C., y Londoño, M. A. C. (2017). Diseño de un protocolo de monitoreo en pozos de la red local, para una gestión sustentable del agua subterránea en Colombia. *Encuentro Internacional de Educación en Ingeniería*.
- Pedrozo Acuña, A. (2021). *Contaminación difusa, el reto para la gestión del agua en ciudades*. <http://187.174.234.55/handle/20.500.12013/2270>
- Pérez-Villarreal, J., Ávila-Olivera, J. A., y Israde-Alcántara, I. (2018). Análisis de los sistemas de flujo en un acuífero perturbado por la extracción de aguas subterráneas. Caso zona Morelia-Capula, Michoacán. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 70(3), 675-688.
- Porras Martín, J., Nieto López-Guerrero, P., Álvarez-Fernández, C., Fernández Uría, A., y Gimeno, M. V. (1985). *Calidad y contaminación de las aguas subterráneas en España*. <https://aguas.igme.es/igme/publica/libro43/lib43.htm>
- Ramírez, C. A. S. (2021). *Calidad del agua: evaluación y diagnóstico*. Ediciones de la U.
- Ramírez, M. Á. L., Gutiérrez, Y. A. A., Drouaillet, K. E. O., Pirene, C. O. O., Reynoso, F. L., y Ramírez, M. L. (2022). Caracterización fisicoquímica y biológica de los lixiviados procedentes del sitio de disposición final no controlado en Tlapacoyan, Veracruz, México. *Enfoque UTE*, 13(3), 1-13.
- Retamal Salgado, K. J. (2011). *Evaluación de pozos de inyección para recarga artificial de aguas subterráneas*. <http://repositorio.udec.cl/handle/11594/8527>

- Rivas, L. E. A., y Pimiento, N. N. (2019). Plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR): impacto ambiental esperado e impacto ambiental provocado. *Revista Caribeña de Ciencias Sociales*, 2019-06.
- Rivera, M. A. O., Barahona, W. E. C., Costales, J. H. N., Lalvay, X. A. L., y Guachichullca, E. J. R. (2021). La calidad de las aguas residuales domésticas. *Polo del Conocimiento: Revista Científico-Profesional*, 6(3), 228-245.
- Rocher, A., y Salvo, J. (2014). *Plataforma de perforación para pozos de agua*. <https://ria.utn.edu.ar/handle/20.500.12272/2581>
- Rojas Rodríguez, R. (2016). *Desarrollo de métodos para la reducción de la contaminación por plaguicidas en aguas subterráneas mediante la adición de residuos orgánicos a los suelos*.
- Sánchez, V. G., Gutiérrez, C. A., Gómez, D. S., Loewy, M., y Guiñazú, N. (2016). Residuos de plaguicidas organofosforados y carbamatos en aguas subterráneas de bebida en las zonas rurales de Plottier y Senillosa, Patagonia Norte, Argentina. *Acta Toxicológica Argentina*, 24(1), 48-57.
- Santana Hinostroza, E. I. (2021). *Revisión sistemática: métodos de tratamiento de aguas subterráneas, 2020*. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/61341>
- Siebert, S., Burke, J., Faures, J. M., Frenken, K., Hoogeveen, J., Döll, P., y Portmann, F. T. (2010). Groundwater use for irrigation – a global inventory. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 14(10), 1863-1880. <https://doi.org/10.5194/hess-14-1863-2010>
- Simonetti, M., Curutchet, G., y Cavello, I. (2015). *Evaluación de la producción de biogás de un consorcio bacteriano anaeróbico, utilizando como medio de cultivo productos de degradación de residuos queratínicos por la cepa Purpureocillium lilacinum LPSC # 876 y Glicerol proveniente de la industria de Biodiesel*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.16392.26881>
- Storniolo, A. del R., y Trejo, W. M. (2018). *Captaciones de aguas subterráneas 1*. <https://fce.unse.edu.ar/sites/default/files/pdf/asignatura/capacitanes-aguas-subterranasI-LHS-2018.pdf>
- Tabares Valencia, S. G. (2019). *Alternativas de conservación de cuencas abastecedoras de agua potable en zonas urbanas*. <https://bibliotecadigital.udea.edu.co/handle/10495/15945>
- Tang, W., Biglari, A., Ebarb, R., Pickett, T., Smallidge, S., y Ward, M. (2021). A Smart Sensing System of Water Quality and Intake Monitoring for Livestock and Wild Animals. *Sensors*, 21(8), 2885.
- Tenorio Pinedo, C. H. (2020). *Capacidad de remoción de contaminantes químicos de residuos líquidos segregados por el canal municipal del distrito de Punchana usando tres géneros de microalgas (Chlorella sp., Scenedesmus sp. y Ankistrodesmus sp.)*. <http://repositorio.ucp.edu.pe/handle/UCP/1148>
- Van Hoof, B., Monroy, N., y Saer, A. (2018). *Producción más limpia: paradigma de gestión ambiental*. Universidad de los Andes.

- Vargas, C. R., Samaniego, L., y Medina, M. R. (2020). Estado actual del monitoreo de agua subterránea en América Latina e introducción al programa GGMN. *Aqua-LAC*, 12(1), 118-126.
- Vargas Mora, T. A., y Ramírez Martínez, L. D. (s.f.). *Evaluación de la vulnerabilidad a la contaminación por cuña marina en los acuíferos de la isla de San Andrés (Colombia) bajo escenarios de cambio climático*. <https://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/13992>
- Velásquez Mercado, D. (2020). *Estudio hidrológico de la cuenca del río Pitumarca y su análisis comparativo del modelo precipitación–escorrentamiento de Lutz Scholz y el modelo estocástico de Thomas-Fiering*. <https://renati.sunedu.gob.pe/handle/sunedu/2861025>
- Venegas Marín, C. A. (2017). *Contaminación en zonas de acuíferos subterráneos a causa de la extracción de petróleo y gas, en el proceso de fracturación hidráulica “fracking”*. https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/14531/2/RAE_Camilo_Andres_Venegas.pdf
- Verruijt, A. (2016). *Theory of groundwater flow*. MacMillan International Higher Education.
- WHO/UNICEF Joint Monitoring Programme for Water Supply, S. and H. (JMP). (2020). *Progress on household drinking water, sanitation and hygiene 2000–2020: Five years into the SDGs*.

FUNDAMENTOS DE LA CONTAMINACIÓN DE AGUAS SUBTERRANEAS

Dentro de esta obra se enmarcan las razones principales por las que el agua subterránea es contaminada: cuáles son los mecanismos que hacen parte de este proceso, así como los múltiples métodos utilizados para la recuperación de este recurso. Esta temática de estudio es de suprema importancia para el desarrollo del territorio y la gestión del recurso hídrico, los cuales abarcan ejes importantes en los planes de desarrollo.

Inicia con una breve introducción sobre la importancia de este recurso; abarca el tema del ciclo hidrológico, sus bases, conceptos y metodología de análisis; posteriormente continúa con el monitoreo, control y la contaminación de las aguas subterráneas, teniendo en cuenta múltiples aspectos culturales, sociales y políticos. Finaliza con los diferentes problemas ambientales y económicos que se desencadenan con la mala gestión, así como los diferentes principios para la gestión sostenible.

Dirigido principalmente a ingenieros civiles e ingenieros ambientales, así como todas las personas que laboren dentro de la gestión de este recurso; sin embargo, está desarrollado para que cualquier persona pueda entenderlo fácilmente. Puede ser utilizada en múltiples materias relacionadas.

Incluye

- ▶ Ciclo hidrológico.
- ▶ Principales problemas ambientales ocasionados por una mala gestión.
- ▶ Métodos para la recuperación del agua subterránea.
- ▶ Principios para una gestión sostenible.

Nelson Javier Cely Calixto

Ph. D.(c) en Ingeniería Sanitaria y Ambiental, magíster en Obras Hidráulicas, especialista en Agua y Saneamiento Ambiental e Ingeniero Civil. Docente tiempo completo UFPS. Investigador Junior del grupo de investigación HYDROS. Consultor con experiencia de más de 15 años en proyectos de ingeniería hidráulica y sanitaria.

Gustavo Adolfo Carrillo Soto

Doctor en Hidrología, magíster en Recursos Hídricos e Ingeniero Civil. Docente e investigador de la UFPS. Director de la Maestría en Ingeniería de Recursos Hidráulicos. Director del grupo de investigación HYDROS. Consultor con más de 20 años de experiencia en proyectos de ingeniería hidráulica, hidrología y climatología.

Carlos Alexis Bonilla Granados

Ph. D. (c) Ingeniería del Agua y Medioambiente, magíster en Tecnologías para el Manejo de Aguas y Residuos, especialista en Patología de la Construcción y en Aguas y Saneamiento Ambiental e Ingeniero Civil. Docente de la UniPamplona. Investigador de los grupos de investigación Etenoha, HYDROS y Fluing. Consultor en proyectos de saneamiento básico.



ETENOHA
Grupo de Investigación



Universidad Francisco de Paula Santander

Vigilada Mineducación



ISBN 978-958-503-433-4



e-ISBN 978-958-503-434-1