



Secretaría de Infraestructura  
y Política Hídrica  
Ministerio del Interior,  
Obras públicas y Vivienda  
Presidencia de la Nación

**COHIFE**  
CONSEJO HÍDRICO FEDERAL



# APUNTES SOBRE CONTAMINACIÓN Y CALIDAD DEL AGUA VULNERABILIDAD DE ACUÍFEROS

**Compiladores | Dr. Carlos Juan Schulz  
Dr. Rodolfo Fernando García**

**SECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA Y POLÍTICA HÍDRICA  
CONSEJO HÍDRICO FEDERAL**

PLAN NACIONAL FEDERAL DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO 075/2011  
“COMPORTAMIENTO Y EVOLUCIÓN ESPACIO-TEMPORAL DEL ARSÉNICO  
EN AGUAS SUBTERRÁNEAS DE LA REPÚBLICA ARGENTINA”

**Universidad Nacional de La Pampa  
Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires**

1 DE SEPTIEMBRE DE 2018



*Esta publicación cuenta con el apoyo de la Secretaría de Infraestructura y Política Hídrica y del Consejo Hídrico Federal, siendo la información de exclusiva responsabilidad de los compiladores.*

---

## INDICE GENERAL

<b>MÓDULO 1.</b> El Agua en la naturaleza. El Ciclo del Agua. Precipitación. Evapotranspiración. Escurrimiento fluvial. Infiltración. Tipos de Aguas en el Suelo. _____	7
1.1. El Agua en la Naturaleza _____	7
1.2. El Ciclo del Agua _____	7
1.3. Precipitación _____	10
1.4. Evapotranspiración _____	11
1.5. Escurrimiento Fluvial _____	16
1.6. Infiltración _____	18
1.7. Tipos de Agua en el Suelo _____	22
<b>MÓDULO 2.</b> Agua Subterránea. Tipos de agua por su posición en el perfil. Características hidráulicas en las diferentes zonas del perfil. Propiedades de los sedimentos portadores (porosidad, retención específica). Permeabilidad. Transmisividad. Concepto de acuífero. Condiciones del medio (isotropía, anisotropía, homogeneidad, heterogeneidad). Relación entre el agua superficial y el agua subterránea. Distribución de la hidrosfera. _____	26
2.1. El Agua Subterránea _____	26
2.2. Características Hidráulicas en las Zonas del Perfil del Suelo _____	28
2.3. Propiedades Físicas del Medio de Circulación _____	29
2.4. Concepto de Acuífero _____	33
2.5. Flujo en Medios Porosos _____	36
2.6. Parámetros Hidrogeológicos de los Reservorios de Agua Subterránea _____	40
2.7. Hidrodinámica _____	45
<b>MÓDULO 3.</b> Hidrogeoquímica. Calidad del Agua Subterránea. Calidad para distintos usos (agrícolas, ganadero, industrial, recreativo, etc.). Origen y características hidrogeoquímicas de los principales constituyentes disueltos de las aguas subterráneas. Representación gráfica de los resultados. _____	49
3.1. Hidrogeoquímica _____	49
3.2. Calidad del Agua Subterránea _____	49
3.3. Calidad Para Distintos Usos _____	53
3.4. Representación Gráfica de los Datos Químicos _____	62
<b>MÓDULO 4.</b> Contaminación. Los contaminantes y su comportamiento en el subsuelo: Principales contaminantes: metales pesados, compuestos orgánicos, fluidos orgánicos no miscibles, pesticidas, otros contaminantes, bacterias y virus. Procesos que afectan el transporte de los contaminantes: procesos geoquímicos, procesos físicos, procesos biofísicos. Fuentes más usuales de contaminación. Contaminación en aguas superficiales. Metodología de detección. Índices de calidad. _____	68
4.1. Contaminación _____	68
4.2. Los Contaminantes y su Comportamiento en el Subsuelo _____	69
4.3. Procesos que Afectan el Transporte de Contaminantes _____	70

---

---

4.4.	Fuentes Usuales de Contaminación _____	73
4.5.	Contaminación en Aguas Superficiales _____	73
<b>MÓDULO 5.</b> Concepto de vulnerabilidad. Metodologías para la evaluación de la vulnerabilidad: Método DRASTIC. Método DIOS. Concepto de Mapa de vulnerabilidad. Aplicación de la metodología. Detección de la contaminación. La contaminación por hidrocarburos. _____		
5.1.	Concepto de Vulnerabilidad _____	80
5.2.	Metodologías para Evaluación de Vulnerabilidad _____	81
5.3.	Concepto de Mapa de Vulnerabilidad _____	93
5.4.	La Contaminación por Hidrocarburos _____	100
<b>MÓDULO 6.</b> La protección de los Recursos Hídricos Subterráneos. Zonas de Protección. Aplicaciones de la investigación hidrogeoquímica. Casos de estudio. Análisis y discusión sobre la problemática del Arsénico, Flúor y Nitratos, casos de estudios. _____		
6.1.	La Protección de los Recursos Hídricos Subterráneos _____	102
6.2.	Zonas de Protección de Pozos (PPP) _____	102
6.3.	Métodos de Delimitación de PPP _____	108
<b>MÓDULO 7.</b> Normas y legislaciones, nacionales e internacionales sobre preservación ambiental. Inconvenientes para su aplicabilidad. Principios y medidas. Perímetros de protección. Monitoreo. Grado de vulnerabilidad; métodos para su determinación; ejemplos. Ejemplos locales y extranjeros de deterioro de acuíferos por sobreexplotación y contaminación. _____		
7.1.	Normas y Legislaciones _____	115
7.1.	Naturaleza Jurídica _____	117
7.3.	Gestión de Aguas Subterráneas _____	124
7.4.	Consorcio de Usuarios _____	131
7.5.	Régimen del Agua en el Orden nacional y Provincial _____	132
7.6.	Manejo de Cuencas Interprovinciales, Internacionales e Iterjuridiccionales _____	133
6.	<b>BIBLIOGRAFÍA</b> _____	138

---

## Índice de Tablas

Tabla 1: Porosidad total y eficaz de diversos materiales (Johnson, 1967; Davis, 1969; Schoeller, 1962 y Ward, 1967).	30
Tabla 2: Clasificación de los sedimentos en función de su permeabilidad (Custodio y Llamas, 1983).	32
Tabla 3: Clasificación de los terrenos y acuíferos en función de su permeabilidad (Custodio y Llamas, 1983).	32
Tabla 4: Composición química del agua subterránea.	50
Tabla 5: objetivos de calidad en función de los usos del agua (FCIHS, 2009).	53
Tabla 6: sensibilidad de los cultivos a las concentraciones de boro en el agua de riego.	60
Tabla 7: Clasificación del agua para consumo bovino.	61
Tabla 8: Principales métodos para determinación de vulnerabilidad de acuíferos.	82
Tabla 9: Método Drastic para la determinación del índice de vulnerabilidad.	83
Tabla 10: Puntaje y rangos asignados al parámetro D, la profundidad del acuífero.	85
Tabla 11: Puntaje y rangos asignados al parámetro R, recarga neta.	85
Tabla 12: Puntaje y rangos asignados al parámetro A, tipo de acuífero.	85
Tabla 13: Puntaje y rangos asignados al parámetro S, tipo de suelo.	86
Tabla 14: Puntaje y rangos asignados al parámetro T, pendiente.	86
Tabla 15: Puntaje y rangos asignados al parámetro I, impacto de la zona vadosa.	86
Tabla 16: Puntaje y rangos asignados al parámetro C, conductividad hidráulica.	87
Tabla 17: Valores de los índices de vulnerabilidad y rangos para la clasificación de la vulnerabilidad para el método DRASTIC (Martínez et al., 1998).	87
Tabla 18: Componentes del índice GOD, sus características y valoraciones, así como las secuencias lógicas de ocurrencia.	88
Tabla 19: Categorías de peligro potencial para el agua subterránea debido a saneamiento "in situ".	94
Tabla 20: Principales sustancias contaminantes relacionadas con la actividad industrial (Meinck et al., 1970 y otros, modificado, en Fcihs, 2009).	95
Tabla 21: Principales actividades que potencialmente generan una carga contaminante al subsuelo.	96
Tabla 22: Características químicas e índices para tipos comunes de actividad industrial (Foster e Hirata, 1991).	97
Tabla 23: Categorías de peligro potencial para el agua subterránea debido a actividades industriales.	98
Tabla 24: Comportamiento de distintos tipos de fertilizantes en el suelo.	98
Tabla 25: Características de los principales grupos de pesticidas agrícolas (Foster e Hirata, 1991).	99
Tabla 26: Valores de capacidad de retención del terreno en función del tipo de suelo.	100
Tabla 27: Valores de contenido de petróleo en la franja capilar en función del tipo de suelo.	100
Tabla 28: Métodos para definir PPP (USEPA, 1988 en Hirata y Reboucas, 1999).	106
Tabla 29: Relación entre los criterios que pueden emplearse en la delimitación de PPP y los procesos físicos que controlan (ITG, 1999).	107
Tabla 30: Poder depurador del suelo en el recubrimiento (Suelo y zona no saturada).(Rehse,1977).	113
Tabla 31: Poder depurador del suelo en la zona saturada (Modificado de Rehse, 1977).	114

---

## Índice de Ilustraciones

Ilustración 1: Esquema del ciclo hidrológico en la tierra (Fetter, 1988).	8
Ilustración 2: Fases del ciclo hidrológico.	8
Ilustración 3: Esquema teórico de salidas del agua subterránea.	10
Ilustración 4: Acuífero libre, mostrando el nivel freático (Fetter, 1988).	33
Ilustración 5: Acuífero libre. En la zona no saturada existe una “falsa freática” o acuífero colgado (Fetter, 1988).	34
Ilustración 6: Acuífero confinado (Fetter, 1988).	34
Ilustración 7: Acuífero confinado, mostrando pozos artesianos y surgentes (Fetter, 1988).	35
Ilustración 8: Acuíferos libre, semiconfinado y confinado (Fetter, 1988).	35
Ilustración 9: Experimento de Darcy.	36
Ilustración 10: Esquema del movimiento del agua subterránea en distintas situaciones morfológicas.	37
Ilustración 11: Esquema del movimiento del agua subterránea en distintas situaciones morfológicas.	38
Ilustración 12: Representación gráfica del concepto de permeabilidad darciana.	40
Ilustración 13: Representación gráfica del concepto de transmisividad.	41
Ilustración 14: Representación gráfica del concepto de coeficiente de almacenamiento.	42
Ilustración 15: Superficies equipotenciales debido a flujo horizontal.	46
Ilustración 16: Superficies equipotenciales debido a flujo con componente vertical.	46
Ilustración 17: Determinación de las líneas de flujo y dirección de movimiento del agua por el problema de tres puntos.	47
Ilustración 18: Líneas de flujo y dirección de movimiento del agua en distintas situaciones hidrogeológicas.	48
Ilustración 19: Líneas de flujo y dirección de movimiento del agua en distintas situaciones hidrogeológicas.	48
Ilustración 20: Contaminación de acuífero debido a falta de sistemas de saneamiento.	94
Ilustración 21: Contaminación de acuífero debido a vertedero de residuos sólidos urbanos.	95
Ilustración 22: Contaminación de acuífero debido a actividad industrial.	96
Ilustración 23: Concepto y esquema de perímetros de protección.	104
Ilustración 24: Contaminación del agua en un pozo por efecto de una fosa séptica.	125
Ilustración 25: Contaminación del agua subterránea por lixiviados de un vertedero de residuos urbanos.	127
Ilustración 26: Zonas de protección de una captación (pozo).	129
Ilustración 27: explotación intensiva del agua subterránea.	131

## Índice de Gráficos

Gráfico 1: Normas para determinar las clases aptas, utilizables y no aptas para el riego de plantaciones. _	60
Gráfico 2: Representación de datos químicos en diagrama de barras o columnar. _____	62
Gráfico 3: Representación de datos químicos en diagrama circular. _____	63
Gráfico 4: Representación de datos químicos en diagrama de polígonos. _____	63
Gráfico 5: Representación de datos químicos en diagrama triangular (Diagrama Pipe – Hill – Langelier). __	64
Gráfico 6: Representación de datos químicos en diagrama triangular (Diagrama Durov). _____	65
Gráfico 7: Representación de datos químicos en diagrama rectangular (Diagrama Wilcox). _____	66
Gráfico 8: Representación de datos químicos en diagrama lineal. _____	67
Gráfico 9: Variación del ISQA con la temperatura. _____	75
Gráfico 10: Variación del ISQA con el consumo de oxígeno. _____	76
Gráfico 11: Variación del ISQA con la materia en suspensión. _____	76
Gráfico 12: Variación del ISQA con el oxígeno disuelto. _____	77
Gráfico 13: Variación del ISQA con la conductividad. _____	77
Gráfico 14: Clasificación de la calidad de las aguas y sus usos orientativos (Según la relación ISQA/IAQA). _	78
Gráfico 15: Riesgo de Contaminación. _____	79

## Índice de Figuras

Figura 1: Tipos de agua en el suelo desde el punto de vista físico. _____	23
Figura 2: Relación entre espacio poroso ocupado por agua y aire en diferentes estados del suelo. _____	24
Figura 3: Tipos de aguas presentes en el suelo a medida que se incrementa la humedad. _____	24
Figura 4: Contenido de agua en el suelo en función de la textura. _____	25
Figura 5: Distribución del agua en el suelo y subsuelo (Castany, 1971). _____	28
Figura 6: El agua en el suelo y capacidad máxima de retención. _____	28
Figura 7: Procesos de atenuación de contaminantes en el agua subterránea (Foster, 1987, modificado de Golwer, 1983). El grosor de la línea correspondiente indica la importancia relativa de los procesos en el suelo, y sobre, en y bajo el nivel freático. _____	73
Figura 8: Sistema GOD para evaluación del índice de Vulnerabilidad de un acuífero (Foster, 1987). _____	89
Figura 9: Riesgo de Contaminación. _____	92
Figura 10: Área de influencia y área de alimentación en un acuífero con gradiente hidráulico en régimen estacionario (Modificado de USEPA, 1987 en Moreno Merino et al., 1991). _____	111

**MÓDULO 1.** El Agua en la naturaleza. El Ciclo del Agua. Precipitación. Evapotranspiración. Escurrimiento fluvial. Infiltración. Tipos de Aguas en el Suelo.

---

### **1.1. EL AGUA EN LA NATURALEZA**

La Hidrogeología es aquella parte del ciclo del agua que corresponde al almacenamiento, circulación y distribución de las aguas terrestres en la zona saturada de las formaciones geológicas, teniendo presente las propiedades físicas y químicas, sus interacciones con el medio físico y biológico y sus reacciones a la acción antrópica.

La Hidrogeología es una ciencia interdisciplinaria que tiene como finalidad establecer las propiedades hidráulicas de los yacimientos de aguas subterráneas, sus características físicas, biológicas y químicas, la forma de localizarla, extraerla y manejarla, como así también preservarla, teniendo presente el ambiente y la historia geológica de una región.

### **1.2. EL CICLO DEL AGUA**

El concepto de ciclo hidrológico involucra el movimiento o transferencia de las masas de agua desde un lugar a otro y desde un estado a otro. El movimiento permanente del ciclo se debe fundamentalmente al "sol" que proporciona la energía suficiente para elevar el agua del suelo o de un cuerpo de agua superficial, al evaporarla. Otro factor de importancia es la fuerza de la gravedad, que permite que el agua condensada precipite y que una vez caída sobre la superficie, escurra hacia las zonas más deprimidas (Custodio & Llamas, 1996).

El ciclo del agua se inicia cuando una parte del vapor de agua de la atmósfera se condensa y se originan las precipitaciones en forma de lluvia o nieve. Se debe tener presente que no toda la lluvia alcanza la superficie de la tierra, ya que una parte se vuelve a evaporar inmediatamente durante su caída y otra es retenida o interceptada por la vegetación o por las superficies de edificios, carreteras, etc., y vuelve a la atmósfera en forma de vapor. De aquella agua que alcanza la superficie del terreno, una parte es retenida en pequeñas depresiones (charcos y aguadas) y en gran proporción retorna casi inmediatamente a la atmósfera por evaporación. Otra parte circula sobre la superficie y se concentra en pequeñas arroyadas y líneas de drenaje, que se reúnen en arroyos y luego en los ríos, constituyendo el agua de escurrimiento superficial, que tiene como destino final un lago o el mar, desde donde será evaporada o bien, se infiltrará en el terreno por donde circula.

Por último, hay una tercera parte de la precipitación que penetra bajo la superficie del terreno, conocida como infiltración, que se realiza a través de canales, fisuras y poros del suelo, a los que va llenando progresivamente. Un cierto volumen del agua infiltrada no desciende hasta la zona saturada o del agua subterránea propiamente dicha, sino que es retenida en los que se conoce como zona no saturada o zona de humedad del suelo, desde donde vuelve a la atmósfera por evaporación y transpiración de las plantas. Establecer la cantidad que corresponde a una u otra es tarea muy difícil, por lo que es común que siempre se aplique el término de evapotranspiración para el conjunto del fenómeno (Fetter, 1988).

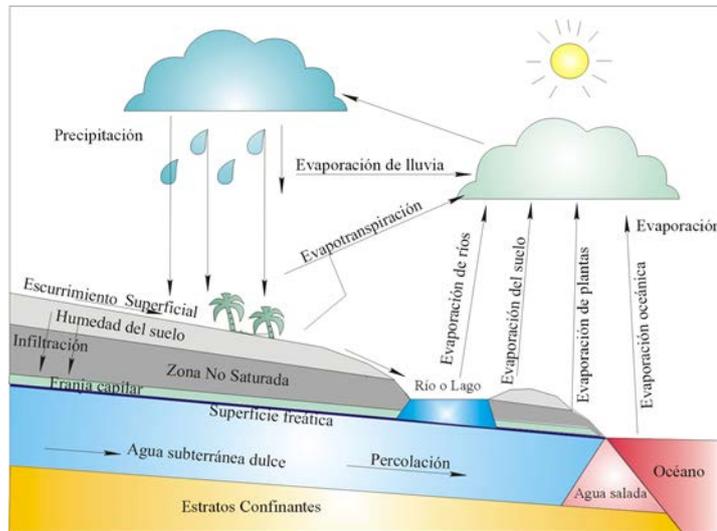


Ilustración 1: Esquema del ciclo hidrológico en la tierra (Fetter, 1988).

El movimiento del agua a través de un terreno se caracteriza por su relativa lentitud y su origen se debe fundamentalmente a la acción gravitatoria. En la zona no saturada, existen otras fuerzas (especialmente la tensión superficial) que originan muchas veces la presencia de una faja más o menos continua llamada faja capilar, desde donde el agua puede retornar a la superficie a través de la evaporación, transpiración o ambos fenómenos a la vez. Otras veces el agua subterránea alimenta directamente a los cauces fluviales, origina manantiales, o entrega sus caudales directamente al mar.

Excepto en las cuencas endorreicas de las zonas áridas o semiáridas (como las existentes en la Puna Argentina), la mayor parte de las aguas del escurrimiento fluvial y subterráneo terminan, más tarde o más temprano en el mar, por lo que se debe considerar a los océanos como la fase final del ciclo hidrológico, ya que de ellos vuelve a evaporarse y se re - inicia nuevamente todo el proceso.

El ciclo hidrológico es un mecanismo en que una partícula de agua evaporada desde el océano vuelve a éste luego de pasar por las etapas de precipitación y escurrimiento fluvial y subterráneo, caracterizándose por que este movimiento puede tener una marcada irregularidad en el espacio y en el tiempo, además de las interrupciones que pueden suceder en cualquiera de las etapas del ciclo global. Como es de suponer, en un ciclo se puede considerar a todas las fases que forman parte de él comenzando desde cualquier punto o lugar; sin embargo lo más intuitivo es comenzar con la "materia prima" del mismo que es la Precipitación y a partir de allí, considerar qué caminos puede seguir el agua que cae en forma de lluvias. Estos caminos pueden ser:

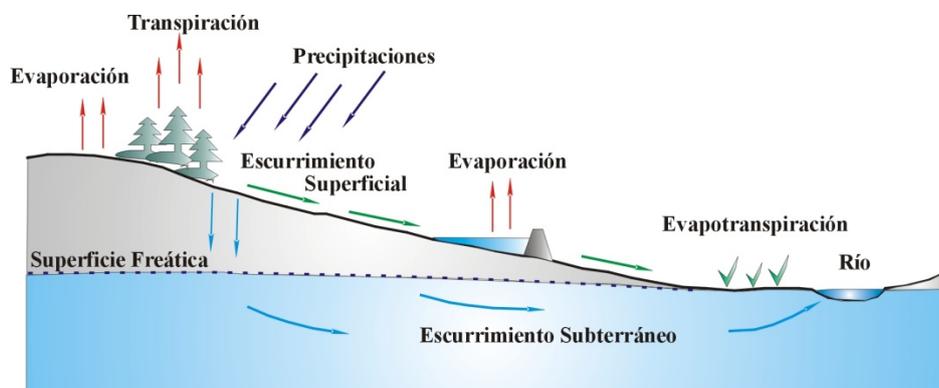


Ilustración 2: Fases del ciclo hidrológico.

- a) Evaporación: Una vez que el agua de lluvia alcanzó la superficie terrestre; una parte se evapora desde la superficie del suelo o bien directamente desde el follaje de los árboles. A este último fenómeno se le denomina interceptación, y en lluvias de corta duración sobre zonas boscosas éstas pueden devolver a la atmósfera una gran parte del agua precipitada sin haber alcanzado el suelo.
  
- b) Infiltración: El agua que se infiltra puede, a su vez, seguir varios caminos:
  - 1. Evaporación: El agua se evapora desde el suelo húmedo, sin relación con la posible vegetación que se desarrolle sobre el suelo en cuestión.
  - 2. Transpiración: Las raíces de las plantas absorben el agua infiltrada en el suelo; quedando una parte retenida para el aprovechamiento de las especies vegetales, mientras que la mayor parte es transpirada.
  - 3. Ecurrimiento Subsuperficial o Hipodérmico: Corresponde a aquella parte del agua infiltrada que tras un corto recorrido lateral y antes de llegar a la superficie freática, vuelve nuevamente a la superficie.
  - 4. Si no es evaporada ni atrapada por las raíces de las plantas, la fuerza de la gravedad continuará actuando sobre las moléculas de agua haciendo que éstas continúen migrando hacia abajo, hasta alcanzar la superficie freática. Allí, aún puede ser una parte atrapada por las raíces de las plantas freatófitas, de raíces muy profundas y que a diferencia de otras plantas, buscan agua del medio saturado.
  - 5. Finalmente, el agua restante da lugar al Ecurrimiento Subterráneo.
  
- c) Ecurrimiento Superficial: El agua de las precipitaciones que no es evaporada ni infiltrada, escurre libremente por la superficie terrestre bajo la influencia de la gravedad. Esta agua a su vez puede seguir los siguientes caminos:
  - 1. Parte es evaporada desde la superficie del curso fluvial, lagos y embalses.
  - 2. Otra parte puede quedar retenida como nieve o hielo en lagos o embalses. Esta parte se conoce con el nombre de Ecurrimiento Superficial Diferido.
  - 3. Finalmente una parte es el Ecurrimiento Superficial Rápido que sigue su camino a un nivel de base local y, finalmente, al mar.

Se conoce con el nombre de Ecurrimiento Directo a aquella porción que llega a los cauces de agua superficiales en un periodo de tiempo corto tras la precipitación que le dio origen. Normalmente, engloba el Ecurrimiento Superficial y el Ecurrimiento Subsuperficial. Son imposibles de distinguir ya que una gran parte de lo que parece Ecurrimiento Superficial (por el aumento de los caudales que sigue a las precipitaciones) ha estado infiltrada subsuperficialmente.

Se denomina Ecurrimiento Básico al volumen de agua que alimenta los cauces superficiales durante la época de estiaje (durante los periodos sin precipitaciones). Este concepto engloba al Ecurrimiento Subterráneo y al Ecurrimiento Superficial Diferido.

Como se ha visto, se sabe con mayor o menor grado de certeza cual son los posibles caminos que pueden seguir el agua evaporada, el agua del escurrimiento superficial y el agua infiltrada. Para completar la visión general del ciclo del agua es necesario conocer como es el largo camino que sigue el agua subterránea en el subsuelo.

El agua que ha alcanzado la zona saturada, circulará por el medio (rocas porosas, fisuradas o sedimentos) siguiendo los gradientes hidráulicos regionales; es decir la pendiente hidráulica (el término involucra el concepto de que el agua se mueve desde una zona de mayor nivel energético hacia otra de menor valor). Este camino, desde su ingreso hasta su salida puede ser de unos cuantos metros, cientos y aún miles de metros o kilómetros, durante un periodo que puede variar desde unos meses hasta miles de años. Esta salida al exterior puede ser:

1. Artificialmente, a través de pozos u otras obras de captación.
2. Naturalmente, a través de un manantial.
3. Naturalmente, a través de los procesos de evapotranspiración, por las plantas freatófitas o por que la superficie freática se encuentra muy cerca de la superficie del terreno.
4. Naturalmente, luego de entregar sus aguas a un curso fluvial.
5. Naturalmente, entregando sus aguas al mar, lago, salar, etc.

De todas estas formas en que el agua subterránea puede manifestarse nuevamente hacia el exterior, las dos más importantes son las aportaciones hacia los cursos fluviales y hacia el mar. Así, en el primer caso, las aguas subterráneas pueden dar origen a Escurrimiento Fluvial cuando existe un comportamiento efluente de un curso fluvial, es decir que recibe aportes del agua subterránea. En el segundo caso, en las zonas costeras y como se verá más adelante, la afluencia de agua subterránea juega un papel preponderante en el equilibrio de la interfase agua dulce - agua salada de las regiones costeras.

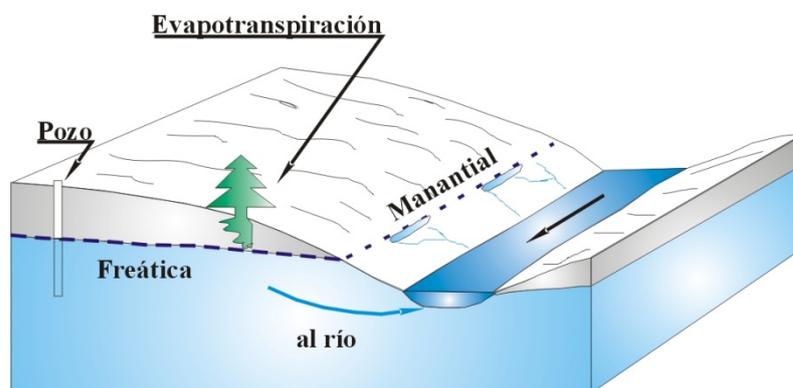


Ilustración 3: Esquema teórico de salidas del agua subterránea.

### 1.3. PRECIPITACIÓN

Las precipitaciones agrupan todas las aguas meteóricas recogidas en una cuenca hidrográfica o área determinada. Se presentan en forma líquida (lluvia, niebla, rocío) o sólida (nieve, granizo). Esta cantidad de agua así precipitada podrá o no enriquecer los embalses subterráneos. Cuando el agua, en estado líquido o sólido, llega a la superficie de la Tierra, se dice que ha precipitado. El vapor de agua contenido en la masa de aire, a consecuencia de los cambios de presión y temperatura y del movimiento de estas masas, ayudado, en ocasiones, por minúsculos núcleos de condensación y material sólido en suspensión, se reúne en gotas de agua o en cristales de hielo y cae venciendo las resistencias que se oponen, hasta llegar a la superficie terrestre. La precipitación sólida amorfa es el granizo y cristalizada, se denomina nieve. La precipitación es un fenómeno de tipo discontinuo y su distribución tanto en el espacio como en el tiempo es sumamente variable. Según los fenómenos meteorológicos que las originan o las acompañan, hay tres tipos principales de precipitaciones:

1. Precipitación convectiva: Originada por el calentamiento de las masas de aire próximas a la superficie del suelo que ha recibido una fuerte insolación. Suelen ser las tormentas locales propias de la estación cálida.
2. Precipitación frontal o ciclónica: Tienen origen en las superficies de contacto de masas de aire (frentes) con temperatura y humedad diferentes. Pueden ser de frentes cálidos o frío.
3. Precipitación orográfica o lluvia de relieve: Propias de zonas montañosas; por el enfriamiento y consiguiente condensación de vapor de agua en las masas de aire que al ser interrumpidas por una ladera ascienden por ella.

A pesar de haber efectuado esta distinción se debe advertir que, en general, las precipitaciones estarán originadas por combinaciones de dos o de los tres tipos mencionados anteriormente.

### 1.3.1. Medición de Precipitaciones

La lluvia se mide por la altura que alcanzaría sobre una superficie ideal plana y horizontal, antes de sufrir pérdidas por evaporación, infiltración y escurrimiento superficial. Los aparatos destinados a cuantificar la cantidad de agua caída son los pluviómetros (pluviómetro ordinario, totalizador y pluviógrafos). Para la medida de la nieve pueden emplearse los pluviómetros ordinarios o totalizadores con el aditivo de sustancias que facilite su fusión. Obteniendo de esta manera, el equivalente en agua de la nieve. Se debe mencionar también que la evaluación del rocío puede ser muy importante, especialmente en aquellas regiones de climas áridos y semiáridos. Los métodos empleados son artificiosos, como por ejemplo sucesivas pesadas de materiales adecuados expuestos a la intemperie.

### 1.3.2. Cálculo de la lámina de agua caída en una cuenca

Se entiende por lámina de agua caída en una zona, a la altura que alcanzaría el agua sobre la superficie de una cuenca, considerando que ésta permanece en ella sin ningún tipo de pérdidas (sin escurrir, evaporarse o infiltrarse). Su valor resulta del cociente entre el volumen precipitado ( $m^3$ ) y la superficie ( $m^2$ ) de la cuenca y se expresa en milímetros. Con este procedimiento se determina el valor P de la ecuación del balance global. Los procedimientos utilizados para su cálculo son:

1. Método de la media aritmética
2. Método de los polígonos de Thiessen
3. Método de las curvas Isohietas

## 1.4. EVAPOTRANSPIRACIÓN

La evapotranspiración es resultado del proceso por el cual el agua cambia de estado líquido a gaseoso y directamente, o a través de las plantas vuelve a la atmósfera en forma de vapor; es decir; la evapotranspiración no es un fenómeno distinto a la evaporación y transpiración, sino la sumatoria de los dos procesos y el término, sólo es aplicable correctamente a una determinada área de terreno cubierta por vegetación. Cuando ésta no existe, únicamente podrá hablarse de evaporación. Por el contrario, en condiciones naturales, y aunque el fenómeno tiene sus características propias, no es posible la ocurrencia exclusiva de transpiración. Justamente, la dificultad en la medida por separado de estas variables ha obligado a introducir el concepto de evapotranspiración (Evp). Desde el punto de vista práctico, dado que la evapotranspiración depende entre otros, de dos factores muy variables y difíciles de medir: el contenido de humedad en el suelo y el desarrollo vegetal de la planta, fue necesario introducir dos conceptos:

- ✓ Evapotranspiración Potencial: Representa la cantidad total de agua que sería evapotranspirada, si las reservas fueran suficientes para compensar las pérdidas máximas. Se supone un desarrollo vegetal óptimo y un suelo en su capacidad de campo máxima.
- ✓ Evapotranspiración Real: Es la que se produce en las condiciones naturales de humedad. Cuando la humedad del suelo es elevada, puede llegar a ser igual que la potencial.

#### 1.4.1. Factores que influyen en la Evapotranspiración

La cantidad de agua evapotranspirada está condicionada a la acción conjunta de varios factores:

##### 1. Físicos

- ✓ Atmosféricos: Determina el poder evaporante de la atmósfera. Las variables que intervienen para poder determinar ese poder evaporante son: temperatura, velocidad y turbulencia del viento, déficit higrométrico y presión atmosférica.
- ✓ Hidrológicos: Determinan el estado de la superficie evaporante, dependiendo por lo tanto de los caracteres físicos de los cuerpos de agua y del suelo: granometría, porosidad, naturaleza litológica, cobertura vegetal y riqueza en agua.

##### 2. Fisiológicos

- ✓ Especie vegetal, edad, desarrollo del follaje, profundidad y densidad de las raíces, carácter perenne, etc.
- ✓ De los factores mencionados, hay dos que son de suma importancia; la temperatura media y la humedad. Estos permiten, como se verá más adelante, estimar valores de evapotranspiración por métodos relativamente simples.

#### 1.4.2. Métodos de medición y cálculo

Los métodos existentes se pueden clasificar en cuatro grandes grupos:

##### 1. Mediciones directas

Son generalmente engorrosos, pero necesarios desde el punto de vista de la calibración de las fórmulas utilizadas en los restantes métodos. Los más importantes son:

- a) Medición de la evaporación (tanques, evaporímetros, etc.).
- b) Evapotranspirómetros.
- c) Lisímetros.
- d) Resoluciones del balance hidrológico (fórmula de balance).

Los métodos a y b son adecuados para medir la evapotranspiración potencial en cambio, c y d se aproximan a las condiciones naturales (evapotranspiración real).

##### 2. Métodos basados en teorías físicas

Para los fines hidrogeológicos son muy complicados y no se utilizarán, son:

- a) Método aerodinámico global (basado en la capacidad del aire para el transporte de vapor de agua).

- b) Método aerodinámico basado en el perfil de humedad y viento.
- c) Método basado en la medida del flujo turbulento de humedad.
- d) Balance de energía.

Métodos semiempíricos: A raíz de que los métodos basados en teorías físicas necesitan de mediciones meteorológicas especiales, Penman (1948 in Custodio & Llamas, 1996) ha combinado los métodos a y d, mencionados en el punto anterior, de tal forma que los datos que se emplean provienen de estaciones climatológicas normales. La expresión matemática de la fórmula de Penman es:

$$E = \frac{(\Delta/\gamma) R_n + E_a}{\Delta/\gamma + 1}$$

E = evaporación diaria en mm.

$\gamma$  = constante psicométrica, en mm de Hg/°C = 0,485 mm de Hg/°C.

$\Delta$  = pendiente de la curva de tensión saturante para la temperatura del aire en mm Hg/°C.

Rn = Evaporación en mm/día

$$R_n = R_N / C_1$$

$$R_N = R_i (1 - r) - R_e$$

RN = radiación neta en cal/cm<sup>2</sup> día

Re = radiación reflejada en onda larga en cal/cm<sup>2</sup>.día

$$R_e = 1440^{\theta} T_a^4 (0,56 - 0,092 \sqrt{e_d}) (0,1 + 0,9 n/N)$$

$\sigma$  = constante de Stefan - Boltzman =  $\theta = 0,826 \cdot 10^{-10}$  cal/cm<sup>2</sup> min oK<sup>4</sup>

Ta = temperatura del aire en °K

C<sub>1</sub> = calor de vaporización necesario para evaporar 1 mm de agua por cada cm<sup>2</sup> de superficie.

$$E_a = 0,35 (0,5 + 0,54 V_2) (e_a - e_d)$$

en mm/día

e<sub>a</sub> = tensión de vapor saturante a la temperatura del aire en mm de Hg.

V<sub>2</sub> = velocidad del viento a 2 metros de altura sobre la superficie evaporante en m/seg.

$$e_d = e_a H_r / 100$$

e<sub>d</sub> = tensión de vapor en el aire en mm de Hg.

Los datos necesarios son:

$\lambda$  = Latitud en grados sexagesimales

T = Temperatura en grados centígrados

V<sub>2</sub> = Velocidad del viento a 2 metros de altura sobre la superficie evaporante en m/seg.

H<sub>r</sub> = Humedad relativa (adimensional)

Para aplicar la fórmula de Penman, también es necesario conocer la radiación global, radiación incidente, latitud del lugar, número de horas de insolación y el número máximo de horas de insolación, según la fecha y el lugar. Para conocer cada uno de estos aspectos se puede aplicar la siguiente expresión:

$$R_i = R_a \left( 0,29 \cdot \cos \lambda + 0,52 \frac{n}{N} \right)$$

$R_i$  = radiación global incidente sobre una superficie horizontal a nivel del suelo, en  $\text{cal/cm}^2 \cdot \text{día}$ ,

$R_a$  = intensidad teórica de radiación incidente, sobre una superficie horizontal suponiendo que no existe atmósfera, en  $\text{cal/cm}^2 \cdot \text{día}$ .

$\lambda$  = latitud del lugar.

$n$  = número de horas de insolación medidas con heliógrafo

$N$  = número máximo de horas de insolación según latitud y fecha.

Por último, si se ha empleado un albedo correspondiente a una superficie de agua libre ( $r = 0,05$ ), la evapotranspiración potencial mensual será:

$$ETP = f d E$$

$f$  = coeficiente reductor correspondiente al mes

$d$  = número de días del mes

$E$  = evaporación en superficie de agua libre en  $\text{mm/día}$  determinada en la expresión original de Penman.

Métodos empíricos: Son los más útiles para los fines del balance hidrológico si el detalle del estudio no exige mayor precisión. Desde el momento que las otras variables que intervienen en el mismo no se calculan por métodos rigurosamente exactos. Están basados en los elementos principales que inciden en la evapotranspiración; tal como temperatura (en términos de temperatura media, radiación incidente, heliofanía, etc.) y precipitación.

Fórmula de Thorthwaite (Evapotranspiración Potencial): Este autor utiliza como variable primaria para el cálculo, la media mensual de las temperaturas medias del aire. Con ello calcula un índice de calor mensual con la siguiente fórmula:

$$i = \left( \frac{t}{5} \right)^{1,514}$$

$i$  = índice de calor mensual

y halla el valor del índice de calor anual  $I$ , como igual a la sumatoria de  $i$  de tal forma que  $I = \sum i$ , siendo éste valor la suma de los doce índices mensuales del año considerado. Para meses teóricos de 30 días, con 12 horas diarias de sol, formula la siguiente expresión:

$$EP = 16 \left( \frac{10t}{I} \right)^a$$

$EP$  = Evapotranspiración potencial en  $\text{mm/mes}$

$t$  = temperatura media mensual del mes en  $^{\circ}\text{C}$ .

$I$  = Índice de calor anual =  $\sum i$

$$a = 675 \cdot 10^{-9} \cdot I^3 - 771 \cdot 10^{-7} \cdot I^2 + 1972 \cdot 10^{-3} \cdot I + 0,49239$$

Finalmente tiene en cuenta la duración real del mes y el número máximo de horas sol, según la latitud del lugar y llega a la expresión:

$$EP = K \cdot 16 \cdot \left( \frac{10t}{I} \right)^a$$

$EP$  = Evapotranspiración potencial  $\text{mm/mes}$

$N$  = Número máximo de horas sol

d = Número de días del mes

$$K = \frac{N}{30} \frac{d}{12} 12$$

Fórmula de Blaney – Criddle: Estos autores proponen la siguiente expresión:

$$EP = K_p \frac{45,7 t + 813}{100}$$

EP = Evapotranspiración potencial en mm/mes

K = coeficiente empírico según el tipo de vegetación

t = temperatura media diaria del mes en °C

p = porcentaje de número máximo de horas de insolación en el mes, respecto al total

Fórmula de Turc (Evapotranspiración Potencial): En su versión más moderna, la fórmula de Turc es:

$$EP = 0,40 \frac{t}{t + 15} (R_i + 50)$$

EP = Evapotranspiración potencial en mm/mes

t = Temperatura media diaria del mes en °C

R<sub>i</sub> = Radiación solar global incidente media diaria del mes en cal/cm<sup>2</sup>.día

Cuando la humedad relativa (H<sub>r</sub>) es menor del 50 % introduce un factor de corrección y la fórmula queda así:

$$EP = 0,40 \frac{t}{t + 15} (R_i + 50) \cdot \left(1 - \frac{50 - H_r}{70}\right)$$

Nota: Para el mes de febrero, el coeficiente 0,40 se sustituye por 0,37

Fórmula de Turc (Evapotranspiración Real): Turc, experimentando en más de 200 cuencas del mundo, llega a la expresión:

$$ER = \frac{P}{\sqrt{0,9 + \left(\frac{P^2}{L^2}\right)}}$$

ER= Evapotranspiración Real en mm/año

P = Precipitación en mm/año

L= Poder evaporante de la atmósfera  $L = 300 + 25 t + 0,05 t^2$

Fórmula de Coutagne (Evapotranspiración Real):

$$ER = P - X P^2$$

Para valores de precipitación comprendidos entre 1/8x y 1/2x.

$$X = \frac{1}{0,8 + 0,14 t}$$

t = temperatura media anual en °C

ER = Evapotranspiración real en m/año

P = precipitación en m/año

### 1.4.3. Comentario a los métodos de cálculo de evapotranspiración

Los métodos teóricos y las medidas directas están ligados al carácter microclimático del proceso, y, en consecuencia, son los únicos realmente válidos, siempre que se reflejen fielmente las condiciones naturales. Desgraciadamente son de delicada y costosa aplicación. Los métodos empíricos tienen la ventaja de su mayor economía, pues, en general, se basan en datos meteorológicos corrientemente obtenibles en casi todas las estaciones meteorológicas. No obstante, los valores que con ellos se obtienen tendrán escasa validez si no están constatados con medidas directas en la zona a la que aplican. La fórmula de Turc, ha dado en general valores más altos que los obtenidos con mediciones directas, por el contrario, con la fórmula de Thornthwaite los valores correspondientes a zonas áridas y semiáridas han resultado algo bajos.

A modo de ejemplo, se ha podido comprobar que la fórmula de Turc para el cálculo de la evapotranspiración real presenta serias limitaciones para su empleo en ambientes de marcada aridez tal como la región de la Puna Argentina o en sectores como la Quebrada del Toro y otras valles intermontanos donde la precipitación media anual es menor a los 100 mm ya que para esos valores (con la temperatura media anual existente en la región), la componente de evapotranspiración real es mayor a la precipitación lo que, conceptualmente, es incorrecto. Otro aspecto que se debe mencionar en relación a la medición y/o cálculo de este parámetro es que, por lo menos en el ámbito de nuestra región, son escasos por no expresar que nulos, las mediciones directas de evapotranspiración. Muchas veces, cuando se pretende aplicar una u otra fórmula empíricas o semiempíricas para la estimación, se encuentra la limitante de la falta de datos indispensables como velocidad del viento, humedad, heliofanía, tensión de vapor, e incluso la temperatura media del lugar. Esta ha sido y es la principal causa y condicionante para avanzar en el conocimiento y caracterización de este parámetro y, por supuesto, para la resolución de la fórmula del balance hídrico. Debido a esta razón, debe prestarse especial cuidado a cálculos y expresiones matemáticas señaladas como unívocas, por lo menos en muchos ambientes climáticos de la región del Noroeste Argentino y también debe entenderse que en la enorme mayoría de los casos, los autores han tratado de señalar estimaciones groseras y en el mejor de los casos, aproximaciones basadas en extrapolaciones de datos de ambientes similares de otras regiones del país o del mundo en donde se cuenta con datos.

### 1.5. ESCURRIMIENTO FLUVIAL

El escurrimiento es la parte del ciclo hidrológico, en la cual el agua precipitada circula sobre la superficie del continente iniciando el retorno, ya sea hacia el mar, hacia la zona de recarga de algún recipiente subterráneo, o para llegar a algún reservorio superficial desde donde se evapora. El escurrimiento es un fenómeno estrictamente superficial del agua. Su valor está en función de la cantidad, distribución e intensidad de las precipitaciones y de factores relacionados con: topografía, vegetación, y propiedades físicas de los sedimentos superficiales.

Los factores fisiográficos que afectan el drenaje superficial son, entre otros, el uso y tipo de suelo, pendiente topográfica, superficie de la cuenca hidrográfica, etc. El uso del suelo es importante ya que un suelo plantado y con vegetación abundante, retiene más el agua de lluvia y produce mayor evapotranspiración, dando lugar a una componente menor de escurrimiento fluvial, que el mismo tipo de suelo sin vegetación. En zonas urbanizadas, se produce un incremento de la componente de escurrimiento y un marcado decrecimiento de la infiltración. El tipo de suelo (forma, estructura, textura, etc.), influye notablemente en la capacidad de infiltración, de esta forma un suelo permeable, poco evolucionado, suele tener mayor capacidad de absorción de agua y por lo tanto disminuye la componente de escurrimiento, a diferencia de un suelo estructurado y texturalmente fino, que tiende a dar lugar una mayor componente de escorrentía.

La pendiente topográfica juega un papel preponderante al momento que ocurre una lluvia en una cuenca cualquiera; de esta forma y bajo las mismas condiciones de textura de los suelos, permeabilidad, vegetación y uso del suelo, la componente de escurrimiento fluvial es mayor a medida que se incrementa la pendiente topográfica. La pendiente media de la cuenca es un factor decisivo en la determinación del tiempo de concentración de una creciente y del comportamiento del escurrimiento.

Un factor importante en la componente de escurrimiento fluvial es el área de la cuenca hidrográfica. Generalmente, una cuenca de gran extensión, entrega caudales más regulares al colector principal, ya que reciben aportaciones de varias regiones climáticas y los factores que producen variaciones no alcanzan a afectar nunca por igual a toda el área. El relieve de la cuenca viene definido por la curva hipsométrica, que representa en ordenadas la altitud y en abscisas el porcentaje de área de la cuenca situada por encima de dicha altitud. La forma de una cuenca afecta al escurrimiento fluvial. Normalmente, para el análisis de forma se emplean el índice de Gravelius y el coeficiente de Compacidad.

Las características litológicas y estructurales (la geología) de una cuenca hidrográfica determinan entre otros, la densidad de drenaje y el tipo de red hídrica. La conjunción de factores geológicos (litología, permeabilidad, estructura, etc.), climáticos y fisiográficos determinará si una cuenca presenta un patrón dendrítico, pinnadas, rectangulares, paralelas, enrejado, anulares, centrípetas, radiales, etc.

### 1.5.1. Aforos

De acuerdo a la fórmula de balance global, **R** representa el escurrimiento fluvial que es la cantidad total de agua que abandona una cuenca a través de sus cursos. Para su cálculo es necesario realizar mediciones de caudal o Gasto =  $Q$ , o sea el volumen de agua que pasa por una sección de un río en un tiempo determinado. Estas mediciones se denominan aforos.

Existen numerosos métodos para realizar aforos, en función de las características de los cursos de agua y del nivel de exactitud requerido en las mediciones. Por el tipo de magnitudes medidas se pueden clasificar en métodos directos e indirectos.

#### 1. Métodos Directos o volumétricos

Se aplica solo a cursos de pequeño caudal, manantiales o canales de riego, donde es posible la instalación de una canaleta o dispositivo similar para desviar la totalidad del flujo hacia un recipiente de volumen conocido. Para el cálculo del caudal se mide el tiempo necesario para completar el volumen del recipiente.

#### 2. Métodos Indirectos

Se clasifican, en función de los parámetros de medición como:

- a) Velocidad de flujo: Se basan en la ecuación que expresa que el caudal que pasa a través de una sección dada es igual a la velocidad del flujo hídrico multiplicada por el área;  $Q = V \times A$ . Al aplicar estos métodos se debe tener en cuenta que la velocidad de flujo de una corriente de agua varía en una misma sección tanto lateral como verticalmente. Así se tiene que la distribución de las velocidades en planta adquiere su mayor magnitud hacia el centro del canal donde el efecto de rozamiento del agua con los bordes del canal se hace más pequeño. Análogamente la distribución de las velocidades en la vertical es máxima cerca de la superficie y va disminuyendo hacia el fondo del lecho. En este caso se descarta la posible influencia del viento o de ríos con alta turbulencia. Por experiencia se dice que la velocidad media para una misma vertical se localiza a 0,4 de la profundidad, medido desde el fondo del lecho. Para la medición de la velocidad de flujo se utilizan principalmente dos métodos: Flotadores y Molinete.

b) Químicos: Se basan en la variación de concentración que experimenta una disolución al ser vertida sobre el cauce de un río en el cual circula un caudal  $Q$  que es el que se trata de determinar. El empleo de este método se recomienda en los lugares en que no puede recurrirse a los métodos convencionales, debido a la poca profundidad de la corriente, a su excesiva velocidad o a la magnitud de la turbulencia. Puede utilizarse como solución traza cualquier sustancia a condición que:

- ✓ Se disuelva rápidamente en un río a temperatura normal
- ✓ No se encuentre en el agua del río normalmente o esté presente en cantidades ínfimas.
- ✓ No se descomponga en el agua del río ni sea retenida o absorbida por sedimentos, plantas u organismos.
- ✓ Su concentración pueda ser detectada por métodos sencillos
- ✓ Sea inofensiva para el hombre y para los animales.
- ✓ Sea económica.

La solución más utilizada es el dicromato de sodio donde la medida de las concentraciones se realiza a través de métodos colorimétricos mediante el reactivo de difenil de carbicida, que produce la máxima escala de matices medible con espectrofotómetros. Otras sustancias utilizadas son la uranina y rodamina. Hay dos grupos fundamentales de aforos químicos: de inyección constante y de inyección instantánea.

c) De Nivel: Son los usados comúnmente en las estaciones de aforos, y se basan en la relación entre la altura del nivel de agua en una sección del río y el caudal erogado en ese momento. La relación altura / caudal se determina experimentalmente, midiendo simultáneamente ambas magnitudes y representando la función en un gráfico de coordenadas: en abscisas el caudal y en ordenadas el nivel correspondiente. Es necesario efectuar numerosas mediciones para determinar las condiciones existentes en una nueva estación. Después es necesario realizar mediciones periódicas para seguir las variaciones de la relación altura / caudal. Estas últimas se realizan generalmente mediante molinete hidrométrico. El lugar donde se mide el nivel debe elegirse cuidadosamente para garantizar una relación estable entre el nivel y el caudal. Las condiciones óptimas para una estación de aforo son:

- ✓ Alejado de la confluencia de corrientes tributarias, con el fin de evitar el efecto de reflujos del agua de dichas corrientes.
- ✓ Donde el lecho de la corriente sea estable e uniforme.
- ✓ Donde la corriente no inunde las márgenes.
- ✓ Ausencia de plantas acuáticas.
- ✓ Donde los niveles no estén afectados por el funcionamiento de estaciones hidroeléctricas.
- ✓ Aguas arriba de un obstáculo o cascadas naturales, o de una estructura artificial de control.

Los registros de los niveles se obtienen mediante observaciones sistemáticas con una escala o limnómetro o por medio de registradores automáticos como: limnógrafo de flotador o limnógrafo de burbujas o limnógrafo sónico.

## 1.6. INFILTRACIÓN

La infiltración es el proceso por el cual el agua penetra en el suelo a través de la superficie de la tierra y queda retenida por él o alcanza un nivel acuífero incrementando el volumen de agua almacenado. Superada la capacidad de campo del suelo, el agua desciende por la acción constante de las fuerzas capilares y de la gravedad; este último proceso recibe el nombre de percolación (Davis y De Wiest, 1971), infiltración eficaz (Castany, 1963) o infiltración profunda.

El término de infiltración se aplica solamente en materiales no saturados, diferenciándose de la percolación que es el tipo de movimiento que predomina en los materiales saturados.

Como se sabe, no toda el agua que se filtra alimenta los acuíferos. Una parte del caudal infiltrado repone el agua pelicular, otra parte conforma la humedad del suelo, que vuelve a la atmósfera por evaporación y/o evapotranspiración. Este caudal de infiltración es denominado infiltración Ineficaz.

$$\text{Por lo tanto: } I_t (\text{total}) = I_e (\text{eficaz}) + I_i (\text{ineficaz})$$

Horton, (1933) llama capacidad de infiltración de un suelo, a la máxima cantidad de agua de lluvia que puede absorber en la unidad de tiempo y en unas condiciones definidas previamente. La relación entre la intensidad de la lluvia y la capacidad de infiltración es la que determina la cantidad de agua que penetrará en el suelo y la que por escorrentía directa alimentará los cauces de los cursos fluviales. Esta capacidad de infiltración decrece con el tiempo, a partir de un máximo al inicio de la lluvia y después de algunas oscilaciones.

### **1.6.1. Factores que afectan la infiltración**

El agua, para infiltrarse, debe penetrar la superficie del terreno y circular a través de este. Hay dos grupos de factores que influyen en el proceso:

1. Factores que definen las características del terreno o medio permeable
2. Factores que definen las características del fluido (agua) que se infiltra

#### 1.a. Condiciones de superficie

La compactación natural o debida al tránsito dificulta la penetración del agua y reduce la capacidad de infiltración. Una superficie sin cobertura vegetal está expuesta al impacto directo de las gotas de lluvia, que también origina una compactación e impide una infiltración eficaz. De esta forma, un suelo bien drenado puede tener una capacidad de infiltración baja debido al "sellado" en superficie por partículas finas. Cuando el suelo está cubierto por vegetación, las plantas protegen de la compactación por impacto de la lluvia, se retarda el recorrido superficial del agua y de esta forma hay más tiempo de exposición para su posible infiltración. La pendiente del terreno influye en el sentido de mantener durante más o menos tiempo una lámina de agua de cierto espesor sobre él. La especie cultivada, densidad de cobertura vegetal y sobre todo, el tratamiento agrícola aplicado, influirán en la infiltración. Por último, en las áreas urbanizadas las posibilidades de infiltración se reducen considerablemente.

#### 1.b. Características del terreno

La textura del terreno influye por sí y por la influencia en la estabilidad de la estructura. Un suelo con alto porcentaje de limos y arcillas está expuesto a la disgregación y arrastre de las partículas por el agua. La estructura define el tamaño de los poros; de esta forma la existencia de poros grandes reduce la tensión capilar pero favorece directamente la entrada de agua. Los sucesivos horizontes en el perfil vertical de un suelo tienen distintas capacidades de infiltración; siendo el horizonte A generalmente bastante más permeable que el B.

#### 1.c. Condiciones ambientales

La humedad inicial del suelo juega un papel preponderante. Cuando el suelo está seco, al comienzo de la lluvia, se crea una fuerte capilaridad al humedecerse las capas superiores, y este efecto, se suma al de gravedad incrementando la intensidad de infiltración. Las arcillas y otros coloides, a medida que se humectan, se hinchan y este efecto ocasiona el cierre de fracturas y grietas disminuyendo la capacidad de

infiltración. Cuando el suelo alcanza su capacidad de campo, es evidente que admitirá menos agua. La temperatura del suelo puede ser suficientemente baja para provocar la congelación del agua recibida, originando una capa totalmente impermeable; sin embargo la temperatura del agua de lluvia puede llegar a ser suficientemente alta como para originar la fusión de esa capa y penetrar así, en el terreno.

#### 2.a. Características del fluido que se infiltra

En primer lugar, el espesor de la lámina de agua sobre el terreno favorece la infiltración. Al inicio de la lluvia, el espesor de la lámina (H) y el espesor del manto saturado (e) es aproximadamente del mismo orden de magnitud. La turbidez del agua afecta especialmente la infiltración por los materiales finos en suspensión que contiene, que penetran en el suelo y reducen por colmatación la permeabilidad, y, por lo tanto la intensidad de la infiltración. El contenido de sales, en ocasiones, favorece la formación de flóculos de coloides del suelo y reduce la capacidad de infiltración; mientras que en otros produce el efecto contrario. La temperatura del agua afecta su viscosidad y en consecuencia la mayor facilidad con que ésta escurrirá por el suelo, debido a este efecto, se han determinado, para un mismo terreno, intensidades de infiltración menores en invierno que en verano.

### **1.6.2. Métodos para determinar la capacidad de infiltración**

Es corriente utilizar como unidad el mm/hora, y en algunos casos el mm/día. Para medidas directas, los intervalos de tiempo entre dos medidas sucesivas son más cortos, pero el resultado se traduce a una de las dos unidades citadas. Un mm de agua infiltrada equivale a 10 m<sup>3</sup>/ha. Los métodos para determinar la capacidad de infiltración tienen, solo un valor relativo, e incluso, en muchos casos, los resultados obtenidos dependen del método empleado. Se citan los siguientes:

1. Lisímetros: Son recipientes de formas diversas en los cuales se utiliza el mismo suelo que se desea investigar. Los más comunes son los lisímetros de superficie, aunque también los hay subterráneos y de pesada. Los lisímetros de superficie se dividen en:
  2. Cajas Lisimétricas: Son las más usadas y consisten en recipientes de sección circular o cuadrada en donde se coloca la muestra de suelo con el que se experimenta. El agua infiltrada se recoge y mide en un recipiente graduado. Este es un sistema apto para suelos blandos y homogéneos.
  3. Lisímetros Monolíticos: Son cajas construidas alrededor de un bloque de suelo, de tal manera que éste sufra alteraciones mínimas.
  4. Análisis de Hidrogramas en Cuencas Pequeñas: El funcionamiento hidrológico de una cuenca de pequeña extensión (< 10 Km<sup>2</sup>), es en esencia, la reproducción que se pretende con los infiltrómetros simuladores de lluvia. En estos casos se aplica la fórmula del balance, despreciando la evapotranspiración debido al tamaño de la cuenca. De esta forma se conoce la precipitación, el caudal escurrido superficial leído con un limnógrafo situado en la salida de la cuenca y por diferencia se obtiene el valor de infiltración.

$$I = P - R$$

5. Infiltrómetros: Se utilizan para medidas muy locales y, con ellos, la capacidad de infiltración se determina directamente con bastantes reservas, los valores obtenidos pueden aplicarse a pequeñas cuencas homogéneas. Cuando la cuenca es mayor y no es homogénea en suelos o vegetación deberá dividirse en áreas que lo sean y utilizar infiltrómetros en cada una de ellas. Los hay de dos tipos:

1) Infiltrómetros tipo simulador de lluvia: El agua, mediante un sistema de tipo aspersión, se distribuye lo más uniformemente posible por la parcela de la que se quiere conocer la capacidad de infiltración. Estas parcelas son de pequeño tamaño (1 a 40 m<sup>2</sup>) y para comprobar la uniformidad del reparto y medir el agua recibida se colocan en ellas algunos pluviómetros. Debe existir un sistema para medir la escorrentía superficial. De esta forma, conocida P y R y despreciando la E<sub>vp</sub>, por ser muy cortos los intervalos entre medidas sucesivas, el valor de la infiltración es:

$$I = P - R$$

2) Infiltrómetros tipos inundador: La capacidad de infiltración se deduce del volumen de agua que es necesario añadir para mantener una lámina de espesor constante sobre un área bien definida. Los defectos más significativos de estos tipos de infiltrómetros son que se anula el efecto de compactación que produce la lluvia, y que no es posible aplicarlos sin alterar la estructura del terreno. Hay dos tipos:

a) Cilindro o anillos concéntricos (Método de Müntz): El método consiste en utilizar dos anillos concéntricos de diferente diámetro, e hincarlos parcialmente en el suelo a una profundidad de unos 10 cm. Se añade una cantidad de agua hasta enrasar el pelo de agua con una regla graduada colocada verticalmente, esta varilla de medición se encuentra en el cilindro interno. Tanto en el cilindro interno como en el externo, la altura de agua debe mantenerse iguales para que no existan presiones diferenciales. La misión del anillo externo es, únicamente impedir la expansión lateral del agua infiltrada a través del área que limita el cilindro interior. Al cabo de cierto tiempo, se observa el volumen de agua infiltrada y se deduce la capacidad de infiltración.

b) Cilindro excavado en el suelo (Método de Porchet): Se excava en el suelo un pozo cilíndrico de radio R y se llena de agua hasta una altura h.

### 1.6.3. Métodos para determinar la infiltración

Hay diversas maneras de evaluación de la infiltración eficaz o recarga (Scanlon et al., 2002 in Custodio, 2011). Todas ellas requieren utilizar parámetros poco conocidos y difíciles de medir, y por lo tanto con una notable incertidumbre asociada. Como expresa Custodio (2011), hay notables estudios en regiones semiáridas y áridas (Flint et al., 2002; Gee y Hillel, 1988; Harrington et al., 2002 in Custodio, 2011), pero en general no es posible encontrar relaciones sencillas. La irregularidad temporal y espacial de la precipitación y la mayor importancia de la recarga concentrada dificulta esa relación, tanto más cuanto mayor sea el grado de aridez.

a) Aplicación de la fórmula del balance: Claro está que si la incógnita es la Infiltración y, de la zona, cuenca o región en cuestión se conocen los otros parámetros de la fórmula del balance global, tal como las precipitaciones, la evapotranspiración real y el escurrimiento fluvial; se puede conocer la incógnita despejando de la ecuación.

$$P - E_{vR} - R - I = 0$$

$$P - E_{vR} - R = I$$

b) Variación de niveles freáticos: El método de cálculo de la recarga a través del análisis de la fluctuación o variación del nivel piezométrico, está basado en la premisa de que la variación de los niveles en acuíferos libres se deben al agua al agua de recarga o Infiltración Eficaz que llega al reservorio. En este caso la recarga se calcula:

$$I = m_e \times \Delta h / \Delta t$$

Donde,  $m$  es la porosidad eficaz,  $h$  es la variación del nivel piezométrico y  $t$  es tiempo. El método se ha utilizado en varios estudios.

- c) Método de trazadores: Se puede estimar la infiltración eficaz utilizando trazadores ambientales químicos e isotópicos, históricos (radioisótopos), artificiales (añadidos de forma premeditada) y de calor (generalmente en aguas superficiales). Dado que los trazadores no miden directamente la recarga o infiltración eficaz, pueden existir ciertos problemas al momento de interpretar los resultados, principalmente por la presencia de otras fuentes de trazador y la existencia de vías preferentes de flujo, que pueden invalidar los resultados del método de trazado.

Entre los métodos más usados se encuentra el del transporte de sustancias disueltas "conservativas" desde la superficie del terreno al nivel freático. Las sustancias disueltas conservativas son aquellas cuyo movimiento en el terreno es muy similar al del agua y por tanto se pueden utilizar para medir el flujo del agua. Se trata de sustancias que no interactúan significativamente con el terreno, no se precipitan en condiciones normales, no se alteran por procesos fisicoquímicos y químicos en el agua (Alcalá García, 2005). El método más utilizado es en el balance del ion cloruro en el agua de lluvia y en el agua del acuífero.

## 1.7. TIPOS DE AGUA EN EL SUELO

El agua del suelo puede clasificarse en una serie de términos diferentes, ya sea desde un punto de vista físico o desde el punto de vista agronómico.

### 1.7.1. Desde el punto de vista físico

**Agua higroscópica:** Absorbida directamente de la humedad atmosférica, forma una fina película que recubre a las partículas del suelo. No está sometida a movimiento, no es asimilable por las plantas (no absorbible). Está fuertemente retenida a fuerzas superiores a 31 atmósferas, que equivale a pF de 4,5.

**Agua capilar:** Contenida en los tubos capilares del suelo. Dentro de ella distinguimos el agua capilar absorbible y la no absorbible.

- a) Agua capilar no absorbible. Se introduce en los tubos capilares más pequeños <0.2 micras. Está muy fuertemente retenida y no es absorbible por las plantas; la fuerza de succión es de 31-15 atmósferas, que corresponde a pF de 4,5 a 4,2.
- b) Agua capilar absorbible. Es la que se encuentra en tubos capilares de 0.2-8 micras. Es un agua absorbible por las plantas. Es un agua útil para la vegetación, constituye la reserva durante los períodos secos. Está fuertemente absorbida; la fuerza de retención varía entre 15 a 1 atmósfera y se extrae a pF de 4,2 a 3.

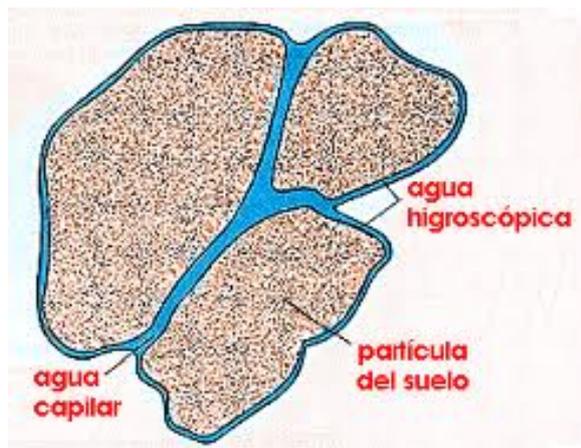


Figura 1: Tipos de agua en el suelo desde el punto de vista físico.

**Agua gravitacional:** No está retenida en el suelo. Se habla de agua gravitacional de flujo lento y agua gravitacional de flujo rápido en función de su velocidad de circulación.

- De flujo lento. La que circula por poros comprendidos entre 8 y 30 micras de diámetro, se admite que está retenida a un  $pF$  que varía desde 3 a un valor que varía entre 1,8 y 2,5. Tarda de 10 a 30 días en atravesar el suelo y en esos días es utilizable por las plantas.
- De flujo rápido. La que circula por poros mayores de 30 micras. Es un agua que no queda retenida en el suelo y es eliminada al subsuelo, pudiendo alcanzar el nivel freático. Es un agua inútil, ya que cuando está presente en el suelo los poros se encuentran totalmente saturados de agua, el medio es asfixiante y las raíces de las plantas no la pueden tomar.

### 1.7.2. Desde el punto de vista agronómico

**Capacidad Máxima:** Momento en el que todos los poros están saturados de agua. No existe fase gaseosa. La porosidad total del suelo es igual al volumen total de agua en el suelo.

**Capacidad de Retención:** Cantidad máxima de agua que el suelo puede retener. Representa el almacenaje de agua del suelo. Se produce después de las precipitaciones atmosféricas cuando el agua gravitacional abandona el suelo; no obstante, durante ese período se producen pérdidas por evaporación, absorción de las plantas, etc. Por ello es muy difícil de medir. Hay una medida equivalente que se realiza en el laboratorio a un  $pF=3$ . Corresponde al agua higroscópica más la capilar, es decir el agua que ocupa los poros  $<8$  micras.

**Capacidad de Campo:** Surge este término para paliar la dificultad de medida de la capacidad de retención. Representa un concepto más práctico, que trata de reflejar la cantidad de agua que puede tener un suelo cuando se pierde el agua gravitacional de flujo rápido, después de pasados unos dos días de las lluvias (se habrá perdido algo de agua por evaporación). La fuerza de retención del agua variará para cada suelo, pero se admite generalmente una fuerza de succión de  $1/3$  de atmósfera o  $pF=2,5$  y corresponde a poros  $<30$  micras (para algunos suelos el  $pF$  de 1,8 es más representativo).

**Punto de Marchitamiento:** Representa cuando el suelo se deseca a un nivel tal que el agua que queda está retenida con una fuerza de succión mayor que las de absorción de las raíces de las plantas. Es el agua que queda a una presión de 15 atmósferas o  $pF=4,2$ . El agua contenida corresponde al agua higroscópica más el agua capilar no absorbible.

**Agua útil:** Es el agua de flujo lento más el agua absorbible menos la no absorbible e higroscópica. Representa el agua en capacidad de campo menos la que hay en el punto de marchitamiento.

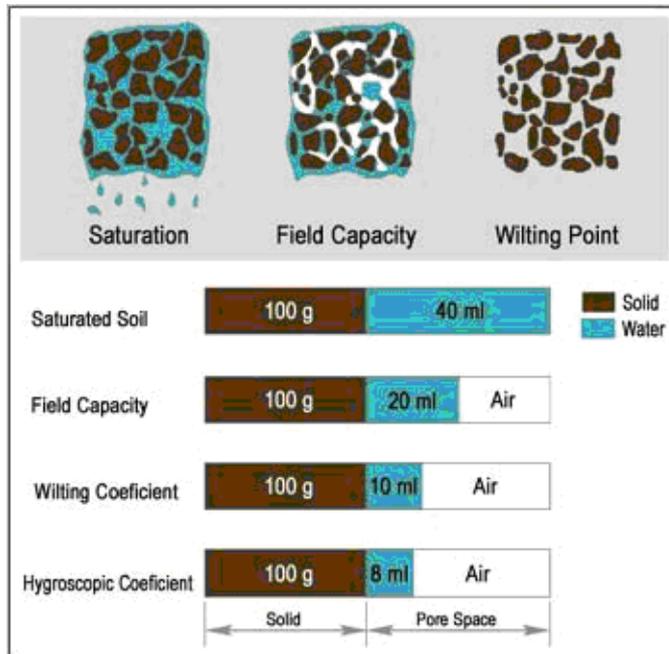


Figura 2: Relación entre espacio poroso ocupado por agua y aire en diferentes estados del suelo.

En la figura que se presenta, se reproducen los tipos de aguas presentes en un suelo al irse humedeciendo progresivamente.

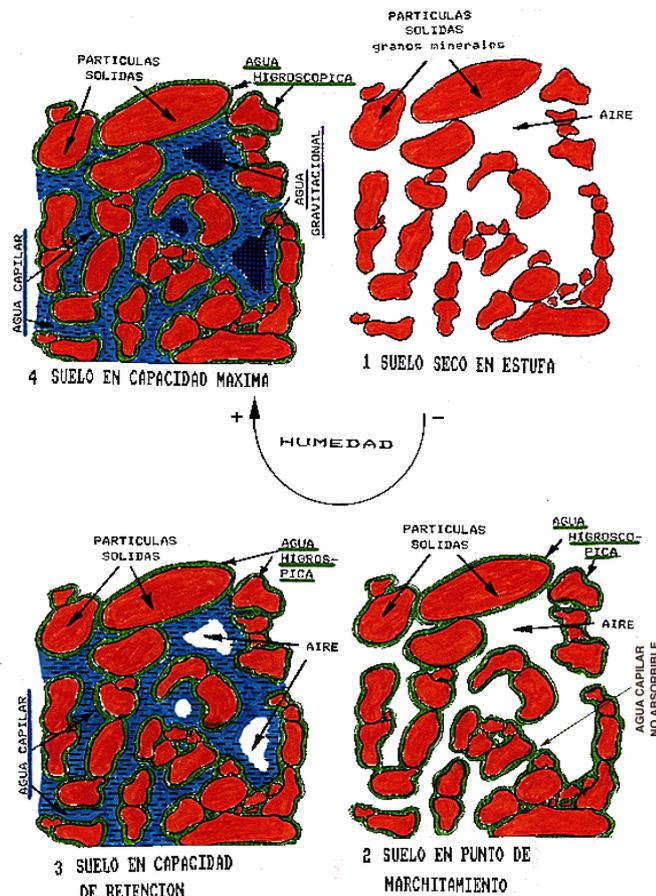


Figura 3: Tipos de aguas presentes en el suelo a medida que se incrementa la humedad.

En la figura que se adjunta se observan los valores típicos para suelos con distintas granulometrías. En ella destacan hechos muy interesantes:

- Suelos arenosos (sand), muy baja capacidad de campo, pero casi toda su humedad es agua útil pues la cantidad de agua en punto de marchitamiento es muy pequeña.
- Suelos arcillosos (clay), muy alta capacidad de campo, pero con gran cantidad de agua inútil en punto de marchitamiento.
- Suelos de granulometrías equilibradas, buenas características al compensarse los efectos de las arenas y de las arcillas.

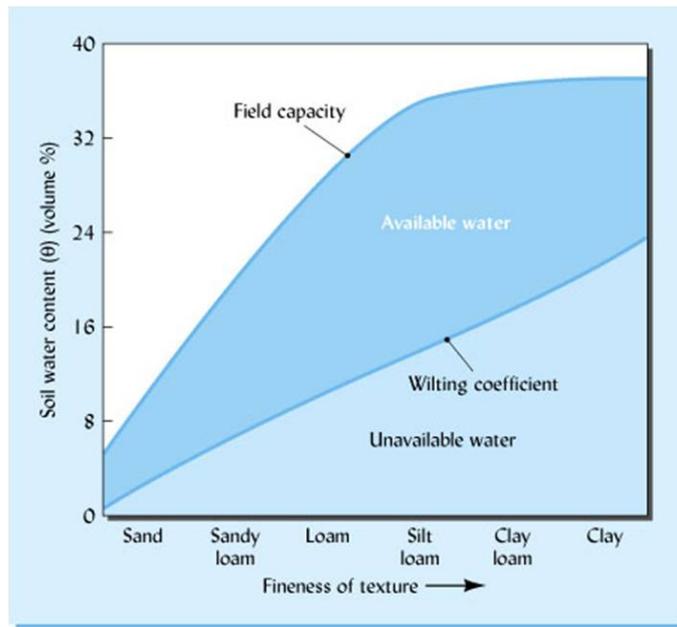


Figura 4: Contenido de agua en el suelo en función de la textura.

**MÓDULO 2.** Agua Subterránea. Tipos de agua por su posición en el perfil. Características hidráulicas en las diferentes zonas del perfil. Propiedades de los sedimentos portadores (porosidad, retención específica). Permeabilidad. Transmisividad. Concepto de acuífero. Condiciones del medio (isotropía, anisotropía, homogeneidad, heterogeneidad). Relación entre el agua superficial y el agua subterránea. Distribución de la hidrosfera.

---

## 2.1. EL AGUA SUBTERRÁNEA

La componente líquida en el suelo es, normalmente el agua, que al atravesar la superficie del terreno se distribuye por él, quedando sometida a varias fuerzas, de cuya intensidad depende el mayor o menor grado de fijación al material sólido. Esencialmente, el agua subterránea por su posición en el perfil, se distribuye en dos grandes zonas denominadas: Zona de Intersticios Conectados y Zona de Intersticios No Conectados.

### 1. Zona de Intersticios Conectados

Corresponde a aquella zona del suelo y subsuelo donde el agua se mueve a través de los poros interconectados. Es posible distinguir a su vez dos grandes medios, llamados Zona de Aireación o Zona No Saturada y Zona Saturada. Generalmente se considera que la zona de aireación se extiende verticalmente desde la superficie del suelo hasta el nivel freático, aunque también este límite puede ser localizado en la parte superior de la franja capilar. La zona de saturación se extiende entre el límite inferior de la franja capilar y el lugar más profundo donde hay espacios porales interconectados, el cual puede ser el basamento o alguna capa confinante inferior (impermeable).

#### a) El agua en la Zona de Aireación

El agua de lluvia, nieve o de un curso fluvial, bajo la acción de la fuerza de gravedad se infiltra en esta zona, descendiendo progresivamente hasta alcanzar un nivel que por sus características texturales (muy fina) se comporta como una base impermeable. Sin embargo, una parte de esta agua no cumple todo este trayecto puesto que queda adherida a las partículas sólidas (clastos) por atracción molecular. La zona de aireación presenta interés desde el punto de vista agronómico, pues allí se localiza el agua aprovechada por los vegetales, y también geológico, ya que en esta zona se produce el denominado cinturón de meteorización debido a una poderosa combinación de procesos físicos, químicos, biológicos y microbiológicos. Castany (1971), distingue:

#### a.1. Zona de evapotranspiración

El agua se encuentra alojada en los horizontes edáficos, los cuales, como es de suponer, pueden variar en espesor, composición, textura, etc. El agua alojada en esta sección es de vital importancia para los vegetales ya que está sometida al proceso de evapotranspiración. Es la zona de alteración de los suelos. El espesor de esta zona varía en función del clima y del tipo de vegetación que se asienta sobre ellas, normalmente alcanza 2 o 3 metros y en casos excepcionales puede superar los 4 metros.

#### a.2. Zona de retención

El agua de esta zona no presenta vínculo alguno con las capas inferiores. Normalmente, el espesor medio es de 0,6 a 2 metros, pero puede alcanzar 10 o 20 metros, o por el contrario faltar completamente. En esta área, el volumen de agua es igual al coeficiente de retención específica.

a.3. Franja capilar

Por encima del nivel freático es común que se desarrolle una zona o franja más o menos continua de agua que se "prolonga" hacia arriba en una columna cuya altura depende de la granometría del suelo, variando en forma inversa con el tamaño del grano. Así, en los terrenos muy permeables (gravas) puede alcanzar unos pocos centímetros y alcanzar 2 e incluso 3 metros en los materiales menos permeables (limos). Normalmente, la franja capilar sigue las fluctuaciones del nivel de la superficie piezométrica. Muchas veces es posible distinguir el agua capilar continua (típica de la franja capilar) y el agua capilar aislada (común en la zona de aireación). El agua capilar es capaz de fluir libremente si desciende el nivel freático, al cual está ligada hidráulicamente.

b) El agua en la Zona de Saturación

La franja capilar, verdadero cinturón móvil que hace de nexo entre las zonas de aireación y saturación, es incluido por muchos autores en la zona de aireación, criterio que puede ser cuestionado y ser compartido solo desde un punto de vista práctico pero no científico, puesto que realmente se comporta como un medio saturado, cuyo espesor y movimiento varía según las características del medio poroso que la aloja. Si la profundidad a que se encuentra el nivel freático es menor que la capacidad ascensional que tiene el agua capilar, cierto caudal se perderá por evapotranspiración. La superficie freática marca el límite inferior de la franja capilar, mientras que el límite superior está dado por la capacidad de ascensión del líquido. De arriba hacia abajo, se pueden distinguir las siguientes:

b.1. Agua freática o agua libre

Es aquella que se mueve en un medio poroso y está solamente sometida a la presión atmosférica. No hay acción de capas impermeables que produzcan efectos confinantes. Percola bajo la acción de la pendiente piezométrica, que a su vez depende de la permeabilidad del medio y gradiente hidráulico.

b.2. El agua confinada

Es aquella que percola entre estratos porosos limitados por capas impermeables, de tal manera que sobre ella se genera una presión diferencial entre la zona de recarga y la zona de descarga. Si el agua está confinada en un estrato comprensible, la extracción de agua puede provocar una compactación del estrato, por lo que un nuevo ingreso de agua puede no alcanzar a restituir las condiciones originales del acuífero.

b.3. El agua fijada

Se puede encontrar en cualquier nivel dentro de la zona saturada. Es el agua alojada en las aperturas subcapilares que ejercen sobre ella una retención cuya fuerza es superior a las fuerzas que comúnmente existen en esta zona. No se debe confundir este tipo de agua con el agua capilar, que solamente aparece en la zona de aireación.

b.4 El agua fósil

Es aquella que ha quedado atrapada en las capas de rocas, cuando éstas se formaron y que tanto la compactación, como otros procesos geológicos, no han logrado eliminar. Esta agua, participó únicamente del ciclo hidrogeológico en tiempos geológicos y por lo tanto, una vez explotada y agotada sus reservas, no se recompone nuevamente.

## 2. Zona de Intersticios No Conectados

Debajo de la zona de saturación se localiza el agua interna, es decir aquella que está químicamente combinada, el agua fijada en intersticios no comunicados y el agua de origen magmática.

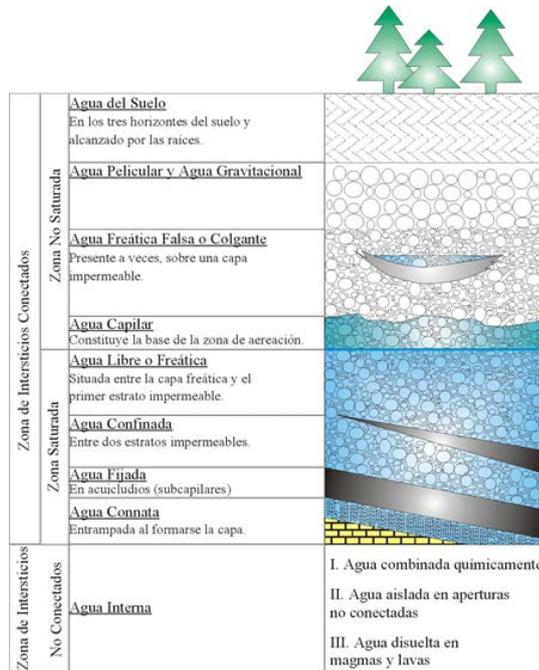


Figura 5: Distribución del agua en el suelo y subsuelo (Castany, 1971).

## 2.2. CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS EN LAS ZONAS DEL PERFIL DEL SUELO

El agua del suelo y subsuelo está controlado por tres grandes fuerzas: La atracción entre las moléculas de agua, que se conoce con el nombre de cohesión; la atracción entre las moléculas de agua y los cuerpos sólidos, que se conoce como adhesión y la fuerza de la gravedad. Estas acciones permiten hacer otras tantas divisiones:

- El agua de cohesión
- El agua de adhesión
- El agua gravífica o de gravedad

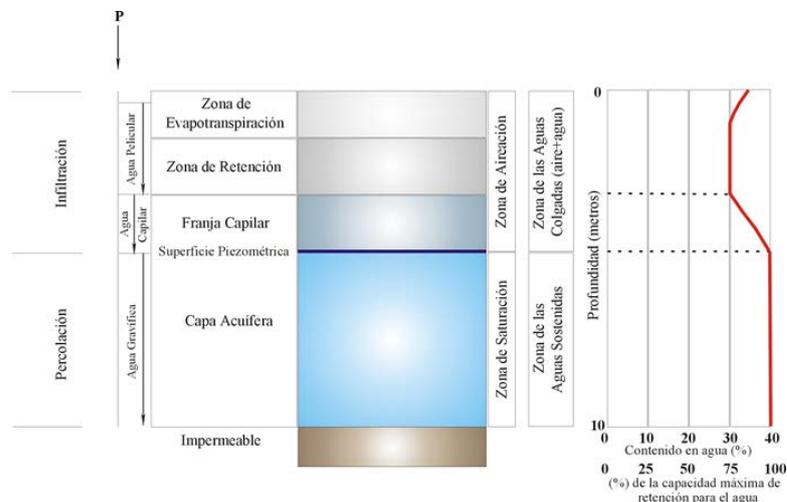


Figura 6: El agua en el suelo y capacidad máxima de retención.

### 2.3. PROPIEDADES FÍSICAS DEL MEDIO DE CIRCULACIÓN

El estudio microscópico del comportamiento de un medio poroso es extraordinariamente complejo dada la forma de los poros y canalículos por los que debe circular el fluido. Afortunadamente, pueden establecerse leyes de carácter macroscópico que tratan el medio como un continuo con unas propiedades bien definidas; estas leyes se basan en la consideración de dos parámetros fundamentales: la permeabilidad y la porosidad. Estos dos parámetros permiten definir y, en algunos casos, predecir el funcionamiento o respuesta de un medio de circulación frente a determinadas acciones exteriores. Como por definición el suelo incluye a todos los materiales agregados con o sin vínculos coherentes, puede suponerse que se compone de elementos diferentes que pueden encontrarse en tres estados o fases de la materia: sólido, líquido y gaseoso. Para el caso de muchas rocas (materiales consolidados) la situación es similar. La relación entre los pesos y volúmenes de las diferentes fases es importante porque ayuda a definir las condiciones del suelo o su comportamiento físico. En la figura que se adjunta puede observarse las magnitudes de volumen y de peso involucradas en una muestra de suelo de volumen unitario.

		Volumen		Peso	
Vt	Vv	Va	Aire		
		Vw	Agua	Ww	Wt
	Vs	Suelo	Ws		

El volumen de sólidos (masa del suelo o roca) se designa como Vs, el volumen de agua como Vw y el volumen de aire como Va. El volumen total es Vt y el volumen de aire más agua es el volumen de vacíos o Vv. En función de estos aspectos se pueden formular algunas relaciones matemáticas características que vinculan el volumen de poros o vacíos con el volumen de sólidos o volumen total.

#### a. Porosidad

La porosidad es una de las características esenciales de las rocas en lo que se refiere a sus propiedades acuíferas. Se define como porosidad a la relación entre el volumen de espacios vacíos con respecto al volumen total de la roca. En función de su origen pueden diferenciarse dos tipos:

Porosidad primaria u original: Es el volumen poral resultante del proceso mismo de depositación de la roca.

Porosidad secundaria: Es la obtenida por alteraciones post-deposicionales de la roca, y que pueden aumentar los valores (fracturación, disolución) o disminuirlos (compactación, cementación, etc.). La porosidad de un material viene expresada por las relaciones entre el volumen de su parte vacía u ocupada por aire y/o agua y su volumen total. A su vez, puede distinguirse:

#### Porosidad total (m)

Es la relación, expresada en porcentaje, entre el volumen de los espacios vacíos Vv y el volumen total de la roca Vt.

$$m = \frac{V_v}{V_t} 100 \%$$

Si Vs es el volumen de la fase sólida, se tiene:

$$m = \left( \frac{V_t - V_s}{V_t} \right) 100 \%$$

Porosidad eficaz (me)

En el estudio del movimiento del agua subterránea sólo importan los poros interconectados; de esta forma nace el concepto de porosidad eficaz, que tiene en cuenta el volumen de esos poros  $V_e$  respecto al volumen total del terreno considerado.

$$m_e = \left( \frac{V_e}{V_t} \right) 100 \%$$

La Retención específica es la diferencia entre la porosidad total y la porosidad eficaz.

$$m_r = m - m_e$$

Tanto la porosidad total como la eficaz dependen de:

1. Heterometría: Los materiales finos (arcillas, limos, arenas muy finas) ocupan los espacios o poros que dejan los granos más gruesos y la porosidad disminuye.
2. La forma y disposición de los granos
3. La compactación, cementación y recristalización disminuyen la porosidad

En el caso de la porosidad intergranular, la porosidad total no depende del tamaño de grano (ya que el porcentaje de huecos total es el mismo). En cambio la porosidad eficaz sí se ve muy afectada por el tamaño de grano; ya que a medida que es más fino, la retención específica aumenta. Por ello, la porosidad total es máxima para las arcillas, pero la eficaz es casi nula.

*Tabla 1: Porosidad total y eficaz de diversos materiales (Johnson, 1967; Davis, 1969; Schoeller, 1962 y Ward, 1967).*

Material		Porosidad Total (%)			Porosidad Eficaz (%)		
Tipo	Descripción	Media	Máx.	Mín.	Media	Máx.	Mín.
Rocas Masivas	Granito	0,3	4	0,2	<0,2	0,5	0,0
	Caliza masiva	8	15	0,5	<0,5	1	0,0
	Dolomía	5	10	2	<0,5	1	0,0
	Areniscas	15	25	3	10	20	0,0
Rocas Metamórficas		0,5	5	0,2	<0,5	2	0,0
Rocas volcánicas	Piroclastos y tobas	30	50	10	<5	20	0,0
	Escorias	25	80	10	20	50	1
	Pumicitas	85	90	50	<5	20	0,0
	Basaltos densos, fonolitas	2	5	0,1	<1	2	0,1
	Basaltos vacuolares	12	30	5	5	10	1
Rocas Sedimentarias Inconsolidados	Aluviones	25	40	20	20	35	5
	Dunas	35	40	30	25	30	10
	Gravas	30	40	25	20	35	10
	Loess	45	55	40	<5	10	0,1
	Arenas	35	45	20	25	35	10
	Depósitos glaciares	25	35	15	15	30	5
	Limos	40	50	35	10	20	2
	Arcillas sin compactar	45	60	40	2	10	0,0
	Suelos superiores	50	60	30	10	20	1

## b. Permeabilidad

La permeabilidad de un material, es la propiedad que tiene éste para dejarse atravesar por un fluido. La ley fundamental que rige el movimiento del agua en medios porosos y bajo un régimen laminar (< 3 cm/seg) es la Ley de Darcy. Esta ley fue experimentada en cilindros rellenos de material poroso y ha sido repetidamente confirmada por los investigadores.

$$Q = K \cdot i \cdot A$$

$$Q = K \cdot \left( \frac{\Delta h}{L} \right) \cdot A$$

Q = caudal; k = permeabilidad darciana o conductividad hidráulica; A = área; i = gradiente hidráulico = h/L; h = diferencia de nivel y L = longitud

La Ley de Darcy establece una proporcionalidad directa entre la velocidad de flujo de un fluido en un medio poroso (V) y el gradiente hidráulico (i):  $i = V/K$

Esta relación indica una propiedad macroscópica del medio cuando intervienen un gran número de poros. Sin embargo, para velocidades elevadas el gradiente crece más rápidamente que V hasta que para velocidades extremadamente altas se comprueba que:  $i = b \times V^2$

Como el régimen del flujo viene definido por el número de Reynolds, es decir por la relación entre las fuerzas de inercia y las fuerzas viscosas:

$$Re = \frac{v d \rho}{\mu}$$

v = velocidad de flujo (cm/seg)

d = tamaño medio de partículas ( $d_{50}$ )

$\rho$  = densidad del fluido ( $g/cm^3$ )

$\mu$  = viscosidad dinámica (dinas.  $seg/cm^2$ )

La ley de Darcy es válida si  $Re < 1$  a 10, siendo en general preciso que  $Re < 4$ . El flujo es totalmente turbulento para valores de Re mayores que 60 a 180, dependiendo estos límites del tipo de material y de los valores adoptados para definirlo.

El valor de K (permeabilidad darciana o conductividad hidráulica), en su forma generalizada:

$$v = -K \text{ gra } dh$$

se puede asimilar a la de flujo calorífico (ley de Fourier) que expresa:

$$q = -k \text{ gra } d\theta$$

siendo q = flujo calorífico ( $cal/cm^2$ ), k = conductividad térmica ( $cal/cm \cdot seg$ ) y  $\text{gra } \theta$  = gradiente de temperatura ( $^{\circ}C/m$ ).

También la fórmula es similar, en expresión, a la del flujo eléctrico (ley de Ohm), que expresa:

$$i = -c \text{ gra } dV$$

siendo i = intensidad específica ( $amp/cm^2$ ), c = conductividad eléctrica (mhos/cm) y  $\text{grad } V$  = gradiente de potencial (volts/cm).

Diversos experimentos han demostrado que la permeabilidad darciana o conductividad hidráulica no sólo depende de las características del medio de circulación, sino también del fluido (su viscosidad y peso específico), por lo que se estableció una relación entre la permeabilidad darciana (**KD**), las propiedades del fluido y una característica intrínseca del medio que es independiente del fluido que circula a través de él. Esa característica se denomina permeabilidad intrínseca o geométrica (**ko**) y se puede expresar como:

$$KD = K_0 \left( \frac{\gamma}{\mu} \right)$$

donde ko es la permeabilidad intrínseca,  $\gamma$  es el peso específico del fluido (dinas/cm<sup>3</sup>) y  $\mu$  es la viscosidad del fluido (dinas/cm<sup>2</sup>). La permeabilidad intrínseca tiene las dimensiones de una longitud al cuadrado (L<sup>2</sup>).

La asignación de un valor de permeabilidad a un material es tarea más complicada que asignarle una porosidad ya que el margen de variabilidad de la permeabilidad es mucho mayor, puesto que está más afectada por pequeñas desviaciones de composición y puede variar con la orientación en que se realiza la medición (permeabilidad vertical y horizontal). El grado de compactación del medio de circulación puede afectar notablemente la permeabilidad. Este efecto es menos sensible en las gravas y tanto menos cuanto más uniforme es la granulometría.

La permeabilidad está muy controlada por la fracción fina. La permeabilidad de materiales consolidados homogéneos es menor que la del material correspondiente suelto a causa de la presencia del cemento en el primero; éste último no sólo reduce el tamaño de los poros, sino que dificulta su conexión, llegando de esta forma y en muchos casos a casi anular la permeabilidad, aun conservando una porosidad importante.

Tabla 2: Clasificación de los sedimentos en función de su permeabilidad (Custodio y Llamas, 1983).

PERMEABILIDAD EN (m/día)

	10 <sup>4</sup>	10 <sup>3</sup>	10 <sup>2</sup>	10	1	10 <sup>-1</sup>	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-6</sup>
CLASIFICACION GEOLOGICA	GRAVAS LIMPIAS		GRAVAS Y ARENAS O ARENAS GRUESAS		ARENAS FINAS O CON MEZCLA DE LIMOS		LIMOS O ARCILLAS ARENOSAS		ARCILLAS COMPACTAS		
CLASIFICACION HIDROGEOLOGICA	BUEN ACUIFERO				ACUIFERO POBRE		ACUITARDOS		PRACTICAMENTE IMPERMEABLE		

Tabla 3: Clasificación de los terrenos y acuíferos en función de su permeabilidad (Custodio y Llamas, 1983).

PERMEABILIDAD EN (m/día)	10 <sup>4</sup>	10 <sup>3</sup>	10 <sup>2</sup>	10	1	10 <sup>-1</sup>	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-6</sup>
CALIFICACIÓN	MUY PERMEABLE		PERMEABLE		ALGO PERMEABLE		POCO PERMEABLE		IMPERMEABLE		
CALIFICACIÓN DEL ACUIFERO	ACUIFERO EXCELENTE		ACUIFERO DE REGULAR A BUENO		ACUIFERO POBRE		ACUITARDO		ACUICLUSIO		
TIPOS DE MATERIALES	GRAVAS LIMPIAS		ARENA LIMPIA GRAVA Y ARENA ARENA FINA		ARENA FINA ARENA LIMOSA CALIZA FRACTURADA		LIMO ARENOSO LIMO ARCILLA LIMOSA		ARCILLAS COMPACTAS PIZARRA GRANITO		

## 2.4. CONCEPTO DE ACUÍFERO

Los acuíferos, que son unidades geológicas que almacenan y transmiten agua en cantidades económicamente explotables, pueden encontrarse en diversos ambientes geológicos, en contacto directo con la atmósfera o bien, desconectados parcial o totalmente de ésta y por lo tanto, sometidos a cargas hidráulicas muy distintas. Desde este punto de vista se pueden clasificar a los acuíferos en:

1. Acuíferos Libres, Freáticos o No Confinados
2. Acuíferos Confinados, Cautivos o Artesianos
3. Acuíferos Semiconfinados (Leaky aquifers)
4. Acuíferos Semilibres

### 1. Acuífero Libre o Freático

Los acuíferos libres son aquellos en que el agua subterránea presenta una superficie libre, sujeta a la presión atmosférica como límite superior de la zona de saturación. Esta superficie libre se conoce como superficie freática y el nivel a que ella se eleva, respecto a otro de referencia, se llama nivel freático. Está formado en general por un estrato permeable parcialmente saturado en agua que yace sobre otro estrato impermeable o relativamente impermeable.

La profundidad de este sustrato impermeable varía de acuerdo al medio geológico, por ejemplo, en zonas donde existen potentes depósitos sedimentarios, la profundidad se puede localizar a varias decenas o cientos de metros.

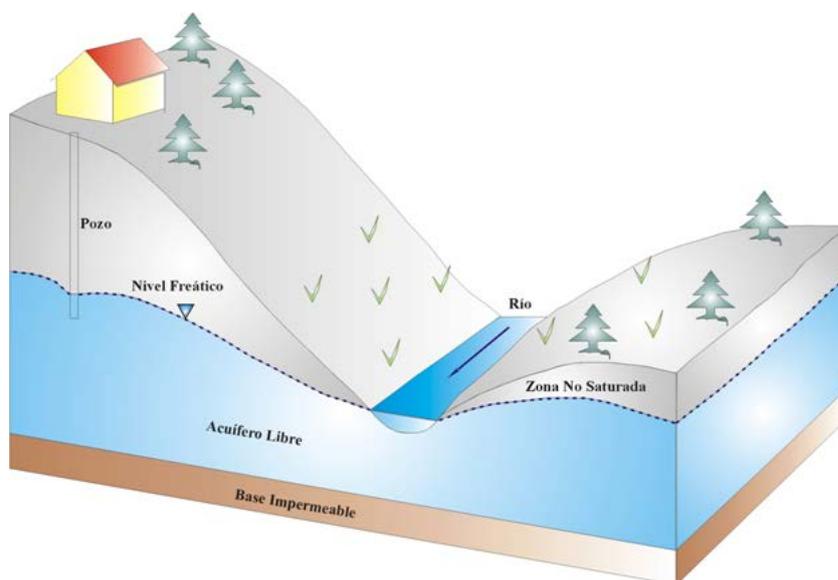


Ilustración 4: Acuífero libre, mostrando el nivel freático (Fetter, 1988).

En la mayoría de los casos, existe solamente un nivel freático, pero en otros a causa de la presencia de acuitardos de pequeñas dimensiones relativas, pueden existir acuíferos que se denominan acuíferos colgados con niveles freáticos adicionales.

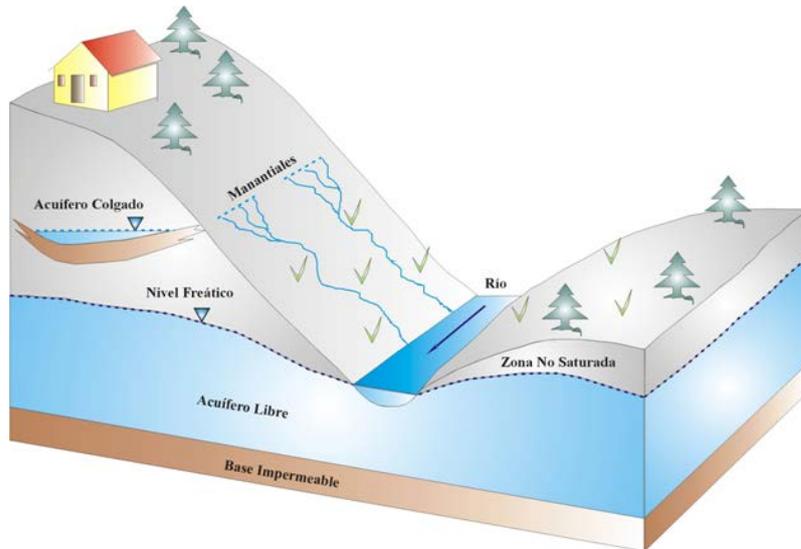


Ilustración 5: Acuífero libre. En la zona no saturada existe una “falsa freática” o acuífero colgado (Fetter, 1988).

En algunos acuíferos libres compuestos de partículas finas, el drenaje por gravedad de los poros con frecuencia puede que no sea instantáneo, y en ese caso, el acuífero entrega el agua un cierto tiempo después de que el nivel freático desciende en el mismo. A este tipo de acuíferos se le denomina libre con entrega retardada.

## 2. Acuífero Confinado o Cautivo

Los acuíferos confinados, cautivos o artesianos, son formaciones geológicas permeables, completamente saturadas de agua, confinadas entre dos capas o estratos impermeables o prácticamente impermeables (una inferior y otro superior). En estos acuíferos el agua está sometida, en general, a una presión mayor que la atmosférica y al perforar un pozo en ellos el agua se eleva por encima de su parte superior (techo) del acuífero hasta un nivel que se denomina nivel piezométrico. La superficie imaginaria que representa la carga piezométrica en los distintos puntos del acuífero se conoce como superficie piezométrica. Se debe recordar en este punto que, tanto el sustrato como el techo impermeable presentan morfología y posición estables, mientras que la superficie piezométrica presenta variaciones de altitud y forma. En algunos casos, la superficie piezométrica puede estar por encima del terreno natural por lo que un pozo perforado en el lugar fluirá naturalmente. Los acuíferos confinados se conocen también como artesianos a causa de que en la región francesa de Artois fue el primer lugar donde se perforaron pozos profundos en acuíferos confinados, alrededor del año 1750.

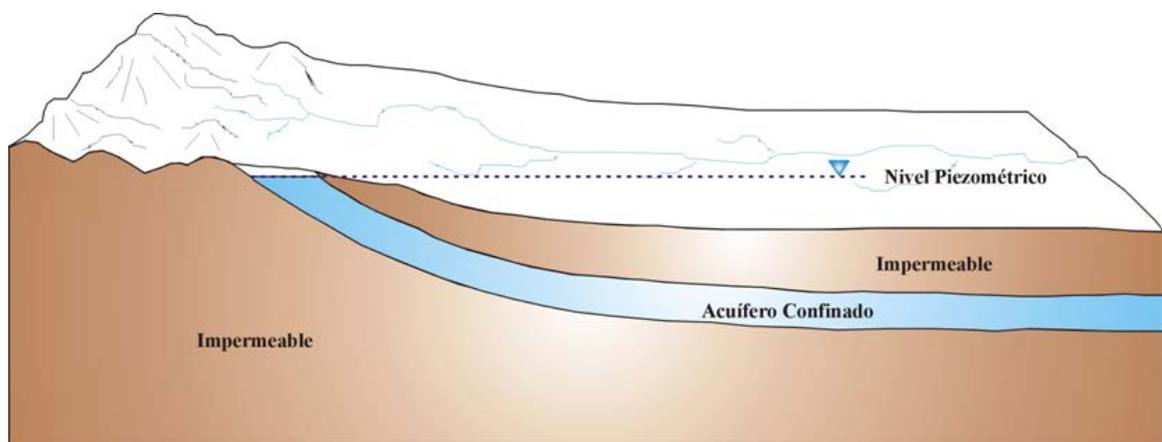


Ilustración 6: Acuífero confinado (Fetter, 1988).

De acuerdo a la posición dentro de un mismo acuífero, se puede advertir un comportamiento distinto de los pozos que se realicen en la unidad. De esta forma, un acuífero puede iniciarse como un acuífero libre (respecto a la zona de recarga), luego pasar a semiconfinado y por último, confinado totalmente. Si un pozo alcanza un nivel confinado con suficiente nivel energético (superficie piezométrica o potenciométrica) y está localizado en una posición topográfica favorable, puede alcanzar a ser un pozo surgente.

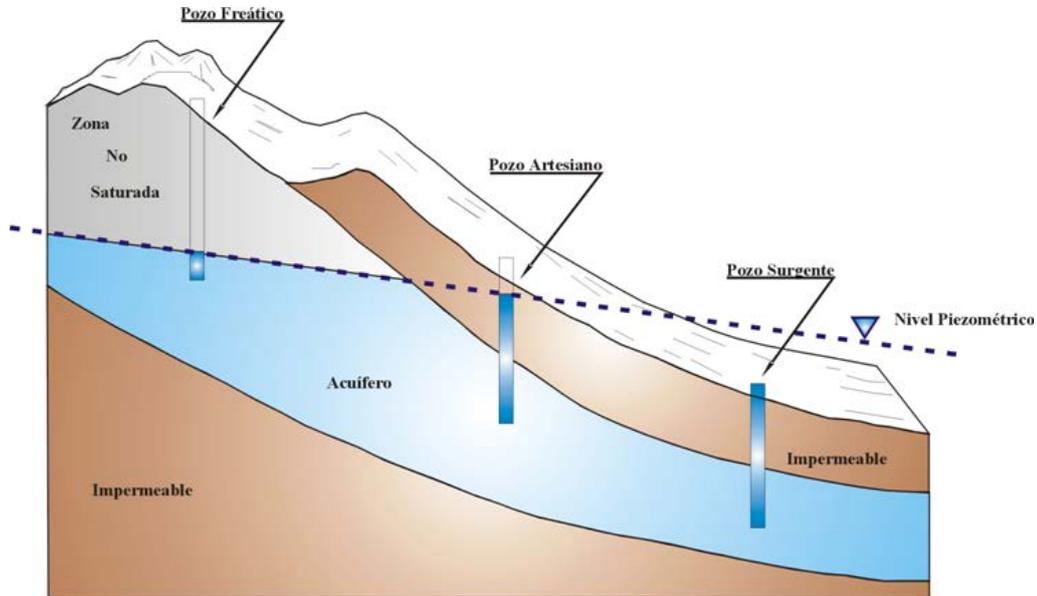


Ilustración 7: Acuífero confinado, mostrando pozos artesianos y surgentes (Fetter, 1988).

### 3. Acuíferos Semiconfinados

Son acuíferos completamente saturados sometidos a presión que están limitados en su parte superior por una capa semipermeable (acuitardo) y en su parte inferior por una capa impermeable (acuífugo) o también por otro acuitardo. En este tipo de acuífero, la disminución de la carga piezométrica originada por el bombeo, por ejemplo, inducirá un flujo vertical del agua contenida en el acuitardo, que actuará como recarga del acuífero. Las características del acuitardo confinante en un acuífero semiconfinado son tales que puede ignorarse la componente horizontal del flujo del acuitardo.

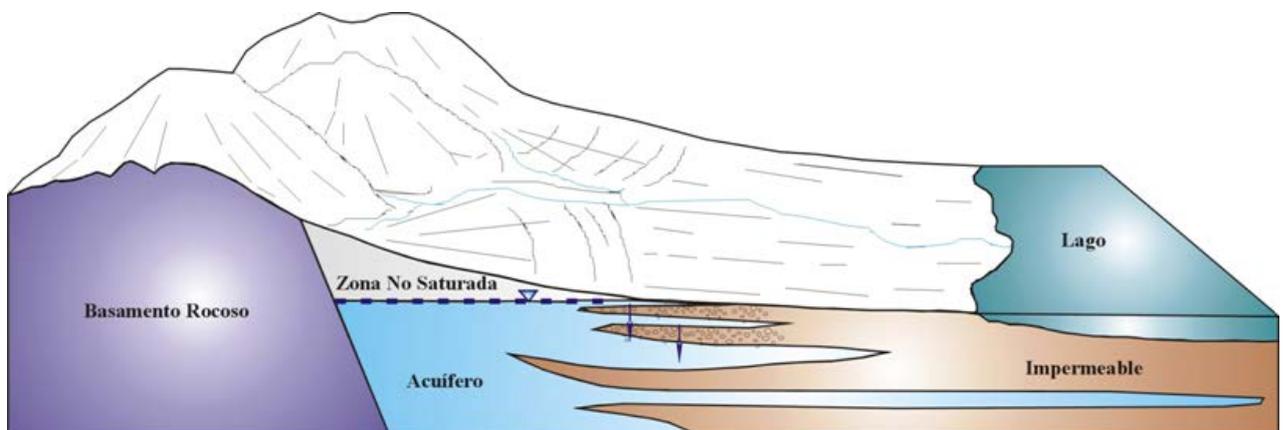


Ilustración 8: Acuíferos libre, semiconfinado y confinado (Fetter, 1988).

#### 4. Acuíferos Semilibres

Los acuíferos semilibres representa una situación intermedia entre un acuífero libre y uno semiconfinado. En este caso, la capa confinante superior es un estrato semipermeable o acuitardo, de características tales que su componente horizontal de flujo no puede ignorarse.

Kruseman y De Ridder (1970), partiendo de considerar los acuíferos apoyados en una capa impermeable, especifican que el tipo de acuífero queda determinado por el carácter de la capa superior. Así quedan definidos:

Acuífero Libre	Capa superior igual que la parte principal del acuífero
Acuífero Semilibre	Capa superior semipermeable (Acuitardo), menos permeable que la parte principal del acuífero, en el que hay que tomar en cuenta la componente horizontal del flujo.
Acuífero Semiconfinado	Capa superior semipermeable (Acuitardo), en que puede ignorarse la componente horizontal del flujo.
Acuífero Confinado	Capa superior impermeable.

#### 2.5. FLUJO EN MEDIOS POROSOS

En el año 1856, en la ciudad francesa de Dijon, el Ingeniero Henry Darcy recibió el encargo de realizar el estudio de la red de abastecimiento a la ciudad. Parece ser que también debía diseñar unos filtros de arenas para purificar el agua captada de los cursos fluviales. Fue así que se interesó por los factores que influían en el flujo del agua a través de los medios porosos y presentó sus resultados de los trabajos donde indica los conceptos más importantes que dan origen a la hidrogeología moderna (Sánchez San Román, 2001). Darcy encontró que el caudal que atravesaba un tubo lleno de arena, era linealmente proporcional a la sección del tubo y al gradiente hidráulico. Es decir que variando el caudal con un grifo y/o moviendo el depósito elevándolo (carga), los niveles de agua en los tubos variaba. También observó que cambiando todas las variables, siempre que se utilice la misma arena, se cumple:

$$Q = cte \cdot A \cdot \frac{\Delta h}{\Delta L}$$

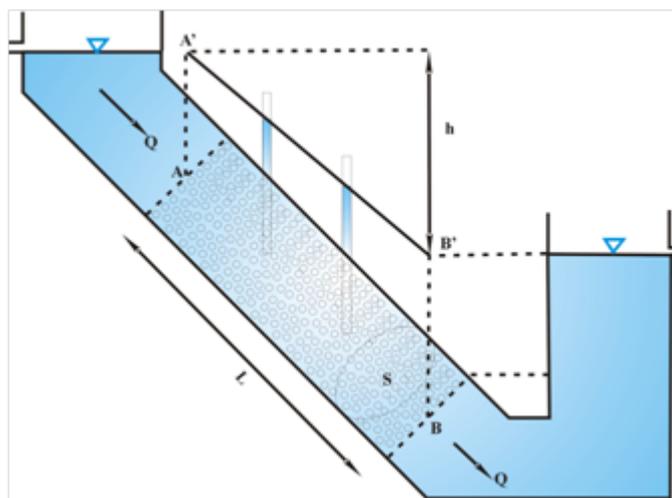


Ilustración 9: Experimento de Darcy.

Darcy también encontró que utilizando otro tipo de arena (más gruesa o más fina o una mezcla) y jugando nuevamente con todas las variables, se volvía a cumplir la ecuación anterior, pero que la constante de proporcionalidad lineal era otra distinta. Así concluyó que esa constante era propia y característica de cada arena y la llamó Permeabilidad o Conductividad hidráulica (K). De esta forma, la expresión actual y moderna de la Ley de Darcy es:

$$Q = K \cdot A \cdot i$$

$$Q = K \cdot A \cdot \frac{\Delta h}{\Delta L}$$

Dónde:

Q= Caudal (m<sup>3</sup>/día)

K= Constante de proporcionalidad lineal o Permeabilidad (m/día) o

A= Sección del tubo (m<sup>2</sup>)

$\Delta h$ = Diferencia de carga hidráulica (m)

L= Longitud entre los tubos piezométricos en el sentido de flujo (m)

i= Gradiente hidráulico

### 2.5.1. El potencial hidráulico

La aplicación del teorema de Bernoulli indica claramente que el agua se pone en movimiento desde los puntos de mayor energía hacia aquellos que tienen menor energía. Esta situación, ampliamente comprobada tiene una importancia fundamental en el estudio y análisis de las aguas subterráneas. Muchas veces, en forma intuitiva, se piensa que el agua subterránea se mueve desde los puntos donde está más alta hacia los puntos en lo que está más bajo, pero esta situación es poco frecuente en la naturaleza. Por el contrario, la aplicación del teorema de Bernoulli muestra que es común que la circulación del agua subterránea circule hacia arriba con cualquier componente, incluso verticalmente.

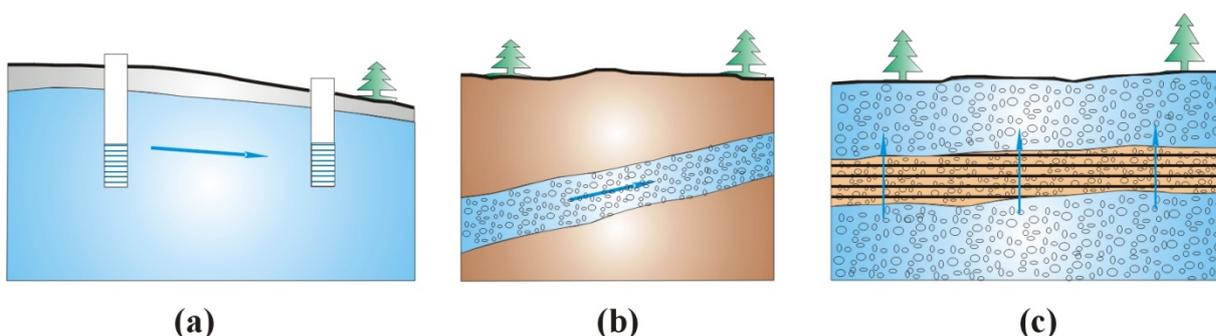


Ilustración 10: Esquema del movimiento del agua subterránea en distintas situaciones morfológicas.

Por ejemplo, si en las ilustraciones siguientes se realizan dos perforaciones que alcancen el acuífero se observará que la columna de agua en el pozo 1 será más alta que la columna de agua del pozo 2. Así, el agua circula de los puntos en la que la columna de agua es más alta, hacia aquellos sectores en donde la columna es más baja.

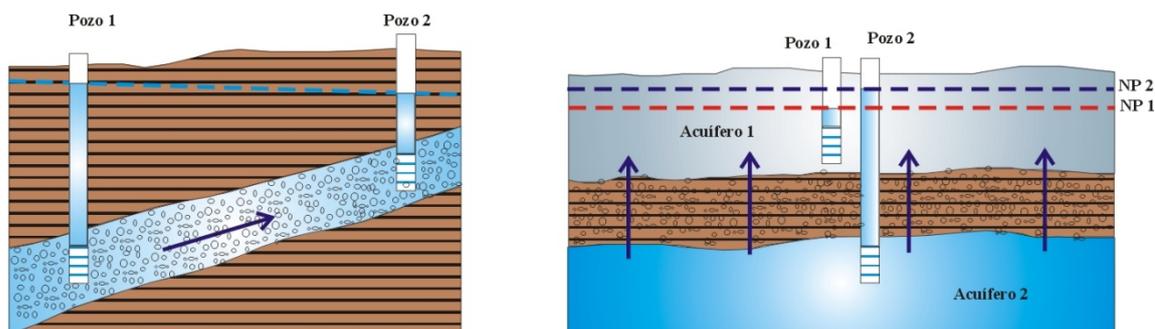


Ilustración 11: Esquema del movimiento del agua subterránea en distintas situaciones morfológicas.

Este movimiento del agua desde los puntos con columna de agua más alta hacia los de columna de agua más baja, en realidad es un indicio de que el fluido se moviliza desde puntos de mayor nivel energético hacia puntos de menor valor. Efectivamente puede demostrarse, como se hizo anteriormente, que la energía total por unidad de masa (Potencial Hidráulico) es igual a la altura de la columna de agua ( $h$ ) multiplicada por la aceleración de la gravedad ( $g$ ).

$$\phi = h \cdot g$$

La energía total del sistema será la suma algebraica de la energía potencial (debido a su posición en el espacio y respecto a un plano de referencia), la energía cinética (debida a su velocidad) y la energía de presión (como la energía que almacena un muelle cuando está comprimido). Si bien la energía cinética en el flujo de canales abiertos es importante, como se ha visto, la velocidad del agua subterránea es tan lenta que a fines prácticos se hace despreciable comparándola con las otras dos.

### 2.5.2. Velocidad del agua en los medios porosos

Se sabe que en cualquier conducto por el que circula un fluido se cumple que el caudal es igual al producto entre la velocidad del fluido y el área atravesada por éste.

$$Q = A \cdot v$$

Si se aplica este concepto al permeámetro cilíndrico del experimento de Darcy y se calcula la velocidad a partir del caudal y de la sección del tubo (que son conocidos) se obtiene una velocidad que no es real, ya que el agua no circula por toda la sección del tubo, sino solamente por una pequeña fracción de ella (a través de los poros interconectados del medio poroso que ocupa el tubo). Esta velocidad así obtenida se denomina *Velocidad de flujo* o *Velocidad de Darcy* ( $vD$ ).

Esa parte de la sección total del tubo por la que puede circular el agua es la de la porosidad eficaz; por lo tanto si un material tiene un 10% de porosidad eficaz ( $m_e$ ), el agua circulará por el 10% de la sección total del tubo. Por lo tanto, para que el mismo caudal circule por una sección 10 veces menor, su velocidad será 10 veces mayor. Esta relación se conoce como *Velocidad Real* o *Velocidad* ( $vR$ ) *Lineal Media*. Así se cumple que:

$$vR = \frac{vD}{m_e}$$

### 2.5.3. Limitaciones de la Ley de Darcy

La ley de Darcy presenta algunas limitaciones en su aplicabilidad y no es suficientemente precisa por dos razones principales:

1º) La constante de proporcionalidad denominada Permeabilidad o Conductividad Hidráulica (KD) no es propia y característica del medio poroso en sentido estricto, ya que su valor también depende de las características del fluido que circula por ese medio. La Conductividad Hidráulica o Permeabilidad de Darcy (KD) puede expresarse como:

$$KD = k \cdot \frac{\gamma}{\mu}$$

Dónde:

KD= Conductividad Hidráulica o Permeabilidad de Darcy

k= Permeabilidad intrínseca (depende sólo del medio poroso)

$\gamma$ = Peso específico del fluido

$\mu$ = Viscosidad dinámica del fluido

Este concepto tiene especial importancia en geología del petróleo, donde se estudian fluidos de diferentes características. En el caso del agua, la salinidad apenas hace variar el peso específico y la viscosidad. Es la temperatura el factor más importante, ya que la viscosidad del agua se duplica entre los 5º y 35º C, con lo que se duplicaría la Permeabilidad de Darcy y, por supuesto, también el caudal circulante por la sección considerada del medio poroso. En el caso de las aguas subterráneas, la temperatura se mantiene casi constante en el tiempo para un mismo acuífero, por lo que prácticamente no existen variaciones. Es por esta razón que en el estudio de las aguas subterráneas se asume (teniendo presente las condiciones enunciadas) que la Permeabilidad de Darcy o Conductividad Hidráulica es una característica del medio poroso.

2º) En algunas circunstancias, la relación entre el caudal y el gradiente hidráulico no es lineal. Esta situación puede suceder cuando el valor de KD es muy bajo o cuando las velocidades del flujo son muy altas. En el primer caso, por ejemplo, calculando el flujo a través de una formación arcillosa, el caudal que se obtendría aplicando la Ley de Darcy sería muy bajo, pero en la realidad, si no se aplican gradientes muy elevados, el agua no llega a circular a través de ese medio y el caudal es 0. En el segundo caso, si el agua circula a gran velocidad, el caudal es directamente proporcional a la sección y al gradiente hidráulico, pero no linealmente, sino que la función es potencial.

$$Q = KD \cdot \left(\frac{dh}{dL}\right)^n$$

Donde el exponente n es distinto de 1.

En el flujo subterráneo, las velocidades son muy bajas y casi siempre la relación es lineal, salvo en las proximidades de captaciones bombeando en ciertas condiciones. La ley de Darcy es válida para velocidades menores o igual a 0,023 m/seg.

## 2.6. PARÁMETROS HIDROGEOLÓGICOS DE LOS RESERVORIOS DE AGUA SUBTERRÁNEA

En el estudio del agua subterránea, tanto para conocer la distribución de las líneas de flujo, caudales y reservas es necesario conocer una serie de parámetros que son conocidos como Parámetros Hidrogeológicos o Parámetros Hidráulicos de los acuíferos. Como expresa Sánchez San Román (2001), la “Personalidad Hidrogeológica” (o Propiedades Hidrogeológicas) de cualquier roca o formación geológica está definida por dos factores:

- ❖ Su capacidad de almacenar agua y luego cederla (porosidad y coeficiente de almacenamiento).
- ❖ Su capacidad de transmitir el agua que circula por ella (permeabilidad, transmisividad)

### Permeabilidad

Como ya se ha visto, la Permeabilidad es definida normalmente como la facilidad que un cuerpo de roca o sedimento ofrece a ser atravesado por un fluido. Este concepto básico en geología, tiene un alcance más preciso en Hidrogeología ya que la Permeabilidad o Conductividad Hidráulica es la constante de proporcionalidad lineal entre el caudal y el gradiente hidráulico. Esta expresión es la Ley de Darcy, por lo que es válido denominarla Conductividad Hidráulica o Permeabilidad Darciana ( $k_D$ ). Las unidades de la Conductividad Hidráulica son las de una velocidad (L/T).

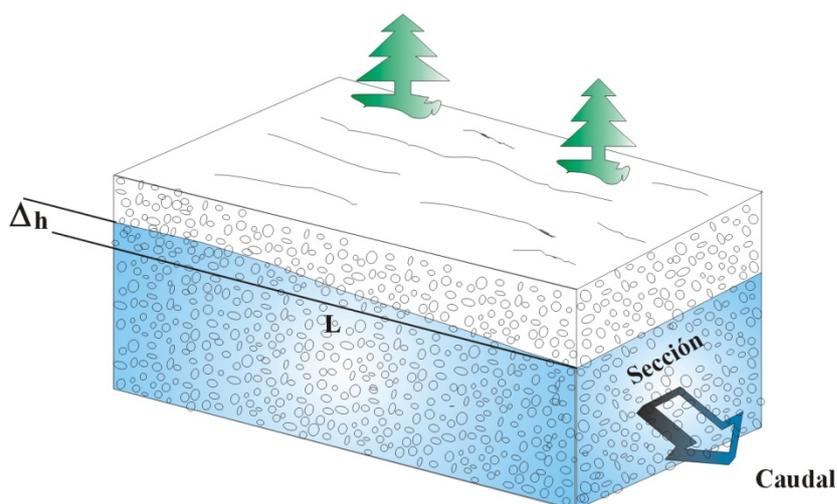


Ilustración 12: Representación gráfica del concepto de permeabilidad darciana.

### Transmisividad

Este concepto fue introducido por Theis en 1935 y lo define como el caudal que se filtra a través de una franja vertical de terreno, de ancho igual a la unidad y de altura igual al espesor permeable saturado, bajo un gradiente igual a la unidad y a una temperatura determinada. Theis intuyó que un acuífero que presenta una  $k_D$  de 50 m/día y tiene un espesor de 5 metros, debería entregar el mismo caudal que un acuífero que tiene una  $k_D$  de 25 m/día y 10 metros de espesor. La ley de Darcy expresa:

$$Q = K_D \cdot i \cdot A$$

El área ( $A$ ) perpendicular al flujo, puede expresarse como el producto de la extensión del acuífero ( $L$ ) por el espesor permeable saturado ( $e$ ), luego:  $Q = K_D \cdot i \cdot L \cdot e$

El producto  $k_D \times e$  se conoce como Transmisividad Darciana (TD):  $T_D = K_D \cdot e$

Por lo tanto la Ley de Darcy puede expresarse:  $Q = T_D \cdot i \cdot L$

o bien:  $T_D = \frac{Q}{L \cdot i}$

La Transmisividad, en consecuencia se expresa en  $m^2/\text{día}$  ó  $\text{cm}^2/\text{seg}$ .

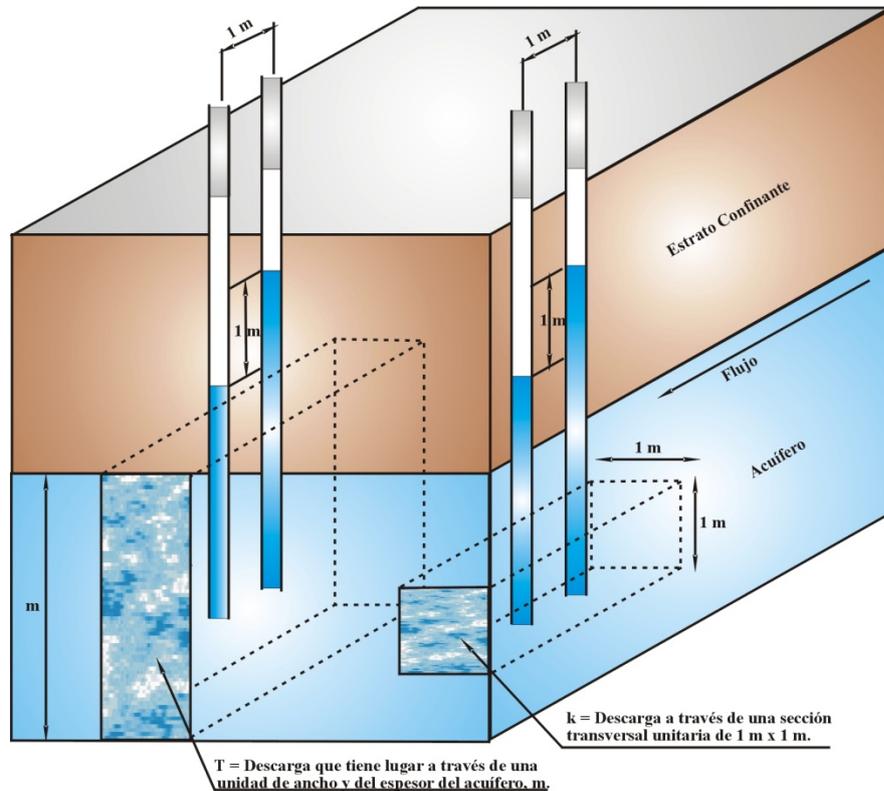


Ilustración 13: Representación gráfica del concepto de transmisividad.

### Coeficiente de Almacenamiento

Se define como el volumen de agua que puede ser liberado por un prisma vertical de acuífero de sección igual a la unidad y de altura igual a la del acuífero saturado si se produce un descenso unidad del nivel piezométrico o carga hidráulica. El coeficiente de almacenamiento S, no tiene dimensión.

En la literatura inglesa el Coeficiente de Almacenamiento se denomina Storativity (S) y se define como el volumen de agua que una unidad permeable va a absorber o expeler del almacenamiento por unidad de superficie cuando se produzca un cambio de gradiente en una unidad. Es adimensional. En la zona saturada, la carga piezométrica genera presión afectando al arreglo de los granos, así como a la densidad del agua almacenada en los espacios porales. Si la presión aumenta, se expande la trama mineral, si la presión disminuye, la trama se contrae o comprime. Esto se denomina elasticidad. El agua se va a contraer con un aumento en la presión y se expande si esta cae. Cuando el gradiente en un acuífero o capa confinante disminuye, la trama del acuífero se comprime, lo que reduce la porosidad efectiva y se expelen agua. De acuerdo a la definición, en los acuíferos libres, el coeficiente de almacenamiento es igual a la porosidad eficaz; ya que si por ejemplo se considera  $1 \text{ m}^2$  de acuífero libre y se hace descender 1 metro su superficie freática, el volumen de agua extraído será igual a la porosidad eficaz.

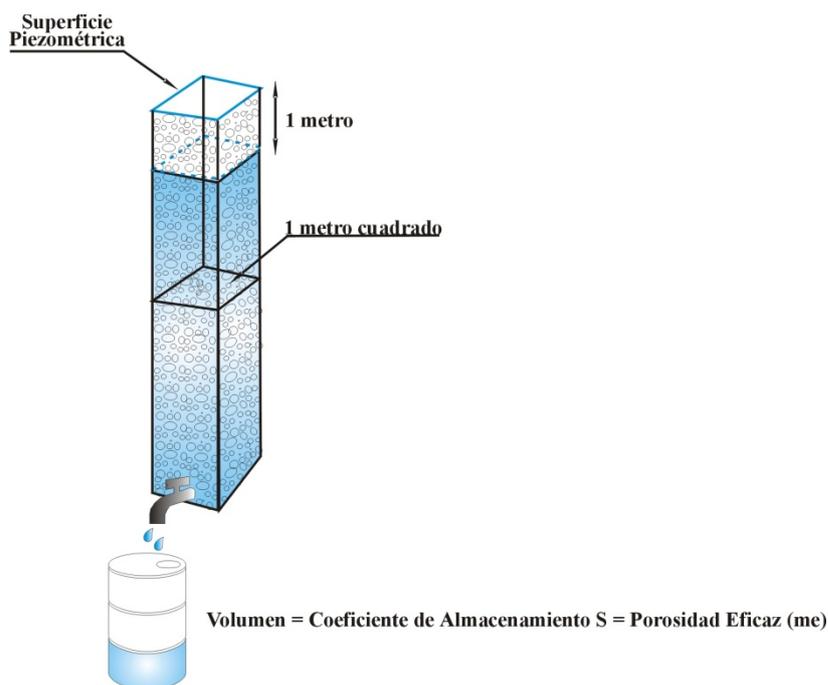


Ilustración 14: Representación gráfica del concepto de coeficiente de almacenamiento.

En los acuíferos confinados o cautivos, lamentablemente, el concepto no es tan simple ya que además entran en juego parámetros tales como los efectos mecánicos de compresión del terreno o de la propia agua. En un acuífero confinado, cuando proporciona agua, todos sus poros continúan llenos de agua (a diferencia de los poros de un acuífero libre que se vacían a medida que entrega el agua) y sólo disminuye la presión. De esta forma, queda claramente evidenciado que en los sistemas confinados, el dato de porosidad eficaz no indica nada acerca de la cantidad de agua almacenada en el reservorio.

El Specific Storage ( $S_s$ ) de la literatura inglesa (Fetter, 1988) se refiere a la cantidad de agua por unidad de volumen de una formación saturada que es almacenada o expelida del almacenamiento debido a la compresibilidad de la trama mineral y del agua poral por unidad de cambio de gradiente, también se conoce como "Elastic Storage Coefficient". Este concepto se aplica a acuíferos y a capas confinantes.

$$S_s = \rho_w \cdot g (\alpha + m\beta)$$

Donde,

- $\rho_w$  es la densidad del agua
- $g$  es la aceleración de la gravedad
- $\alpha$  es la compresibilidad de la trama del acuífero
- $\beta$  es la compresibilidad del agua
- $m$  es la porosidad total

$S_s$  posee dimensiones de longitud  $-1$  y generalmente es un número muy pequeño. En un acuífero confinado, al caer el gradiente, el nivel piezométrico sigue estando por arriba del techo del acuífero, a pesar de que se saca agua del almacenamiento, el acuífero permanece saturado.

De la misma forma, en un acuífero confinado, el Storativity ( $S$ ) es igual al producto de su Specific storage, por el espesor ( $b$ ) del acuífero:

$$S = b \cdot S_s$$

Al tener en cuenta las unidades, el concepto de Storativity es adimensional. El agua es incorporada o cedida debido a la compresibilidad de la trama mineral y del agua contenida en los poros. El agua proviene de todo el espesor del acuífero. El valor correspondiente a un acuífero confinado es muy pequeño. En un acuífero libre, al fluctuar el nivel por variaciones en el almacenamiento, el agua drena desde los espacios porales. Esta adición o pérdida es debida a su porosidad efectiva ( $m_e$ ).

$$S = h \cdot m_e \cdot S_s$$

$m_e$  = porosidad efectiva

$h$  = espesor saturado

$S_s$  = specific storage

Los valores de porosidad eficaz ( $m_e$ ), son muy grandes con respecto al producto del espesor saturado y el valor de specific storage, por esto, los valores de Storativity se consideran como equivalentes a la porosidad eficaz o el llamado Specific yield ( $S_y$ ).

$$S = m_e = S_y$$

El coeficiente de almacenamiento es adimensional (ya que es una relación de volumen/volumen), y los valores que presenta son mucho más bajos en los acuíferos confinados perfectos que en los semiconfinados y libres. Los valores típicos son:

- ❖ Acuíferos libres: 0,3 a 0,01 ( $3 \cdot 10^{-1}$  a  $10^{-2}$ )
- ❖ Acuíferos semiconfinados:  $10^{-3}$  a  $10^{-4}$
- ❖ Acuíferos confinados:  $10^{-4}$  a  $10^{-5}$

En el caso de los acuíferos confinados, el agua liberada procede de los efectos mecánicos de la compresión del cuerpo del acuífero (trama sólida) y del agua. En el caso de los acuíferos libres o freáticos, ignorando los efectos relativamente pequeños que puede introducir la elasticidad del acuífero, resulta claro que el coeficiente de almacenamiento es equivalente a la porosidad eficaz, ya que en ambos casos resulta ser la cantidad de agua que puede ser extraída por gravedad de una unidad de volumen de acuífero saturado.

### Resistencia hidráulica y factor de goteo

Para el análisis y estudio de los acuíferos semiconfinados es necesario tener en cuenta, además de la Transmisividad y Coeficiente de Almacenamiento, dos nuevas propiedades que se conocen con el nombre de resistencia hidráulica y factor de goteo.

**Resistencia Hidráulica (C):** Es una medida de la resistencia que ofrece la capa semiconfinante (Acuitardo) al flujo en dirección vertical, y se define por la relación entre el espesor saturado del acuitardo ( $e'$ ) y su Permeabilidad Darciana Vertical ( $K'_D$ ); es decir:

$$C = \frac{e'}{K'_D}$$

Las dimensiones de la resistencia hidráulica son las del tiempo. Si  $C = \infty$ , el acuífero es confinado.

**Factor de Goteo o Factor de Filtración (L):** Determina la distribución de la filtración en un acuífero semiconfinado. Es decir que determina el origen del agua que se extrae de un pozo construido en el acuífero. Tiene las dimensiones de una longitud y está definido por la ecuación:

$$L = \sqrt{K_D \cdot C}$$

Valores altos de L indican una gran resistencia al flujo del acuitardo confinante en comparación con el acuífero, lo que implica una pequeña influencia relativa en la recarga del acuífero a partir del acuitardo.

Factor de Drenaje (D): En el análisis de acuíferos libres con entrega retardada o semilibres, es necesario tener en cuenta el llamado factor de drenaje (D) que está definido por la siguiente ecuación:

$$D = \left( \frac{KD \cdot e}{\alpha \cdot S_y} \right)^{1/2}$$

Donde  $\alpha$  es el inverso del índice de retraso de Boulton ( $1/\alpha$ );  $S_y$  el volumen total de entrega retardada procedente del almacenamiento, por unidad de abatimiento por unidad de área horizontal (caudal específico después de un tiempo grande de bombeo). Valores altos de D indican un drenaje rápido. Si  $D = \infty$ , la entrega es instantánea al descender la superficie freática y el acuífero será libre sin entrega retardada. El factor de drenaje (D), tiene las dimensiones de una longitud.

## 2.7. HIDRODINÁMICA

El flujo de agua se produce de una zona de mayor nivel energético hacia otra de menor valor siguiendo la misma analogía del flujo calórico o flujo eléctrico. El agua se mueve buscando un máximo gradiente, tal como sucede con una pelota de fútbol que se hace rodar por las laderas de una colina. Esta se mueve en forma perpendicular a las curvas de nivel, buscando siempre la máxima pendiente topográfica. De igual manera, una línea de flujo de agua subterránea, en su búsqueda del mayor gradiente, se mueve en forma perpendicular a las líneas equipotenciales. En el ejemplo, la pelota representa la molécula de agua y su movimiento determina un vector de velocidad en un instante determinado (línea de flujo) que se dispone en forma perpendicular a las curvas de nivel (líneas equipotenciales). De esta forma se puede expresar que así como las curvas de nivel representan puntos de igual altura o cota; las líneas equipotenciales representan puntos de igual valor energético.

Una superficie equipotencial es el lugar geométrico de los puntos del espacio que tienen un mismo potencial hidráulico.

Una red de flujo es una representación esquemática del flujo en un plano mediante líneas de flujo y líneas equipotenciales. Las líneas equipotenciales son la traza de las superficies equipotenciales al ser cortadas por el plano en que se dibuja la red de flujo. El flujo siempre es tridimensional, así que las redes de flujo, en un plano pueden trazarse en un plano horizontal o en un corte vertical (Sánchez, San Román, 2001).

El trazado de una red de flujo debe cumplir con algunas condiciones. Entre las principales es que ambas familias de líneas (de flujo y equipotenciales) tienen que intersectarse en forma perpendicular. Por otro lado, los espacios resultantes de la construcción deben ser “cuadrados” (aunque sean trapecios curvilíneos o triángulos deben aproximarse lo más posible a cuadrados).

La construcción de una red de flujo permite, entre otras cosas calcular cuantitativamente el caudal circulante. También se puede establecer (obviamente) la dirección de flujo del agua subterránea, el gradiente hidráulico, el tiempo de tránsito de una molécula de agua y la velocidad de flujo.

### 2.7.1. Curvas equipotenciales o isopiezas

Las curvas isopiezométricas (o abreviadamente isopiezas) son las curvas de nivel de la superficie piezométrica o de los puntos de igual presión de un acuífero, se identifican con las líneas equipotenciales, las cuales son las líneas de igual elevación de nivel estático, generalmente se expresan en metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.).

Para identificar las isopiezas (conocidas también como hidroisohipsas) se emplean también los términos de curvas isofreáticas cuando se refieren al movimiento de las aguas subterráneas en un acuífero libre y curvas piezométricas cuando se analiza un acuífero confinado.

Las superficies piezométricas poseen una superficie que le es propia, comparable a la de una superficie topográfica: depresiones, ondulaciones, rupturas de pendiente, y pueden trazarse en ella curvas de nivel que unan los puntos de igual altitud.

Las curvas isopiezas pueden presentar cualquier forma, curvatura o inclinación, pero en muchas zonas la componente vertical del flujo es pequeña en comparación con la componente horizontal, es decir, que el flujo es casi horizontal y que las superficies equipotenciales son aproximadamente verticales.

Cuando el flujo de agua es horizontal, las superficies equipotenciales son verticales, como se observa en la figura siguiente. Allí se representa el flujo a través de un estrato acuífero horizontal, que se encuentra confinado.

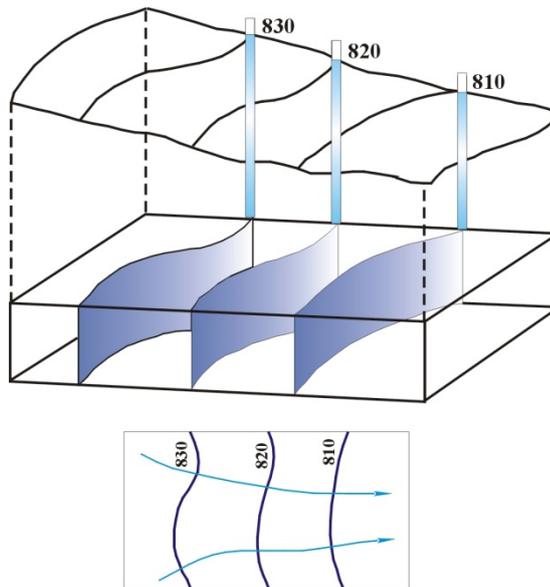


Ilustración 15: Superficies equipotenciales debido a flujo horizontal.

En la ilustración siguiente, se representa una situación correspondiente a un acuífero libre que aporta agua a un curso fluvial (río efluente) y en donde existe una componente de flujo vertical importante. En este caso, las redes de flujo se representan en cortes verticales o perfiles. Como es de suponer, para saber si el flujo subterráneo es horizontal, o si por el contrario, presenta una componente ascendente o descendente, hay que medir el nivel energético del agua en el acuífero, lo que se hace realizando pozos puntuales (de acuerdo a lo que se quiera investigar) a diferente profundidad dentro del reservorio.

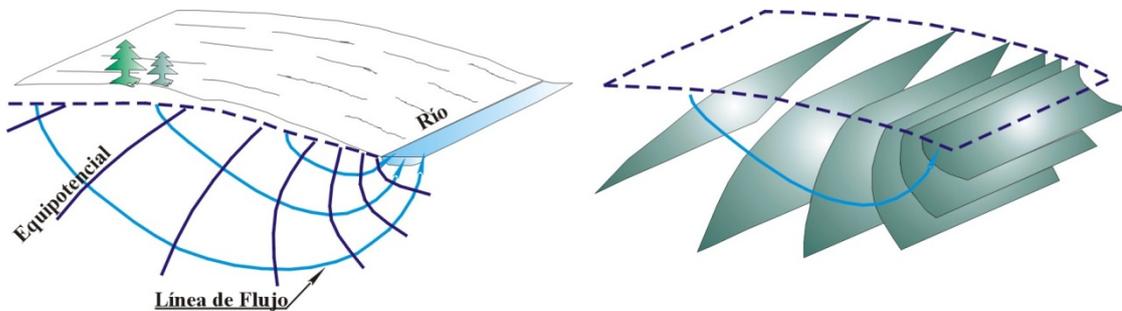


Ilustración 16: Superficies equipotenciales debido a flujo con componente vertical.

Las etapas para la construcción de un mapa de isopiezas son:

- Medida del nivel piezométrico en diversos puntos (los más posibles).
- Hay que obtener la cota del nivel de agua, que es igual a la cota del terreno menos la profundidad del agua.
- Situación sobre el mapa de todas las medidas y trazado de las isopiezas.
- Todos los puntos de agua se colocan, con su correspondiente nivel piezométrico, sobre un mapa de curvas de nivel de escala adaptada al tipo de problema a resolver. Se trazan entonces las curvas isopiezas uniendo los puntos de igual altitud, tal como se operaría en el levantamiento de un mapa topográfico de curvas de nivel. La equidistancia de las curvas se escoge en función del gradiente hidráulico, de la escala y de la densidad de los puntos de observación.
- Trazado de algunas líneas de flujo perpendiculares a las líneas isopiezométricas.

- En un mapa de isopiezas a veces no se dibujan. En cualquier caso pueden trazarse algunas indicando las direcciones del flujo, pero no tantas para que formen una malla de cuadrados.
- El mapa obtenido revela la forma de la superficie piezométrica del acuífero estudiado en una época determinada, es de hacer notar que un mapa de isopiezas reflejará fielmente la realidad tridimensional si todas las medidas se han tomado en un lapso de tiempo breve (máximo 2 días), si todos los puntos de medida están en el mismo acuífero y tienen profundidades similares.

Las curvas Isopiezas permiten determinar, partiendo de las observaciones en el terreno y sus variaciones en las diferentes zonas del acuífero, obtener indicadores de gran utilidad sobre las características del movimiento de las aguas subterráneas. Por consiguiente, los mapas de curvas Isopiezas permiten:

- Calcular la profundidad de la superficie piezométrica.
- Trazar las líneas de flujo y determinar la dirección del movimiento de las aguas subterráneas.
- Determinar el gradiente hidráulico.
- Velocidad de flujo y tiempo de tránsito de moléculas.

### 2.7.2. Trazado de líneas de flujo y determinación de la dirección del movimiento

Una línea de flujo es una línea imaginaria que traza el patrón a través del cual se moverá una partícula del flujo de agua subterránea a través del acuífero. Las líneas de flujo se trazan perpendicularmente a las líneas equipotenciales e indican la dirección del flujo de agua subterránea. El método elemental de determinación es el siguiente: Sean tres puntos de agua A, B y C, de los que se han determinado los niveles piezométricos de 40, 34 y 36 m.b.b.p. Se unen los tres puntos mediante segmentos de recta, trazando de este modo un triángulo ABC. Cada lado se divide en segmentos proporcionales unidos mediante rectas los puntos de igual altitud: son las curvas Isopiezas. La recta AD, perpendicular, representa una línea de flujo y permite determinar el eje y la dirección del movimiento.

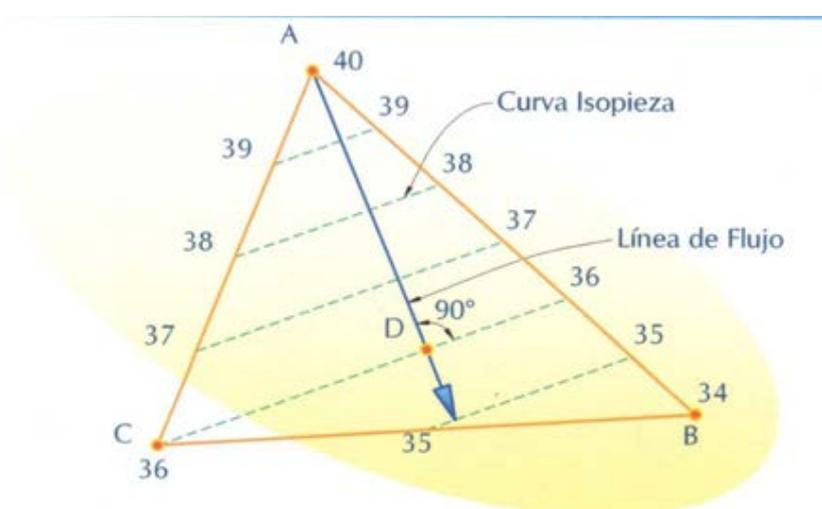


Ilustración 17: Determinación de las líneas de flujo y dirección de movimiento del agua por el problema de tres puntos.

La primera operación para la interpretación de los mapas de curvas isopiezas consiste en trazar las líneas de flujo. En los casos sencillos, elevamos las perpendiculares a las curvas Isopiezas. Una flecha indica el sentido del movimiento, deducido de los niveles piezométricos.

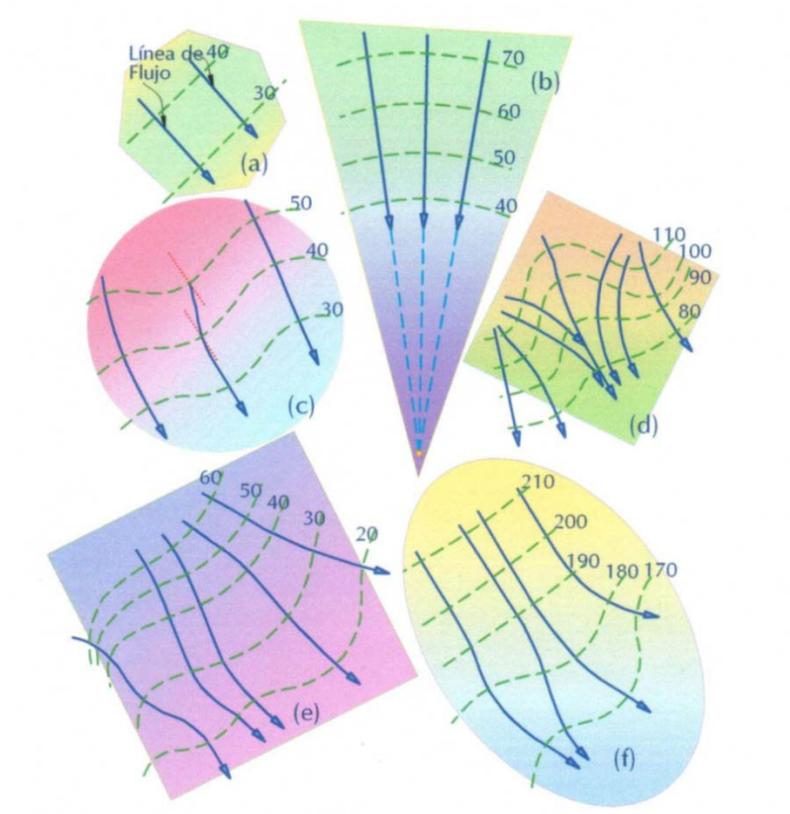


Ilustración 18: Líneas de flujo y dirección de movimiento del agua en distintas situaciones hidrogeológicas.

En los casos complejos. Se trazan primero los ejes principales de circulación de las aguas subterráneas que corresponden a los trayectos más cortos y más sencillos, en general en los centros de los arcos elementales de las curvas. En un eje de movimiento elevamos la perpendicular a cada curva isopiezas y redondeamos los ángulos para dibujar una curva regular. Las direcciones principales se subrayan mediante trazos más acentuados.

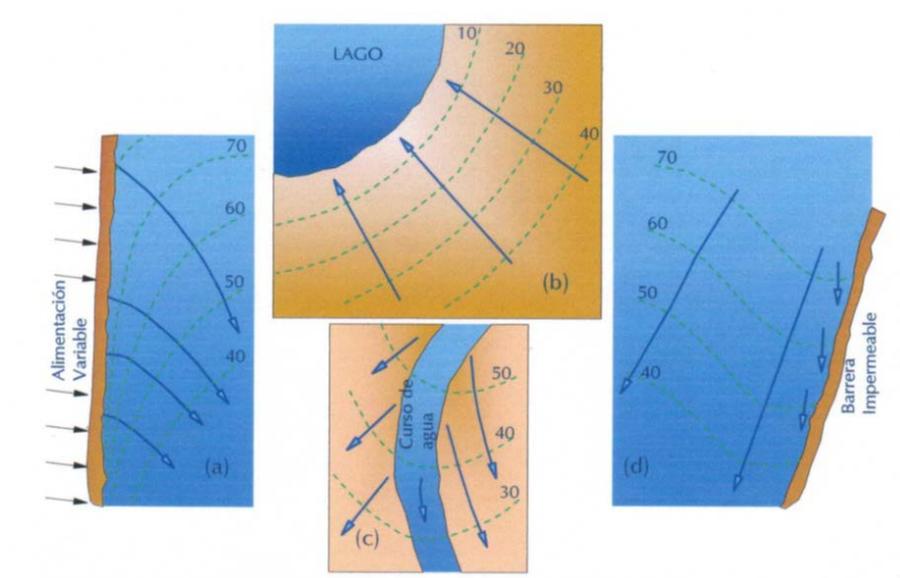


Ilustración 19: Líneas de flujo y dirección de movimiento del agua en distintas situaciones hidrogeológicas.

**MÓDULO 3.** Hidrogeoquímica. Calidad del Agua Subterránea. Calidad para distintos usos (agrícolas, ganadero, industrial, recreativo, etc.). Origen y características hidrogeoquímicas de los principales constituyentes disueltos de las aguas subterráneas. Representación gráfica de los resultados.

---

### **3.1. HIDROGEOQUÍMICA**

Además del interés por los problemas de cantidad del agua subterránea en los sistemas acuíferos, el desarrollo social ha llevado a que la comunidad científica se haya ido concientizando de la necesidad de un conocimiento más profundo de los problemas de calidad. Esto se ha traducido en el interés por parte de muchos investigadores por las fuentes y mecanismos de incorporación al agua de sus diversos constituyentes.

### **3.2. CALIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA**

La calidad química del agua subterránea es una de las facetas más importantes en la técnica del hidrogeólogo. Si tras los estudios realizados conseguimos alumbrar un determinado caudal, cualquiera que hubiera sido sus fines: abastecimiento a una población, fines agrícolas o industriales, hasta no realizar un análisis químico no conoceremos verdaderamente el fin que ciertamente pueda dársele al agua. A veces, a pesar de nuestro éxito aparente por haber obtenido un importante caudal, nuestra euforia queda totalmente anulada frente a una pésima calidad. Es la naturaleza quien verdaderamente tiene la última sorpresa. A veces la capacidad ingenieril del hombre puede conseguir corregir, mediante obras o plantas de tratamiento mejorar una calidad. Sin embargo, nunca debemos olvidar en este aspecto el precio que ha de tener un agua para cualquiera de los usos..." (Pulido, 1978).

La calidad del agua subterránea es un concepto tan importante como el de la cantidad de agua, ya que puede llegar a decidir si esta es apta o no para un determinado uso o si el tratamiento correctivo necesario va a ser técnica y económicamente viable. Por este motivo, el concepto de calidad va ligado íntimamente a dos aspectos fundamentales: los condicionamientos naturales que modifican o controlan la composición química de las aguas subterráneas; así como, el uso que se pretende dar a dicha agua, y las políticas de gestión y planificación asociadas a dicho recurso (FCIHS, 2009).

Bajo condiciones naturales, no influenciadas, la calidad intrínseca del agua subterránea dependerá fundamentalmente de los siguientes factores: condiciones originales de los acuíferos, litología, velocidad de circulación, la calidad del agua de infiltración, las relaciones con otras aguas o acuíferos y las leyes del movimiento de las sustancias transportadas con el agua, así como los factores hidrodinámicos. Además de las actividades humanas que pueden (como está ocurriendo en la actualidad) producir poluciones y/o contaminaciones insospechadas Custodio y Llamas, 1983).

#### **3.2.1. Determinaciones de parámetros a partir de datos químicos**

Se define como calidad, a la integración de las propiedades físicas, químicas y biológicas del agua subterránea; el estudio de estas propiedades tiene como objetivo diagnosticar el estado del agua sobre la base de las normas de calidad vigentes.

La Calidad de un agua entonces, queda definida por su composición, el conocimiento de los efectos que puede causar cada uno de los elementos que contiene o el conjunto de todos ellos, permite establecer las posibilidades de su utilización, clasificando así, de acuerdo con límites estudiados, su destino como bebida, usos agrícolas, industriales, etc.

• **Sustancias disueltas en un agua natural subterránea**

En un agua subterránea natural, la mayoría de las sustancias disueltas se encuentran en estado iónico. Unos cuantos de estos iones están presentes casi siempre y su suma representa casi la totalidad de los iones disueltos; estos se conocen como iones fundamentales o mayoritarios y son: Cloruro, Sulfato, Bicarbonato, Sodio, Calcio y Magnesio. Es frecuente que los aniones nitrato y carbonato y el catión potasio se consideren dentro del grupo de los fundamentales aun cuando en general su proporción es pequeña. Otras veces se incluye además el ion ferroso.

Entre los gases deben considerarse como fundamentales el anhídrido carbónico y el oxígeno disuelto, aunque no es frecuente que se analicen en aguas subterráneas.

Entre las sustancias disueltas poco ionizadas o en estado coloidal son importantes los ácidos y aniones derivados de la sílice.

El resto de iones y sustancias disueltas se encuentran por lo general en cantidades notablemente más pequeñas que los anteriores y se llaman iones menores o minoritarios a aquellos que se encuentran formando menos del 1% del contenido iónico total y se denominan elementos traza a aquellos que aunque presentes, están por lo general en cantidades difícilmente medibles por medios químicos usuales.

Tabla 4: Composición química del agua subterránea.

**COMPOSICION QUIMICA DEL AGUA SUBTERRANEA**

(Tomado de Davis y De Wiest, 1966)

**Constituyentes mayoritarios**

Son estables en solución en rangos de pH y eh muy amplios  
Conforman el 99 % de la salinidad del agua

Los siguientes componen el 95 % de la salinidad (concentraciones entre 1 y 100 ppm)

Sodio	Bicarbonato
Calcio	Sulfato
Magnesio	Cloruro

Los siguientes constituyen el 4 % de la salinidad (concentraciones entre 0,01 y 10 ppm)

Hierro	Carbonato
Estroncio	Nitrato
Potasio	Fluoruro
Boro	

**COMPOSICION QUIMICA DEL AGUA SUBTERRANEA**

**Constituyentes minoritario (concentraciones entre 0,00001 y 0,1 ppm)**

Antimonio	Bromo	Cobre	Manganeso	Fosfato	Selenio	Vanadio
Aluminio	Cadmio	Germanio	Molibdeno	Plomo	Titanio	Yodo
Arsénico	Cromo	Litio	Niquel	Rubidio	Uranio	Zinc
Bario	Cobalto					

**Constituyentes traza (concentraciones menores a 0,001 ppm)**

Berilio	Cesio	Galio	Lantano	Plata	Rutenio	Torio
Bismuto	Escandio	Indio	Niobio	Platino	Talio	Tungsteno
Cerio	Estaño	Itrio	Oro	Radio	Terbio	Zirconio

- **Análisis de las aguas: Parámetros físicos y químicos**

Los análisis de aguas tienen contenidos muy diversos según el objetivo y el uso propuesto a que las aguas se destinen. Con frecuencia, sólo consisten en unas pocas determinaciones físicas, químicas, bioquímicas y biológicas de rutina. Los parámetros mínimamente analizados establecen los contenidos de los iones que por sus concentraciones en el agua subterránea se consideran mayoritarios, algunos minoritarios y si es posible o necesario, algún elemento traza; también se determina temperatura, color, olor, turbidez, dureza, alcalinidad, pH, conductividad eléctrica, residuo sólido, sólidos totales disueltos, contenidos en coliformes, etc.

- **Cálculo del error porcentual: validez del análisis**

En un análisis físico y químico completo debe verificarse que la suma de miliequivalentes de aniones debe ser igual o aproximadamente igual a la suma de miliequivalentes de cationes.

$$r(\text{CO}_3\text{H}^- + \text{SO}_4^{2-} + \text{Cl}^- + \text{NO}_3^-) = r(\text{Na}^+ + \text{K}^+ + \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) \quad r(\text{meq/l})$$

En la práctica existe una diferencia entre ambas cifras que se debe a los errores acumulados de cada una de las determinaciones individuales y al no tener en cuenta las contribuciones iónicas menores. Si existe una diferencia muy grosera del balance iónico puede deberse a la existencia en cantidades anormales de los iones minoritarios o a un error grave del análisis. La fórmula del error se puede definir como:

$$\text{Error (\%)} = 100 \cdot \frac{\sum \text{cationes} - \sum \text{aniones}}{\sum \text{cationes} + \sum \text{aniones}}$$

Una vez realizado el balance iónico de los análisis de las muestras de agua, para comprobar si el error es aceptable o no, se debe tener en cuenta el valor del error resultante y el valor de la conductividad eléctrica del agua.

El error admisible depende un poco de la concentración y del tipo de agua. Se puede establecer (Anderson, 1966 modificado in Custodio y Llamas, 1983) que:

Conductividad $\mu\text{S/cm}$	50	200	500	2000	>2000
Error admisible (%)	30	10	8	4	4

Si un análisis tiene un error prácticamente nulo es sospechoso de haber sido arreglado o bien que el sodio y el potasio (Na + K) fueron determinados por diferencia. Según el FCIHS, 2009; los valores de la tabla deben tomarse como referencia algo anticuadas ya que actualmente la precisión de los laboratorios ha mejorado sustancialmente. El error dependerá de los métodos analíticos empleados y su admisibilidad suele ser especificada por cada laboratorio. Para soluciones muy concentradas, zonas áridas y salmueras, se debe diluir la muestra, lo que provoca una mayor probabilidad de error.

- ✓ **Comprobaciones teóricas**

Con frecuencia, en una planilla de análisis suele faltar la expresión de algunos parámetros, en esos casos, a partir de ciertos cálculos se puede no solo obtener los valores de los parámetros faltantes sino también comprobar si es que los resultados que se muestran en una planilla de análisis corresponden verdaderamente a pruebas de laboratorio realizadas o, si fueron "calculadas" con estas fórmulas sencillas.

$$\text{CE } (\mu\text{S/cm}) \text{ a } 18 \text{ }^\circ\text{C} = \text{Rs (mg/l)} * 1,4.$$

Si el cálculo difiere en más del 30 % del resultado del análisis, este último se considera como deficiente.

$$Rs \text{ (mg/l) a } 105 \text{ }^\circ\text{C} = \text{Sumatoria de cationes (mg/l) + Sumatoria de aniones (mg/l) - } [\frac{1}{2} \text{ CO}_3\text{H}^- \text{ (mg/l)}]$$

Si el cálculo de Rs es mayor en un 30 % al resultado del análisis, este último se considera como deficiente.

$$\text{Dureza Total (meq/l)} = [\text{Ca (meq/l) + Mg (meq/l)}] * 50$$

$$\text{TDS (mg/l)} = \text{Rs (mg/l) + } [\frac{1}{2} \text{ CO}_3\text{H}^- \text{ (mg/l)}]$$

$$\text{CO}_3\text{H}^- \text{ (mg/l)} = 1,22 * \text{Alcalinidad Total (mg/l de concentración equivalente de CO}_3\text{Ca)}.$$

### 3.2.2. Tipos de aguas

Las aguas se pueden clasificar según distintos aspectos:

#### ✓ Clasificaciones simples

Por la cantidad de sales totales disueltas (STD) se pueden establecer cuatro clases:

Agua Dulce: de 0 a 2.000 mg/l

Agua Salobre: 2.000 - 5.000 mg/l

Agua salada: 5.000 - 40.000 mg/l

Salmuera: hasta saturación

#### ✓ Por su Dureza Total (DT) se pueden establecer cuatro tipos

Blanda: 0 a 50 mg/l de CaCO<sub>3</sub> (equivalente)

El jabón hace espuma

Algo dura: hasta 100 mg/l de CaCO<sub>3</sub> (equivalente)

El jabón no hace espuma

Dura: hasta 200 mg/l de CaCO<sub>3</sub> (equivalente)

Corta el jabón

Muy Dura: hasta saturación

#### ✓ Por su Temperatura

Referente a la temperatura de las agua, estas se denominan (Schoeller, 1962 in Custodio y Llamas, 1976):

Aguas hipertermal o termales, si es  $t > t_m + 4^\circ \text{C}$

Aguas ortotermal o normales, si es  $t_m \leq t \leq t_m + 4^\circ \text{C}$

Aguas hipotermal o frías, si  $t < t_m$

Siendo  $t$  la temperatura del agua y  $t_m$  la temperatura media anual en el lugar.

Según; Bogomolov, 1966 y Silin-Betchurin se puede establecer la siguiente clasificación:

Muy frías  $t < 5 \text{ }^\circ\text{C}$

Frías  $5^\circ \text{C} < t \leq 10 \text{ }^\circ\text{C}$

Moderadamente frías  $10^\circ\text{C} < t \leq 18 \text{ }^\circ\text{C}$

Tibias  $18 \text{ }^\circ\text{C} < t \leq 25 \text{ }^\circ\text{C}$

Moderadamente tibias  $25 \text{ }^\circ\text{C} < t \leq 37 \text{ }^\circ\text{C}$

Calientes  $37 \text{ }^\circ\text{C} < t \leq 42 \text{ }^\circ\text{C}$

Muy calientes  $t > 42 \text{ }^\circ\text{C}$

Si la temperatura es mayor de 100 °C al aflorar se convierten en aguas a 100 °C y vapor originando manifestaciones cuyo funcionamiento está ligado al efecto de pérdida de densidad producido por el vapor que se desprende al reducirse la presión. (Custodio y Llamas, 1976).

Modernamente las aguas termales van adquiriendo un interés creciente ya que pueden ser una fuente de energía de bajo costo para la producción de energía eléctrica, calefacción doméstica e industrial, etc. La prospección geotérmica es un campo paralelo al de la hidrología subterránea que ha adquirido un inusitado auge a partir de 1960 (Custodio y Llamas, 1976).

El nombre de agua mineral es muy ambiguo y se utiliza con acepciones muy diversas. Unas veces se consideran aguas minerales a aquellas que poseen un contenido de sales disueltas superior al de las aguas potables, mientras que otras veces se consideran aguas minerales a aquellas que llevan contenidos anormalmente altos de algunas sustancias disueltas como CO<sub>2</sub>, CO<sub>3</sub>H<sup>-</sup>, S<sup>=</sup>, Fe<sup>++</sup>, etc., aunque su salinidad sea inferior al de muchas aguas potables. Si la temperatura es elevada, se las puede llamar termales o termominerales y si poseen propiedades curativas reconocidas se las puede llamar mineromedicinales. (Custodio y Llamas, 1976).

### 3.3. CALIDAD PARA DISTINTOS USOS

Como ya se ha expresado, desde el punto de vista de la gestión del recurso hídrico, la valoración de la calidad del agua está muy ligada al uso que se le quiera dar. De hecho, no es igual el enfoque de un estudio que trate de valorar el agua para suministro urbano como el que se realizaría para uso industrial o agrícola.

El hecho de la existencia de una calidad natural o intrínseca de las aguas subterráneas, provoca que hasta la fecha, las normas de calidad de las aguas, se enfoque para cada uso en concreto. En ese sentido, el uso que goza de mayor protección, está dirigido para el consumo humano y en concreto para usos minero-medicinales, mientras que los usos agrícolas o ganaderos, se mueven más en el ámbito de las recomendaciones. Dada su gran variabilidad, los usos industriales del agua subterránea no suelen presentar normas generales de calidad.

Tabla 5: objetivos de calidad en función de los usos del agua (FCIHS, 2009).

<b>Actividad demandante</b>	<b>Necesidades en relación con la calidad de agua</b>	<b>Necesidades en relación con la cantidad</b>
<i>Actividades industriales</i>	Se busca agua con unas características tales que no encarezca o imposibilite la producción. Los problemas aparecen sólo cuando se modifica algún parámetro del agua que dificulta el proceso industrial.	Necesidad o interés de tener agua abundante (generalmente durante todo el año) y a la menor profundidad posible, a fin de no encarecer los costes de extracción.
<i>Actividades agrícolas</i>	Se busca un agua adecuada para la actividad agrícola a desarrollar, que puede variar según el tipo de cultivo. En general, se buscan aguas con pocos cloruros, sulfatos y sin metales pesados. Los nitratos son aceptados siempre que no se exceda un determinado límite.	Igual que en el caso industrial, aunque con una demanda más concentrada en los periodos de riego.
<i>Suministro de agua potable</i>	Calidad físico-química y bacteriológica regulada por ley. Se buscan aguas poco mineralizadas y en caso contrario se procede a su tratamiento. En muchos casos se actúa legalmente contra las actividades que disminuyen la calidad del agua o que encarecen el tratamiento.	Se busca el agua suficiente para asegurar el suministro con garantías a medio o largo plazo y durante todo el año.

<i>Usos turísticos</i>	Se requiere la calidad contemplada para el agua de suministro en red de agua potable.	Grandes cantidades de agua, concentrada en relativamente pequeños periodos de tiempo, que normalmente (Europa, California, norte de África) suelen coincidir con los periodos de menor precipitación.
<i>Suministro de agua embotellada</i>	Se regula mediante una ley diferente a la de agua de red. Generalmente se embotellan aguas muy poco mineralizadas o se tratan con procesos de potabilización muy energéticos (osmosis inversa, carbono activo, ozono, etc.). Sin embargo, hay casos en que tienen concentraciones anormalmente altas de determinados elementos (razas o mayores).	Cantidad de agua suficiente para hacer frente a la demanda. Los costes de extracción se cargan en el precio unitario de la botella. Generalmente operan volúmenes de agua inferiores al de suministro en red.
<i>Agua para usos ambientales</i>	Se busca la calidad del agua que ha permitido sostener el ecosistema del que forma parte y se procura la mínima modificación posible.	Se busca la cantidad de agua suficiente para no perturbar el equilibrio natural que dio lugar al ecosistema o se tiende a recuperar zonas desaparecidas del mismo a base de limitar la cantidad de agua de otras actividades posteriores (p. ej. antiguas zonas de un humedal que fueron desecadas artificialmente).

### a) Aguas para consumo humano

El estudio de la calidad del agua destinada a ser consumida por el hombre ha sido, y es, de primordial importancia, interviniendo en el mismo, muchos factores que pueden afectarla, ya sea de manera inmediata o diferida.

Para definir la calidad que debe tener el agua destinada al consumo humano es importante adoptar criterios. Un grupo de investigadores de la Organización Mundial de la Salud (OMS) menciona que el término “criterio” designa la relación entre la exposición a un contaminante o a otro factor, y el riesgo o la magnitud de efectos indeseables en circunstancias específicas definidas por variables del ambiente y del “blanco”, siendo este el receptor – organismo, población o la fuente a ser protegida de un riesgo específico. Es decir, adoptar un criterio de calidad de agua de bebida significa conocer la relación entre la exposición y la frecuencia que se espera que un efecto indeseable para la salud pueda ocurrir. Como riesgo implica la probabilidad de ocurrencia de un efecto adverso sobre la salud humana, el análisis del riesgo debe llevarse a cabo de manera tal que se entienda la naturaleza y magnitud del efecto no deseado.

#### Concepto de Agua Potable

De modo general se denomina potable a aquella agua que puede ser consumida por el hombre sin peligro alguno para su salud. Ello supone tener en cuenta las características del agua, ya sean físicas, químicas, bacteriológicas, etc., definiendo criterios de calidad para cada una de ellas.

#### Normas de Potabilidad

La aparición y evolución de reglamentaciones que limitan la utilización del agua para la bebida, han seguido los pasos que la investigación ha ido desarrollando y que se extiende no solo a los efectos que los distintos elementos puedan tener en el organismo humano, sino también a los sistemas de análisis y determinaciones que permiten su detección y cuantificación de manera precisa e inequívoca.

La tendencia mundial es a la normalización de las reglamentaciones existentes, no solo en lo que atañe a la fijación de unos límites admisibles de las características del agua, sino también en lo referente a la metodología de tomas de muestras, frecuencia de las mismas y métodos de análisis a utilizar.

Todos los países tienen legislaciones relacionadas con las aguas de consumo humano, las que sirven para determinar las responsabilidades de los distintos sectores involucrados en la producción y distribución del agua potable o agua de bebida (términos equivalentes), de su monitoreo y de su control. Los países cuentan asimismo, con reglamentaciones que definen lo que se entiende por agua potable; es decir, los patrones que ésta debe seguir para que la misma sea inocua para la salud humana. Dentro de esas reglamentaciones de cada país, hay una muy específica que se denomina la "Norma de Calidad de Agua de Bebida". Allí se establece qué sustancias pueden estar presentes en el agua y las concentraciones máximas permisibles que no signifiquen riesgo para la salud.

No existe ningún país que no considere como herramienta principal para la confección y actualización periódica de sus Normas Nacionales, a las Guías OMS para la calidad del Agua Potable. Por supuesto que no todos los contaminantes que figuran en las guías están presentes en las aguas de abastecimiento, por lo tanto, cada país deberá seleccionar cuidadosamente que parámetros incluirá en sus normas de calidad, atento a las sustancias que se utilicen en la industria, actividad agropecuaria, en los procesos de potabilización de las aguas, factores económicos y avances tecnológicos. De nada sirve proponer normas de calidad de aguas que establezcan límites para una infinidad de parámetros, si luego, su identificación se hace impracticable por no poder contar todos los laboratorios de control de calidad con el instrumental necesario o, a veces, con el personal adiestrado para su manejo.

La Organización Mundial de la Salud adoptó en 1963 el criterio de dividir las características del agua en cuatro grupos, para cada parámetro de cada grupo propone valores de concentraciones que de sobrepasarse supondrían la No - Potabilidad del agua.

1. Características Físicas – Químicas
  - a. Sustancias que pueden afectar a la salud
  - b. Sustancias que afectan la potabilidad
  - c. Sustancias tóxicas
  - d. Indicadores de polución
2. Bacteriológicas
3. Biológicas
4. Radioactivas

La OMS publicó en 1985 la primera edición de las "Guías para la calidad del agua de bebida". En 1988 la OMS comienza la revisión de las guías poniendo mayor énfasis en los riesgos para la salud que ocasionan los químicos presentes en el agua de bebida. Se publica entonces, en 1995, la segunda edición de las guías, incluyendo muchos contaminantes que no estaban contemplados en la edición anterior y además fueron modificados los valores guías de algunos contaminantes debido a los avances en los estudios científicos. Actualmente están en vigencia las Guías OMS 2006. Toda la información que proveen las **Guías OMS** se presenta bajo tres aspectos:

- Recomendaciones
  - ✓ Se exponen los valores guía para numerosos contaminantes del agua relacionados con la calidad del agua potable.
  - ✓ Se explica la forma en que deberían aplicarse los valores guía, los criterios utilizados para seleccionar los diversos contaminantes químicos, físicos, microbiológicos y radiológicos considerados; se describe los métodos utilizados para obtener los valores guía, así como breves

exposiciones resumidas en las que se fundamentan los valores guía recomendados o se explica por qué no es necesario en la actualidad, un valor guía basado en la salud.

- ✓ Se exponen los valores guía en capítulos dedicados a contaminantes microbiológicos, químicos (se tiene en cuenta sustancias que representan un peligro potencial para la salud humana y que se detectan con bastante frecuencia y en concentraciones relativamente altas en el agua de bebida; también se examinan desinfectantes y productos derivados de los mismos) y radiológicos.
  - ✓ Se estudian los componentes físicos, inorgánicos y orgánicos que pueden suscitar quejas a los consumidores (apariencia, sabor, olor, etc.).
  - ✓ Por último, se explican los métodos de protección y mejoramiento de la calidad del agua, incluida la selección y protección de las fuentes de agua, la elección de los procesos de tratamiento, la protección de las redes de distribución y el control de la corrosión.
- Criterios relativos a la salud y otra información de base

Se detallan los criterios aplicables a cada sustancia o contaminante; toda la información clínica, epidemiológica y sanitaria que respalda la elección de los parámetros y el valor de sus concentraciones.

Se describen cada parámetro, bajo que rutas y en la forma como se verifica la exposición y la infección en el ser humano; el significado específico que tiene la exposición a través del agua; los efectos sobre la salud humana y como se ha llegado al valor guía recomendado.

- Vigilancia y control de los abastecimientos de agua a la comunidad

Se describen los métodos empleados en la vigilancia de la calidad del agua teniendo en cuenta los problemas especiales de los sistemas de abastecimiento para las pequeñas comunidades, en particular las de los países en desarrollo, y se exponen las estrategias para conseguir que la vigilancia sea eficaz. También se examinan los vínculos entre vigilancia y acción correctiva.

#### a) Valor guía

Las Guías OMS giran alrededor del concepto de valor guía, que sirve para estimar la calidad del agua de bebida. Un valor guía representa la concentración de un componente que no supone un riesgo significativo para la salud del consumidor si éste bebe el agua durante toda su vida. La calidad definida en las Guías para la calidad del agua potable, es la adecuada para el consumo humano y para todos los usos domésticos habituales, incluida la higiene personal.

Las desviaciones por un periodo breve durante el cual se sobrepasan los valores guía, no significan necesariamente que el agua no sea apta para el consumo. La proporción en que pueda rebasarse un valor guía y el periodo durante el cual pueda prolongarse esta situación sin que ello repercuta en la salud pública dependerá de la sustancia de que se trate. El objeto de los valores guía, es servir de base para la elaboración de normas nacionales que, debidamente aplicadas, aseguren la inocuidad del agua abastecida, mediante la eliminación o la reducción a una concentración mínima de los componentes considerados peligrosos para la salud. Los valores guía recomendados no son límites obligatorios. Para definir límites de ese tipo, es necesario considerar los valores guía en el contexto de las condiciones locales o nacionales de carácter ambiental, social, económico y cultural.

#### b) Código Alimentario Argentino

La normativa en nuestro país con respecto al agua para suministro público y de uso domiciliario, está regida por el Código Alimentario Argentino (CAA). En su Capítulo 12, Bebidas Hídricas, Aguas y Aguas Gasificadas, define las características físicas, químicas (sustancias inorgánicas y contaminantes orgánicos) y microbiológicas que debe cumplir el agua para ser considerada Agua Potable de suministro público y Agua Potable de uso domiciliario.

*Código Alimentario Argentino Actualizado (2012). Capítulo 12 .Bebidas Hídricas, Agua y Agua Gasificada.*

### **Agua Potable**

“Con las denominaciones de Agua potable de suministro público y Agua potable de uso domiciliario, se entiende la que es apta para la alimentación y uso doméstico: no deberá contener sustancias o cuerpos extraños de origen biológico, orgánico, inorgánico o radiactivo en tenores tales que la hagan peligrosa para la salud. Deberá presentar sabor agradable y ser prácticamente incolora, inodora, límpida y transparente. El agua potable de uso domiciliario es el agua proveniente de un suministro público, de un pozo o de otra fuente, ubicada en los reservorios o depósitos domiciliarios”. Ambas deberán cumplir con las características físicas, químicas y microbiológicas siguientes:

#### Características físicas:

Turbiedad: máx. 3 NTU

Color: máx. 5 escala Pt-Co

Olor: sin olores extraños

#### Características químicas:

pH: 6,5 - 8,5; pH sat.: pH  $\pm$  0,2

#### Substancias inorgánicas:

Amoníaco (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) máx.: 0,20 mg/l;

Antimonio máx.: 0,02 mg/l;

Aluminio residual (Al) máx.: 0,20 mg/l;

Arsénico (As) máx.: 0,01 mg/l;

Boro (B) máx.: 0,5 mg/l;

Bromato máx.: 0,01 mg/l;

Cadmio (Cd) máx.: 0,005 mg/l;

Cianuro (CN<sup>-</sup>) máx.: 0,10 mg/l;

Cinc (Zn) máx.: 5,0 mg/l;

Cloruro (Cl<sup>-</sup>) máx.: 350 mg/l;

Cobre (Cu) máx.: 1,00 mg/l;

Cromo (Cr) máx.: 0,05 mg/l;

Dureza total (CaCO<sub>3</sub>) máx.: 400 mg/l;

Fluoruro (F<sup>-</sup>): para los fluoruros la cantidad máxima se da en función de la temperatura promedio de la zona, teniendo en cuenta el consumo diario del agua de bebida:

- Temperatura media y máxima del año (°C) 10,0 - 12,0; contenido límite recomendado de Flúor (mg/l), límite inferior: 0,9; límite superior: 1,7;

- Temperatura media y máxima del año (°C) 12,1 - 14,6, contenido límite recomendado de Flúor (mg/l), límite inferior: 0,8; límite superior: 1,5;

- Temperatura media y máxima del año (°C) 14,7 - 17,6; contenido límite recomendado de Flúor (mg/l), límite inferior: 0,8; límite superior: 1,3;

- Temperatura media y máxima del año (°C) 17,7 - 21,4; contenido límite recomendado de Flúor (mg/l), Límite inferior: 0,7; límite superior: 1,2;

- Temperatura media y máxima del año (°C) 21,5 - 26,2, contenido límite recomendado de Flúor (mg/l), límite inferior: 0,7; límite superior: 1,0;

- Temperatura media y máxima del año (°C) 26,3 - 32,6, contenido límite recomendado de Flúor (mg/l), límite inferior: 0,6; límite superior: 0,8;

Hierro total (Fe) máx.: 0,30 mg/l;

Manganeso (Mn) máx.: 0,10 mg/l;

Mercurio (Hg) máx.: 0,001 mg/l;

Níquel (Ni) máx.: 0,02 mg/l;

Nitrato (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) máx.: 45 mg/l;

Nitrito (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>) máx.: 0,10 mg/l;

Plata (Ag) máx.: 0,05 mg/l;

Plomo (Pb) máx.: 0,05 mg/l;

Selenio (Se) máx.: 0,01 mg/l;  
Sólidos disueltos totales, máx.: 1500 mg/l;  
Sulfatos (SO<sub>4</sub>=) máx.: 400 mg/l;  
Cloro activo residual (Cl) mín.: 0,2 mg/l.

La autoridad sanitaria competente podrá admitir valores distintos si la composición normal del agua de la zona y la imposibilidad de aplicar tecnologías de corrección lo hicieran necesario. Para aquellas regiones del país con suelos de alto contenido de arsénico, se establece un plazo de hasta 5 años para adecuarse al valor de 0,01 mg/l. (**Modificado por Resolución Conjunta SPReI N° 34/2012 y SAGyP N° 50/2012**): Prorrogase el plazo de cinco (5) años previsto para alcanzar el valor de 0,01 mg/l de arsénico hasta contar con los resultados del estudio “Hidroarsenicismo y Saneamiento Básico en la República Argentina – Estudios básicos para el establecimiento de criterios y prioridades sanitarias en cobertura y calidad de aguas” cuyos términos fueron elaborados por la Subsecretaría de Recursos Hídricos del Ministerio de Planificación Federal.

#### Características Microbiológicas:

Bacterias coliformes: NMP a 37 °C- 48 hs. (Caldo Mc Conkey o Lauril Sulfato), en 100 ml: igual o menor de 3.  
Escherichia coli: ausencia en 100 ml.  
Pseudomonas aeruginosa: ausencia en 100 ml.

En la evaluación de la potabilidad del agua ubicada en reservorios de almacenamiento domiciliario deberá incluirse entre los parámetros microbiológicos a controlar el recuento de bacterias mesófilas en agar (APC - 24 hs. a 37 °C): en el caso de que el recuento supere las 500 UFC/ml y se cumplan el resto de los parámetros indicados, sólo se deberá exigir la higienización del reservorio y un nuevo recuento. En las aguas ubicadas en los reservorios domiciliarios no es obligatoria la presencia de cloro activo.

#### Contaminantes orgánicos:

THM, máx.: 100 ug/l;  
Aldrin + Dieldrin, máx.: 0,03 ug/l;  
Clordano, máx.: 0,30 ug/l;  
DDT (Total + Isómeros), máx.: 1,00 ug/l;  
Detergentes, máx.: 0,50 mg/l;  
Heptacloro + Heptacloroepóxido, máx.: 0,10 ug/l;  
Lindano, máx.: 3,00 ug/l;  
Metoxicloro, máx.: 30,0 ug/l;  
2,4 D, máx.: 100 ug/l;  
Benceno, máx.: 10 ug/l;  
Hexacloro benceno, máx.: 0,01 ug/l;  
Monocloro benceno, máx.: 3,0 ug/l;  
1,2 Dicloro benceno, máx.: 0,5 ug/l;  
1,4 Dicloro benceno, máx.: 0,4 ug/l;  
Pentaclorofenol, máx.: 10 ug/l;  
2, 4, 6 Triclorofenol, máx.: 10 ug/l;  
Tetracloruro de carbono, máx.: 3,00 ug/l;  
1,1 Dicloroeteno, máx.: 0,30 ug/l;  
Tricloro etileno, máx.: 30,0 ug/l;  
1,2 Dicloro etano, máx.: 10 ug/l;  
Cloruro de vinilo, máx.: 2,00 ug/l;  
Benzopireno, máx.: 0,01 ug/l;  
Tetra cloro eteno, máx.: 10 ug/l;  
Metil Paratión, máx.: 7 ug/l;  
Paratión, máx.: 35 ug/l;  
Malatión, máx.: 35 ug/l.

Los tratamientos de potabilización que sea necesario realizar deberán ser puestos en conocimiento de la autoridad sanitaria competente.

**b) Aguas para uso agrícola**

El agua de riego contiene determinadas sales que se añaden a las ya existentes en el suelo. Las sales que nos interesan son aquellas que, además de ser solubles, se descomponen en los iones:

Cationes	Aniones
Calcio (Ca <sup>2+</sup> )	Cloruro (Cl <sup>-</sup> )
Sodio (Na <sup>+</sup> )	Sulfato (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )
Magnesio (Mg <sup>2+</sup> )	Biocarbonato (CO <sub>3</sub> H <sup>-</sup> )
Potasio (K <sup>+</sup> )	Carbonato (CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> )

Existen muchas clasificaciones establecidas para aguas destinadas al riego. Una de las más utilizadas es la de Wilcox. Esta tiene en cuenta a la concentración total de sales solubles expresada mediante la conductividad eléctrica (en microsiemens/cm a 25 °C) y la concentración relativa de sodio con respecto al calcio y magnesio (en meq/l), denominada índice RAS.

$$RAS = \frac{r(Na)}{\sqrt{\frac{r(Ca + Mg)}{2}}}$$

En el diagrama de Wilcox quedan definidas 16 categorías del agua establecidas al combinar las distintas clases de las características de conductividad eléctrica y peligro de alcalinización del suelo.

**C-1:** Agua de baja salinidad. Conductividad entre 100 y 250 microsiemens/cm a 25 °C que corresponde aproximadamente a 64-160 mg/l de sólidos disueltos. Puede usarse para la mayor parte de los cultivos en casi todos los suelos, con muy poco peligro de que desarrolle salinidad. Es preciso algún lavado, que se logra normalmente con el riego, excepto en suelos de muy baja permeabilidad.

**C-2:** Agua de salinidad media. Conductividad entre 250 y 750 microsiemens/cm a 25 °C correspondiendo aproximadamente a 160 - 480 mg/l de sólidos disueltos. Puede usarse con un grado moderado de lavado. Sin excesivo control de la salinidad se pueden cultivar, en la mayoría de los casos, las plantas moderadamente tolerantes a las sales.

**C-3:** Agua altamente salina. Conductividad entre 750 y 2250 microsiemens/cm a 25 °C correspondiendo aproximadamente a 480 - 1440 mg/l de sólidos disueltos. No puede usarse en suelos de drenaje deficiente. Selección de plantas muy tolerantes a las sales y posibilidad de control de la salinidad del suelo, aún con drenaje adecuado.

**C-4:** Agua muy altamente salina. Conductividad superior a 2250 microsiemens/cm a 25 °C correspondiendo aproximadamente a más de 1440 mg/l de sólidos disueltos. No es apropiada en condiciones ordinarias para el riego. Puede utilizarse con una selección de cultivos en suelos permeables, de buen drenaje y con exceso de agua para lograr un buen lavado.

**S-1:** Agua baja en sodio. Puede usarse en la mayoría de los suelos con escasas posibilidades de alcanzar elevadas concentraciones de sodio intercambiable. Los cultivos sensibles como los frutales de pipa, pueden acumular cantidades perjudiciales de sodio.

**S-2:** Agua media en sodio. Puede presentar un peligro en condiciones de lavado deficientes, en terrenos de textura fina con elevada capacidad de intercambio catiónico, si no contienen yeso.

**S-3:** Agua muy alta en sodio. En la mayor parte de los suelos puede alcanzarse un límite de toxicidad de sodio intercambiable, por lo que es preciso un buen drenaje, lavados intensos y adiciones de materia orgánica. En los suelos yesíferos el riesgo es menor.

**S-4:** Agua muy alta en sodio. En general es inadecuada para riego, excepto con salinidades bajas o medias, siempre que se pueda posibilitar su empleo con la disolución de calcio del suelo, el uso de yeso o de otros elementos.

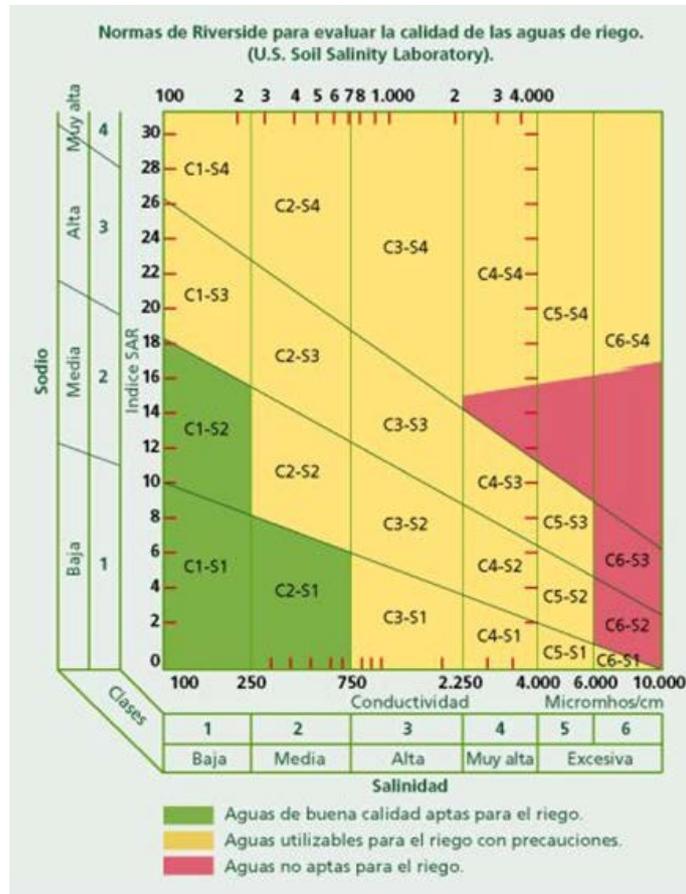


Gráfico 1: Normas para determinar las clases aptas, utilizables y no aptas para el riego de plantaciones.

Con respecto a la salinidad del agua puede establecerse la siguiente clasificación (Davis y De Wiest, 1966):

Cultivos *poco tolerantes*: pera, manzana, naranja, almendros, ciruela, durazno, damasco, limón, mora, chaucha, apio, rábano, etc. Cultivos *tolerantes*: uva, aceituna, granada, tomate, coliflor, lechuga, maíz, zanahoria, cebolla, arvejas, alfalfa, trigo, centeno, avena, arroz, girasol, higo, coliflor, papas, etc. Cultivos *muy tolerantes*: dátil, remolacha, espárrago, espinaca, césped, algodón, cebada, etc.

Con respecto al contenido de boro en las aguas destinadas al riego de plantaciones se pueden establecer cinco clases:

Tabla 6: sensibilidad de los cultivos a las concentraciones de boro en el agua de riego.

Clase	Cultivos sensibles	Cultivos semitolerantes	Cultivos tolerantes
I	0,33 ppm de boro	0,67 ppm de boro	1,00 ppm de boro
II	0,33 a 0,67 ppm	0,67 a 1,33 ppm	1,00 a 2,00 ppm
III	0,67 a 1,00 ppm	1,33 a 2,00 ppm	2,00 a 3,00 ppm
IV	1,00 a 1,25 ppm	2,00 a 2,50 ppm	3,00 a 3,75 ppm
V	+ 1,25 ppm	+ 2,50 ppm	+ 3,75 ppm

**c) Agua para uso ganadero**

La calidad de agua de bebida para animales, en principio, debería tener similares características que para el consumo humano. Sin embargo, muchos animales pueden tolerar ciertas concentraciones de sales que el ser humano no puede hacerlo. Los bovinos conforman el grupo de animales que más se ajustan a calidades físicas y químicas diferentes, siempre dentro de un ámbito de razonabilidad, fundamentalmente en cuanto al contenido de sales totales y, principalmente de sulfatos. Por supuesto que el contenido de elementos y compuestos como flúor y arsénico son altamente tóxicos también para los animales cuando se encuentran en exceso. Los cloruros son normalmente, considerados como sales beneficiosas para el engorde de animales, especialmente el cloruro de sodio ya que los cloruros de magnesio y calcio le brindan sabor amargo al agua. Tanto los carbonatos como bicarbonatos, en apariencia, no tienen y no se conocen efectos negativos sobre los animales bovinos. Los sulfatos, como ya se expresó, suelen tener un efecto adverso sobre la calidad del agua para el consumo animal ya que le otorgan propiedades purgantes al agua y el característico sabor amargo.

Sager, 2000 (INTA E.E.A, San Luis), realiza una clasificación de la calidad de agua para consumo animal bovino teniendo en cuenta la relación Sales Totales – Sales Beneficiosas – Sales Perjudiciales. Las sales totales (residuo seco) debe expresarse en gr/l. Las sales consideradas beneficiosas es igual a la diferencia entre las sales totales y los sulfatos (sales totales – sulfatos = sales beneficiosas). Las sales perjudiciales corresponden al contenido en sulfatos (gr/l).

Sales totales = Residuo seco g/l y Sulfatos g/l ( $\text{SO}_4^-$ ). La diferencia entre ambos indica con mucha aproximación las sales beneficiosas.

Sales beneficiosas = Sales totales - sulfatos ( $\text{SO}_4^-$ ). Pocas veces se obtendrán valores enteros al determinar la relación, pero será suficiente que si el punto decimal supera 0,5 se redondee hacia mayor y si es menor a 0,5 se redondee hacia menor.

*Tabla 7: Clasificación del agua para consumo bovino.*

Sales Totales	Muy Buena	Buena	Regular	Mala	No Apta
1		1:0	0:1		
2	2:0	2:1	1:1 – 0:2		
3	3:0	4:0 – 3:1	1:2	0:3	
4			2:2	1:3	0:4
5			5:0 – 4:1 – 3:2	2:3	1:4 – 0:5
6				6:0 – 5:1 4:2 – 3:3	2:4 – 1:5 0:6
7					7: 0 – 6:1 5:2 – 4:3 3:4 – 2:5 1:6 – 0:7
8					8:0 – 7:1 6:2 – 5:3 4:4 – 3:5 2:6 – 1:7 0:8

### 3.4. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LOS DATOS QUÍMICOS

Existen numerosas formas gráficas de representar los datos procedentes de un análisis físico-químico de aguas, la elección de alguna de estas formas depende, entre otros aspectos, de lo que se desea mostrar. En general las representaciones se pueden hacer a través de tablas de síntesis, diagramas o de mapas.

El diseño de los diagramas tiene en cuenta:

- la cantidad de muestras define diagramas simples (una sola muestra, ej. Diagrama Stiff, Diagramas en Barras o Columnas, Diagramas Circulares) o colectivos (en forma comparativa para varias muestras, ej. Diagramas Piper, Schoeller, Durov, Wilcox, etc.). Estos diagramas pueden ser tipo triangulares (ej. Diagrama Piper y Durov), verticales (ej. Diagrama de Schoeller), columnares, radiales, etc.
- el concepto de lo que se quiere comparar, mostrar o destacar define diagramas de clasificación de aguas (Ej. Piper, Wilcox) y diagramas de solo representación (Ej. Stiff, Durov, Schoeller)

Para la realización de mapas, por lo general se tiene en cuenta la concentración de algún ion específico (Ej. mapas de isoconcentraciones) o algún parámetro significativo (mapa de isoconductividades eléctrica), también es posible utilizar diagramas individuales así como simbologías específicas indicando condiciones de aptitud.

#### 1. Diagramas de Barras o Diagramas Columnares

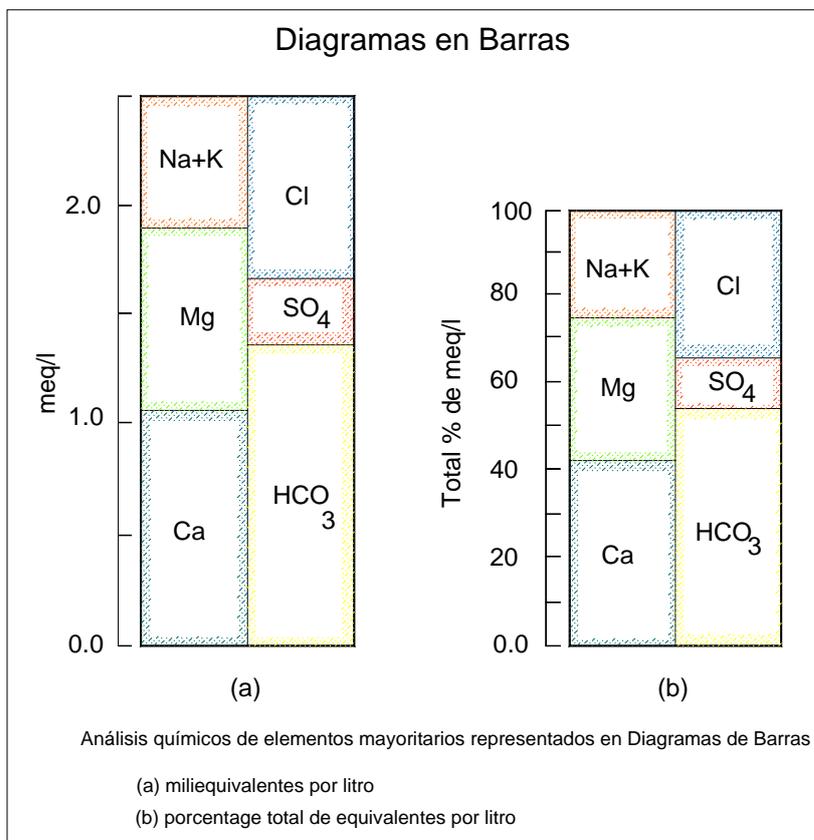


Gráfico 2: Representación de datos químicos en diagrama de barras o columnar.

2. Diagramas Circulares

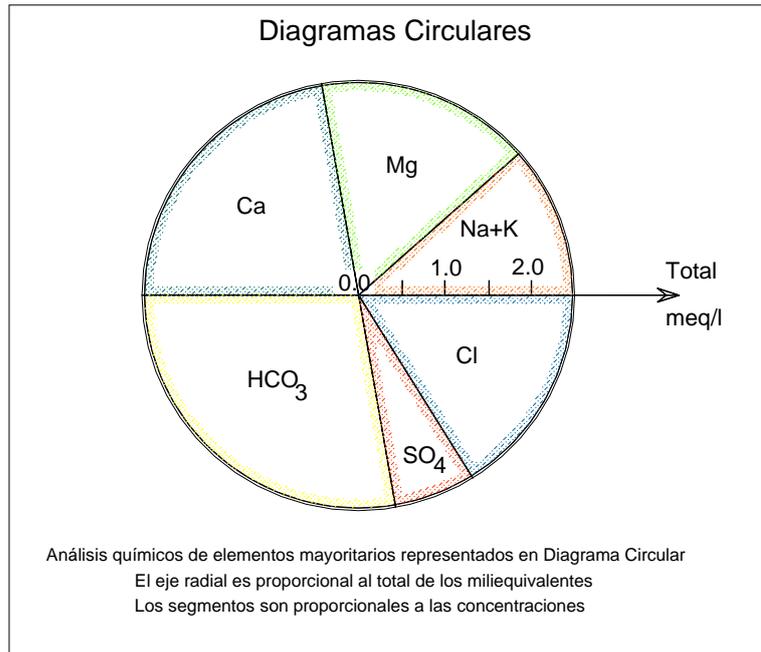


Gráfico 3: Representación de datos químicos en diagrama circular.

3. Diagramas en Polígonos - Diagrama Stiff

Consiste en tomar sobre semirectas convergentes o paralelas segmentos proporcionales a cada ion y unir los extremos dando así un polígono. Sobre cada semirecta se toma un solo ion o bien un catión y un anión simultáneamente.

La forma de la figura resultante permite a simple vista determinar las proporciones en las concentraciones de los iones mayoritarios representados. Son muy ventajosos cuando se pretende comparar distintos tipos de agua y para representaciones en mapas.

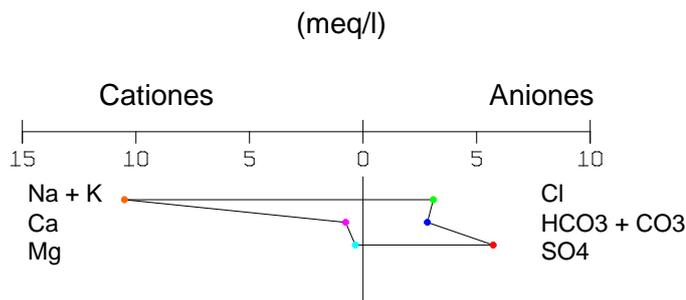


Gráfico 4: Representación de datos químicos en diagrama de polígonos.

4. Diagramas Triangulares

Diagrama Piper

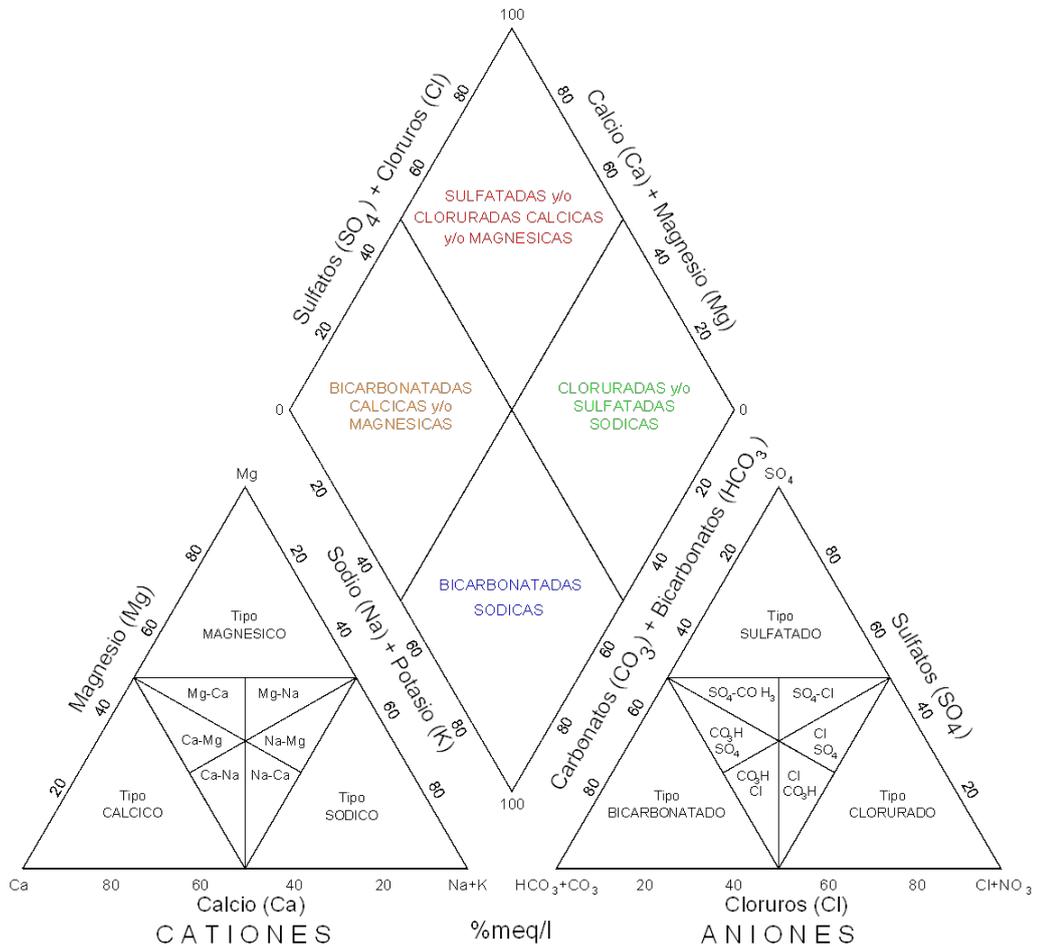


Gráfico 5: Representación de datos químicos en diagrama triangular (Diagrama Piper – Hill – Langelier).

El diagrama de Piper es ideal para representar tres componentes. Cada uno de los vértices de un triángulo equilátero representa uno de los componentes (A, B o C) puros, de tal forma que representan el 100 % de cada uno de ellos. Normalmente estos triángulos están asociados a una figura romboédrica que representa un campo específico del tipo de agua que la muestra representa. Este tipo de gráficos tiene la ventaja de que se puede representar también a numerosas muestras, quedando agrupadas todas aquellas que tienen similitud geoquímica. Las unidades se representan en meq/l.

**Diagrama Durov**

Este tipo de gráfico también permite representar varias muestras simultáneamente, quedando agrupadas todas aquellas que tienen similitud geoquímica. Las unidades se representan en meq/l.

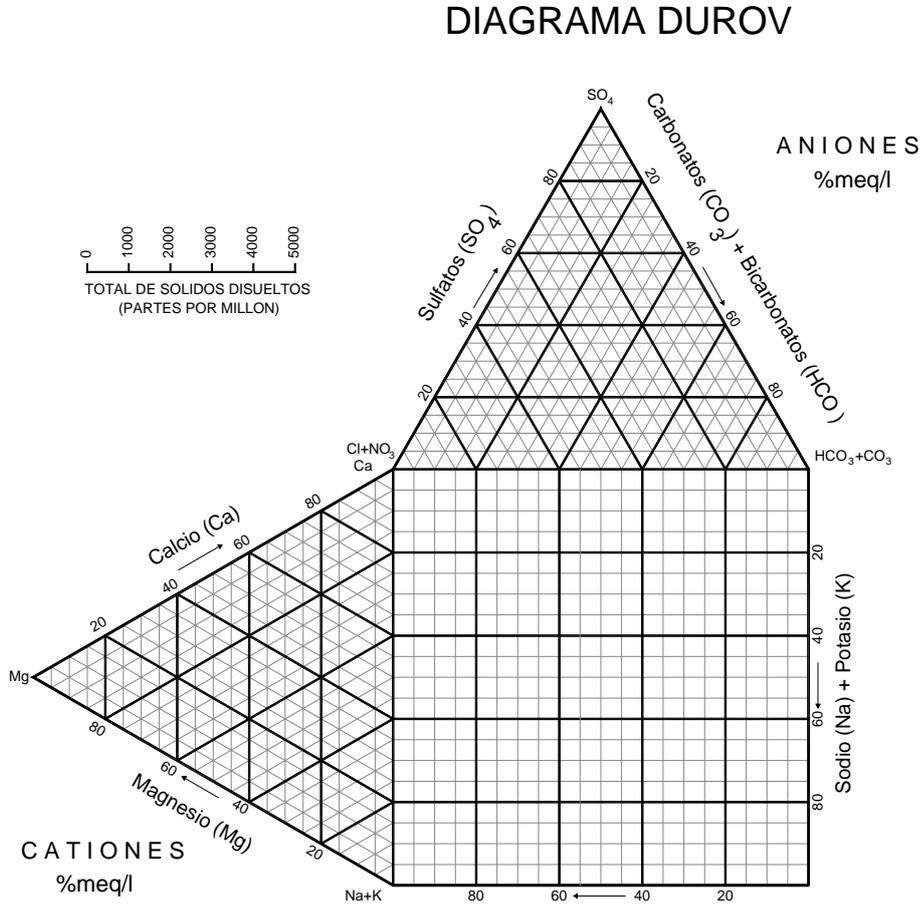


Gráfico 6: Representación de datos químicos en diagrama triangular (Diagrama Durov).

5. Diagramas Rectangulares

**Diagrama Wilcox**

Esta representación es muy empleada para determinar la calidad de agua para riego de plantaciones. El gráfico tiene dos entradas; por un lado la Conductividad Eléctrica del agua y por el otro el RAS (Relación de Absorción de Sodio). La interpretación del Diagrama de Wilcox permite indicar la peligrosidad de salinización y la peligrosidad de sodicidad, factores que afectan directamente a los suelos y vegetales. En el diagrama pueden apreciarse 16 categorías del agua establecidas al combinar las distintas clases de las características de conductividad y peligro de alcalinización del suelo. Este tipo de gráficos tiene la ventaja de que se puede representar a numerosas muestras con fines comparativos.

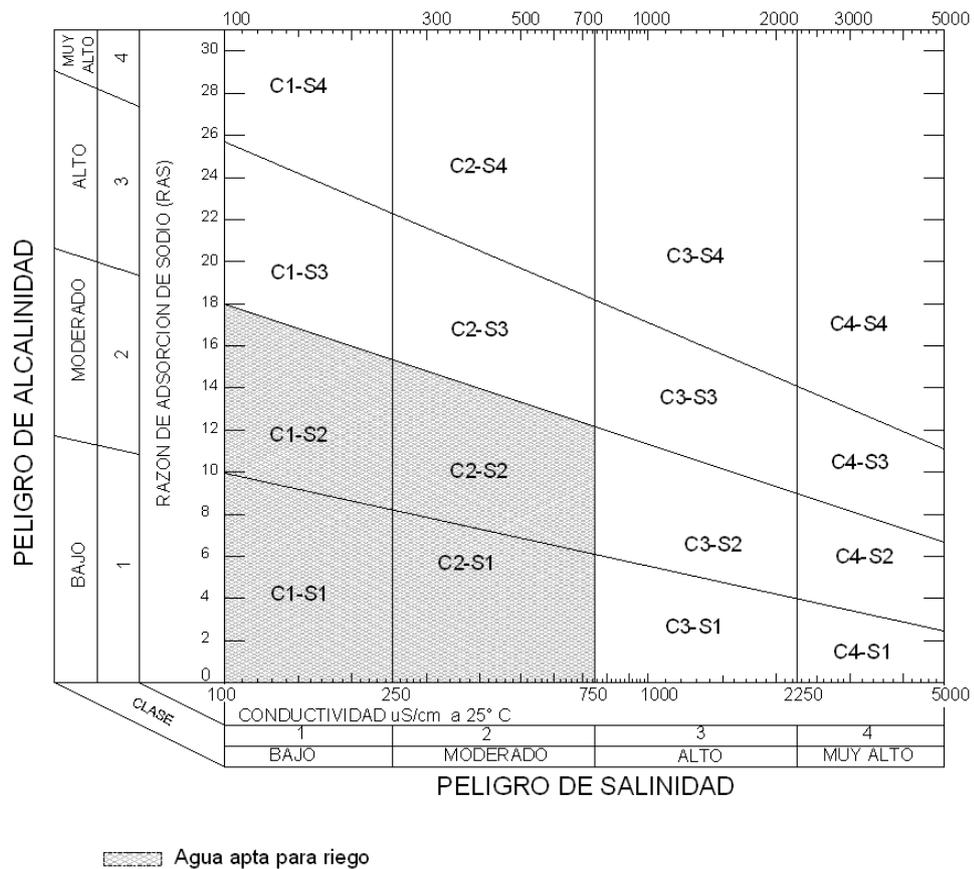


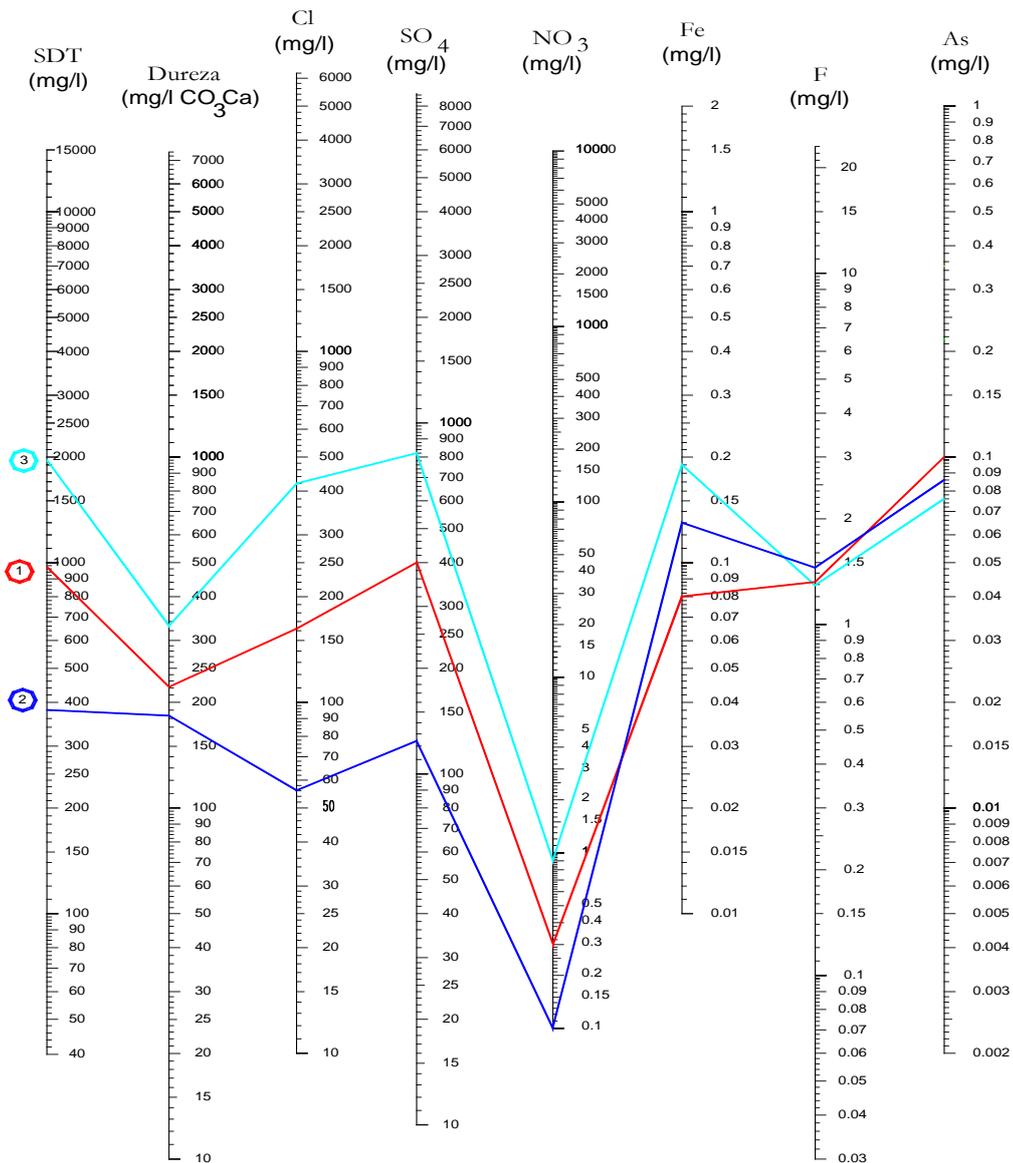
Gráfico 7: Representación de datos químicos en diagrama rectangular (Diagrama Wilcox).

6. Diagramas Lineales

Diagrama Schoeller

Se dispone de varias semirectas verticales paralelas igualmente espaciadas. A cada semirecta se le asocia un anión o un catión y se representa a partir de un origen (en general la misma altura para todas las semirectas) segmentos proporcionales a la concentración en meq/l, ppm o %. Los diferentes puntos obtenidos se unen dando una línea quebrada. Se pueden representar varios análisis simultáneamente a fines comparativos, pero cuando supera cierto número suelen ser confusos en su representación.

DIAGRAMA TIPO SCHOELLER



REFERENCIAS

- ① Dique de Baez
- ② A° Cantamampa
- ③ A° Primavera

Gráfico 8: Representación de datos químicos en diagrama lineal.

**MÓDULO 4.** Contaminación. Los contaminantes y su comportamiento en el subsuelo: Principales contaminantes: metales pesados, compuestos orgánicos, fluidos orgánicos no miscibles, pesticidas, otros contaminantes, bacterias y virus. Procesos que afectan el transporte de los contaminantes: procesos geoquímicos, procesos físicos, procesos biofísicos. Fuentes más usuales de contaminación. Contaminación en aguas superficiales. Metodología de detección. Índices de calidad.

---

#### 4.1. CONTAMINACIÓN

El agua es un recurso natural esencial para el desarrollo de la vida humana. Las principales fuentes de extracción son los cuerpos de agua superficiales y los embalses subterráneos.

Los embalses subterráneos o acuíferos son formaciones geológicas o estratos que permiten la circulación del agua por sus poros o grietas. La explotación del agua del subsuelo se efectúa generalmente mediante perforaciones, donde se instala una bomba sumergible que capta el agua circulante. El recurso así obtenido puede satisfacer la demanda de abastecimiento a poblaciones, industrias, riego de cultivos o simplemente cubrir las necesidades hídricas a nivel domiciliario rural.

Las principales limitaciones para su aprovechamiento son las características de la formación geológica portadora y transmisora, la profundidad a que se encuentra y la calidad (físicoquímica y bacteriológica) del agua. La calidad depende tanto de factores naturales como antrópicos. Los primeros están vinculados al Ciclo Hidrológico y los segundos a la acción del hombre sobre el recurso.

Del agua que alcanza la superficie del terreno, una parte queda almacenada y es devuelta a la atmósfera, otra parte escurre por la superficie y otra infiltra a través del terreno. El movimiento del agua en profundidad y según su avance, se denomina infiltración, percolación o escorrentía subterránea. El movimiento es muy lento y se debe fundamentalmente a la acción gravitatoria. Parte del agua incorporada al terreno retorna a la atmósfera por la evaporación o por la transpiración de las plantas; otra parte pasa a engrosar el caudal de los ríos, alimentando su cauce o a través de manantiales. Salvo en algunos casos particulares, la mayor parte de las aguas de escorrentía superficial y subterránea terminan en el mar. Puede entonces considerarse que los océanos son el punto final del Ciclo Hidrológico.

A lo largo del ciclo el agua participa en procesos de origen natural y también es afectada por la actividad del Hombre, que se manifiesta de diversas formas. En particular cabe citar la agricultura como un ejemplo de actividad que afecta directamente la calidad del agua subterránea. La utilización de fertilizantes, pesticidas, herbicidas, etc., incorpora elementos que intervienen en los procesos químicos que se desarrollan en el suelo, en los que participa el agua. Los efluentes industriales o domésticos que llegan a infiltrar a través del terreno, constituyen también una fuente de incorporación de elementos que pueden derivar en un desmejoramiento de la calidad del agua. Si por tal degradación de la calidad se debe suspender el uso que se hacía del agua, se dice que la misma ha sido contaminada para ese uso.

El tipo, extensión y duración de las alteraciones en la calidad del agua dependen del tipo de influencia que ejerzan las actividades humanas, de los procesos geoquímicos, físicos y biológicos que tengan ocurrencia en el suelo y el subsuelo y de las condiciones hidrogeológicas existentes.

La contaminación del agua subterránea es difícil de detectar y corregir, tal es así que a menudo no se detecta hasta que el contaminante mismo surge dentro de un pozo que está localizado a una cierta distancia de la fuente de contaminación. Un acuífero, una vez contaminado, puede deteriorarse totalmente como fuente de agua potable. Incluso si fuera posible limpiar el agua contaminada de un acuífero, éste último (el reservorio) permanecería aún contaminado ya que muchas sustancias químicas tienen la

tendencia a unirse a partículas del sedimento. Conforme el agua nueva reemplaza a la contaminada removida (por bombeo por ejemplo), las sustancias químicas unidas se liberan, contaminando el agua.

La contaminación de las aguas superficiales suele ser muy visible y por ello, normalmente se es capaz de poner en movimiento acciones y remedios para evitarlo, mitigarla o por lo menos para tratar de paliarla. En el caso de las aguas subterráneas, al no ser visibles y estar su explotación muy distribuida, la acción protectora o correctora llega con frecuencia muy tarde, y ello en el supuesto de que llegue a producirse. Además, cuando la contaminación se hace perceptible, usualmente ya ha alcanzado un importante desarrollo en extensión del área contaminada (pluma de contaminación).

Debido a la constitución física del acuífero (normalmente con fracciones sedimentarias de todos los tamaños y los efectos atenuadores de los suelos) suele existir una resistencia natural a la contaminación; pero una vez que ésta se ha producido y establecido, la regeneración suele ser extremadamente lenta, a veces de muchos años, si es que puede lograrse por medios económicamente viables. Lógicamente, la persistencia y evolución depende del contaminante, pues mientras unos son fácilmente degradables naturalmente, otros lo son con dificultad y otros son estables. De lo mencionado se desprende con facilidad la gran importancia que tiene proteger los embalses subterráneos contra la contaminación, cualquiera sea su origen.

## **4.2. LOS CONTAMINANTES Y SU COMPORTAMIENTO EN EL SUBSUELO**

### **1. Metales pesados**

Los metales pesados, usualmente definidos como los de densidad mayor a los  $5 \text{ g/cm}^3$ , incluyen entre otros al cadmio, cromo, estaño, mercurio, plomo, cobre, plata y cinc. Las fuentes donde se originan están asociadas tanto a procesos naturales, como a actividades humanas. Están presentes en desechos sólidos, líquidos y gaseosos (en menor cantidad). Son usados como materia prima para diversos productos industriales y también como catalizadores en procesos químicos. Algunos son usados como aditivos en los combustibles y otros son componentes de pesticidas y fertilizantes. No hay que olvidar la posible aparición de metales pesados radioactivos como consecuencia de la utilización de tecnologías nucleares. Las fuentes más comunes de altas concentraciones de metales pesados en aguas subterráneas son la minería y los procesos de fundición.

### **2. Compuestos orgánicos**

Los que representan la mayor amenaza a la calidad de las aguas subterráneas son ciertos tipos de hidrocarburos halogenados, de grupos alifático y aromático. Son de amplio uso industrial y son moderadamente solubles en agua y móviles y persistentes en el subsuelo. Gases y polvos domésticos e industriales contienen compuestos orgánicos que alcanzan el agua subterránea al disolverse en el agua de lluvia que luego percola. Los compuestos orgánicos están presentes principalmente en el alcantarillado municipal y en residuos líquidos industriales, y llegan al agua subterránea por filtración ocasional o por disposición intencional. Otras formas en que llegan al subsuelo es en los líquidos lixiviados, provenientes de rellenos sanitarios o abonos, y por la aplicación de pesticidas, que son principalmente compuestos orgánicos sintéticos.

### **3. Fluidos orgánicos no miscibles**

Proviene de derrames accidentales o de filtraciones de tuberías o tanques de almacenamiento. Estos fluidos forman fases separadas que se comportan de acuerdo a sus propiedades físicas individuales, moviéndose a mayores o menores velocidades que el agua. Los que son más livianos pueden formar cuerpos en la superficie freática, mientras que los más pesados se hunden hasta el fondo del acuífero.

#### 4. Pesticidas

Los pesticidas son productos químicos utilizados para el control de insectos, hongos y otros organismos no deseados, y son utilizados principalmente en actividades agrícolas. A principios de siglo se utilizaban compuestos de mercurio y arsénico, pero en la actualidad se fabrican en base a miles de compuestos orgánicos sintéticos diferentes. Los procesos de transformación a que se ven sometidos, dependen de su naturaleza físico-química y de la interacción con el suelo y el sistema climático. La mayoría de los pesticidas tiene una fuerte sorción en el suelo, debida a la capacidad adsorptiva de los coloides del suelo y de la materia orgánica, y es por eso que las prácticas agronómicas como la irrigación y el arado de la tierra son de gran importancia en el impacto que producen.

#### 5. Otros contaminantes

Los gases y aerosoles industriales y domésticos contienen dióxido de carbono, dióxido de azufre, cloruros y fluoruros, que ingresan al subsuelo al disolverse en agua de lluvia. El uso de fertilizantes inorgánicos y abonos (que contienen cloruros nitratos y fosfatos) aumenta la cantidad de sales solubles en el suelo.

#### 6. Bacterias y virus

Los acuíferos que más expuestos están a la contaminación microbiológica son los superficiales. Esta contaminación es causa de enfermedades de transmisión hídrica, y generalmente resulta del ingreso directo de agua contaminada al subsuelo, sin pasar por la zona no saturada. Algunos de los microorganismos que pueden ser transmitidos por el agua subterránea son, entre muchos otros, la salmonella, el virus de la hepatitis y el virus de la polio.

### 4.3. PROCESOS QUE AFECTAN EL TRANSPORTE DE CONTAMINANTES

Desde la fuente y a través del suelo, la zona no saturada, y el sistema acuífero, las sustancias se ven sometidas a procesos naturales que hacen cambiar sus características físicas o químicas. Estos procesos resultan en la atenuación del contaminante, ya que pueden disminuir su severidad o su concentración en el agua, o hasta incluso removerlo totalmente, y dependen de las condiciones hidrogeoquímicas del lugar.

#### 1. Procesos químicos

##### a. Sorción

La sorción es una propiedad de los sólidos que liberan ciertos constituyentes en la solución y captan componentes de la solución (moléculas y iones) en su superficie cargada, por enlaces covalentes o de Van der Waals. Incluye la adsorción y la absorción, las cuales difieren en que la última implica penetración de la sustancia absorbida. Este es un fenómeno de superficie, por lo tanto se da en mayor proporción cuanto menor sea el tamaño de las partículas sólidas. Entre la cantidad de una sustancia en solución y la cantidad sorbida se establece un equilibrio, por lo cual puede haber sorción o desorción según sea la concentración de la solución.

Son sorbentes fuertes los minerales de arcilla, los hidróxidos e hidratos de hierro y manganeso, el hidróxido de aluminio y las sustancias orgánicas, así como también las raíces de los vegetales y los microorganismos. Si el intercambio es entre iones, y lo que une a los iones con la superficie de las partículas sólidas son enlaces iónicos (más fuertes), el proceso es denominado intercambio iónico. El más común es el intercambio de cationes. Por su gran carga eléctrica respecto a su superficie, el intercambio iónico está limitado a las partículas coloidales ( $10^{-6}$  a  $10^{-3}$  mm de diámetro).

b. Solución – precipitación

Al avanzar el flujo de agua, el material disuelto precipita si su concentración aumenta por encima de los límites de saturación. Esto puede pasar como consecuencia de la evaporación y la transpiración, o al mezclarse aguas de distinta composición. Cuando precipitan los iones de mayor concentración remueven a otros iones en su camino (co-precipitación). Así los contaminantes son incorporados por sustitución isomorfa de iones de similar tamaño en la estructura del mineral en formación (co-precipitación) o en la de uno que ya se ha formado (reemplazo). La nueva fase sólida resultante es menos soluble que la original.

c. Oxidación – reducción

La oxidación y la reducción son las dos partes de un mismo proceso, que junto al pH condiciona la solubilidad de muchos compuestos presentes en el agua. Consiste en la donación de un electrón (oxidación) por parte de una sustancia, a otra que lo recibe (reducción). Las condiciones de oxidación o de reducción predominantes en el agua son controladas por la presencia de oxígeno disuelto. Donde hay un consumo de oxígeno (por ejemplo por bacterias) se crea una zona de reducción, dando lugar a la precipitación de metales pesados, mientras que si el ingreso de oxígeno al agua es mayor que el consumo el material inorgánico reducido se oxida, precipitando los óxidos e hidróxidos de hierro y manganeso.

## 2. Procesos bioquímicos

Son importantes para la transformación de compuestos orgánicos peligrosos en otros menos dañinos y hasta inocuos. Los procesos bioquímicos son efectuados por microorganismos, que obtienen la energía necesaria para su metabolismo degradando las sustancias en compuestos más simples llegando hasta el dióxido de carbono y el agua.

Los principales responsables de estos procesos son las bacterias hongos y algas. Las bacterias pueden ser aeróbicas, si necesitan oxígeno libre para vivir, o anaerobias, si no lo necesitan. Los microorganismos autóctonos están adaptados al ambiente subsuperficial local, y si hay un aumento de nutrientes por contaminación se produce un aumento de su población.

Las reacciones provocadas por los microbios son importantes en los ciclos del azufre, el nitrógeno, el hierro y el manganeso. Dependen del potencial redox, el oxígeno disuelto, el pH, la presencia de otros compuestos y las concentraciones de los compuestos y los organismos. Para ser degradados, los compuestos orgánicos deben estar disueltos. Algunos, como los compuestos orgánicos halogenados (pesticidas, solventes, trihalometanos), son resistentes a biodegradarse y requieren ser deshalogenados mediante varios mecanismos biológicos como primer paso para su degradación.

## 3. Procesos físicos

a. Advección

Es el movimiento del contaminante provocado por el flujo de agua. Los solutos que no reaccionan con otros o con el medio, se mueven a la velocidad promedio del agua subterránea. Por esto, si consideráramos solamente la advección, el movimiento de un frente de soluto sería uniforme a lo largo de todo el frente y los contaminantes se moverían con un frente recto, a la velocidad del flujo del agua.

b. Dispersión

Consiste en la desviación de los solutos de la trayectoria esperada que se produce al pasar por los poros interconectados. Es la combinación de la difusión molecular y la dispersión mecánica. Por ella el

contaminante se dispersa en el agua circundante, en un proceso de mezcla irreversible, resultando en una pluma cuyo volumen aumenta pero cuya concentración disminuye.

La dispersión se da tanto en la dirección del flujo como en la transversal, lo que hace que el contaminante pase a ocupar una porción cada vez mayor de flujo y que el frente no sea recto y perpendicular a la dirección del flujo, ya que parte se mueve adelante de lo que sería solo por advección. Este fenómeno depende del grado de homogeneidad del medio, que determina las direcciones de mayor o menor migración de los contaminantes.

c. Retardación

Es la disminución en la velocidad de movimiento de un soluto, y es consecuencia de los diferentes mecanismos físicos y químicos. La retardación anula los efectos de la dispersión, por lo que el frente tiende a ser recto. Microscópicamente es el resultado de la sorción y desorción sucesivas, mientras que en una visión macroscópica incluye la dilución, la filtración, las reacciones químicas y las transformaciones bioquímicas.

d. Filtración

La filtración implica la remoción mecánica de las partículas de tamaño mayor que el de poro y la sorción de las partículas suspendidas más pequeñas. La retención efectuada a las partículas hace que se reduzca la porosidad del medio y por lo tanto su permeabilidad. Este fenómeno depende de la granulometría del medio, de las condiciones hidráulicas y del tamaño de las partículas contaminantes.

e. Transporte de gas

Los gases ingresan desde la atmósfera por difusión, por variaciones de presión y temperatura en la zona no saturada y por dispersión en el flujo en la zona saturada. El abastecimiento de oxígeno determina que las condiciones sean aerobias o anaerobias.

El movimiento inverso remueve productos gaseosos de decaimiento (nitrógeno, dióxido de carbono) y contaminantes volátiles (gasolina, benceno), aunque la volatilización no cambia apreciablemente la concentración de las sustancias en el agua subterránea.

#### 4. Procesos biofísicos

Los patógenos son introducidos pasivamente en el agua subterránea. Su eliminación está dada por condiciones ecológicas desfavorables y por la presencia de organismos autóctonos antagónicos. La distancia horizontal que es capaz de viajar está determinada por la velocidad del flujo y por su tiempo de supervivencia. La ocurrencia de los distintos procesos varía en las diferentes zonas subsuperficiales, decreciendo en variedad y magnitud con la profundidad. El grado de atenuación depende de: 1) el tiempo en que el contaminante está en contacto con el material a través del cual pasa, 2) el tamaño de grano y las características físicas y químicas del mismo, y 3) la distancia que el contaminante ha recorrido.

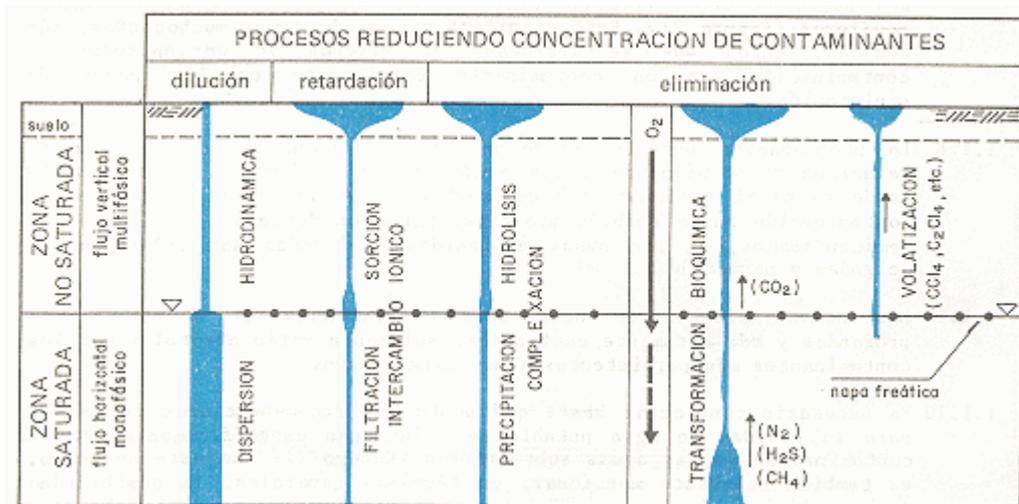


Figura 7: Procesos de atenuación de contaminantes en el agua subterránea (Foster, 1987, modificado de Golwer, 1983). El grosor de la línea correspondiente indica la importancia relativa de los procesos en el suelo, y sobre, en y bajo el nivel freático.

#### 4.4. FUENTES USUALES DE CONTAMINACIÓN

La alteración de la calidad del agua subterránea puede ser efectuada por fuentes puntuales, que son más fáciles de identificar, o por fuentes difusas. También se puede hacer distinción entre las actividades en las que la generación de la carga contaminante al subsuelo es parte de su diseño y aquellas en las que es incidental o accidental.

La contaminación puede ser originada en distintos niveles: en la superficie del terreno; en la zona no saturada; o en la zona saturada, y está asociada con actividades industriales, agrícolas, comerciales y domésticas.

Entre las causas de aplicación en la superficie de contaminantes están los derrames accidentales, la disposición en el suelo de aguas residuales domésticas y lodos, descargas de efluentes industriales al suelo y a cursos de agua, la aplicación de fertilizantes y pesticidas, la existencia de silos y precipitaciones aéreas. Los pozos negros, fosas sépticas, lagunas de tratamiento, rellenos sanitarios, la filtración desde tanques y tuberías, y los cementerios son algunos de los elementos que originan contaminación en la zona no saturada. En cambio los generadores de polución por debajo del nivel freático son minas, intrusión salina, pozos abandonados utilizados para la disposición de residuos, etc.

#### 4.5. CONTAMINACIÓN EN AGUAS SUPERFICIALES

Tal y como pone de relieve el ciclo hidrológico, los ríos nacen en las vertientes de las montañas donde el agua es casi pura. En su discurrir por los valles y llanuras hasta el mar va aumentando su nivel de mineralización y, simultáneamente, se producen transportes de materiales, especialmente durante los períodos de crecidas. A este comportamiento genérico deben sumarse los efectos derivados directa e indirectamente de la actividad humana.

Para controlar la calidad de las aguas y también para conocer el comportamiento de los ríos, además de los hidrogramas anteriormente citados, se han desarrollado los índices de calidad y polución basados inicialmente en los parámetros fisicoquímicos. Posteriormente han sido ampliamente complementados con el desarrollo de los denominados índices biológicos, aplicando parámetros de esta naturaleza. Mientras que

sólo existen algunas decenas de índices fisicoquímicos, los biológicos ya se cuentan por centenares y siguen creciendo ininterrumpidamente.

Los parámetros que integran los índices han de ser sensibles y representativos de la calidad del agua desde la perspectiva concreta que se desea observar. Además, su analítica debe estar perfectamente normalizada, y en lo posible ser rápida y de bajo coste.

Se han establecido históricamente varios índices o ecuaciones basadas en parámetros fisicoquímicos referidos a diversas aplicaciones del agua. Son muy conocidos el de Stabler para riego (1927), o el de Tillmans (1931) y Claude Schmitt (1955), ambos sobre el equilibrio del dióxido de carbono. No obstante, hay que esperar hasta la década de 1960 para el desarrollo, en los Estados Unidos, de los modernos índices fisicoquímicos de calidad. Cuando fueron introducidos en España, algunos científicos propusieron diversos índices: Sánchez Crespo (1969), Martínez de Bascarán (1975) y Queralt (1979).

Como se describió anteriormente, a efectos del control de la calidad de las aguas y visto el gran número de compuestos y características que conforman dicha calidad se ha intentado simplificar y buscar unos índices que englobando unas pocas características fáciles de determinar o analizar permiten dar una idea general y rápida de la calidad del agua. Existe una amplia gama de índices de calidad que consisten en una fórmula que da un resultado numérico según el valor de determinados parámetros analíticos y una escala de ponderación.

El ISQA (Índice simplificado de Calidad) se utiliza en Cataluña para el control de calidad del agua de los ríos:

$$ISQA = T (A + B + C + D)$$

A: Contenido orgánico (Oxidabilidad al Permanganato o DQO – Mn). Rango 0 – 30

B: Representa la materia en suspensión. Rango 0 – 25

C: Corresponde al Oxígeno disuelto en el agua. Rango 0 – 25

D: Indica la conductividad eléctrica. Rango 0 – 20

T: Incluye la temperatura como factor de todos los sumandos. Rango 1 – 0,8

Cada uno de los valores correspondientes se toma de los gráficos adjuntados.

Con este índice se clasifica la calidad del agua en tramos de ríos y se determinan las zonas donde hay que hacer actuaciones de corrección de calidad y se orienta sobre los posibles usos del agua.

- a. Temperatura: Se determina directamente donde se produce la toma de muestras y se mide en grados centígrados (°C). El rango numérico resultante, tal y como puede apreciarse en la figura varía únicamente entre 0,8 y 1. Debe tenerse en cuenta que este componente es un factor limitante en la fórmula de aplicación posterior hecho que le da una especial relevancia:
- b. Contenido orgánico: Se mide la oxidabilidad, expresada en mg O<sub>2</sub>/l. Es decir, la concentración global orgánica insoluble y soluble, tanto si es natural o artificial, biodegradable o resistente. El oxidante utilizado es el permanganato potásico (KMnO<sub>4</sub>) en condiciones ácidas y a ebullición. En este caso, la escala varía entre 0 y 30. Si se realizase otra determinación análoga, como la DQO o el TOC, debería establecerse un coeficiente de correlación.
- c. Materias en suspensión: Determina la cantidad de sólidos insolubles: orgánicos o inorgánicos, naturales o artificiales. Vienen expresados en mg/l. Es un parámetro que tiene mucha influencia en la fotosíntesis. Su valor varía entre 0 y 25.

- d. Oxígeno disuelto: Su concentración (expresada en mg O<sub>2</sub>/l) está muy relacionada con el contenido de materia orgánica, especialmente con el contenido de materia orgánica biodegradable. También está relacionado, pero en menor grado, con el contenido de nutrientes. La escala de valores varía entre 0 y 25.
- e. Conductividad: Mide la conductividad eléctrica del agua a 20 °C (medido en tS/cm). La conductividad está relacionada con la concentración de sales inorgánicas, principalmente cloruros y sulfatos. La escala varía entre 0 y 20.

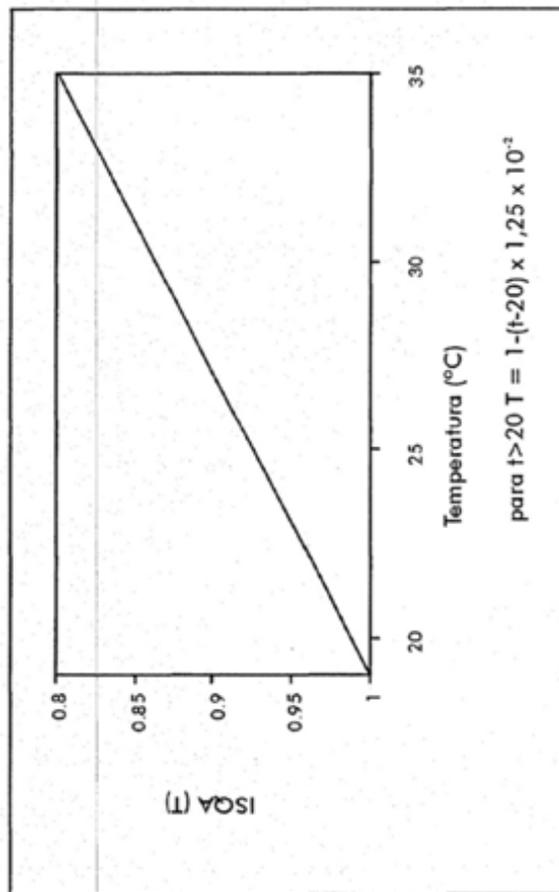


Gráfico 9: Variación del ISQA con la temperatura.

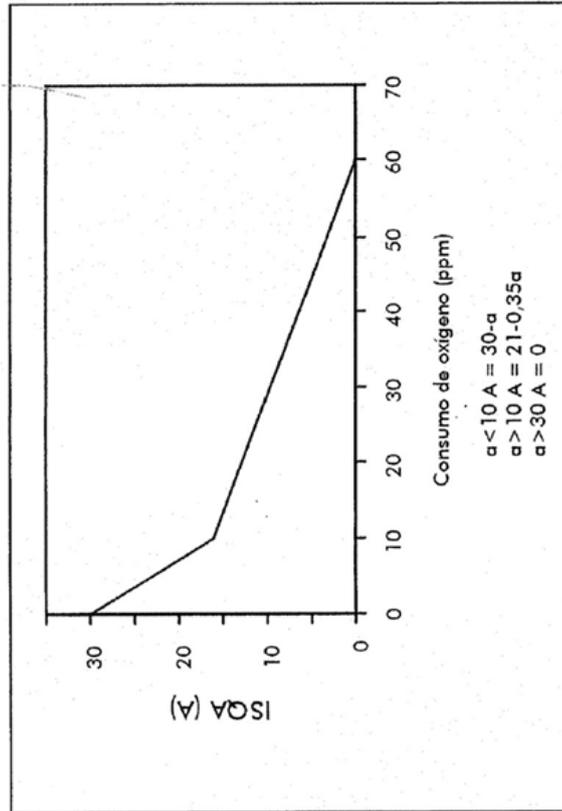


Gráfico 10: Variación del ISQA con el consumo de oxígeno.

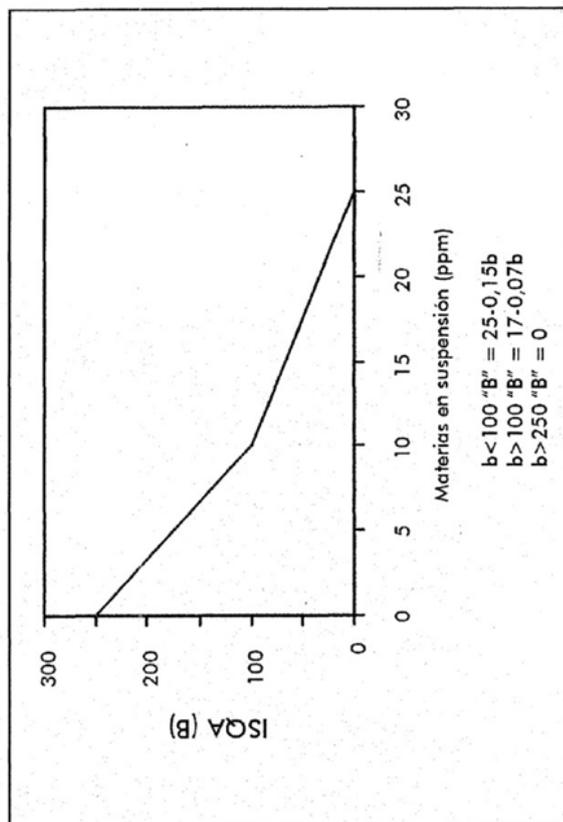


Gráfico 11: Variación del ISQA con la materia en suspensión.

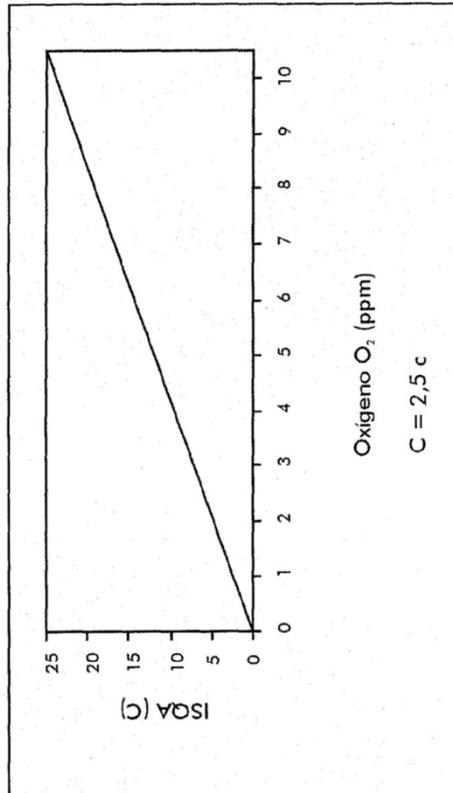


Gráfico 12: Variación del ISQA con el oxígeno disuelto.

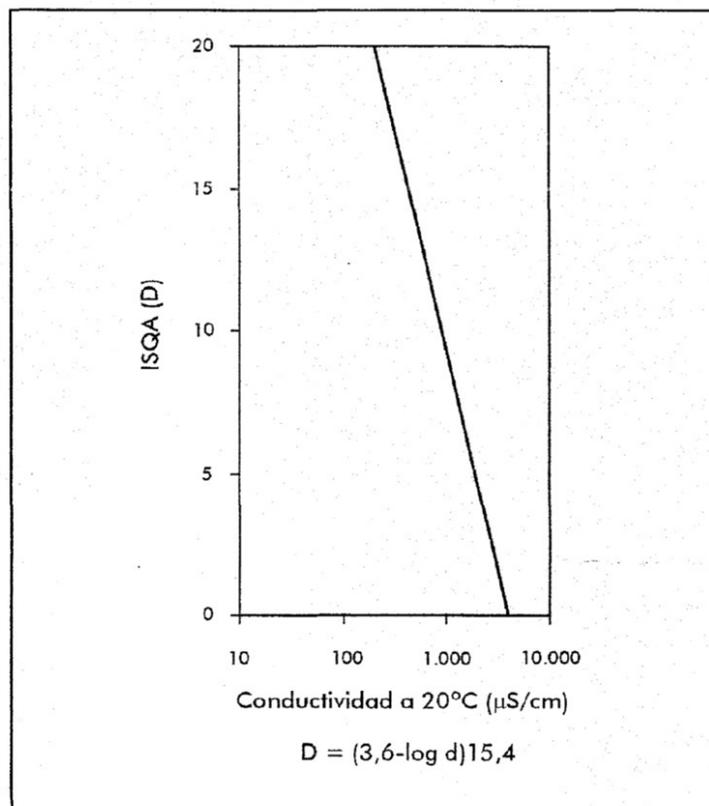


Gráfico 13: Variación del ISQA con la conductividad.

ISQA	ANIMAL CARACTERÍSTICO	ACTIVIDAD CARACTERÍSTICA	PROPIEDADES DEL AGUA	COLOR CLAVE
100-85	Trucha 	Abastecimiento 	<b>Aguas de montaña.</b> Son limpias, frescas, de bajo contenido orgánico y mineral; generalmente cerca de montes con nieve en invierno.	Azul
85-75	Barbo 	Natación 	<b>Aguas claras.</b> Esencialmente son todavía limpias y fácilmente potabilizables.	Verde
75-60	Bagra 	Pesca 	<b>Aguas turbias.</b> Tienen un contenido orgánico y mineral significativo. Para su potabilización necesitan un tratamiento fisicoquímico adecuado.	Verde
60-45	Carpa 	Náutica 	<b>Aguas sucias.</b> Opacas, con coloraciones y espumas. Para su potabilización necesitan tratamientos enérgicos, con tecnología avanzada. Presentan problemas de gustos y olores desagradables. Es probable la muerte de peces en períodos de estiaje o por vertidos determinados.	Naranja
45-30	Anguila 	Riego por inundación 	<b>Aguas deterioradas.</b> Desaconsejables para consumo humano. Pueden usarse en agricultura de foma vigilada. Tienen poco oxígeno disuelto. En el fondo se producen fermentaciones anaerobias.	Rojo
30-15	Rana 	Riego de árboles 	<b>Aguas residuales diluidas.</b> Fermentaciones anaerobias generalizadas, con olores desagradables y coloraciones intensas. Riesgo de contaminar las aguas subterráneas si se usan para riego.	Negro
15-0	Rata 	Peligro generalizado 	<b>Aguas residuales.</b> La situación global del río es desastrosa. Las aguas subterráneas próximas están degradadas. El sistema no es recuperable a corto plazo.	Negro

Gráfico 14: Clasificación de la calidad de las aguas y sus usos orientativos (Según la relación ISQA/IAQA).



**MÓDULO 5.** Concepto de vulnerabilidad. Metodologías para la evaluación de la vulnerabilidad: Método DRASTIC. Método DIOS. Concepto de Mapa de vulnerabilidad. Aplicación de la metodología. Detección de la contaminación. La contaminación por hidrocarburos.

---

### 5.1. CONCEPTO DE VULNERABILIDAD

Se denomina vulnerabilidad a la susceptibilidad que tiene el agua de un acuífero a la contaminación. El acuífero presenta zonas más vulnerables que otras. Son precisamente las zonas más vulnerables aquellas que importa identificar para controlar el desarrollo de actividades que puedan resultar contaminantes.

Para identificar las distintas zonas de vulnerabilidad se cuantifican ciertos parámetros en varios puntos del acuífero (profundidad de la capa freática, pendiente del terreno, etc.). Aplicando una metodología de interpretación de los distintos parámetros evaluados, se puede construir una carta de vulnerabilidad, donde se delimiten las zonas de distinto riesgo a la contaminación. El que un acuífero se contamine o no depende no sólo de la vulnerabilidad del mismo, sino también de la carga contaminante aplicada. A la interacción de estos dos factores se denomina riesgo de contaminación de las aguas subterráneas.

De lo expuesto, se desprende la importancia de tener conocimiento de la vulnerabilidad de un acuífero para gestionar una correcta explotación del mismo. De aquí la importancia de elaborar cartas de vulnerabilidad para los sistemas acuíferos.

El concepto de vulnerabilidad a la contaminación del agua subterránea fue introducido por primera vez por Margat en la década de los años 1960, señalando que la zona no saturada de un acuífero le proporcionaba un grado de protección y/o atenuación frente a contaminantes externos. De acuerdo a Vrba y Zaporozec (1994), la vulnerabilidad es una propiedad intrínseca del sistema hidrogeológico que depende de la sensibilidad del mismo a impactos producidos por actividades humanas e impactos producidos por procesos naturales. Dentro de este concepto se puede diferenciar:

- ✓ Vulnerabilidad intrínseca o natural: hace referencia a los atributos propios del acuífero tal como el tipo de suelo, las características de la zona no saturada, los parámetros hidráulicos y la recarga que controlan la aptitud del acuífero para responder ante un impacto determinado, como así también su capacidad de autorestauración.
- ✓ Vulnerabilidad específica o integrada: es la aptitud del acuífero para hacer frente a un tipo determinado de contaminante o impacto en concreto. A diferencia del anterior, los parámetros que miden esta vulnerabilidad están definidos por el impacto.

De acuerdo a estos dos conceptos, la vulnerabilidad natural se suele calcular y expresar entonces en términos hidrogeológicos; mientras que la vulnerabilidad específica se expresa en términos de riesgo frente a un determinado tipo de contaminante.

Lo más coherente sería evaluar la vulnerabilidad a cada contaminante, a cada clase de contaminante o a cada grupo de actividades contaminantes, sin embargo, este es un ideal al que no se intenta llegar debido a limitaciones prácticas. Cabe destacar que no es posible hablar de la vulnerabilidad a un contaminante universal ya que, por ejemplo, a la larga todos los acuíferos son vulnerables a contaminantes persistentes no degradables, que pueden verse retrasados en su llegada al acuífero, pero llegan. Tampoco hay que olvidar que los acuíferos más vulnerables son los más fácilmente recuperables.

El grado de vulnerabilidad puede expresarse mediante un índice de vulnerabilidad. Se han desarrollado varios métodos para determinar estos índices; estos métodos asignan diferentes puntajes a los parámetros

---

hidrogeológicos involucrados según la importancia asignada al mismo en atenuar una acción contaminante o potencialmente contaminante.

## 5.2. METODOLOGÍAS PARA EVALUACIÓN DE VULNERABILIDAD

Existen diversas técnicas de valoración de la vulnerabilidad, la elección de la técnica está en función de las necesidades y de la disponibilidad de los datos en cada caso. Dentro de las metodologías utilizadas pueden establecer dos grandes grupos atendiendo a si se realiza o no cuantificación. Los métodos cualitativos asignan categorías de vulnerabilidad (alta, media, etc.) a partir de matrices donde se recogen los datos de cada zona. Los cuantitativos, por el contrario, tratan de obtener valores numéricos que pueden ser traducibles a categorías mapeables de vulnerabilidad.

Los métodos cualitativos presentan el inconveniente de su subjetividad, lo que los hace muy poco comparables entre zonas diferentes. Sólo deberán ser usados para primeras evaluaciones, cuando la escala considerada sea muy pequeña o cuando los datos disponibles sean muy escasos.

Los métodos cuantitativos, por el contrario, están representados básicamente por métodos paramétricos. En estos métodos se seleccionan los factores que se considera influyen en la vulnerabilidad, y luego cada factor se jerarquiza en intervalos. Cada uno de estos intervalos está representado por un valor de parámetro (rating) al cual se le asigna un índice de ponderación o peso relativo (weight).

La combinación final de todos estos puntajes asignados resulta en índices de vulnerabilidad, que luego se agrupan en diferentes clases. La ventaja de estos métodos frente a los anteriores es que se elimina, al menos en gran medida, la subjetividad de la evaluación y hace muy comparables mapas obtenidos por el mismo método. Hay numerosos métodos para la determinación de la vulnerabilidad y riesgo de contaminación de los acuíferos.

Los dos métodos cuantitativos paramétricos internacionalmente más utilizados para determinar la vulnerabilidad de los acuíferos son los métodos del Índice DRASTIC y del Índice GOD. Los índices de vulnerabilidad determinados de esta forma buscan establecer la capacidad de atenuación de contaminantes por eliminación, retardación y dilución para cargas contaminantes impuestas desde superficie.

**CONTAMINACIÓN Y CALIDAD DEL AGUA. VULNERABILIDAD DE ACUÍFEROS**

*Tabla 8: Principales métodos para determinación de vulnerabilidad de acuíferos.*

METODO	EVALUACION DE	FACTORES	REFERÈNCIA
SURFACE IMPOUDMENT ASSESSMENT	sistemas de disposición de aguas servidas	. zona no saturada . importancia del recurso . calidad de aguas subterráneas . peligrosidad del material	LE GRAND (1964)
LANDFILL SITE RANTING (método Le Grand-Brown)	rellenos sanitarios nuevos y en operación	. distancia relleno y pozos . profundidad del agua . gradiente del acuífero	LE GRAND (1983)
SITE RANKING SYSTEM	disposición de productos químicos, nuevos y en operación	. suelo, caracterización hídrica, sorción y taponamiento químico . hidrodinámica del acuífero . aire . población próxima	HAGERTY et al. (1973)
POLUIÇÃO DOS LENÇÓIS ACUÍFEROS	vulnerabilidad general	. geología (litología y estructura)	TALTASSE (1972)
WASTE-SOIL INTERACTION MATRIX	disposición de residuos sólidos y líquidos y nuevas industrias	. efectos en la salud . característica producto químico . comportamiento del producto . capacidad del suelo de atenuación . hidrogeología . característica del lugar	PHILIPS et al. (1977)
SITE RANTING METHODOLOGY	disposición de residuos sólidos y líquidos y nuevas industrias	. receptor-población/uso del agua/uso local/degradación ambiental . caminos-nivel y tipo de contaminación; profundidad agua; pluviometría; permeabilidad suelo . característica del residuo-toxicidad, persistencia . práctica manejo/operación	KULFS et al (1980)

METODO	EVALUACION DE	FACTORES	REFERÈNCIA
TPE	áreas de riesgo de contaminación	. velocidad del agua subterránea . porcentaje de arcilla . actividad potencialmente contaminante . exploración de los acuíferos	SILVA et al. (1980)
HAZARD RANKING SYSTEM	áreas prioritarias para acción de remediación del acuífero	. migración-característica del medio y residuo; cantidad de producto; población existente próxima . explosión y fuego . contacto directo	CALDWELL et al. (1981)
MAPA DE VULNERABILIDAD	vulnerabilidad general	. características litológicas . área de recarga y descarga	DUARTE (1980)
BRINE DISPOSAL METHODOLOGY	aguas de formación en campos de petróleo y gas	. método de disposición . volumen . geología . densidad de pozos de petróleo . proximidad de pozos de agua	WESTERN MICHIGAN UNIVERSITY (1981)
PESTICIDE INDEX	pesticidas en uso normal	. característica fisico-química del pesticida . clima . perfil del suelo . cosecha	RAO et al. (1985)
<b>DRASTIC</b>	vulnerabilidad general	. <b>D</b> profundidad del agua . <b>R</b> recarga neta . <b>A</b> medio acuífero . <b>S</b> suelo . <b>T</b> topografía . <b>I</b> impacto en el acuífero . <b>C</b> conductividad hidráulica.	ALLER et al. (1985)

MÉTODO	EVALUACION DE	FACTORES	REFERENCIA
<b>GOD</b>	vulnerabilidad general	. G tipo de acuífero . O litología zona vadosa (no saturada) . D profundidad del agua	FOSTER & HIRATA (1988)
GROUNDWATER VULNERABILITY MAP FOR NITRATE	Vulnerabilidad al nitrato en la actividad agrícola	. tipo de suelo . características litológicas del acuífero	PALMER (1988)
POTENTIAL WASTE SITES (PWDS)	Disposición de residuos sólidos	. vulnerabilidad . confinamiento del acuífero . proximidad de fuentes . tipo y cantidad contaminante . velocidad zona saturada . percolación	BGS (sin data)
(Sin nombre)	Vulnerabilidad general, basado en la teoría del flujo-piston	. conductividad hidráulica zona no saturada . profundidad del agua subterránea . humedad del suelo . recarga real	Marcolongo & Pretto (1987)
SINTACS	Vulnerabilidad general	. (S) profundidad del agua . (I) recarga neta . (N) zona no saturada . (T) topografía . (A) medio acuífero . (C) conductividad hidráulica . (S) suelo	CIVITA et al. (1990)
(Sin nombre)	Vulnerabilidad general	. característica litológica y de permeabilidad de acuíferos. . profundidad del agua	ADAMS & FOSTER (1992)
RIESGO POR SISTEMAS DE SANEAMIENTO <i>IN SITU</i>	Evaluar áreas de mayor riesgo por sistemas de saneamiento <i>in situ</i>	. vulnerabilidad (GOD) . densidad población . análisis indicadores físico-químicos (conductividad eléctrica)	FERREIRA & HIRATA (1993)

Cada método tiene un diferente criterio de ponderación de los parámetros involucrados; el método GOD asigna un peso similar para cada característica hidrogeológica, y considera un rango más amplio de variación para la profundidad al nivel freático. El método DRASTIC por su parte considera de mayor importancia los parámetros correspondientes al tipo de suelo, profundidad al nivel freático, impacto en la zona no saturada y recarga al acuífero.

### 5.2.1 Método DRASTIC

El método DRASTIC (Aller et al., 1987) valora y pondera parámetros intrínsecos, que reflejan las condiciones naturales del medio. Este sistema paramétrico sumativo de evaluación incluye siete factores fundamentales a las que asigna valores (**Rating**) y un multiplicador o índice de ponderación (**Weight**).

Tabla 9: Método Drastic para la determinación del índice de vulnerabilidad.

<b>D</b>	Depth to water (Profundidad del agua)
<b>R</b>	Recharge (Recarga)
<b>A</b>	Aquifer media (Tipo de Acuífero)
<b>S</b>	Soil media (Tipo de suelo)
<b>T</b>	Topography (Topografía, pendiente)
<b>I</b>	Impact of the Vadose Zone Area (Tipo de impacto de la zona vadosa)
<b>C</b>	Hydraulic Conductivity of the aquifer (Conductividad hidráulica)

La valoración y ponderación de estos parámetros intrínsecos permite acotar intervalos o rangos de vulnerabilidad a la contaminación y delimitar áreas de igual valor de vulnerabilidad. Las hipótesis en las que el índice DRASTIC se basa para determinar los siete parámetros involucrados son las siguientes:

- ✓ Las cargas contaminantes son introducidas desde la superficie del terreno.
- ✓ Las cargas contaminantes penetran con el agua de recarga.
- ✓ Las cargas contaminantes tienen la movilidad del agua.
- ✓ La superficie mínima de aplicación del método es de 0,4 km<sup>2</sup>

Cuando no se cumplen las condiciones anteriores, la posterior evaluación del riesgo potencial de contaminación del agua subterránea mediante un análisis de vulnerabilidad por este método, no es confiable. El índice DRASTIC se resuelve mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Valor del Índice de Vulnerabilidad (IdeV)} = \text{DRDW} + \text{RRRW} + \text{ARAW} + \text{SRSW} + \text{TRTW} + \text{IRIW} + \text{CRCW}$$

La ecuación anterior expresa la conjunción de las valoraciones de cada propiedad, aportadas por el método, y el conocimiento que se tiene de las unidades acuíferas involucradas. Como resultado final, luego de encontrar un valor numérico o índice de vulnerabilidad para cada porción del área de estudio, se delimitarán áreas mayores agrupando intervalos de valores de índices de vulnerabilidad a fin de zonificar el área según la categoría de vulnerabilidad resultante.

El método DRASTIC puede ser utilizado en casos específicos; por ejemplo, permite evaluar la susceptibilidad de un sitio a la acción de una carga contaminante permanente, tal es el caso de los sitios a utilizar para disposición de desechos sólidos. En esta condición existe una mayor probabilidad que el acuífero esté afectado por la producción de lixiviados del propio relleno sanitario; también permite discriminar áreas homogéneas con el mismo nivel de vulnerabilidad a partir de las cuales se puede obtener una evaluación de las zonas de recarga y crear zonas de protección para el propio acuífero.

El peso o ponderación (**W**) vale:

- 5 para D
- 4 para R
- 3 para A
- 2 para S
- 1 para T
- 5 para I
- 3 para C

Entonces la ecuación adquiere la siguiente forma:

$$\text{IdeV} = \text{DR5} + \text{RR4} + \text{AR3} + \text{SR2} + \text{TR1} + \text{IR5} + \text{CR3}$$

El rating (**R**) para cada parámetro es:

- DR: Profundidad al acuífero (1 a 10)
- RR: Recarga Neta (1 a 9)
- AR: Tipo de Acuífero (1 a 10)
- SR: Tipo de Suelo (1 a 10)
- TR: Topografía (1 a 10)
- IR: Impacto de la zona vadosa (1 a 10)
- CR: Conductividad Hidráulica (1 a 10)

Los puntajes (**R**) están señalados en tablas de acuerdo a rangos para cada uno de los siete parámetros.

Tabla 10: Puntaje y rangos asignados al parámetro D, la profundidad del acuífero.

D (Profundidad al acuífero) (metros)	
Rango	Puntaje
0 – 1,5	10
1,5 – 4,6	9
4,6 – 9,1	7
9,1 – 15,2	5
15,2 – 22,9	3
22,9 – 30,5	2
30,5 -	1

Tabla 11: Puntaje y rangos asignados al parámetro R, recarga neta.

R (Recarga neta) (m/día)	
Rango	Puntaje
0 – 0,00014	1
0,00014 – 0,00028	3
0,00028 – 0,00049	6
0,00049 – 0,00070	8
0,00070 -	9

Tabla 12: Puntaje y rangos asignados al parámetro A, tipo de acuífero.

A (Tipo de acuífero)		
Rango	Puntaje	Puntaje típico
Esquisto macizo	1 - 3	2
Metamórfico / Ígneo	2 - 5	3
Metamórfico / Ígneo, meteorizado	3 - 5	4
Conglomerado glacial	4 - 6	5
Arenisca estratificada, calcita y secuencias esquistosas	5 - 9	6
Arenisca maciza	4 - 9	6
Calcita maciza	4 - 9	6
Arena y grava	4 - 9	8
Basalto	2 - 10	9
Calcita cárstica	9 - 10	10

Tabla 13: Puntaje y rangos asignados al parámetro S, tipo de suelo.

S (Tipo de suelo)	
Rango	Puntaje
Delgado o ausente	10
Grava	10
Arena	9
Turba	8
Arcilla expansiva y/o agregada	7
Marga arenosa	6
Marga	5
Marga limosa	4
Marga arcillosa	3
Orgánico	2
Arcilla no expansiva ni agregada	1

Tabla 14: Puntaje y rangos asignados al parámetro T, pendiente.

T (Pendiente) (%)	
Rango	Puntaje
0 - 2	10
2 - 6	9
6 - 12	5
12 - 18	3
18 -	1

Tabla 15: Puntaje y rangos asignados al parámetro I, impacto de la zona vadosa.

I (Impacto de la zona vadosa)		
Rango	Puntaje	Puntaje típico
Capa confinante	1	1
Limo / arcilla	2 - 6	3
Esquisto	2 - 5	3
Calcita	2 - 7	6
Arenisca	4 - 8	6
Calcita estratificada, arenisca, esquistos	4 - 8	6
Arena y grava con significativa arcilla y limo	4 - 8	6
Metamórfico / Ígneo	2 - 8	4
Arena y grava	6 - 9	8
Basalto	2 - 10	9
Calcita cárstica	8 - 10	10

Tabla 16: Puntaje y rangos asignados al parámetro C, conductividad hidráulica.

C (Conductividad hidráulica) (m/día)	
Rango	Puntaje
0 – 4,07	1
4,07 – 12,22	2
12,22 – 28,52	4
28,52 – 40,75	6
40,75 – 81,5	8
81,5 -	10

Recordando la expresión matemática del Índice de Vulnerabilidad:

$$\text{IdeV} = \text{DR5} + \text{RR4} + \text{AR3} + \text{SR2} + \text{TR1} + \text{IR5} + \text{CR3}$$

Al resolver esta expresión matemática se puede observar que el **menor valor** que adquiere es igual a **23** y el **máximo valor** es de **226**.

Tabla 17: Valores de los índices de vulnerabilidad y rangos para la clasificación de la vulnerabilidad para el método DRASTIC (Martínez et al., 1998).

Valor del Índice	Clasificación de la Vulnerabilidad
< 100	Despreciable
101 - 119	Muy Baja
120 - 139	Baja
140 - 159	Moderada
160 - 179	Alta
180 - 199	Muy Alta
> 200	Extrema

### 5.2.2. Método GOD

El método GOD (Foster, 1987; Foster e Hirata, 1988) se basa en que la vulnerabilidad del acuífero es primera y lógicamente una función de:

- ❖ La inaccesibilidad de la zona saturada, en un sentido hidráulico, a la penetración de contaminantes.
- ❖ La capacidad de atenuación de los estratos encima de la zona saturada del acuífero como resultado de su retención física y reacción química con contaminantes.

Estos dos componentes de la vulnerabilidad del acuífero interactúan con los siguientes componentes correspondientes de la carga contaminante al subsuelo:

- ❖ El modo de disposición del contaminante en el subsuelo, y en particular, la magnitud de cualquier carga hidráulica asociada.
- ❖ La clase de contaminante en términos de su movilidad y persistencia.

Esta interacción determinará el tiempo de residencia en la zona no saturada y la demora de la llegada del contaminante al acuífero, y además, el grado de su atenuación, retención o eliminación antes de llegar al acuífero.

El método GOD es un método multiplicativo que reduce el número de parámetros respecto al DRASTIC, con el objeto de facilitar la aplicación del mismo y de extenderlo a áreas con menos disponibilidad de datos.

$$IdeV = G \times O \times D$$

La vulnerabilidad de un acuífero se estima multiplicando índices asignados a los siguientes parámetros:

*Tabla 18: Componentes del índice GOD, sus características y valoraciones, así como las secuencias lógicas de ocurrencia.*

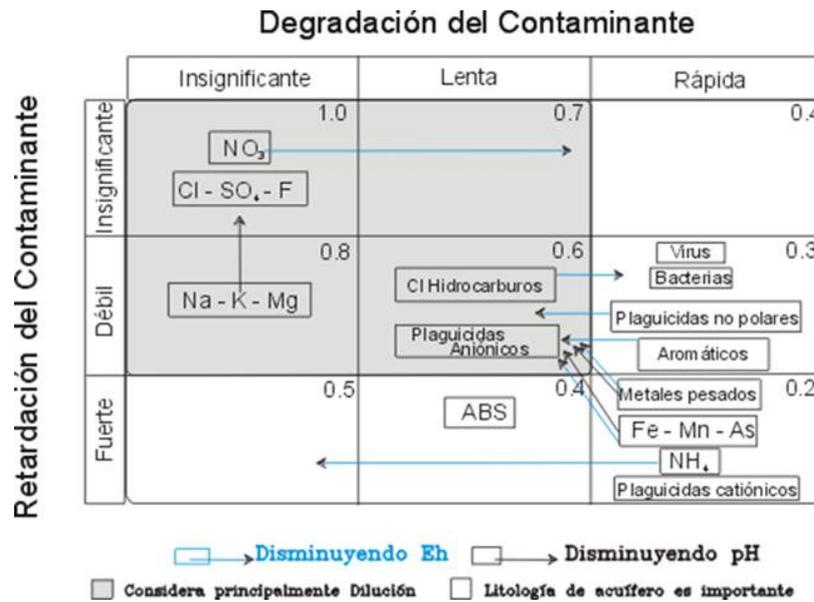
<b>G</b>	<b>G</b> roundwater occurrence. Régimen hidráulico del agua subterránea: evalúa el tipo de acuífero (libre, confinado, semiconfinado, etc.).
<b>O</b>	<b>O</b> verall aquifer class. Naturaleza del acuífero o sustrato litológico: litología y grado de consolidación del acuífero y/o zona no saturada.
<b>D</b>	<b>D</b> epth to groundwater table. Profundidad del agua subterránea: profundidad del nivel freático, asignando mayores índices a profundidades menores o más cercanas a la superficie.



- ❖ La clase de contaminante involucrado.
- ❖ La intensidad de la contaminación.
- ❖ El modo de disposición en el subsuelo.
- ❖ El tiempo de aplicación de la carga contaminante.

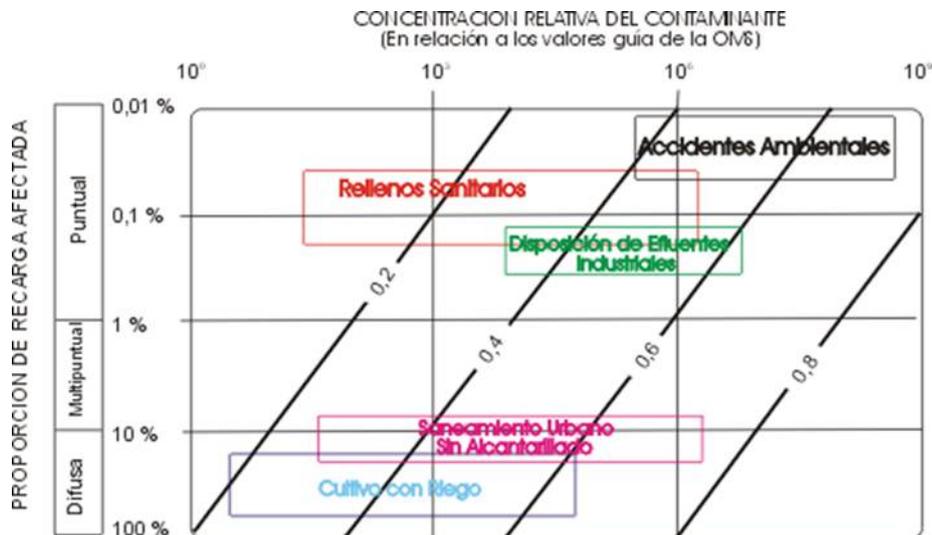
La Clase de Contaminante (**CdeC**) involucrado en una actividad contaminante o episodio de contaminación está definido por:

- ✓ Su tendencia a la degradación o transformación in-situ, como resultado de la actividad bacteriológica o reacción química.
- ✓ Su tendencia hacia el retardo con respecto al flujo de agua subterránea como resultado de procesos como intercambio catiónico, sorción, etc.



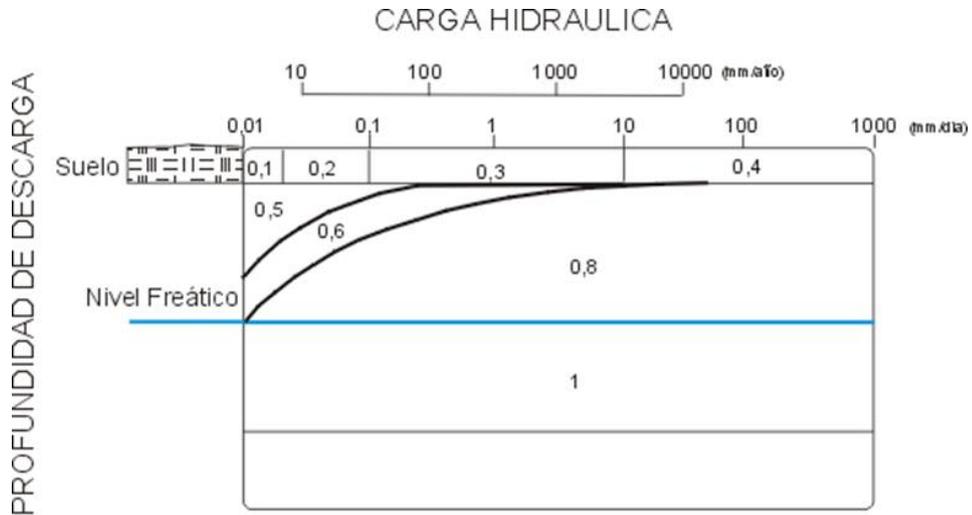
La Intensidad de Contaminación (**IdeC**) se puede definir por:

- ✓ La concentración relativa de cada contaminante involucrado con relación a los valores recomendados por la Organización Mundial para la Salud (OMS) para la calidad de agua potable.
- ✓ La proporción de la recarga local de agua subterránea afectada por la contaminación.



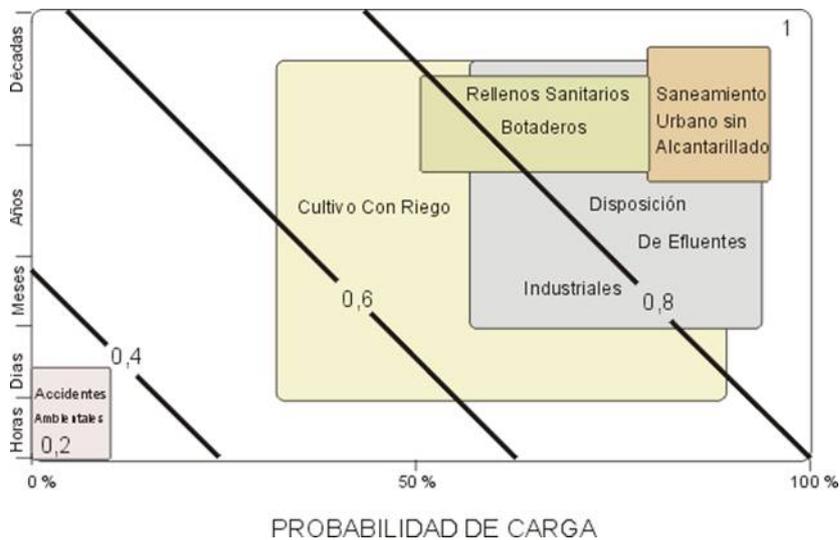
El Modo de Disposición (**MdeD**) del contaminante en el subsuelo está definido por:

- ✓ La carga hidráulica asociada con el contaminante, incluyendo la infiltración natural de las precipitaciones.
- ✓ La profundidad bajo superficie a la que el efluente es descargado o donde la lixiviación de residuos sólidos ocurre.



El Tiempo de Aplicación (**TdeA**) de la carga contaminante considerada se define por:

- ✓ La probabilidad de que el contaminante sea descargado al subsuelo, que en la mayoría de los casos será alto, con la excepción del caso de accidentes ambientales.
- ✓ El período durante el cual se aplica la carga, que mostrará también una amplia variación de horas a décadas.



Cada una de estas características interactúa con un diferente componente de vulnerabilidad de contaminación de un acuífero, y esta interacción determina el grado del *Riesgo de Contaminación de las Aguas Subterráneas*.

**Riesgo de Contaminación por el Método GOD**

El riesgo de contaminación se define como la interacción entre la Vulnerabilidad del Acuífero y la Carga Contaminante y como la probabilidad de que las aguas subterráneas se contaminen con concentraciones por encima de los valores recomendados por la Organización Mundial de la Salud. Esto significa que la interacción entre la *Carga Contaminante* y la *Vulnerabilidad* del acuífero determina el *Riesgo de que la Contaminación* penetre al acuífero.

Se puede tener una alta vulnerabilidad sin riesgo de contaminación, por la ausencia de una carga significativa de contaminantes, y viceversa. La carga contaminante puede ser controlada o modificada, pero no la vulnerabilidad del acuífero, excepto en algunas actividades antrópicas donde se elimina la cubierta de suelo o material de la zona no saturada y que puede aumentar la vulnerabilidad natural.

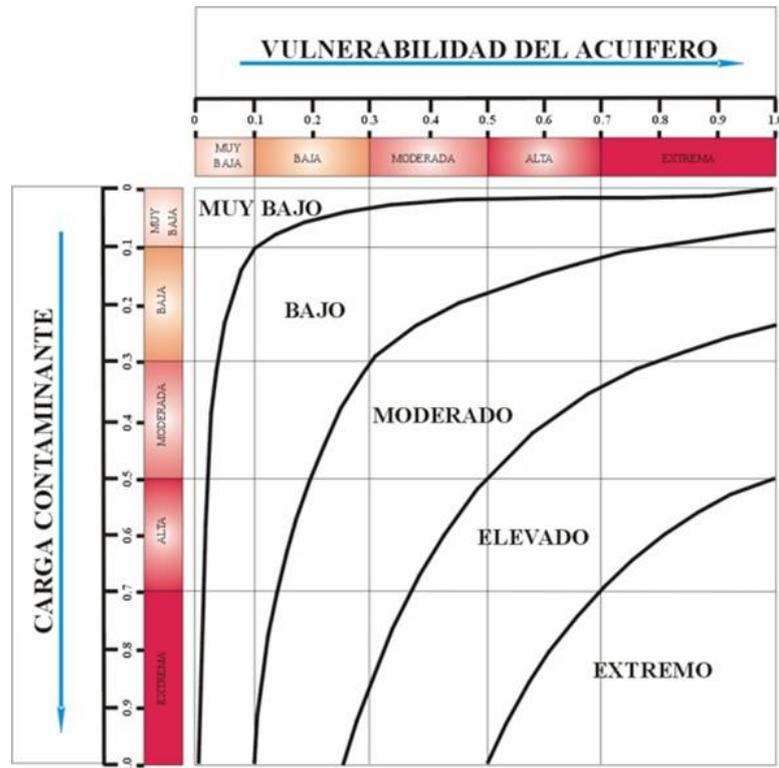


Figura 9: Riesgo de Contaminación.

### 5.3. CONCEPTO DE MAPA DE VULNERABILIDAD

Las propiedades del medio varían de un punto a otro, lo que hace variable el potencial de un acuífero para protegerse, y por esto algunas áreas son más vulnerables que otras. Como resultado de la evaluación de la vulnerabilidad, pueden obtenerse mapas mostrando zonas con mayor o menor sensibilidad a la contaminación, que generalmente se construyen para el acuífero superior. Estos niveles permiten valorar la vulnerabilidad en forma relativa entre las regiones que integran el área de estudio, pero no se puede hablar de ellos en forma absoluta.

La confección de un mapa de vulnerabilidad implica combinar varios mapas temáticos, correspondientes a los factores hidrogeológicos elegidos para la evaluación. Los cambios en el sistema acuífero hacen que el mapa de vulnerabilidad no sea estático, sino que deba ser revisado en función del tiempo.

Los mapas de vulnerabilidad tienen múltiples propósitos y son útiles sobre todo a nivel gubernamental. Su principal cometido es servir de guía en la planificación del uso de las tierras, siendo una herramienta fundamental para definir qué utilización pueden tener determinadas zonas; y en el desarrollo de políticas de protección para las aguas subterráneas.

#### 5.3.1. Riesgo de Contaminación de las aguas subterráneas

La aplicación de un contaminante en superficie y la accesibilidad del acuífero a la contaminación determinan la sensibilidad del mismo a la alteración de su calidad como fuente. Foster (1987), define el Riesgo como la interacción entre la carga contaminante que es, será, o pudiera ser aplicada al subsuelo como resultado de actividad humana, y la vulnerabilidad del acuífero a la contaminación. Posteriormente, en una publicación del CEPIS (Foster e Hirata, 1991) se lo define como la probabilidad de que las aguas subterráneas se contaminen con concentraciones por encima de los valores recomendados por la OMS para la calidad de agua de consumo humano. Sería ideal estudiar cada actividad contaminante en forma *detallada e individual*, y así evaluar el *riesgo debido a cada una de ellas*. Sin embargo, un procedimiento inicial para la determinación del riesgo parece lógico para luego priorizar investigaciones posteriores. Cabe aclarar que el riesgo evaluado en este trabajo no es el riesgo de contaminación de extracciones cercanas a los vertidos.

#### 5.3.2. Caracterización de la carga contaminante y tipos de contaminación

La probabilidad de que cada contaminante alcance las aguas subterráneas depende de varios factores. Entre ellos están: la tendencia del compuesto a ser degradado o retardado, la concentración y la cantidad en que se aplique en proporción a la recarga local, la carga hidráulica y la profundidad a la que se descarga y el tiempo de aplicación de la carga contaminante.

La contaminación puede darse por fuentes puntuales (que son más fáciles de identificar), o por fuentes difusas. Ejemplos de estos casos son el vertido al terreno del efluente de una industria y la aplicación de pesticidas en actividades agrícolas, respectivamente. Otra distinción importante puede hacerse entre fuentes que vierten el contaminante directamente bajo el suelo y las que lo hacen por encima del mismo.

Esta última clasificación es muy importante, ya que en el suelo se da la mayor atenuación de los contaminantes por tener más arcilla, más materia orgánica y mayor población bacteriana. Cuando la carga es aplicada bajo esta zona, se está perdiendo su capacidad de reducir la vulnerabilidad del acuífero y por lo tanto, en esos casos, no debe ser tenida en cuenta.

- **Contaminación de origen urbano**

Las aguas residuales domésticas y los desechos sólidos contienen altas concentraciones de organismos fecales, de materia orgánica y de compuestos nitrogenados. Si se vierten directamente al suelo y se infiltra, el agua subterránea puede contaminarse por patógenos bacteriales y virales, incluyendo aquellos que causan diarrea, tifoidea y hepatitis; y por nitratos, amonio, detergentes, desinfectantes y otras sustancias químicas. Estos pueden tornar el agua no potable debido a su concentración que pone en peligro la salud humana.

La mayor amenaza sobre la calidad del agua subterránea se presenta cuando se urbaniza un área sin alcantarillado, sobre acuíferos vulnerables con niveles freáticos poco profundos, con infiltración de aguas residuales y de ríos contaminados por descarga de desagües y con lixiviación de desechos domésticos en vertederos, y en menor grado, de rellenos sanitarios.

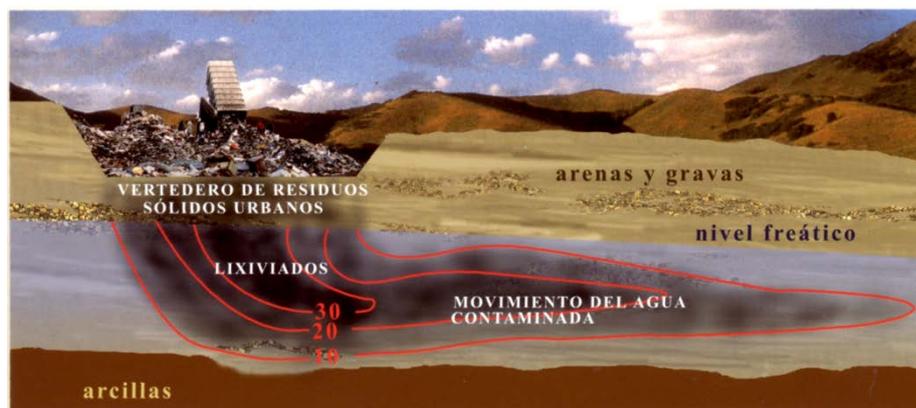
Bajo algunas condiciones hidrogeológicas, ciertas unidades de saneamiento in-situ presentan el riesgo de una migración directa de bacterias y virus patógenos hacia acuíferos. La contaminación de las aguas subterráneas, debido a un saneamiento sin alcantarillado, ha constituido una de las causas comprobadas de transmisión de agentes patógenos en numerosos brotes de epidemia. Con frecuencia, este es el resultado de la falta de espacio en los asentamientos que son densamente poblados, pero también ocurre en urbanizaciones más prósperas que emplean un saneamiento in-situ y que construyen pozos excavados para aumentar las fuentes de suministro de agua. Los pozos negros son construidos en su mayoría de manera que haya infiltración hacia el subsuelo y así hacer menos frecuente operaciones de vaciado en los mismos. De este modo se transforman en fuentes de contaminación por nitrógeno y patógenos fecales principalmente, y en el caso de talleres mecánicos y estaciones de combustibles, por compuestos orgánicos sintéticos e hidrocarburos. Hay que destacar que en estos casos no se cuenta con el efecto atenuador del suelo, ya que las descargas se hacen directamente en la zona vadosa.

Tabla 19: Categorías de peligro potencial para el agua subterránea debido a saneamiento "in situ".

Densidad de Población	Cobertura de Alcantarillado		
	Alta (> 75%)	Parcial (25 – 75 %)	Mínima (< 25%)
Baja (< 100/ha)	Baja	Moderada	Moderada
Media (100/ha – 200/ha)	Moderada	Moderada	Alta
Alta (>200/ha)	Moderada	Alta	Alta



Ilustración 20: Contaminación de acuífero debido a falta de sistemas de saneamiento.



20 — Isocontenidos de amonio ( $\text{NH}_4^+$ ) en mg/l

Penacho contaminante en un vertedero con fugas de lixiviado

Ilustración 21: Contaminación de acuífero debido a vertedero de residuos sólidos urbanos.

- **Contaminación de origen industrial**

Numerosas industrias producen desechos líquidos, conocidos como efluentes, con concentraciones elevadas de compuestos orgánicos peligrosos y metales pesados. Aún a muy bajas concentraciones, algunas de estas sustancias químicas, son tóxicas, carcinogénicas o mutagénicas. En muchos casos los efluentes que contienen tales sustancias químicas, se descargan en el ambiente sin tratamiento para reducir sus efectos nocivos. Estos efluentes penetran en el agua subterránea por infiltración de las lagunas, de fosas y de ríos, o de lixiviación. En otros casos, las sustancias químicas, penetran en el suelo antes o durante su uso industrial, como resultado de derrames o fugas de los tanques y tuberías, las cuales deberían ser teóricamente seguras. La minería es un caso especial de industria que puede tener un impacto significativo sobre la calidad del agua subterránea.

Tabla 20: Principales sustancias contaminantes relacionadas con la actividad industrial (Meinck et al., 1970 y otros, modificado, en Fcihs, 2009).

Sector Industrial	Principales sustancias contaminantes
Construcción	Sólidos en suspensión, metales, pH.
Minería	Sólidos en suspensión, metales pesados, materia orgánica, pH, cianuros, sulfuros, etc.
Energía	Calor, hidrocarburos y productos químicos.
Textil y piel	Cromo, taninos, tensoactivos, sulfuros, colorantes, grasas, disolventes orgánicos, ácido acético y fórmico, sólidos en suspensión.
Vehículos	Aceites lubricantes, pinturas, aguas residuales.
Naval	Petróleo, productos químicos, disolventes y pigmentos.
Siderurgia	Cascarillas, aceites, metales disueltos, emulsiones, bases y ácidos.
Química inorgánica	Mercurio, fósforo, fluoruros, cianuros, amoniaco, nitritos, ácido sulfhídrico, hierro, manganeso, molibdeno, plomo, plata, selenio, cinc y los compuestos de todos ellos.
Química orgánica	Organohalogenados, organosilíceos, compuestos cancerígenos y otros que afectan al balance de oxígeno.
Fertilizantes	Nitratos, amonio, nitritos, metales y fosfatos.
Pasta y papel	Sólidos en suspensión y otros que afectan al balance de oxígeno.
Química de plaguicidas	Organohalogenados, organofosforados, compuestos cancerígenos de síntesis, biocidas.
Fibras químicas	Aceites minerales y otros que afectan el balance de oxígeno.
Pinturas, barnices y tintas	Compuestos organoestámicos, compuestos de cinc, cromo, selenio, molibdeno, titanio, estaño, bario, cobalto y otros.
Detergentes	Jabones, surfactantes, detergentes.
Alimenticia	Vinazas, alperiches, grasas, conservantes.

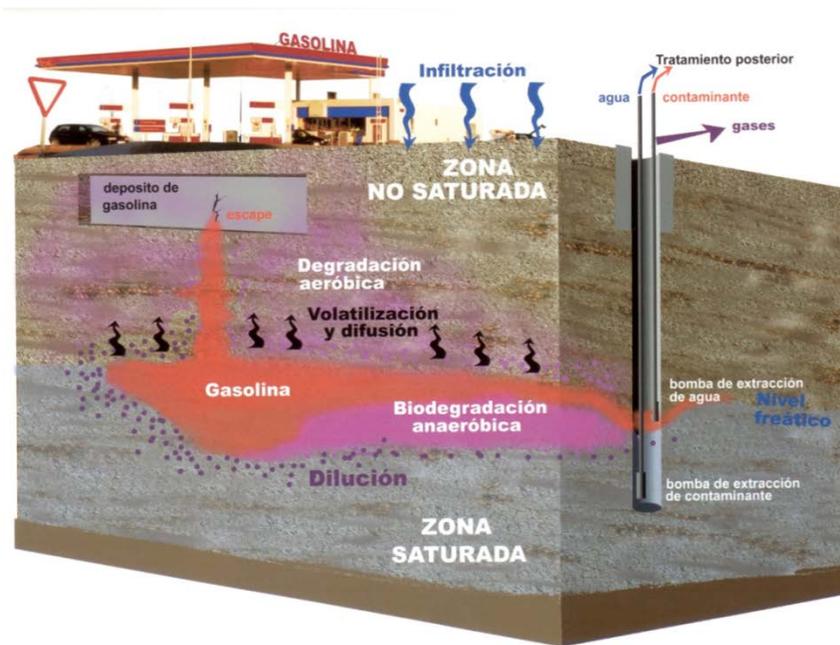


Ilustración 22: Contaminación de acuífero debido a actividad industrial.

Tabla 21: Principales actividades que potencialmente generan una carga contaminante al subsuelo.

Actividad	Categoría de Distribución	Principal tipo de Contaminante	Sobrecarga Hidráulica Relativa	Descarga Bajo Nivel del Suelo
<b>• URBANIZACION</b>				
Saneamiento sin Alcantarillado	U/R, P-D	N - F - O	+	*
Fugas de Alcantarillado (a)	U, P - L	O - F - N	+	*
Lagunas de Oxidación sin Revestimiento (a)	U/R, P	O - F - N	++	*
Descarga de aguas servidas sobre terrenos (a)	U/R, P - D	N - S - O - F	+	
Descarga de aguas servidas a Ríos (a)	U/R, P - D	N - O - F	++	*
Lixiviación de Rellenos Sanitarios (a)	U/R, P	O - S - M		*
Tanques de Combustible	U/R, P - D	O		*
Drenaje de Carreteras	U/R, P - D	S - O	+	*
<b>• DESARROLLO INDUSTRIAL</b>				
Fugas de tanques y tuberías (b)	U, P - D	O - M		*
Derramamientos de productos químicos	U, P - D	O - M	+	
Lagunas de Agua de Procesamiento y efluentes sin revestimiento	U, P	O - M - S	++	*
Descarga de Efluentes sobre terrenos	U, P - D	O - M - S	+	
Descarga de Efluentes a Ríos	U, P - L	O - M - S	++	*
Lixiviado de Rellenos de Residuos Sólidos	U/R, P	O - M - S		*
Drenaje de Patios	U/R, P	O - M	++	*
Deposición Aérea	U/R, D	S - O		
<b>• PRACTICAS AGRICOLAS</b>				
a. Cultivos				
. Con Agroquímicos	R, D	N - O		
. Con Irrigación	R, D	N - O - S	+	
. Con Estiércol, lodo, desperdicios	R, D	N - O - S		
. Con Irrigación de aguas residuales	R, D	N - O - S - F	+	
b. Cría de Ganado/Procesamiento de				

CONTAMINACIÓN Y CALIDAD DEL AGUA. VULNERABILIDAD DE ACUÍFEROS

Cosechas				
. Lagunas de Efluentes sin Revestimiento	R, P	F - O - N	++	*
. Descarga de Efluentes sobre Terreno	R, P - D	N - S - O - F		
. Descarga de Efluentes a Ríos	R, P - L	O - N - F	++	*
<b>• EXTRACCIÓN MINERAL</b>				
Cambios de Régimen Hidráulico	R/U, P - D	S - M		*
Descarga de Aguas de Drenaje	R/U, P - D	M - S	++	*
Lagunas de Agua de Procesamiento o Lodo sin Revestimiento	R/U, P	M - S	+	*
Lixiviado de Rellenos de Residuos Sólidos	R/U, P	S - M		*

(a): Puede incluir componentes industriales

(b): También puede ocurrir en áreas no industriales

(c): La intensificación de cultivos presenta mayores riesgos de contaminación

U/R: Urbano/Rural

P/L/D: Puntual, Lineal, Difuso

N: Nutrientes

F: Patógenos Fecales

O: Compuestos Micro orgánicos Sintéticos y/o Carga Orgánica

S: Salinidad

M: Metales Pesados

Tabla 22: Características químicas e índices para tipos comunes de actividad industrial (Foster e Hirata, 1991).

Actividad Industrial	Índice de Mazurek	Flujo (1) (m <sup>3</sup> /T)	Carga de		Contenido de						Índice Contaminación Potencial de Aguas
			pH	Salinidad	Nutrientes	Materia Orgánica	Hidrocarburos	Patógenos	Metales Pesados	Orgánicos Sintéticos	
1.Hierro o acero	6	30	6	*	*	**	**	*	**	**	2
2.Procesamiento de metales	8	-	7-10	*	*	*	*	*	***	***	3
3.Ingeniería mecánica	5-8	-	-	*	*	*	***	*	***	**	3
4.Metales no ferrosos	7	-	-	*	*	*	*	*	***	*	2
5.Minería no metálica	3-4	30	-	***	*	*	*	*	*	*	1
6.Refinerías petróleo/gas	7-8	-	-	*	**	***	***	*	*	**	3
7.Productos plásticos	6-8	104	-	***	*	**	**	*	*	***	3
8.Productos de caucho	4-6	1	-	**	*	**	*	*	*	**	2
9.Químicos orgánicos	3-9	92	7	**	*	**	***	**	**	***	3
10.Químicos inorgánicos	6-9	115	-	**	*	*	*	*	***	*	2
11.Farmacéuticos	6-9	4000	-	***	**	***	*	**	*	***	3
12.Carpinterías	2-4	1	-	**	*	**	*	*	*	**	1
13.Pulpa y papel	6	108	8	*	**	**	*	*	*	**	2
14.Jabón y detergente	4-6	5	-	**	*	**	**	**	*	*	2
15.Fábrica textiles	6	400	-	**	**	***	*	*	*	**	2
16.Curtiembres	3-8	37	-	***	**	**	*	*	**	***	3
17.Alimentos/bebidas	2-4	-	-	**	***	***	*	***	*	*	1
18.Plaguicidas	5-9	30	-	**	*	*	*	*	*	***	3
19.Fertilizantes	7-8	6	-	***	***	*	**	*	*	**	2
20.Azúcar y alcohol	2-4	62	-	***	***	***	**	*	*	*	2
21.Termoeléctricas	-	-	-	*	*	*	***	*	***	**	2
22.Eléctricos o electrónicos	5-8	-	-	*	*	*	***	*	**	***	3

**Nota:** (1). Valor máximo del promedio. (-): Datos no disponibles. (\*) Baja probabilidad de concentraciones elevadas en líquidos de proceso y/o efluente final. (\*\*) Moderada probabilidad. (\*\*\*) Alta probabilidad.

Tabla 23: Categorías de peligro potencial para el agua subterránea debido a actividades industriales.

Uso del Agua (m <sup>3</sup> /h)	Índice de Peligro Potencial para las Aguas Subterráneas		
	1	2	3
100	Bajo	Moderado	alto
100 – 1000	Bajo	Moderado	Alto
>1000	Moderado	Alto	Alto

- **Contaminación de origen agrícola**

Las prácticas agrícolas siempre ejercen una gran influencia sobre la calidad de agua subterránea y pueden causar problemas serios, bajo ciertas circunstancias. Su influencia es grande debido a que normalmente se realiza sobre áreas de recarga de acuíferos. De especial preocupación es el cultivo de un solo tipo de cosecha (monocultivo) por muchos años sobre áreas extensas con grandes aplicaciones de fertilizantes químicos y pesticidas. A esto puede agregarse la influencia de irrigación excesiva que resulta en la lixiviación de sales, nutrientes y pesticidas. La descarga de efluentes sin control proveniente de la cría intensiva de ganado también puede producir, localmente, una contaminación orgánica significativa del agua subterránea.

La contaminación por nitratos es un claro ejemplo de contaminación difusa de origen agrícola ya que con el incremento en la demanda de producción de granos, se introducen enormes cantidades de fertilizantes. Sin embargo, como ya se señaló en otra oportunidad, la presencia de nitratos antrópico en el agua subterránea también está vinculada a los efluentes líquidos urbanos no tratados y a los lixiviados de las plantas de tratamiento de residuos sólidos urbanos, entre otras fuentes. El especial interés por los estudios y control de presencia de nitratos en el agua está vinculado a que la ingesta de agua con concentraciones superiores a las admitidas en nitratos pueden provocar serias enfermedades como la metahemoglobinemia o enfermedad de los niños azules y otros efectos adversos sobre la gestación y la salud humana.

Algunas prácticas del uso del suelo pueden causar contaminación de tipo difusa de las aguas subterráneas por nutrientes introducidos mediante la aplicación de fertilizantes, y por pesticidas. En el caso de los fertilizantes se debe notar (Foster e Hirata, 1991) que el nitrato lixiviado se deriva de la acumulación de nitrógeno total en el suelo y solamente una menor parte se deriva directamente del fertilizante aplicado en un año dado. El fosfato y el potasio no son, en general, lixiviados de tierras cultivadas en cantidades significativas debido a su fuerte retención en el suelo.

Tabla 24: Comportamiento de distintos tipos de fertilizantes en el suelo.

Tipo	Adsorción en el Suelo	Movilidad en Suelo		Transformación		Posibles Contaminantes	
		Baja	Alta	Química	Bioquímica	Catión	Anión
<b>De Nitrógeno</b>							
Nitrato de calcio	Baja, solo Ca	Baja	Alta		*	NH <sub>4</sub>	NO <sub>3</sub> , NO <sub>2</sub>
Salitre de amonio	Parcial, solo NH <sub>4</sub>	Baja	Alta		*	NH <sub>4</sub>	NO <sub>3</sub> , NO <sub>2</sub>
Salitre de sodio	Baja, solo Na	Baja	Alta		*	NH <sub>4</sub>	NO <sub>3</sub> , NO <sub>2</sub>
Salitre de potasio	Baja, solo K	Baja	Alta		*	NH <sub>4</sub>	NO <sub>3</sub> , NO <sub>2</sub>
Salitre de amonio y cal	Aumentado NH <sub>4</sub> y Ca	Baja	Alta		*	NH <sub>4</sub>	NO <sub>3</sub> , NO <sub>2</sub>
Sulfato de amonio	Parcial, solo NH <sub>4</sub>	Baja	Media		*	NH <sub>4</sub>	NO <sub>3</sub> , NO <sub>2</sub>
Amoniaco líquido	Alta NH <sub>4</sub>	Baja	Alta		*	NH <sub>4</sub>	NO <sub>3</sub> , NO <sub>2</sub>
Agua amoniacal	Parcial NH <sub>4</sub>	Baja	Alta	*	*	NH <sub>4</sub>	NO <sub>3</sub> , NO <sub>2</sub>
Urea	Parcial NH <sub>4</sub>	Baja	Alta	*	*	NH <sub>4</sub>	NO <sub>3</sub> , NO <sub>2</sub>
Cianamida cálcica		Baja	Alta	*	*	NH <sub>4</sub>	NO <sub>3</sub> , NO <sub>2</sub>
Urea-50/amoniaco-50	Parcial NH <sub>4</sub>	Baja	Alta	*	*	NH <sub>4</sub>	NO <sub>3</sub> , NO <sub>2</sub>

De Fósforo							
Superfosfato	Muy Alta	Extremadamente Bajo					HPO <sub>4</sub>
Superfosfato granulado			*				HPO <sub>4</sub>
Tri-superfosfato			*				HPO <sub>4</sub>
Fosfatos pulverizados			*				HPO <sub>4</sub>
Polvo de Thomas			*				HPO <sub>4</sub>
Superfosfato simple + fosfato crudo			*				HPO <sub>4</sub>
De Potasio							
Cloruro de potasio	Baja, solo K	Baja	Alta			K	Cl
Cloruro de potasio + sulfato de magnesio	Baja, solo K	Baja	Alta			K	Cl
Kainit	Baja, solo K	Baja	Alta			K	Cl
Sulfato de potasio	Baja, solo K	Baja	Media			K	Cl
NPK combinado	Aumentada	Baja	Alta	*	*	K	NO <sub>2</sub> , NO <sub>3</sub> , PO <sub>4</sub>

En cuanto a los pesticidas, se cree que la proporción lixiviada (Foster e Hirata, 1991) de una aplicación puede estar en el rango de 0,5 a 5,0 % en función del tipo de compuesto, el sistema suelo – cosecha y el régimen climático y de irrigación.

Tabla 25: Características de los principales grupos de pesticidas agrícolas (Foster e Hirata, 1991).

Grupo Químico	Adsorción		Afinidad con		Solubilidad (H <sub>2</sub> O a 20-25 °C)	Persistencia en el Suelo (vida media/días)	Movilidad
	Materia Orgánica	Arcillas	Materia Orgánica	Arcillas			
<b>Iónicos</b>							
Catiónicos	+ (d)	+ (de)	Fuerte	Muy Fuerte	Alta	4000-5000	1
Ácidos	+	-	Débil	Muy Débil	Alta a mayor pH	10 – 140	5
Básicos	+ (cdef)	+ (de)	Débil	Media	Alta a bajo pH	25 – 400	3
<b>No Iónicos</b>							
Hidrocarburos clorinados	+ (bd)	+	Muy Fuerte	Débil	Baja	460 – 1650	1
Organofosfatos	+ (bd)	+ (c)	Muy Fuerte	Media	Moderada	1 – 60	1
Anilinas perdurables	+ (bd)	+	Fuerte	Débil	Baja	45 – 180	1
Feniluros	+ (bd)	+ (cf)	Media	Débil	Baja a media	120 – 400	3
Carbamatos	+ (bd)	-(c)	Media	Débil	Moderada	10 – 70	3
Amidas	+ (bd)	-	Débil	Muy Débil	Moderada	30 – 70	3
Tiocarbonatos	+ (bd)	+	Fuerte	Media	Moderada	30 – 220	2
Fenilamidas	+ (bd)	-	Fuerte	Débil	Moderada	300 – 400	2
Benzonitrilos	+ (bd)	+	Fuerte	Media	Moderada	60 – 180	2

**Nota:** b: afinidad hidrofóbica; c: afinidad hidrógena; d: transferencia de carga; e: intercambio de iones; f: intercambio de ligantes. 1: Inmóvil; 2: Poco Móvil; 3: Móvil; 4: Altamente Móvil; 5: Extremadamente Móvil.

#### 5.4. LA CONTAMINACIÓN POR HIDROCARBUROS

La forma que toma el penacho contaminante, ya sea por vertidos o fugas, de petróleo y sus derivados a medida que infiltra depende de la permeabilidad. A mayor permeabilidad es menor su dispersividad, dependiendo a su vez si la permeabilidad es variable o no. La máxima profundidad de penetración se la puede evaluar utilizando la siguiente fórmula:

$$D = \frac{1000 \cdot V}{A \cdot R \cdot K'}$$

D = Profundidad (m)

V = volumen (m<sup>3</sup>)

A = área (m<sup>2</sup>)

K' = factor de corrección según viscosidad

K' = 0.5 gasolina

K' = 1.0 kerosene – gasoil

K' = 2.0 fuel – Oil (ligero)

R = capacidad de retención del terreno (l/m<sup>3</sup>)

Tabla 26: Valores de capacidad de retención del terreno en función del tipo de suelo.

R (l/m <sup>3</sup> )	Suelo
5	grava gruesa
8	grava, arena gruesa
15	arena gruesa media
25	arena media fina
40	arena fina

Con esta ecuación se puede determinar si el penacho contaminante llega o no al nivel freático. Si es así, la máxima extensión del petróleo sobre la superficie freática se la puede evaluar según la siguiente fórmula:

$$D = \frac{1000 (V - A) \cdot R \cdot d \cdot K'}{F}$$

d = profundidad del nivel freático (m)

F = contenido de petróleo en la franja capilar (l/m<sup>2</sup>)

Tabla 27: Valores de contenido de petróleo en la franja capilar en función del tipo de suelo.

R (l/m <sup>3</sup> )	Suelo
5	grava gruesa
8	grava, arena gruesa
12	arena gruesa media
20	arena media fina
40	arena fina

Para calcular el tiempo de recorrido en la zona no saturada se utiliza la siguiente fórmula:

$$T = \frac{B \cdot mr}{R}$$

B = espesor de la zona no saturada

R = recarga anual

mr = porosidad

Para calcular el tiempo de recorrido en la zona saturada se utiliza la siguiente fórmula:

$$T = \frac{d \cdot m}{K \cdot i}$$

d = distancia vertido – perforación

m = porosidad

i = gradiente hidráulico

K = constante en función de la litología (Arenas limpias de sedimentación fluvial K = 80 m/día; Arenas de médano de sedimentación eólica K = 20 m/día).

---

**MÓDULO 6.** La protección de los Recursos Hídricos Subterráneos. Zonas de Protección. Aplicaciones de la investigación hidrogeológica. Casos de estudio. Análisis y discusión sobre la problemática del Arsénico, Flúor y Nitratos, casos de estudios.

---

### 6.1. LA PROTECCIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÁNEOS

Si bien la importancia de los recursos hídricos subterráneos adquiere cada vez mayor relevancia tanto para el abastecimiento de agua público como privado, es cierto que aún muchos países no cuentan con un programa de protección de acuíferos. Si se analiza esta situación no solamente con criterio científico y técnico, sino con el sentido común, no se logra entender cómo y porqué un recurso que es cada vez más solicitado y presionado ambientalmente, no sea convenientemente protegido y preservado de las acciones potencialmente contaminantes. En efecto, ello significa que una administración segura de las aguas subterráneas debería señalar con claridad meridiana que la mejor práctica que podría existir es proteger el recurso hídrico antes de que se produzca su contaminación y no, estar tratando de establecer políticas y lineamientos técnicos de cómo actuar luego de una contaminación consumada.

Este axioma tiene su sustento en el hecho cierto de que un acuífero contaminado es posible que nunca más pueda ser utilizado como fuente de agua segura ya que es casi imposible (sino imposible) de que su calidad natural pueda ser restablecida. Claro está que esta situación se debe a que en un acuífero que es contaminado, no solamente se contamina la trama líquida (el agua), sino también se contamina la trama sólida (la roca o sedimento), por lo que aun que se logre cambiar toda el agua contaminada, es evidente que la roca o sedimento seguirá afectada por la contaminación.

En Norteamérica y Europa principalmente, los programas de protección de aguas subterráneas ante la contaminación antrópica se basan en el establecimiento del *Perímetro de Protección de Pozos (PPP)* o en la *Cartografía de la Vulnerabilidad de los Acuíferos (CVA)*, uno y otro presentan ventajas y desventajas.

Como señalan Hirata y Reboucas (1999), tanto una técnica como la otra presentan restricciones para la real protección del recurso hídrico subterráneo ya que, por ejemplo, las mayores desventajas y limitaciones que presentan las técnica PPP son las incertidumbres y dificultades objetivas para la obtención de datos confiables de la dinámica de los acuíferos; en cambio en la técnica del CVA, aunque puede ser más flexible que la anterior, el mayor problema es que no presenta la exactitud necesaria para establecer la protección efectiva de los puntos de captación.

### 6.2. ZONAS DE PROTECCIÓN DE POZOS (PPP)

Restringir el uso del territorio circundante a una fuente de captación de agua subterránea es una de las formas más antiguas y básicas de protegerla frente a una contaminación.

A pesar de la importancia de los recursos de aguas subterráneas para abastecimiento de agua potable, existe poca o ninguna preocupación acerca de su protección. En consecuencia, han comenzado a aparecer problemas serios en varias áreas. En algunas zonas la necesidad de fuentes adicionales de agua es tan agobiante que quizás se puede entender que la protección de acuíferos se pase por alto o se vea como una consideración menor. El primer paso hacia la protección del agua subterránea es tomar conciencia de la escala y seriedad del problema. En áreas urbanas vulnerables, normalmente se dará la máxima prioridad a las medidas de control o acciones correctivas que incluyen:

- ❖ Evitar actividades de descarga de sustancias químicas tóxicas peligrosas y desechos de almacenes en general.

- ❖ Ejercer control más estricto sobre la operación de las industrias existentes que involucran compuestos tóxicos, especialmente donde descarguen grandes volúmenes de efluentes líquidos al suelo o a ríos influentes.
- ❖ Restringir la instalación y controlar la operación de rellenos sanitarios para desechos sólidos.
- ❖ Instalar un sistema eficiente de alcantarillado si la disposición in-situ al suelo constituye un riesgo inaceptable para la calidad del agua subterránea y de la salud humana.

Tales acciones necesitan una base institucional y adicionalmente pedir apoyo legal. Las autoridades nacionales deben considerar los siguientes pasos:

1. Establecer políticas nacionales y/o regionales de control de contaminación de aguas subterráneas, para aliviar los problemas existentes y para prevenir la contaminación en áreas que aún no están afectadas.
2. Revisar la legislación existente a fin de decidir si es adecuada para este propósito y revisarla si fuera necesario.
3. Reforzar las provisiones legales.

El área de protección más amplia que se puede definir para un pozo o manantial es la de captación y recarga. Esta es el área dentro del cual toda recarga del acuífero, ya sea proveniente de precipitación o infiltración de agua superficial, será captada. Es por ello que, para eliminar completamente el riesgo de contaminación, toda actividad potencialmente contaminadora tendrá que ser prohibida o controlada en el ámbito requerido dentro de toda la zona de captación. Esto será frecuentemente insostenible debido a presiones socioeconómicas, entonces se requerirá efectuar alguna subdivisión de la zona de captación para aplicar restricciones más severas en aquellas áreas cercanas al pozo o manantial.

Las zonas de protección se delimitan teniendo en cuenta las condiciones hidrogeológicas del ambiente y en especial, la extensión de la zona de recarga de las captaciones a proteger.

❖ Zona de Protección I

Debe rodear a la captación por los lados por lo menos con un radio de 10 metros. Normalmente la construcción de un alambrado perimetral, con acceso restringido es suficiente.

❖ Zona de Protección II:

Depende principalmente de la "línea de los 50 días". Aguas arriba de la captación debe haber, por lo menos, 100 metros. Como regla, esta zona de protección no necesita ser tan grande hacia todos los lados y aguas abajo del pozo como la zona de anterior. En el caso de que los datos hidrogeológicos sean insuficientes o exista una fuerte fluctuación del caudal de descarga, esta zona debe ser mayor (como medida de seguridad).

❖ Zona de Protección III:

Generalmente debe extenderse hasta los límites de la zona de recarga de la captación.

Para definir las restricciones del uso de la tierra en las zonas de protección, se deben tener en cuenta las actividades agrícolas, ganaderas, forestales, industriales, mineras, de transporte (rutas, ferrocarriles, poliductos, etc.), urbanas, prospección y penetración del subsuelo, explotación del recurso por otros usuarios, etc. Pueden citarse algunas restricciones aplicadas al uso de la tierra para cada una de las zonas de protección:



Ilustración 23: Concepto y esquema de perímetros de protección.

Para la Zona de Protección I o inmediata: propiedad de la empresa que presta el servicio. Esta zona debe garantizar la protección directa sobre los alrededores inmediatos de las captaciones o manantiales contra la contaminación. Esta zona estará cerrada y controlada con prohibición de realizar cualquier actividad. Dentro de los límites de la zona de protección I son válidas todas las restricciones para las zonas III, II y tampoco están permitidas la entrada no autorizada, cualquier tipo de actividad agrícola, uso de fertilizantes y uso de abono orgánico.

Para la Zona de Protección II o próxima: se autoriza solo actividades no contaminantes, cierto tipos de almacenamientos y en general una circulación restringida al tránsito de personas y vehículos. Esta zona de protección debe garantizar la protección contra la polución causada por el establecimiento humano y sus actividades, particularmente aquellas que ponen en riesgo la calidad del agua por su cercanía a las captaciones o a manantiales. El límite de esta zona se extiende a un tiempo de transferencia de 50 días alrededor del área de captación. Dentro de los límites de la zona de protección II son válidas todas las restricciones para la zona III y tampoco está permitido la presencia de edificios para uso comercial o agrícola, establos, depósitos para materiales para la construcción, rutas, vías de ferrocarril y otras instalaciones para el tráfico, estacionamiento de vehículos, expendio de combustibles y otros servicios, talleres mecánicos, lugares para acampar, predios deportivos, cementerios, extracción de áridos, actividad minera si causa destrucción de capas protectoras y subsidencia de suelos, explosiones, apertura y uso inapropiado de fertilizantes minerales, transporte de sustancias radiactivas y residuales, etc.

Para la Zona de Protección III o lejana: se establecen restricciones de uso del terreno en relación a la instalación de establecimientos industriales o urbanizaciones o a determinadas actividades agrícolas, y a la existencia de vías de comunicación. Esta zona debe garantizar la protección contra peligros serios especialmente los causados por sustancias químicas no degradables o altamente degradables y contaminantes radiactivos. Tampoco está permitido: filtrado de aguas residuales, incluyendo aguas de alcantarillado de rutas, caminos y lugares pavimentados; filtración de sustancias radiactivas, refinerías, plantas metalíferas, plantas químicas, etc. si no tratan y remueven estas sustancias cuidadosamente; plantas nucleares, almacenamiento y disposición de sustancias radiactivas o peligrosas, cañerías de conducción muy largas para transportar sustancias peligrosas para la calidad del agua, ubicación de vertederos, depósitos de basura, cementerios de autos y chatarras, plantas de tratamiento de efluentes, etc.

La contaminación de las aguas subterráneas ocurre cuando los contaminantes se infiltran hasta el sistema acuífero. Frecuentemente esto ocurre como consecuencia de la descarga descontrolada al suelo de efluentes. Los perfiles del suelo tienen capacidad de atenuar muchos, pero no todos, los contaminantes del agua. Los procesos involucrados en ésta atenuación continúan, pero en menor grado a mayor profundidad

en la zona no saturada y en la zona saturada del acuífero. En ésta última, la dispersión hidrodinámica que acompaña al flujo de las aguas subterráneas ocasionará también la dilución de contaminantes persistentes y móviles.

Sin embargo, no todos los perfiles de suelo y los acuíferos subyacentes son igualmente efectivos en la reducción de los contaminantes. Además el grado de atenuación variará considerablemente con el tipo de contaminante y el proceso de contaminación en cualquier situación dada. La actividad humana sobre el suelo modifica también los mecanismos de infiltración e introduce otros nuevos, cambiando la tasa, la frecuencia y la calidad de la recarga de los acuíferos, especialmente en climas más áridos. Comprender éstos mecanismos y diagnosticar tales cambios son críticos en la evaluación del riesgo de contaminación de las aguas subterráneas y en la implementación de medidas para el control de la contaminación.

La migración del agua y el transporte de contaminantes desde el suelo hasta las aguas subterráneas tiende a ser un proceso lento en la mayoría de los acuíferos. Esto significa que puede tomar muchos años, incluso décadas, antes que el impacto de un episodio de contaminación por un contaminante persistente sea identificado en los suministros de aguas obtenidos desde el acuífero. Durante éste período puede haber ocurrido un daño irreversible del acuífero.

Las propiedades de los acuíferos (especialmente la porosidad efectiva y el espesor efectivo, y a veces la transmisividad), ejercen un control dominante sobre la dimensión de las áreas de protección definida por el tiempo de flujo horizontal. La sensibilidad a la variación de estos parámetros será inmediatamente evidente, por esto, será esencial emplear valores reales. La estimación de valores para la porosidad y el espesor puede presentar problemas significativos en el caso de acuíferos fisurados (porosidad secundaria) y en acuíferos multicapa, respectivamente. Los peligros de sobre-estimar éstos parámetros también serán aparentes. Deberá ser considerado los casos más desfavorables.

Otra complicación práctica con las áreas especiales de protección es que ellas interactúan, cambian de posición y tienen formas complejas si varios pozos existen próximos unos a otros. Por la tanto, éstas áreas son las apropiadas para acuíferos con regímenes de explotación estable. En el caso de acuíferos sometidos a explotación intensiva, sería más práctico unir áreas individuales en un área más grande y general de protección. Sin embargo, si una proporción significativa de explotación, es para uso no potable (como por ejemplo riego), se presenta una complicación adicional.

### **6.2.1. Realización de PPP**

En la actualidad el PPP es la técnica de protección más empleada en el mundo ya que según la opinión de muchos especialistas es la forma más segura de lograr una protección casi absoluta contra la contaminación de una captación (pozo o manantial), puesto que se parte de la premisa de impedir todo tipo de actividad potencialmente contaminante sobre todo el área de recarga de un acuífero. Sin embargo, como se comprende rápidamente, efectuar este tipo de protección sobre todo un área de recarga no solamente parece imposible desde el punto de vista técnico, sino que también conllevaría un esfuerzo económico prácticamente inviable. De esta manera, se considera entonces más adecuado definir la protección mediante un sistema de zonas o perímetros de protección rodeando a la captación, en el interior de las cuales se restringen o prohíben de forma gradual las actividades que pueden modificar la calidad del agua subterránea.

De esta manera, los perímetros de protección deben garantizar la calidad del agua y que ésta no se afectada en ninguno de sus parámetros que están establecidos por las normativas locales de la legislación vigente. Se debe señalar que al establecer un sistema de esta naturaleza, también es necesario encontrar un equilibrio entre la protección y la actividad socioeconómica que se desarrolla en el lugar.

Como ya se ha señalado, existen varios métodos para definir los PPP, cada uno con ventajas y desventajas.

Tabla 28: Métodos para definir PPP (USEPA, 1988 en Hirata y Reboucas, 1999).

Método	Descripción	Ventajas	Desventajas
Radio Fijo Arbitrario	Áreas circulares, de radios fijos, definidos por hidrogeólogo con experiencia.	Rápido. Sencillo. Bajo Costo. Fácil convencimiento del público común.	No incorpora condiciones hidrogeológicas. Puede producirse grandes errores.
Radio Fijo Calculado	Áreas circulares, radio definido en función del volumen extraído del pozo de un cilindro, con porosidad establecida.	Rápido. Sencillo. Bajo costo.	No incorpora condiciones hidrogeológicas. Poco flexible. Muchas veces puede dar lugar a áreas superestimadas.
Cartografía de Vulnerabilidad	Basados en mapas hidrogeológicos y de suelos.	Bastante flexible. Usado en condiciones geológicas complejas.	No permite delinear una zona de captura específica. Resultados subjetivos.
Cartografía de Sistemas de Flujo	Áreas definidas por los mapeos de las condiciones de borde y del flujo del acuífero.	Flexible y barato. Puede aprovechar muchos datos existentes.	Asume un flujo uniforme bidimensional. Puede generar PPP grandes si es utilizado solo. Depende de datos primarios precisos.
Flujo Uniforme Analítico	Área definida por ecuación analítica de flujo uniforme a partir del mapeo de flujo de acuífero.	Simple. Permite definir una zona de captura. Robusto frente a la incertidumbre de la información.	Asume flujo uniforme y bidimensional. Ignora recarga, Heterometría y anisotropía.
Formato Simple Variable	Combinación de método de flujo uniforme, tiempo de tránsito y radio fijo calculado.	Simple y barato. Es el método más potente de los de formatos preestablecidos.	No funciona en acuíferos heterogéneos. Método poco flexible.
Sistemas de Flujo y Ecuación de Tiempo de Tránsito	Combinación del método de flujo uniforme con ley de Darcy para cálculo de advección.	Usa conceptos de degradación del contaminante. Puede ser utilizado con otros métodos.	Errores en la estimación de la porosidad eficaz y permeabilidad darciana pueden causar grandes distorsiones. Exige buen nivel de datos.
Aproximación de Tiempos de Tránsito	Basados en datos hidroquímicos e isotópicos para definir dirección de flujo.	Puede ser utilizado en cualquier medio. Puede ser utilizado con otros métodos. Usa el concepto de tiempo de tránsito para degradación de contaminantes.	Interpretación de geoquímica precisa. Algunas veces brinda resultados ambiguos. Requiere personal experto. Costos elevados.
Númérico de Flujo y Transporte	Modelación matemática.	Se aplica en cualquier medio geológico, inclusive heterogéneos y anisótropos. Método	Necesita gran cantidad de información. Es para expertos. Suele ser costoso.

Los criterios de zonación de PPP pueden estar basados también en el hecho de que una vez producida una contaminación, el logro de ese objetivo se obtiene mediante tres procesos (ITG, 1991):

- ❖ **Dilución:** El contaminante al moverse en el seno del acuífero se diluye al mezclarse con el agua que contiene, pudiendo llegar a ser suficiente para hacer aceptable esa agua para el consumo (no supera los parámetros de la normativa vigente local).
- ❖ **Degradación:** Ya sea mediante reacciones químicas con el oxígeno disuelto (especialmente en la zona no saturada) o con los materiales del acuífero, o en el caso de bacterias y otros organismos vivos al morir por no encontrarse en un medio adecuado.

- ❖ **Instalación de un sistema de vigilancia y control:** Permite tomar medidas ante la contaminación o detener el bombeo de la captación amenazada antes de que llegue el agente contaminante a la captación.

Cuando se quiere proceder a delimitar un PPP, debe elegirse primeramente en base a qué criterios se va a definir, puesto que los objetivos que se persiguen varían en función de éste. Los criterios empleados usualmente son los siguientes:

1. Evitar que debido al bombeo en la captación se produzcan variaciones en el flujo del agua subterránea en las inmediaciones del pozo que puedan provocar la llegada de sustancias indeseables (**distancia y descensos**).
2. Asegurar que la contaminación será inactivada o degradada en el trayecto entre el punto de vertido de la contaminación y el lugar de extracción (**poder autodepurador del terreno, tiempo de tránsito, distancia**).
3. Proporcionar un tiempo de reacción que permita el empleo de otras fuentes de abastecimiento alternativas, hasta que se reduzca a niveles tolerables el efecto de la contaminación (**tiempo de tránsito**).
4. Garantizar la protección de la calidad de las aguas subterráneas en la totalidad del área de alimentación de una captación (**criterios hidrogeológicos**).

Tabla 29: Relación entre los criterios que pueden emplearse en la delimitación de PPP y los procesos físicos que controlan (ITG, 1999).

Criterio	Distancia	Descenso	Tiempo de Tránsito	Criterios Hidrogeológicos	Poder Autodepurador del Terreno
Advección		x	x	x	
Dispersión hidrodinámica (dispersión mecánica y difusión molecular)			x		x
Interacción sólido-soluto (reacciones químicas de adsorción)			x		x

La **Distancia** consiste en delimitar un área definida por un círculo con centro en la captación. Sus dimensiones es una decisión del organismo de aplicación, aunque sería conveniente que esta extensión sea fijada utilizando criterios más complejos. Es el criterio más elemental, pudiendo valorarse como poco eficaz cuando no se incorpora ninguna consideración sobre las condiciones de flujo del agua subterránea.

El **Descenso**, es un criterio que se basa en considerar que en el área en la cual desciende el nivel piezométrico debido al efecto del bombeo, se producen cambios en la dirección del flujo subterráneo y un incremento de la velocidad de flujo con que el agua llega a la captación, debido al incremento del gradiente hidráulico, acelerando la migración de un contaminante hacia la captación.

El **Tiempo de Tránsito**, permite evaluar el tiempo que un contaminante tarda en llegar a la captación que se pretende proteger. Los cálculos para la determinación del tiempo de tránsito se realizan considerando principalmente el proceso de advección, que es el más conocido y el que tiene mayor importancia en acuíferos con alta velocidad de flujo. La mayoría de los países han escogido como criterio para definir la zonación de los perímetros un **tiempo de tránsito de 1 día para la zona inmediata** (Zona I), **50-60 días para la zona próxima** (Zona II) y **10 años para la zona lejana** (Zona III).

Los **Crterios Hidrogeológicos**, hacen referencia a todas aquellas situaciones y acciones que permitan identificar los límites hidrogeológicos que delimitan el área en el cual el agua procedente de la precipitación después de infiltrarse podría llegar a alcanzar la captación. La aplicación de este criterio implica la protección de un área mayor a la necesaria.

El **Poder Autodepurador del Terreno**, consiste en utilizar la capacidad que poseen los diferentes suelos para atenuar la concentración de los contaminantes que los atraviesan. En esta capacidad depuradora intervienen procesos físicos, químicos y biológicos que actúan de modo diferente para cada contaminante, por lo cual deben realizarse experiencias previas que permitan evaluarlos convenientemente.

### 6.3. MÉTODOS DE DELIMITACIÓN DE PPP

Como ya se ha señalado, existen diferentes métodos para efectuar la delimitación de los perímetros de protección. El empleo de uno u otro estará, claramente, en función de disponibilidad de obtener datos técnicos básicos del acuífero en cuestión y, por supuesto, de la factibilidad económica de poder llevarlos a la práctica. Entre los métodos aplicados a **medios porosos** se pueden citar: radio fijo arbitrario, radio fijo calculado (función del tiempo de tránsito y función del descenso); entre los métodos gráficos se encuentran: método de Wyssling, método de Hoffman y Lillich, método de Albinet, método de Horsley, método de nomogramas, uso de catálogo de formas simples, empleo de ábacos.

Los métodos que mejor se ajustan para **medios kársticos y/o fracturados** son: métodos hidrogeológicos, métodos de trazadores (radioactivos, colorantes, especies iónicas, gaseosos), método del poder autodepurador del terreno, otros métodos analíticos como datación con Tritio.

#### 1. Radio fijo arbitrario

Es el método más simple. El perímetro de protección que se obtiene está conformado por el área definida por un radio asignado arbitrario, con centro en la captación. En la actualidad, este método puede ser utilizado para la definición de la zona inmediata (zona de restricciones absolutas) y se usa también en aquellos lugares mientras se están llevando a cabo estudios técnicos tendientes a establecer con precisión estos perímetros.

#### 2. Radio fijo calculado

En este caso el radio que define el perímetro propuesto se obtiene mediante una ecuación en la que se utiliza como criterio el tiempo de tránsito o el descenso del nivel piezométrico.

**2a. Tiempo de Tránsito:** La ecuación empleada calcula el volumen de agua que llegará a la captación en un tiempo determinado, que será el considerado necesario para eliminar o disminuir la contaminación hasta un nivel admisible. Se supone que la captación es el único drenaje del acuífero y no existen direcciones preferentes de flujo, convergiendo en el pozo todas las líneas de corriente. Las líneas isócronas son círculos concéntricos con el centro de captación. La ecuación volumétrica es:

$$Q t = m_e H \pi R^2$$

$$R = \sqrt{\frac{Q t}{m_e \pi H}}$$

Q = caudal de bombeo  
 t = tiempo de tránsito hasta la captación  
 $m_e$  = porosidad eficaz del acuífero  
 H = espesor saturado en la captación  
 R = radio del perímetro de protección

**2b. Función del descenso:**

Cuando se emplea este método, lo que se pretende definir es el área en el cual se produce un descenso determinado del nivel piezométrico. Por ello es necesario utilizar la ecuación de Theis para el estado transitorio:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \int_u^\infty \frac{e^{-u}}{u} du$$

$$u = \frac{R^2 S}{4Tt}$$

s= descenso en un punto situado a la distancia R de la captación  
 Q= caudal de bombeo constante  
 T= transmisividad  
 R=distancia a la captación  
 S=coeficiente de almacenamiento  
 t=tiempo transcurrido desde el comienzo del bombeo

La función del pozo W (u) que corresponde a la integral anterior es:

$$W(u) = \int_u^\infty \frac{e^{-u}}{u} du$$

Por lo tanto se tiene:

$$W(u) = \frac{s 4 \pi T}{Q}$$

Con este valor de **W (u)** se entra a la tabla de Theis de la función del pozo (se encuentra en todo libro de texto de hidráulica) y se obtiene **u**. Entonces, luego puede calcularse **R**.

$$R = \sqrt{\frac{u 4 T t}{S}}$$

**3. Método de Wyssling**

Este método se basa en el cálculo de la denominada *zona de llamada* de una captación y en la búsqueda posterior del tiempo de tránsito deseado. El método es simple, aplicable en acuíferos porosos homogéneos. Para su aplicación se necesita un ensayo de bombeo previo. La resolución por este método, precisa conocer los parámetros gradiente hidráulico (i), el caudal bombeado (Q), la permeabilidad darciana o conductividad hidráulica (K), la porosidad eficaz ( $m_e$ ) y el espesor del acuífero (b).

En primer lugar se calcula la denominada *zona de llamada*. En un acuífero libre, si **B** es el ancho de la zona de llamada, entonces:

$$Q = K B b i$$

$$B = \frac{Q}{K i b}$$

El radio correspondiente a la zona de llamada se puede obtener de la siguiente expresión:

$$X_0 = \frac{Q}{2 \pi K i b}$$

El ancho del frente de llamada a la altura de la captación ( $B'$ ) será:

$$B' = \frac{B}{2}$$

$$B' = \frac{Q}{2 K i b}$$

La velocidad eficaz  $V_e$  se define como:

$$V_e = \frac{K i}{m_e}$$

Una vez determinada la zona de llamada se busca en la dirección del flujo, la distancia correspondiente al tiempo de tránsito deseado (isócronas). Se emplean las siguientes ecuaciones:

$$S_o = \frac{+l + \sqrt{l(l + 8 X_o)}}{2}$$

$$S_u = \frac{-l + \sqrt{l(l + 8 X_o)}}{2}$$

Dónde:

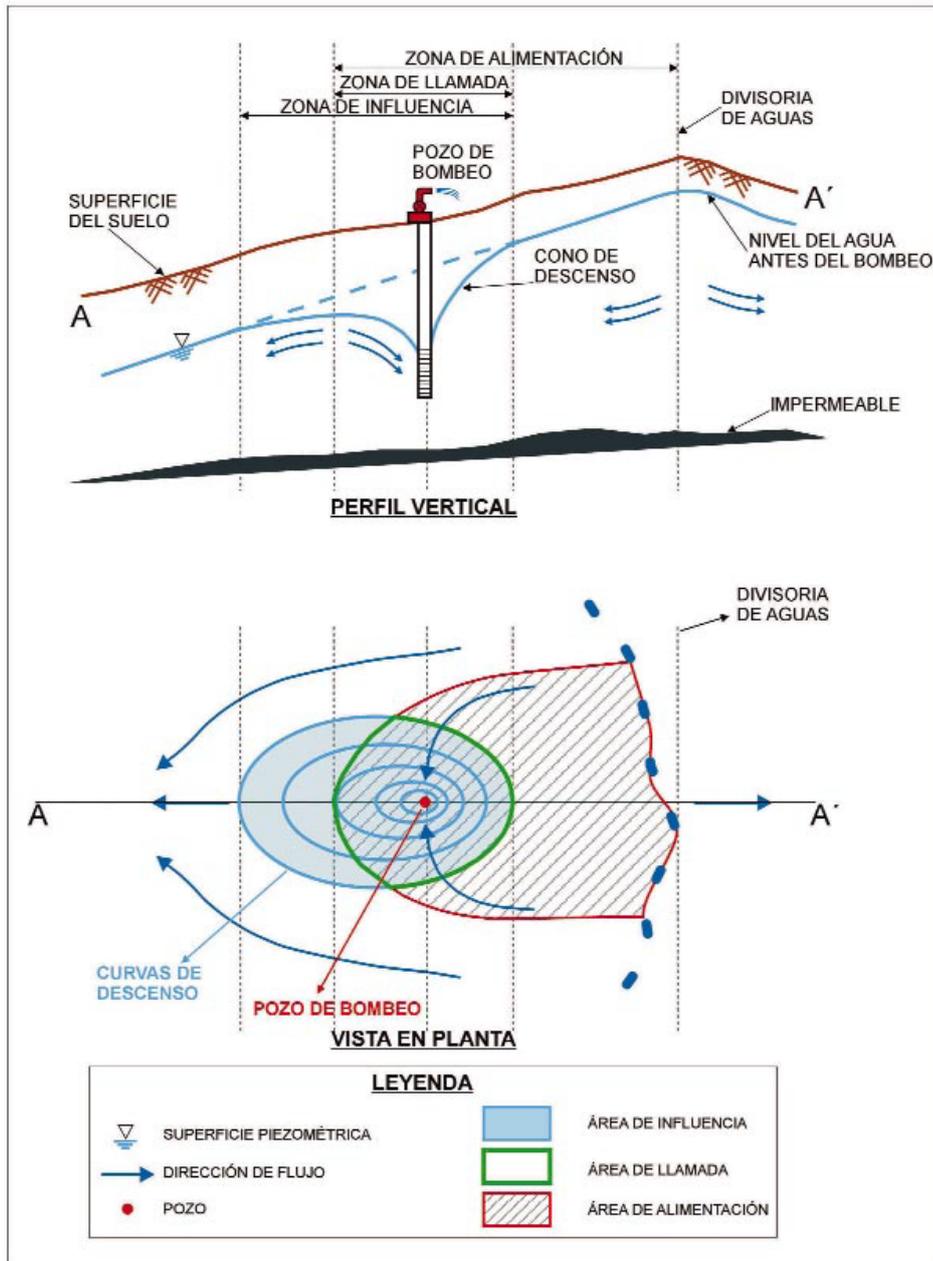
$$l = V_e t$$

t = tiempo de tránsito

$V_e$  = velocidad eficaz

$S_o$  = distancia en el sentido del flujo correspondiente a un tiempo de tránsito t

$S_u$  = distancia en el sentido contrario al flujo correspondiente a un tiempo de tránsito t



ESQUEMA DE UN BOMBEO EN MEDIO POROSO

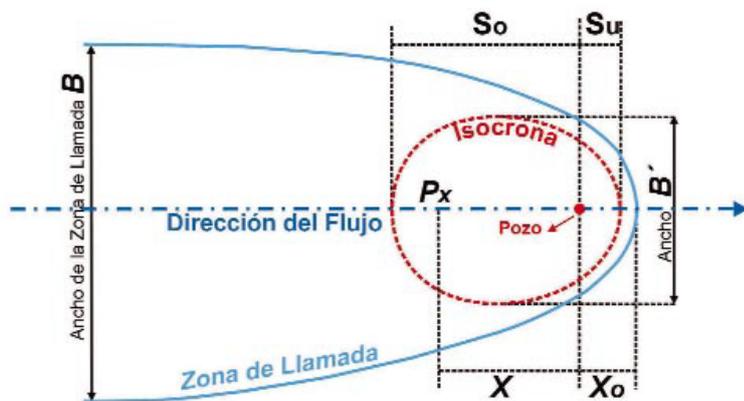


Figura 10: Área de influencia y área de alimentación en un acuífero con gradiente hidráulico en régimen estacionario (Modificado de USEPA, 1987 en Moreno Merino et al., 1991).

#### 4. Método hidrogeológico

La aplicación de estos métodos permite, mediante la cartografía hidrogeológica de detalle, el análisis de la piezometría, la determinación del balance hidrogeológico y otras diversas técnicas que permiten identificar variaciones litológicas, cambios de permeabilidad, divisorias de aguas subterráneas, relación o no con el agua superficial, etc., que permite en definitiva, localizar los diferentes límites de flujo a partir de los cuales se pueden definir perímetros de protección.

#### 5. Método de modelos matemáticos de flujo y transporte

Los perímetros de protección pueden establecerse usando modelos matemáticos que simulan el flujo del agua subterránea y/o el transporte de solutos, resolviendo numéricamente las ecuaciones que lo definen. Hay numerosos programas en el mercado que pueden ser utilizados para efectuar modelaciones numéricas. Uno de los aspectos más sensibles de la aplicación de estos métodos es saber desde el inicio la calidad de datos con que se cuenta o se pueden obtener y no acudir a simplificaciones extremas que podrían condicionar el resultado. No debe olvidarse que en definitiva, que con el uso de un programa siempre será posible obtener un resultado, pero se puede estar muy lejos de la realidad predictiva si es que los datos de base son poco consistentes.

#### 6. Método de Rehse para cálculo del poder depurador del suelo

Se trata de un método empírico para cuantificar el poder depurador de los materiales en la zona no saturada y en la zona saturada, ante los efluentes contaminantes que pudieran atravesarlos. Para su cálculo (Rehse, 1977 en Lallemand-Barrès y Roux, 1989) se apoya en varias tablas que relacionan el tipo de material y su poder depurador tanto en la zona saturada como en la no saturada. El poder depurador (Lallemand-Barrès y Roux, 1989) vendrá dado por:

$$M_x = M_A + M_R$$

Dónde:

$M_x$ : Poder depurador sobre la totalidad del transporte

$M_R$ : Poder depurador en el trayecto vertical (zona no saturada)

$M_A$ : Poder depurador en el trayecto horizontal (zona saturada)

La depuración es completa cuando:  $M_x$  sea mayor o igual a 1.

**La depuración en la zona no saturada** es igual a:

$$M_R = \sum_{i=n}^{i=1} h_i I r_i$$

Dónde:

$h_i$  = Espesor vertical de los materiales en la zona no saturada

$I r_i$  = Índices de depuración para esos materiales en la zona no saturada (Tabla 30)

Cuando  $M_R \geq 1$  la depuración en la zona no saturada es completa y según Rehse no sería necesario determinar ningún perímetro de protección.

Cuando  $M_R < 1$  la depuración no es completa y el agua contaminada alcanzaría la zona saturada.

**La depuración en la zona saturada** es igual a:

Si  $M_x = 1$ , es decir existe una depuración completa antes de que el agua llegue a la captación, entonces el poder depurador de la zona saturada será:

$$M_A = 1 - M_R$$

La distancia **L** que como mínimo es necesario recorrer para alcanzar una depuración total, será:

$$L = \frac{M_A}{I_A}$$

Dónde:

$I_A$  : Índice de depuración de la zona saturada correspondiente al material acuífero (Tabla 31)

L = Longitud atravesada de la zona saturada

Según Rehse, **L** correspondería al límite del perímetro de protección próximo.

Si no existe recubrimiento de suelo, toda la depuración debería realizarse a través del material acuífero, para que sea completo, debería ser:

$$M_A = 1$$

$$L = \frac{1}{I_A}$$

Tabla 30: Poder depurador del suelo en el recubrimiento (Suelo y zona no saturada).(Rehse, 1977).

M	Descripción del material	H (m)	$I_{ir} = 1/H$
1	Humus, 5-10 % humus, 5-10% arcilla	1,2	0,8
2	Arcilla sin grietas de desecación, limo-arcilloso. Arena muy arcillosa	2	0,5
3	Limo arcilloso a limo	2,5	0,4
4	Limo, arena poco limosa, arena limosa	3-4,5	0,33-0,22
5	Arena fina a media	6	0,17
6	Arena media a gruesa	10	0,1
7	Arena gruesa	15	0,07
8	Grava con abundante matriz arenosa y limo arcillosa	8	0,13
9	Grava con abundante matriz arenosa y escasamente limosa	12	0,08
10	Grava fina a media, rica en arena	25	0,04
11	Grava media a gruesa con poca arena	35	0,03
12	Gravas, guijarros	50	0,02

M = Número de clasificación granulométrica.

H = Espesor de la capa necesario para la depuración.

IR = Índice de depuración en la zona no saturada.

Arena: Diámetro de grano 2 – 0,063 mm.

Limo: Diámetro de grano 0,063 – 0,005 mm.

Arcilla: Diámetro de grano < 0,005 mm.

Tabla 31: Poder depurador del suelo en la zona saturada (Modificado de Rehse, 1977).

M	Descripción del material	L (m)	$I_d = 1/L$
9	Grava con abundante matriz arenosa y escasamente limosa	a) 100	0,01
		b) 150	0,007
		c) 170	0,006
		d) 200	0,005
10	Grava fina a media, rica en arena	a) 150	0,007
		b) 200	0,005
		c) 220	0,0045
		d) 250	0,004
11	Grava media a gruesa con poca arena	a) 200	0,005
		b) 250	0,004
		c) 270	0,0037
		d) 300	0,0033
12	Gravas, guijarros	a) 300	0,0033
		b) 340	0,0029
		c) 360	0,0027
		d) 400	0,0025

L = Distancia horizontal necesaria para la depuración (m).

a) Velocidad eficaz < 3 m/día.

b) Velocidad eficaz comprendida entre 3 y 20 m/día.

c) Velocidad eficaz comprendida entre 20 y 50 m/día.

d) Velocidad eficaz > 50 m/día.

IA = Índice de depuración en el acuífero.

**MÓDULO 7.** Normas y legislaciones, nacionales e internacionales sobre preservación ambiental. Inconvenientes para su aplicabilidad. Principios y medidas. Perímetros de protección. Monitoreo. Grado de vulnerabilidad; métodos para su determinación; ejemplos. Ejemplos locales y extranjeros de deterioro de acuíferos por sobreexplotación y contaminación.

---

### 7.1. NORMAS Y LEGISLACIONES

El agua es fundamental para la vida social, económica y ambiental de un país. Por ello es tan importante que los anteproyectos de ley de aguas se presenten con explicación de motivos, el origen de las normas y los propósitos de política perseguidos con su aplicación sin ocultar sus propósitos. La temática ambiental y social, así como las características propias con que se presenta el agua, no deben ni tienen por qué ser relegados para fomentar la inversión privada y el uso eficiente del agua como valor económico.

Una Ley general de Aguas debe ofrecer flexibilidad, para que en las distintas zonas del país donde se aplique, se puedan adaptar políticas hídricas coherentes con las características de las mismas, debe asignar prioridad para una ocupación territorial que no altere el flujo natural del agua, priorizar las zonas de captación y usos razonables del agua para asentamientos humanos, establecer criterios de planificación del uso múltiple del agua por cuencas, prever como mantener caudales mínimos y las condiciones de cauces naturales para mantener la vida acuática. Debe tener en cuenta que el manejo de aguas no es independiente de lo que se hace en la tierra con otros recursos, debe hacer referencia al manejo y gestión conjunto de las aguas subterráneas y superficiales y debe determinar normas operativas relevantes para controlar los distintos tipos de contaminación, debe tener presente los usos actuales y futuros de las aguas de comunidades campesinas nativas. Dentro de este contexto un mercado de aguas puede y debe operar en la medida que exista claras reglas de juego y respeto por el derecho de terceros, el ambiente y los intereses de la sociedad.

El contenido de una ley de aguas debe por ello utilizar una terminología legal precisa y venir acompañada de un glosario adecuado a los usos y costumbres de cada país. Por el ejemplo “patrimonio de la nación”, es un concepto que no sólo implica al “dominio público” si no que también involucra al privado. Por dicho motivo, no porque un bien es “patrimonio de la nación” se le debe eximir del “uso efectivo” al entregar el Estado un derecho de uso de agua.

Precisamente los mercados de derechos de agua, que son una de las opciones importantes para asignar mejor el agua; se fomentan al ir acompañados por la obligación de uso efectivo y beneficioso y caducidad en caso de incumplimiento de la ley. De lo contrario, las posesiones de derechos tienen una gran posibilidad de monopolios por parte de sus poseedores. El mercado de aguas es además cautivo y sujeto a la infraestructura hidráulica disponible por lo que en general no mueve más del 5% del total de asignaciones de agua de un país con escaso desarrollo hidráulico. El apostar toda la eficiencia de uso de agua de un país, con escasas estructuras hidráulicas y un pobre sistema de gestión hídrica, a un mercado de aguas no bien regulado puede en estos casos causar más perjuicios que beneficios

Una ley de aguas debería, por lo tanto, prever las condiciones básicas del mercadeo de derechos, conforme el ejemplo del sistema norteamericano, (único sistema maduro al respecto), en el cual la ley estipula y destaca que: (i) no se pueden mercadear derechos que no fueron efectivamente utilizados; (ii) no se pueden mercadear derechos en exceso del monto histórico efectivamente consumidos; y (iii) no se pueden mercadear derechos en perjuicio ambiental o comunitario.

Otro aspecto fundamental a ser incorporados en una ley de aguas son los instrumentos económicos. La incorporación de un sistema de cobros por disponer de un derecho de uso y la aplicación de pagos por contaminación del agua está comprobado que es una de las herramientas más eficaces para promover un

uso eficiente de dicho recurso. El régimen de cobros debe ser un instrumento para mejorar y promover el uso eficiente de los recursos hídricos además de ser un medio de captación de ingresos. Sin embargo debe recordarse que su implementación requiere una buena estructura de gestión del agua por cuenca o sistema de cuencas. Además debe reconocer que todos los habitantes de una cuenca deben contribuir a pagar por el agua y que dicho pago puede también, parcial o totalmente, ser efectuado con trabajo comunitario como lo han demostrado por siglos las comunidades autóctonas del Perú. La justa valorización del agua puede por lo tanto originarse de varias formas según la cultura local y el tipo de régimen económico. En muchos países se dan varias formas simultáneamente.

Debe existir preocupación en la ley por establecer claramente que los derechos de aguas de entidades públicas son derechos reales, estableciendo la obligación de uso efectivo y de corto plazo y alta rentabilidad, tal como las fomentadas por las compañías mineras, como parte del título. De esta forma se protege la disposición del recurso para uso esencial como es el caso de las entidades públicas que tienen derechos otorgados para agua potable y saneamiento. Además debe quedar claramente establecido que el hecho que el agua para la población tiene prioridad sobre otros usos, no exime a las empresas de agua potable y saneamiento de pagar un justiprecio por los derechos de captación del agua, más aún si el agua ya se encuentra captada y canalizada para asignarla a otros usos.

El tema de la competencia para el otorgamiento inicial de las concesiones de uso de agua es muy relevante cuando se piensa fomentar un mercado de aguas. En principio se deben respetar los usos existentes. Para los nuevos usuarios en caso de competencia o subasta, éstos deben competir entre actores con el mismo nivel económico. Solanes (1997) señala que en una reciente discusión sobre el tema en Sudáfrica se analizó que en países con marcadas diferencias sociales y relevante número de pobres el sistema de subasta puede resultar en fuertes inequidades en relación a las oportunidades de acceso al recurso. Por supuesto que si no existe en la ley una forma de prioridad de acceso al agua con fines poblacionales, este sistema se traducirá en que las poblaciones y pueblos pobres así como comunidades indígenas no podrán competir por obtener agua con grandes inversionistas en proyectos de corto plazo y alta rentabilidad como los fomentados por grandes compañías mineras, petroleras y energéticas. Inclusive en zonas desérticas venderán sus derechos de agua junto con la tierra; la cual es dejada de lado por el nuevo usuario que sólo le interesa el agua para inversiones más rentables al corto plazo como en la minería; debido a las elevadas cifras que le ofrece una empresa minera.

Estas ventas de agua se incrementan si los derechos de uso de aguas son asignados en forma individual y no comunal. El hecho que algunos comuneros vendan sus derechos causa un “efecto de arrastre” al resto de la comuna, debido a la merma en la calidad del agua que va quedando y mayores costos de mantenimiento del sistema de canales antes compartido con más usuarios. Ello causa el despoblamiento de zonas habitadas por miles de años así como de los ecosistemas existentes para ceder el agua a una explotación minera; usualmente con no más de 20 o 30 años de proyección; que en general sólo deja luego relaves y no genera empleo para la población local.

Este proceso es en general irreversible tanto para los habitantes como para los pobladores y ecosistemas afectados. Este tema social-ambiental relevante parece no ser de inclusión en la política hídrica implícita en gran parte de los anteproyectos de ley que se presentan en la región pero es particularmente relevante en las zonas áridas y semiáridas de los andes peruanos, bolivianos, chilenos y argentinos. Se dice que “no hay que detener el progreso”. Eso es válido en la medida que ese progreso sea sustentable y sostenible y no efímero como ocurre con las explotaciones mineras que no mantienen una reserva de agua para preservar la vida en el desierto.

Con relación a la organización institucional para la gestión del agua lamentablemente en varios anteproyectos de ley se sigue asignando la gestión de un recurso multisectorial como el agua a un organismo sectorial como es el ministerio de agricultura o el de energía. La solución es de alguna manera lo opuesto de la práctica moderna donde el manejo del agua se hace depender de organismos no usuarios, no

sectoriales y no vinculados directamente a un sector de usos. Si se sigue con la práctica de asignar la autoridad máxima de aguas a un sector usuario se crea un obstáculo importante para la gestión de los recursos hídricos. Un organismo público sectorial en definitiva es juez y parte en el manejo del agua. Por ejemplo, con este sistema todos los usos del agua; incluido el empleado para generar electricidad o abastecer de agua potable; estarían sujetos a una autoridad de aguas de una cuenca, que dependería de una autoridad nacional de aguas, que dependería de un consejo de aguas de nivel nacional (compuesto por personas del estado, sociedad civil y usuarios), que dependería de un organismo sectorial y que luego se reduciría a la decisión de un ministro como el de agricultura o el de energía. Esto no es adecuado. Dado su carácter la Autoridad de Aguas debe depender directamente o en última instancia del primer ministro o de un ministerio de tipo multisectorial y además tener autonomía en sus decisiones dentro del marco de la ley y los acuerdos del consejo.

La ley de aguas debería también disponer, más allá de la obligatoriedad de establecer un sistema institucional de gestión de agua a nivel nacional y por cuencas (sistema nacional de gerenciamiento de recursos hídricos), que se elaboren normas y criterios de formulación, aprobación y evaluación de planes de uso de agua a nivel de cuencas. Si no se hace mención a los planes de ordenamiento de recursos hídricos con fines de uso múltiple, así como asignación de costos y beneficios de obras multipropósito, en la ley se deja un importante vacío normativo, con la posible consecuencia que el plan se convierta en un simple listado de obras o un documento sin sentido por no existir compromiso de los actores involucrados en su aplicación. Además un anteproyecto de aguas debe formularse comenzando por rescatar lo positivo de la ley vigente y determinar por qué, si fuera el caso, no se aplicaron algunos artículos de la misma. Muchas veces la ley vigente es totalmente ignorada. No vaya a suceder que una la nueva ley sea peor que la existente como ha ocurrido tantas veces con las reformas efectuadas sin el debido respeto a lo que funciona adecuadamente.

Lo ideal sería conducir en cada país un debate para ordenar y sistematizar experiencias de la región así como elaborar especificaciones técnicas (véase recuadro 3) de aplicación general en los países de la región, que faciliten los procesos de creación y operación de entidades de uso múltiple del agua a nivel de cuencas.

## **7.1. NATURALEZA JURÍDICA**

Para el tratamiento de este tema, se realiza a continuación un extracto textual de un excelente trabajo realizado por Formento y Ferrazzino (2002). La constatación de que el agua no es un recurso natural infinito justifica la especial relevancia e interés que suscita en la actualidad, en los diversos sectores sociales, materias como la protección y la utilización del dominio público, la calidad de las aguas y la planificación hidrológica. De tal forma, se hace necesario conocer de qué manera la legislación argentina dispone de herramientas para configurar el régimen legal de aguas, cuáles son sus alcances y sus limitaciones en el marco de los recursos naturales, el medio ambiente y la actividad agraria. En efecto, siendo un recurso de fundamental importancia para la vida y esencia del hombre, ha sido necesaria su regulación jurídica mediante un conjunto de complejas normas que se encuentra en distintos ámbitos del derecho nacional.

El moderno derecho de aguas surgió de la necesidad de balancear los distintos intereses sectoriales y espaciales que recaen sobre este recurso. Sus normas se entrelazaron con las del derecho energético, el agrario, el minero, el industrial, el naviero y el pesquero. Debido a su movimiento, está también sometido a las relaciones interjurisdiccionales e internacionales (Valls, 1994). Está constituido por aquellas normas que perteneciendo al derecho público o al derecho privado, rigen la creación, la modificación, la transmisión y la extinción de las relaciones (jurídicas) aplicables a su conocimiento, aprovechamiento y preservación como, asimismo, a la defensa contra su acción nociva (Brebba, 1992). Por consiguiente, resulta difícil el estudio de la normativa del agua porque no se encuentra sistematizada, la mayoría está incorporada al derecho de fondo, o sea, resulta del Código Civil pero, también, hay importantes disposiciones en el derecho administrativo, en los códigos provinciales, en las normas municipales.

En el campo jurídico particular, la indefinición acerca de la especialidad del derecho ambiental, de la legislación de los recursos naturales e, incluso del derecho agrario y los diferentes criterios en cuanto al objeto de estos sectores; conducen a una defensa plena de los intereses que ellos defienden. Por consiguiente, se favorece un tratamiento clásico de la problemática desde la perspectiva de la estructura interna de las normas que la tratan. Se resuelve el problema como si fuera una cuestión más del derecho civil o del administrativo, según los sujetos de la relación, y se pierde la especialización propia de la temática tratada (Pastorino, 1998).

Resulta imprescindible asumir la interdisciplinariedad con que debe abordarse el agua, los restantes recursos naturales, el ambiente y la actividad agraria. En consecuencia, se refuerza el criterio de que el agua constituye uno de los elementos que integran el ambiente, que es alcanzado por el principio de la interdependencia de los recursos naturales y, por tanto, no puede aislárselo para su tratamiento.

Esta perspectiva integral favorece la especialización y facilita la resolución de supuestos límites o contradicciones entre ellas. En esta línea, vigorizaría el fuero agrario especializado en razón de la índole técnico-científica de las realidades que aborda, fortaleciendo su contenido relacionado con los elementos de la naturaleza y sus recursos. Sería aconsejable no resolver los conflictos ambientales, agrarios o de recursos naturales como si fueran una causa administrativa o civil más. Así, la problemática queda encorsetada entre el derecho civil y el administrativo (Pastorino, 1998), mientras que el tema ambiental ni siquiera figura en la agenda de la propia labor legislativa.

Metodológicamente, este trabajo se basa en aplicar el método descriptivo y analítico, con la finalidad de generar y analizar críticamente la información referida a los principios generales establecidos por la normativa existente en la legislación argentina.

### **Los recursos naturales en el sistema federativo argentino**

La República Argentina tiene un sistema federal de organización, donde cada provincia conserva el dominio originario de los recursos naturales existentes en su territorio, en este caso, el agua. De tal forma, la primera característica significativa que aparece en el derecho positivo argentino es la coexistencia de tantos regímenes legales como provincias existen, a lo que debe sumarse la legislación de carácter nacional, la cual resulta aplicable en determinadas jurisdicciones o en actividades específicas.

Como consecuencia del sistema federativo la Constitución asegura la independencia económica de las provincias y su autonomía para disponer de los recursos naturales- suelo, subsuelo mineral, hídrico, espacio aéreo, ríos interprovinciales- y demás bienes que, conforme a las leyes que dicte el Congreso de la Nación, merezcan la calificación de bienes de dominio público.

Con la reforma de la Constitución Nacional de 1994 se introduce una disposición relativa al dominio de los recursos naturales (Art. 124). En tal sentido, se establece que “corresponde a las provincias el dominio originario de los recursos naturales existentes en su territorio”. Los estados provinciales conservan todo el poder no delegado al Gobierno Federal, así como aquel que se hubiesen reservado por medio de pactos especiales. La excepción la constituyen aquellos recursos que en forma expresa, hubieran sido transferidos constitucionalmente a la Nación (Pigretti, 1997).

### **El derecho de aguas en las constituciones provinciales**

Lamentablemente, y en ausencia de una concepción y tratamiento integral, muchas leyes provinciales se refieren al agua. Esta situación genera una desarmonía entre las normas, lleva al desconocimiento de las mismas y a la intervención de una pluralidad de organismos públicos. Las Constituciones Provinciales, por lo general, establecen principios referidos a:

- El derecho de usar el agua será objeto de concesiones, beneficiando al predio para el que se utilizará el recurso.
- El otorgamiento de dichas concesiones debe hacerse por ley, correspondiendo a los poderes administrativos el control del cumplimiento de las condiciones.

### **Los códigos de agua provinciales**

Algunas provincias han dictado leyes o códigos de aguas, siendo la más antigua del año 1884, de la provincia de Mendoza; en 1946, Salta dictó un moderno código de agua; en 1950, Santiago del Estero, modificado en 1955. Estas leyes establecen principios en materia de concesiones de aguas que, por el Código Civil, corresponden al dominio público de ellas. Dentro de la región pampeana, Córdoba cuenta con un código de aguas, que indica que las concesiones deben gestionarse ante la Dirección Provincial de Hidráulica, ente registrador de los usuarios.

Estas concesiones pueden otorgarse tanto a propietarios individuales como a comunidades de usuarios. En el caso de las aguas superficiales, la concesión es a perpetuidad. Para el caso de las subterráneas, la concesión es eventual (no permanente) y se requiere informar las características de la perforación y los equipos previstos, la calidad y el caudal de agua extraída, e identificar al perforista y al técnico responsable, quienes deben estar inscriptos en un registro especial (Formento, 1998).

En ese código se ha fijado un orden de prioridades para el uso de aguas, y la máxima, la tienen los aprovechamientos para uso doméstico, municipal y el abastecimiento de la población; en segundo término, están los usos industriales; en tercer lugar, el uso agrícola (riego); en cuarto, la bebida del ganado y, luego, los restantes (energético, recreativo y minero). Para obtener una concesión para uso agrícola debe demostrarse que el riego es necesario, que los suelos son aptos y que se cuenta con el adecuado desagüe.

Algunas provincias fijaron en sus constituciones los principios básicos de su política hídrica; tal como los casos de Mendoza, Río Negro y Chubut; otras, dictaron reglamentos. Las provincias no solo fueron elaborando códigos sistemáticos y orgánicos que pretendían regular todas las alternativas posibles, sino que algunas llegaron a cambiar sus códigos recientes por modelos que consideraban más modernos. Como resultado, las provincias argentinas lograron verdaderos modelos jurídicos que contemplaban muchas variables, pero que no siempre coincidieron con los requerimientos perfeccionistas. Los códigos de agua de San Luis y Santa Cruz concentran su enfoque normativo sobre los requerimientos específicos de cada provincia (Valls, 1994).

En 1999, se promulgó la ley 12.257 que sancionó el Código de agua de la Provincia de Buenos Aires "estableciendo el régimen de protección, conservación y manejo de recurso hídrico de la provincia". En dicho código, se prevé la creación de un ente autárquico "autoridad del agua", la formación de consorcios integrados por los beneficiarios y se reglamentan los distintos usos; la mencionada ley aún no fue reglamentada, lo que dificulta su aplicación. En general, los códigos de aguas responden a los siguientes principios:

- El Estado conserva el derecho de propiedad sobre el agua, sin perjuicio de ceder su uso a los particulares a través del otorgamiento de concesiones.
- Establecen un sistema de prioridad horaria cuando las concesiones tengan el mismo objeto, de otro modo la prioridad se determinará por el tipo de consumo a realizar.
- En la solicitud que se presente, se indicará la superficie del predio a regar, las propiedades a atravesar, el volumen de agua a emplear, el tipo de obras de captación, la conducción y la conservación e información sobre la existencia de terceros concesionarios en las proximidades.
- Las concesiones se otorgarán previa citación de los interesados por medio de edictos y de acuerdo a los elementos de convicción aportados por el peticionante.

- La concesión puede otorgarse por tiempo ilimitado o por determinado plazo, operándose su caducidad por no haberse emprendido las obras dentro del plazo propuesto, o por no haberse ejercitado el objeto de la concesión por el término de un año o por un plazo mayor.
- Se debe abonar un canon por volumen de agua utilizado.

Más allá de la validez de cada intento de instituir un fuero específico para las cuestiones relativas al uso del agua, tal como caracterizan a los distintos códigos de aguas, estos procedimientos implican realizar un abordaje inadecuado y parcial. En efecto, no sólo hay que tener en cuenta al recurso agua conforme a las leyes de la naturaleza, sino que es necesario conceptualizarla como un elemento más del ecosistema.

Por otra parte, cualquier persona puede solicitar ante la autoridad pública, la inclusión de la declaración de impacto ambiental en los códigos de aguas, cuando se efectúe aprovechamientos de agua de cierta magnitud, con el fin de que las causas determinantes del impacto sean removidas (Victoria, 1998).

### **NATURALEZA Y RÉGIMEN JURÍDICO DEL AGUA**

Por su naturaleza jurídica, el Código Civil argentino caracteriza al agua como:

- un bien inmueble por naturaleza, cuando integra o compone partes fluidas del suelo que conforman su superficie y profundidad.
- una cosa mueble cuando siendo parte fluida del suelo, puede ser separada de él y transportarse de un lugar a otro.

Con relación al régimen jurídico del agua, si bien por el Código Civil todos tienen derecho de usar y gozar del agua pública, el Estado puede disponer sobre ese uso y goce; en cambio, sólo puede reglamentar el ejercicio del derecho del propietario sobre el agua privada.

### **EL DOMINIO, LA JURISDICCIÓN Y LA SERVIDUMBRE**

Para entender la complejidad de la aplicación de la normativa jurídica con relación al derecho de aguas, es necesario distinguir y precisar los conceptos de dominio, jurisdicción y servidumbre. El dominio [4] confiere a su titular la prerrogativa de poseer la cosa, disponer o servirse de ella, usarla y gozarla conforme a un ejercicio regular, y de reivindicarla de quien injustamente la posea. Es el derecho en virtud del cual una cosa se encuentra sometida a la voluntad y acción de una persona. Se ejerce sobre las cosas, los bienes, los recursos. La jurisdicción es la suma de facultades divisibles en las diversas materias. Se ejerce sobre las relaciones funcionales.

La diferencia entre ambos conceptos radica en que, mientras que el dominio [5] se ejerce sobre las cosas, la jurisdicción lo hace sobre las relaciones. La jurisdicción hace a los usos, el dominio hace a la titularidad del recurso. El dominio lleva necesariamente a la jurisdicción; la jurisdicción no lleva necesariamente al dominio. Pero, en última instancia, tiene más cuota de poder la jurisdicción que el dominio y éste puede terminar vaciado.

Por ejemplo, respecto al tratamiento de las cuencas hídricas: "...En una cuenca provincial navegable, el dominio sobre las aguas va a ser de las provincias por donde atravesase el río, o de aquéllas a las que sirva de límite. En cuanto al uso del agua si implican jurisdicción sobre el recurso puede presentarse una alternativa, ya que, puede haber dominio con jurisdicción y puede haber jurisdicción sin dominio" (Franza, 1997).

"La servidumbre es un derecho real, perpetuo o temporario sobre un inmueble ajeno, en virtud del cual se puede usar de él, o ejercer ciertos derechos de disposición, o bien impedir que el propietario ejerza algunos de sus derechos de propiedad" (Art. 2970). El derecho se halla constituido sobre la heredad (el predio) y no

sobre la persona, o sea que el beneficio lo tiene una heredad sobre otra; existen un predio sirviente (aquel sobre el cual se han constituido servidumbres) y otro dominante.

A través de este derecho real, el propietario tiene su dominio desmembrado en forma permanente o transitoria, pero a su voluntad o disposición legal, y deberá respetarlo por el tiempo que se halla estipulado. El uso y goce de algunos o todos los derechos de propiedad quedan a cargo de aquel por el cual se ha constituido la servidumbre.

Las servidumbres se establecen por contrato oneroso o gratuito, traslativo de propiedad. Pueden establecerse sobre la totalidad de un inmueble o sobre una parte material de él, en su superficie, profundidad o altura.

## **LA PROPIEDAD DEL AGUA**

En la mayoría de los países el agua es de propiedad pública y su asignación y precio es determinado principalmente por agencias estatales. Como consecuencia, es típicamente el Estado quien asume la responsabilidad de proveer agua a la población, para lo cual debe construir y operar la infraestructura hidráulica necesaria.

En muchos países, los resultados son poco alentadores, ya que a pesar de la creciente escasez de agua y de los altos costos de la infraestructura hidráulica, el agua se utiliza en forma poco eficiente, la infraestructura tiene problemas de diseño, construcción y operación, y la entrega de servicios es deficiente. Actualmente existe una tendencia hacia el refuerzo de la institucionalidad, el mejoramiento de políticas de precios y la entrega de la administración del agua a las comunidades y las asociaciones de usuarios de agua.

La intención es reforzar la atribución al dominio público de todas las aguas continentales -garantía de un bien de todos y para todos- y la incorporación de mecanismos de planificación como elemento esencial en la gestión del agua. Marcar los objetivos en materia de vertidos de una forma clara, la consideración adecuada del régimen económico; definir la regulación de las obras hidráulicas, tener un conocimiento real de los aprovechamientos y de los recursos para poder trabajar sobre ello, y dar más armas a la administración para tener las garantías de condición previa.

Argentina se inclinó hacia compañías privadas para que manejen los sistemas de aprovisionamiento de agua, lo cual trajo aparejado complicaciones en cuanto a costo y a la tecnología. Es imprescindible señalar que la privatización demanda que haya un seguimiento cercano por parte del aparato estatal.

En la provincia argentina de Tucumán, en razón del encarecimiento del suministro del agua que han sufrido los usuarios, existen presiones para que la compañía Vivendi Environnement abandone su contrato a largo plazo. Por otra parte, esta multinacional francesa alega que perdió 3 millones de dólares sólo en 1998; el tema está siendo sometido a arbitraje. La empresa demandó a la provincia pero perdió. La agencia regulatoria está renegociando el contrato y los consumidores exigen participar en él. Mientras tanto, la provincia busca una nueva compañía que maneje el sistema de abastecimiento de agua. En 1992, la empresa Suez cerró un contrato por 30 años para manejar el servicio de agua en el partido de Lomas de Zamora, -provincia de Buenos Aires- en donde hay problemas de exceso de suministro. La empresa culpa a la crisis Argentina, que impidió nuevas inversiones y que el gasto solamente se limite a mantener la infraestructura existente.

## **DOMINIO PRIVADO Y PÚBLICO DEL AGUA EN LA ARGENTINA**

La legislación argentina, en el Código Civil, establece las siguientes disposiciones con relación a las aguas de dominio público y privado y sus restricciones.

### **AGUAS DE DOMINIO PRIVADO**

- Las vertientes que nacen y mueren dentro de una misma heredad pertenecen, en propiedad, uso y goce, al dueño de la heredad.
- Las aguas pluviales pertenecen a los dueños de las heredades donde cayesen o entrasen.
- Los manantiales, es decir, aquellas aguas que surgen en terrenos particulares, corresponden al dueño del fundo.

### **AGUAS DE DOMINIO PÚBLICO**

- Mares territoriales hasta la distancia que determine la legislación especial.
- Mares interiores, bahías, ensenadas.
- Ríos, sus cauces.
- Demás aguas que corren por cauces naturales.
- Toda otra agua que tenga o adquiera la aptitud de satisfacer el uso de interés general.
- Aguas subterráneas, sin perjuicio del ejercicio regular del derecho del propietario del fundo de extraer las aguas subterráneas, en la medida de su interés y con sujeción a la reglamentación.
- Lagos navegables y sus lechos.

### **AGUAS SUBTERRÁNEAS**

Son las que existiendo en las profundidades de la tierra, no constituyen aguas que corren por cauces naturales; su origen debe buscarse en las lluvias, sin descartar aquellas que quedaron en el interior de la tierra [7]. El dominio público puede ser nacional o provincial.

### **RÍOS INTERIORES**

La Constitución Nacional (Art. 26) consagra que la navegación de los ríos interiores de la Nación es "libre" para todas las banderas, con sujeción únicamente a los reglamentos que dicte la autoridad nacional. El aprovechamiento hídrico corresponde a la jurisdicción provincial, porque las provincias se han reservado todos los derechos que no han delegado expresamente en la Nación.

### **AGUAS Y CUENCAS INTERPROVINCIALES**

El principio seguido por la legislación argentina en cuanto al "Dominio de las aguas" es que corresponde a la provincia y también su jurisdicción, salvo que las aguas fueran navegables, en cuyo caso la jurisdicción es "federal".

### **AGUAS INTERPROVINCIALES NO NAVEGABLES**

La doctrina es unánime con relación a las aguas interprovinciales no navegables respecto a que corresponden a las provincias en que se hallan o cruzan, tanto el dominio como la jurisdicción.

La utilización de un recurso limitado como el agua por parte de los distintos usuarios puede generar conflictos entre ellos. Por ejemplo, el usuario de un río aguas arriba puede tomar agua perjudicando al de aguas abajo. En el caso del agua subterránea sucede algo similar, si no se respeta una separación mínima entre pozos de la misma napa, se produce una interferencia entre ellos y los caudales que se pueden extraer se reducen.

Por tales motivos, en países o regiones donde el agua es un bien escaso, se ha desarrollado una legislación específica que regula su uso, resguarda los derechos legales de los usuarios, estableciéndose las bases para el arbitraje en los conflictos que se puedan originar (Pigretti, 1997).

## RESTRICCIONES

Restricciones al dominio privado por causa de interés público derivada de la navegación o flotación. La ley establece la obligación de dejar una calle o camino público de treinta y cinco metros hasta la orilla del río, obligación denominada servidumbre de sirga.

Restricciones al dominio privado basado en el interés privado y público de la mejor utilización económica de la propiedad en materia de aguas. El Código Civil establece:

- la obligación que tiene el dueño del fundo inferior de recibir las aguas que naturalmente desciendan de los terrenos superiores. "Es prohibido al dueño de un terreno superior agravar la situación del terreno inferior dirigiendo las aguas a un solo punto, o haciendo de cualquier modo más impetuosa la corriente que pueda perjudicar al terreno inferior".
- el propietario de un terreno ubicado en una zona baja tiene que soportar el agua que, naturalmente y sin la intervención del hombre, viene desde los campos altos. Y, de igual modo en que está obligado a sufrir por lo que no pidió, tampoco puede hacer nada para contener el agua que naturalmente llega a su establecimiento.
- "El dueño del terreno inferior no puede hacer dique alguno que contenga o haga refluir sobre el terreno superior las aguas, arenas o piedras que naturalmente descienden".

## SERVIDUMBRES REALES

De descarga (sobrantes del riego, de las industrias, del avenamiento, etc.) impuesta por la ley. El propietario inferior está obligado a recibir las aguas sobrantes, salvo la indemnización debida, y también la de permitir el paso de las aguas al procederse al avenamiento.

De recibir aguas de otro predio de los techos vecinos, siempre y cuando las mismas sean naturales y no servidas, y de sacar agua de la fuente, del aljibe, o del pozo. Actualmente, este tipo de restricciones, prácticamente carece de aplicación.

De carácter forzoso en virtud del interés público. La servidumbre de acueducto consiste en el derecho real de hacer entrar las aguas en un inmueble propio viniendo por heredades ajenas. Es siempre continua y aparente, y se aplica a las aguas de uso público, como a las aguas corrientes bajo la concesión de la autoridad competente; a las aguas traídas a la superficie del suelo por medio artificiales, como a las que naturalmente nacen; a las aguas de receptáculo o canales pertenecientes a particulares que hayan concedido el derecho de disponer de ellas.

## DERECHOS Y OBLIGACIONES EN LAS SERVIDUMBRES FORZOSAS

### a) Del dueño del fundo sirviente

- que se le pague un precio por el uso del terreno que fuese ocupado por el acueducto y el de un espacio de cada uno de los costados, que no baje de un metro de anchura, en toda la extensión de su curso. Este ancho podrá ser mayor por convenio de las partes [9]. También, se le abonará el 10 % sobre la suma total del valor del terreno, el cual siempre pertenecerá al dueño del predio sirviente.
- puede oponerse a que se construya otro acueducto en su terreno, ofreciendo paso por el suyo a las aguas de que otra persona quiera servirse, con tal que de ello no se siga un perjuicio notable al que quiera abrir un nuevo acueducto. Se le pagará el valor del suelo ocupado por el antiguo acueducto, incluso el espacio lateral; y se le indemnizará de todo lo que valga la obra en la longitud que aproveche el interesado. Si le fuese necesario ensanchar el acueducto, lo hará a su costa pagando el valor del terreno, y el espacio lateral, pero sin el 10% de recargo.

- puede usar de las aguas que corran por el acueducto descubierto, y llevarlas a su heredad, si con esto no causa perjuicio al predio dominante.
- no puede cubrir el acueducto abierto para utilizar el terreno ni plantar árboles en los lados del acueducto sin asentimiento del dueño de la heredad dominante.
- recibir indemnización de todo perjuicio de parte del que tiene acueducto en heredad ajena, si éste quisiere introducir mayor volumen de agua. Si para ello le fuere necesario obras nuevas, se observará lo dispuesto a la construcción de acueductos

b) Del dueño del fundo dominante

- a alzar o rebajar el terreno del inmueble sirviente a fin de hacer llegar a su destino las aguas del acueducto; también, podrá tomar la tierra o arena que le fuese necesaria.
- no podrá convertir el acueducto subterráneo en acueducto descubierto, ni el descubierto en subterráneo, privando al poseedor del inmueble sirviente el sacar agua o dar allí de beber a sus animales.

### 7.3. GESTIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

La gestión de recursos hídricos subterráneos se define como el conjunto de guías, normativas, leyes, reglamentos y actuaciones dirigidas a sostener, proteger, restaurar y regenerar esos recursos (Custodio, 1994). La gestión hace referencia a la cantidad, calidad y disponibilidad de agua subterránea y debe ser compatible con la demanda, con el medio ambiente y con la ordenación y uso del territorio. La gestión requiere considerar los costes y beneficios directos e indirectos, las prioridades y restricciones no valorables económicamente, el uso sostenible del recurso y el respeto a los derechos intergeneracionales.

Sabiendo que el agua es un recurso escaso y altamente vulnerable a las acciones antrópicas directas e indirectas de cualquier índole, es necesario crear un escenario donde toda la sociedad participe activamente en el control de todas las facetas vinculadas a la protección del recurso hídrico y de esa manera, no permitir que un tema tan esencial para la supervivencia de la especie humana misma, sea decisión de unos pocos, sean entes gubernamentales o empresas privadas, (García, 2008; García Maurizio, 2013).

La gestión de las aguas subterráneas no es un objetivo aislado, sino que se integra en la de otros recursos de agua, en la ordenación territorial y en los usos reales del territorio. Supone una asignación de agua que sea económica (no necesariamente barata) y equitativa y suficientemente flexible como para poder adaptarse a un mundo y sociedad cambiantes. La gestión de las aguas subterráneas incluye:

- ✓ Inventario de necesidades y usos
- ✓ Conocimiento de la demanda real y su evolución
- ✓ Disponer de suficiente información y conocimientos científicos y técnicos
- ✓ Disponer de suficiente personal debidamente formado en la temática
- ✓ Poseer medios de observación (monitoreo) de la cantidad y calidad del agua y también de los Impactos ambientales, sociales y territoriales de la explotación
- ✓ Ampararse en medidas administrativas y legales
- ✓ Disponer de medios de aplicación de la normativa vigente
- ✓ Recibir medios económicos adecuados
- ✓ Realizar campañas de información pública y de formación, etc.

Toda gestión ha de ser realista, aceptada socialmente, instrumentable, flexible, adaptada a cada circunstancia local y temporal, e integrada en el conjunto de recursos que requiere la sociedad.

Así como la **gestión** atañe al presente, con visión al futuro, la **planificación** se dirige al futuro considerando el presente. La segunda es la guía de la primera. La planificación no debe ser rígida en la definición de las actuaciones, sino un marco guía para ajustarse a situaciones poco previsibles. La planificación es un conjunto de guías, en un marco legal-administrativo, con directrices económicas orientadas a definir grandes líneas de actuaciones futuras y efectuar correcciones a medida que se observen desviaciones. El marco amplio a que debería limitarse una planificación debe incluir aspectos y criterios tales como:

- ✓ Técnicos en cuanto a calidad y cantidad del agua
- ✓ Económicos, tanto a escala micro como macro
- ✓ Sociales
- ✓ Legales
- ✓ Políticos
- ✓ De seguridad de suministro para usos humanos
- ✓ De atención a situaciones de emergencia y estratégicas
- ✓ De predictibilidad, de forma que sea posible prever como amortizar obras e inversiones

### El Monitoreo de la Calidad del Agua Subterránea como elemento de gestión

Con frecuencia se piensa únicamente en la cantidad de agua subterránea disponible y no en la calidad, característica que en determinadas circunstancias, puede decidir sobre su potencial uso.

En general, se define como Calidad del Agua (haciendo extensivo el termino tanto a las aguas superficiales como a las subterráneas) a la integración de las características y propiedades físicas-químicas, biológicas y radioactivas del agua; el estudio de estas propiedades tiene como objetivo diagnosticar en un determinado momento, el estado del agua para ser utilizada con un fin específico, ya sea sobre la base de Normas de Calidad vigentes o especificaciones requeridas según el uso destino.

La calidad del agua subterránea depende de varios factores como por ejemplo: el origen, tipo, composición litológica y otras características del acuífero, velocidad de circulación local y regional, tipo del agua infiltrada, tiempo de permanencia, etc. Además, las actividades humanas, suponen una importante amenaza de alteración (polución y/o contaminación) de las características naturales de esas aguas subterráneas, ello lleva a que sus propiedades físicas, químicas, radioactivas y biológicas se degraden afectando a los usos, a otras fases del ciclo hidrológico y al medio ambiente.



Ilustración 24: Contaminación del agua en un pozo por efecto de una fosa séptica.

### **Las Normas de Potabilidad como elemento de gestión**

Todos los países tienen legislaciones relacionadas con las aguas de consumo humano, las que sirven para determinar las responsabilidades de los distintos sectores involucrados en la producción y distribución del agua potable o agua de bebida (términos equivalentes), de su monitoreo y de su control.

Los países cuentan asimismo, con reglamentaciones que definen lo que se entiende por agua potable, es decir, los patrones que ésta debe seguir para que la misma sea inocua para la salud humana. Dentro de esas reglamentaciones de cada país, existe o debería existir, una muy específica que se denomina "Norma de Calidad de Agua de Bebida". Allí se establece qué sustancias pueden estar presentes en el agua y las concentraciones máximas y/o mínimas permisibles que no signifiquen riesgo para la salud. Es por esto que, no existe ningún país que no considere como herramienta principal para la confección y actualización periódica de sus Normas Nacionales, a las Guías OMS para la calidad del Agua Potable.

La normativa en nuestro país con respecto al agua para suministro público y de uso domiciliario, está regida por el Código Alimentario Argentino. Este define las características físicas, químicas (sustancias inorgánicas y contaminantes orgánicos) y microbiológicas que debe cumplir el agua para ser considerada Agua Potable de Suministro Público y Agua Potable de Uso domiciliario.

Artículo 982 - **(Res Conj. SPRyRS y SAGPyA N° 68/2007 y N° 196/2007)** "Con las denominaciones de Agua potable de suministro público y Agua potable de uso domiciliario, se entiende la que es apta para la alimentación y uso doméstico: no deberá contener sustancias o cuerpos extraños de origen biológico, orgánico, inorgánico o radiactivo en tenores tales que la hagan peligrosa para la salud. Deberá presentar sabor agradable y ser prácticamente incolora, inodora, límpida y transparente. El agua potable de uso domiciliario es el agua proveniente de un suministro público, de un pozo o de otra fuente, ubicada en los reservorios o depósitos domiciliarios.

### **La protección de la calidad como elemento de gestión**

La protección de los recursos hídricos subterráneos incluye todo el conjunto de acciones y disposiciones cuyo objetivo es conservar tanto la cantidad como la calidad. El concepto debe incluir todas las consideraciones de carácter social, económico, técnico y legal que tengan como objetivo preservar el recurso hídrico subterráneo, desde el punto de vista de su cantidad como la calidad en el presente y futuro.

Todas estas consideraciones deberán estar relacionadas con el criterio del uso sustentable del recurso. De acuerdo a lo definido por la World Commission on Environment and Development, (1987), el desarrollo sustentable es el desarrollo que satisface las necesidades presentes sin comprometer la capacidad de que las generaciones futuras puedan satisfacer las suyas.

La protección de los recursos hídricos subterráneos se basa en principios generales, hidrogeológicos, hidrológicos, ambientales, económicos y sociales. La protección conlleva costos económicos, unos de carácter general que gravan sobre una región o un territorio, y otros específicos que se deben pagar, al menos en parte, por los beneficiarios de la protección.

Todas las acciones y disposiciones, en el marco de la protección de los recursos hídricos subterráneos, necesitan una base institucional y adicionalmente un apoyo legal. Las autoridades de gestión deben considerar los siguientes pasos:

- ✓ Establecer políticas nacionales y/o regionales de control de contaminación de aguas subterráneas, para aliviar los problemas existentes y para prevenir la contaminación en áreas que aún no están afectadas.

- ✓ Revisar la legislación existente a fin de decidir si es adecuada para este propósito y modificarla si fuera necesario.

Las medidas o estrategias de protección de las aguas subterráneas contra la contaminación deben encontrar un balance realista entre la protección del conjunto de los recursos hídricos de un acuífero, sobre la base de mapas de vulnerabilidad, y la protección de fuentes puntuales de suministro (pozos, manantiales) en base a la delimitación de perímetros de protección.

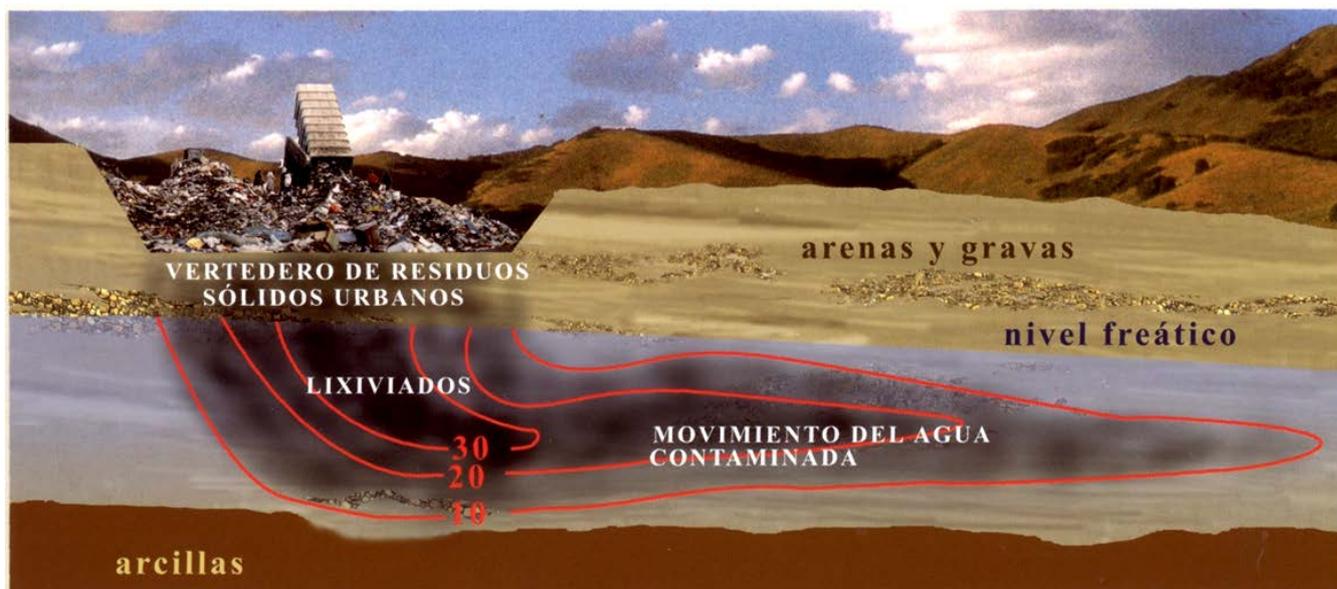


Ilustración 25: Contaminación del agua subterránea por lixiviados de un vertedero de residuos urbanos.

### **Determinación y Mapeo de la Vulnerabilidad como estrategia de protección de la calidad**

La Vulnerabilidad de las Aguas Subterráneas es una propiedad intrínseca de un acuífero que depende de la capacidad de ese sistema para resistir a los impactos humanos y naturales. Los parámetros principales para este tipo de análisis son: recarga, tipo de suelo, características de la zona vadosa, tipología de acuífero, topografía, naturaleza geológica de las capas suprayacentes, etc.

Existen distintos métodos para la determinación de los Índices de Vulnerabilidad, luego de obtenidos, es posible representarlos en forma cartográfica, de modo útil y adecuado para las tareas de Gestión. Los mapas son sombreados en tonos de rojo, indicando la vulnerabilidad creciente con una mayor intensidad de color. Se recomienda, en todos los casos, el mapeo de la Vulnerabilidad a la escala necesaria, teniendo en cuenta que, mapas a escala pequeña son de escasa utilidad pero ilustrativos, formativos y creadores de conciencia.

Los parámetros hidrogeológicos y la ubicación de las obras hidráulicas (por lo general extraídos directamente del mapa hidrogeológico) deberían conservarse en el mapa de vulnerabilidad, para uso en posteriores investigaciones más detalladas del riesgo de contaminación de aguas subterráneas en áreas seleccionadas. En el caso de la existencia de carga contaminante al subsuelo de fuentes puntuales de contaminación, es necesaria la realización de un inventario y localización de los mismos en un mapa a la misma escala que el anterior. Para fuentes de contaminación multipuntual dispersa, generalmente es más práctico delinear la extensión de las actividades relacionadas en el mapa de carga contaminante, con sombreado para representar la intensidad relativa con respecto a los principales contaminantes persistentes registrando los datos que sirven de consulta en el inventario tabulado.

Con la utilización de mapas de vulnerabilidad, se pretende alcanzar la siguiente secuencia de objetivos:

- ✓ Proporcionar una zonación de un área determinada tal que indique la posibilidad de penetración y difusión de un contaminante en un acuífero.
- ✓ Correlacionar estos datos con la presencia de fuentes puntuales o difusas de posible contaminación.
- ✓ Realizar una valoración del impacto sobre la calidad del agua subterránea para la prevención de sucesos de tipo catastróficos o derivados de accidentes o para reducir sus efectos.
- ✓ Definir los objetivos de la prevención y de la protección en la planificación del aprovechamiento y uso de los recursos de agua.
- ✓ Orientar la organización del control y seguimiento de la calidad del agua subterránea y del medio ambiente relacionado.
- ✓ Definir el cuadro de actuaciones en caso de emergencia hídrica.
- ✓ Orientar las decisiones de ordenación del territorio.
- ✓ Marcar prioridades en las aplicaciones presupuestarias.
- ✓ Mejorar la educación general.

Todo esto hace que un mapa de vulnerabilidad no sea una herramienta de uso universal para no especialistas, de forma que personas inexpertas en el tema, no pueden decidir con garantías, en base a esos mapas, sobre la planificación del agua subterránea, ordenación del territorio y normas de uso en relación a actividades y sustancias contaminantes.

#### **Determinación de Perímetros de Protección de captaciones como estrategia de protección de la calidad**

La importancia de las captaciones de agua subterránea (manantiales, pozos y drenes), como fuentes de suministro de agua potable, ha llevado a intentar su protección mediante el establecimiento de Zonas o Perímetros de Protección en el entorno de la misma, en estas zonas, se establecen, en forma gradual, restricciones al uso del territorio y a actividades que supongan un riesgo de contaminación.

La creación de zonas de protección garantiza a largo plazo la existencia segura del recurso hídrico subterráneo sin contaminación para que éste pueda ser utilizado en el momento o en un futuro como fuente para abastecimiento público de agua.

El área de protección más amplia que se puede definir para un pozo o manantial es la de captación y recarga. Esta es el área dentro de la cual toda recarga del acuífero, ya sea proveniente de precipitación o infiltración de agua superficial, será captada. Es por ello que, para eliminar completamente el riesgo de contaminación, toda actividad potencialmente contaminadora tendrá que ser prohibida o controlada en el ámbito requerido dentro de toda la zona de captación. Esto será frecuentemente insostenible debido a presiones socioeconómicas, entonces se requerirá efectuar alguna subdivisión de la zona de captación para aplicar restricciones más severas en aquellas áreas cercanas al pozo o manantial.

Las zonas de protección se delimitan teniendo en cuenta las condiciones hidrogeológicas del ambiente y en especial, la extensión de la zona de recarga de las captaciones a proteger.



Ilustración 26: Zonas de protección de una captación (pozo).

**Zona de Protección I o Zona Inmediata:** Debe rodear a la captación por los lados por lo menos con un radio de 10 metros.

**Zona de Protección II o Zona Próxima:** Depende principalmente de la “línea de los 50 días”. Aguas arriba de la captación debe haber, por lo menos, 100 metros. Como regla, esta zona de protección no necesita ser tan grande hacia todos los lados y aguas abajo del pozo como la zona de anterior. En el caso de que los datos hidrogeológicos sean insuficientes o exista una fuerte fluctuación del caudal de descarga, esta zona debe ser mayor (como medida de seguridad).

**Zona de Protección III o Zona Alejada:** Generalmente debe extenderse hasta los límites de las zona de recarga de la captación.

Para definir las restricciones del uso de la tierra en las zonas de protección, se deben tener en cuenta las actividades agrícolas, ganaderas, forestales, industriales, mineras, de transporte (rutas, ferrocarriles, poliductos, etc.), urbanas, prospección y penetración del subsuelo, explotación del recurso por otros usuarios, etc. Pueden citarse algunas restricciones aplicadas al uso de la tierra para cada una de las zonas de protección:

Para la **Zona de Protección I o Inmediata:** propiedad de la empresa que presta el servicio. Esta zona debe garantizar la protección directa sobre los alrededores inmediatos de las captaciones o manantiales contra la contaminación. Deberá estar cerrada y controlada con prohibición de realizar cualquier actividad.

Para la **Zona de Protección II o Próxima:** se autoriza solo actividades no contaminantes, cierto tipos de almacenamientos y en general una circulación restringida al tránsito de personas y vehículos. Debe garantizar la protección contra la polución causada por el establecimiento humano y sus actividades, particularmente aquellas que ponen en riesgo la calidad del agua por su cercanía a las captaciones o a manantiales. El límite de esta zona se extiende a un tiempo de transferencia de 50 días alrededor del área de captación. Dentro de los límites de la zona de protección II son válidas todas las restricciones para la zona III y tampoco está permitido la presencia de edificios para uso comercial o agrícola, establos, depósitos para materiales para la construcción, rutas, vías de ferrocarril y otras instalaciones para el tráfico, estacionamiento de vehículos, expendio de combustibles y otros servicios, talleres mecánicos, lugares para acampar, predios deportivos, cementerios, extracción de áridos, actividad minera si causa destrucción de capas protectoras y subsidencia de suelos, explosiones, apertura y uso inapropiado de fertilizantes minerales, transporte de sustancias radiactivas y residuales, etc.

Para la **Zona de Protección III o Lejana**: se establecen restricciones de uso del terreno en relación a la instalación de establecimientos industriales o urbanizaciones o a determinadas actividades agrícolas, y a la existencia de vías de comunicación. Esta zona debe garantizar la protección contra peligros serios especialmente los causados por sustancias químicas no degradables o altamente degradables y contaminantes radiactivos. Tampoco está permitido: filtrado de aguas residuales, incluyendo aguas de alcantarillado de rutas, caminos y lugares pavimentados; filtración de sustancias radiactivas, refinerías, plantas metalíferas, plantas químicas, etc. si no tratan y remueven estas sustancias cuidadosamente; plantas nucleares, almacenamiento y disposición de sustancias radiactivas o peligrosas, cañerías de conducción muy largas para transportar sustancias peligrosas para la calidad del agua, ubicación de vertederos, depósitos de basura, cementerios de autos y chatarras, plantas de tratamiento de efluentes, etc.

Los programas de protección de las aguas subterráneas son sin duda la estrategia menos costosa y más favorable para la salud pública y el medio ambiente. Deben tener una autoridad legal e institucional adecuada y estructuras estables para ser efectivos. Deben incluir una instrumentación legal apropiada, financiación asegurada a largo plazo, personal suficiente y estrategias de operación estables y mecanismos de financiación para que la actividad perdure.

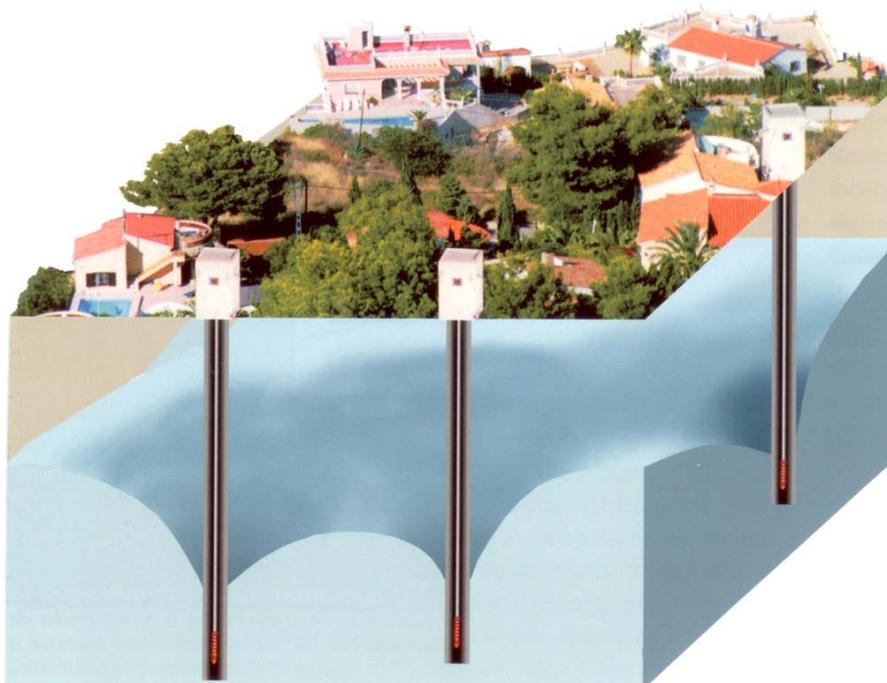
Luego de establecer las estrategias y programas de protección de los recursos hídricos subterráneos, los entes oficiales serán los encargados de incluirlas e instrumentarlas en el plan de Gestión.

### **La protección de la cantidad del agua subterránea como elemento de gestión**

La protección de la cantidad de agua de un sistema hídrico subterráneo, pretende el uso sostenido de los recursos de agua. El uso intensivo del agua subterránea se está convirtiendo en una situación corriente en muchas áreas del mundo, especialmente en las áridas y semiáridas, y en islas pequeñas y zonas costeras. En la mayoría de circunstancias se puede utilizar a los recursos hídricos subterráneos para suministrar agua dulce a la población local, con beneficios evidentes para el fomento del desarrollo regional. Los acuíferos son un recurso de agua fiable para el suministro de agua y para el riego de cultivos, con un coste razonable y que emplea tecnología disponible.

El agua subterránea es un recurso hídrico clave en el alivio de la pobreza, en la lucha contra la desnutrición y las hambrunas, y en la mejora de las condiciones de salubridad de la población. Sin embargo:

- ✓ El agua subterránea ni resolverá todas las situaciones ni debería ser fomentada como un recurso ilimitado, lo que llevaría a un crecimiento incontrolado en el uso de la misma.
- ✓ Los problemas y las circunstancias locales pueden necesitar consideración especial o de inversión adicional, como en el caso de algunos acuíferos fracturados en zonas áridas, o cuando aparecen componentes disueltos peligrosos, como el arsénico o el fluoruro.
- ✓ Las cuestiones ambientales relacionadas con el agua subterránea pueden ser importantes, especialmente cuando el área se va desarrollando en términos económicos y educativos.
- ✓ El desarrollo intensivo del agua subterránea puede producir algunos efectos colaterales negativos. Estos efectos negativos se refieren en su mayor parte al descenso del nivel del agua subterránea, el agotamiento del almacenamiento, la interferencia con manantiales, agua superficial y ecosistemas dependientes y, a veces, el deterioro de la calidad del agua.



*Ilustración 27: explotación intensiva del agua subterránea.*

#### 7.4. CONSORCIO DE USUARIOS

Se denomina consorcios de usuarios a las personas físicas o jurídicas que se agrupen o se constituyan para el uso de agua pública sea agua superficial o agua subterránea. De acuerdo a esta definición, los consorcios son personas del Derecho Público y Privado, sin fines de lucro, autárquicos y conforman entes públicos no estatales.

De esta manera, las aguas del dominio público son adquiridas por los particulares por medio de la concesión y el permiso. La concesión le brinda al usuario un “derecho al uso, sin que ello signifique garantía del uso mismo”.

Desde el momento en que se establece el acto administrativo de su reconocimiento, el consorcio será responsable del suministro, distribución del agua y evacuación de sus excedentes en su zona de influencia y a tales fines de la infraestructura hidráulica comprendida en la misma; todo ello de acuerdo a los reglamentos, planes e instrucciones que imponga la Autoridad de Aplicación. Asimismo los consorcios asumirán responsabilidades exclusivas por los daños y perjuicios provocados a terceros con motivo de los hechos, actos u omisiones de cualquier naturaleza resultante de su propia actividad, la de sus dependientes y contratistas.

Corresponderá también a los consorcios vigilar que los usuarios hagan uso racional y eficiente de las aguas, dando aviso inmediato a la Autoridad de Aplicación de cualquier irregularidad que pueda producirse. El consorcio y sus miembros serán solidariamente responsables ante el Estado o la Autoridad de Aplicación respecto de las contribuciones a que estén obligados como usuarios de agua pública. Los usuarios que forman parte del consorcio deben pagar un “canon” por “el derecho al uso” del agua.

El Estado o la Autoridad de Aplicación le brindan el Derecho para que el consorcio use agua del Dominio Público de una fuente pública. De acuerdo a ello, el “Estado” no delega facultades, sino que llama a los propios interesados del manejo del recurso, al automanejo controlado o autogestión.

## 7.5. RÉGIMEN DEL AGUA EN EL ORDEN NACIONAL Y PROVINCIAL

La República Argentina tiene un sistema de gobierno federal compuesto por 23 provincias y la Ciudad Autónoma de Buenos Aires. Según la Constitución Nacional, a las provincias les corresponde el dominio de los recursos naturales existentes en su territorio. Existen también poderes concurrentes, cuyo ejercicio corresponde indistinta y simultáneamente al gobierno nacional y provincial.

Argentina dispone de una oferta hídrica media anual por habitante muy importante. La misma es superior a los 22.500 m<sup>3</sup> por habitante, muy por encima del umbral de stress hídrico adoptado por el PNUD equivalente a una disponibilidad de 1000 m<sup>3</sup> por habitante. No obstante la distribución de la oferta es muy irregular, por lo que en varias provincias de la región árida y semiárida, la disponibilidad de agua se ubica por debajo de ese valor, recordando que casi el 65 % del país se encuentra bajo condiciones climáticas áridas o semiáridas.

En temas relacionados directa o indirectamente con los recursos hídricos, según la Constitución, la Nación ejerce jurisdicción sobre la navegación, el comercio interprovincial e internacional, la celebración de tratados internacionales y el dictado de los Códigos Civil, Penal, de Minería, de Comercio, y de Trabajo y Seguridad Social.

La legislación nacional actual está constituida por las normas contenidas fundamentalmente en el Código Civil, el Código de Comercio, el Código de Minería, el Código Penal y leyes federales como las de energía, navegación, transporte, puertos, protección del ambiente y de los recursos naturales, entre otros, las que contienen disposiciones directa o indirectamente relacionadas con el agua. A su vez la Nación ha ratificado tratados internacionales sobre aguas compartidas, ingreso de buques nucleares en aguas argentinas, préstamos para obras de abastecimiento de agua potable y saneamiento urbano y rural, construcción de obras de uso múltiple y otros cuya normativa involucra directa o indirectamente al agua (Pochat, 2005).

A pesar de la legislación existente, durante años la GIRH en Argentina se caracterizó por una gran fragmentación sectorial e institucional que no hizo más que agudizar desequilibrios sociales y territoriales. La comunidad hídrica argentina comenzó a tomar conciencia del deterioro en la gestión de los recursos hídricos y se vio motivada para corregir el rumbo actual del manejo de las aguas. Se sostuvo, desde un principio, en que el primer paso debería ser la creación de bases jurídicas sólidas que permitieran una gestión eficiente y sustentable de los recursos hídricos.

La visión compartida por la comunidad hídrica argentina fue que el aprovechamiento de los recursos hídricos debe realizarse armonizando los valores "social", "económico" y "ambiental" que la sociedad le adjudica al agua. También reconoce que la consideración aislada de estos tres valores puede provocar acciones antagónicas o excluyentes entre sí. Por lo tanto, concluye que la única forma de utilizar el agua en beneficio de toda la sociedad provendrá de encontrar el balance en la aplicación de estos tres valores que guían la política hídrica; que sólo será posible alcanzar a través de la participación ciudadana en los procesos de toma de decisiones. En marzo de 2003 los representantes de las jurisdicciones provinciales, suscribieron el Acta Constitutiva del Consejo Hídrico Federal (COHIFE), como ámbito de discusión, concertación y coordinación de la política hídrica en el que participan las provincias, la ciudad autónoma de Buenos Aires y la Subsecretaría de Recursos Hídricos. Desde su creación, este organismo ha desarrollado una labor de consolidación del espacio institucional y un esfuerzo de funcionamiento y desarrollo con activa participación de sus miembros. En septiembre de 2003, el COHIFE suscribió el Acuerdo Federal del Agua y los Principios Rectores de Política Hídrica, y se acordó elevarlos al Congreso Nacional para materializar una normativa a través de una ley Marco Nacional de Política Hídrica.

Durante los últimos años la sociedad argentina tomó conciencia de la vulnerabilidad y deterioro de la gestión de sus recursos hídricos, dándole la motivación para corregir el rumbo actual. Se coincidió en que el primer paso en esa dirección es definir la visión que conduzca a una base jurídica sólida que garantice una

gestión eficiente y sustentable de los recursos hídricos para todo el país. Con tal fin, y a instancias de la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación, las provincias argentinas convocaron a los sectores vinculados con el uso, gestión y protección de sus recursos hídricos, buscando establecer la visión que indique “qué es el agua para nosotros”, y al mismo tiempo señale la forma de utilizarla como “motor de nuestro desarrollo sustentable”. De dicha visión se desprende que el aprovechamiento de los recursos hídricos debe realizarse armonizando los aspectos “sociales”, “económicos” y “ambientales” con que nuestra sociedad identifica al agua. Se reconoce que la única forma de lograr utilizar sustentablemente el agua en beneficio de toda la sociedad provendrá de encontrar el balance justo en la aplicación de estos tres faros que deben guiar nuestra política hídrica.

Como corolario del esfuerzo mancomunado de todas las jurisdicciones en definir Principios Rectores de Política Hídrica, y a través de la instancia de consenso que posibilitó el Consejo Hídrico Federal (COHIFE), es posible en la actualidad traducir la visión lograda en una Ley Marco de Política Hídrica, coherente y efectiva, que respetando las raíces históricas de cada jurisdicción, conjugue los intereses provinciales, regionales y nacional en una gestión integrada de los recursos hídricos que minimice los conflictos relacionados con el agua.

## **7.6. MANEJO DE CUENCAS INTERPROVINCIALES, INTERNACIONALES E ITERJURIDICIONALES**

El régimen fluvial de la red hidrográfica argentina (entendido como el comportamiento del caudal de los cursos de agua a lo largo del año hidrológico), salvo algunas excepciones, muestra como característica predominante su irregularidad, derivada de la incidencia de factores tales como: las variaciones sufridas por las fuentes de alimentación, la naturaleza geológica y topográfica de los terrenos surcados por los cursos de agua, su cobertura vegetal, una intensa regulación mediante obras de ingeniería, entre otros. A tal condicionante para el manejo de las cuencas hidrográficas superficiales del país, se suma el hecho de que la mayoría de los sistemas fluviales desbordan los límites jurisdiccionales, tanto entre provincias como entre naciones, de su territorio, lo cual significa, entre otras consideraciones, restricciones al uso del agua y ciertas limitaciones –en especial en los casos en que el país se halla ubicado aguas abajo– al recibir las influencias de los usos a que el río se ve sometido en sus diferentes tramos.

Todo cuerpo de agua que trasciende los límites políticos de un Estado (provincial o nacional) es concebido como compartido; en el caso de las cuencas hidrográficas superficiales, son compartidas con plena soberanía territorial sobre la parte de la cuenca perteneciente a cada Estado. Tal concepción primaria parece la más acertada a la luz de una perspectiva jurídica y práctica, en consideración a la realidad impuesta por la natural indivisión de las aguas y la necesidad de participar del usufructo de los recursos asociados, situación que conduce a la discusión en torno a lo que se comparte: si además del curso del río principal, también se comparten sus tributarios, el agua subterránea, el resto de los recursos naturales geográficamente contenidos por la cuenca.

Así como a nivel nacional el Estado ejerce el dominio sobre las aguas que nacen y mueren dentro de su territorio, cuando se trata de cursos compartidos por dos o más Estados, éstos ejercen cierta forma de condominio o soberanía compartida de sus aguas, sobre la base de su natural indivisión.

En términos generales, se denomina internacional a la cuenca cuyo curso colector atraviesa dos o más Estados o les sirve de frontera. En tal sentido, son nacionales, los ríos que se ubican íntegramente en el territorio de un solo Estado, en tanto que son ríos internacionales, los que pueden caer bajo la soberanía de varios Estados y en diversas formas, ya sea porque separan a dos Estados o atraviesan sucesivamente a dos o más Estados. Si se trata de ríos de curso sucesivo, la determinación de la frontera entre los Estados está dada por una línea imaginaria que atraviesa el río y se conecta con los límites exteriores de las fronteras territoriales en cada un punto ubicado en cada una de las orillas; en tanto que, para el caso de ríos

contiguos, la determinación de la frontera entre los Estados depende de factores geográficos físicos, tales como el comportamiento y el tamaño del río, lo cual implica una mayor complejidad en su reconocimiento.

Argentina posee varios ríos limítrofes internacionales: con Bolivia (Grande de San Juan, Bermejo, Grande de Tarija, Itaú, y Pilcomayo), Paraguay (Pilcomayo, Paraguay, y Paraná), Brasil (Iguazú, San Antonio, Pepirí Guazú y Uruguay) y Uruguay (Uruguay y de la Plata). Asimismo, importantes ríos transfronterizos o sucesivos, fluyen dentro del territorio nacional, luego de superar la frontera con el territorio de otro país, hasta su desembocadura, en condición de tercer país, como los casos de los ríos Paraná y Uruguay.

Es necesario abordar el tratamiento del marco regulatorio nacional de los recursos hídricos, puesto que se produce un proceso de influencia recíproca entre la política nacional, el derecho nacional, la política internacional y el derecho internacional, sin que sea posible realizar la división tajante entre un derecho nacional de regulación hídrica destinado a regir los temas nacionales sólo hasta la frontera y un derecho internacional que rija de las relaciones con otros estados, por cuestiones de tipo geográficas.

Uno de los escollos más importantes para la implementación práctica del concepto de Cuenca hidrográfica o de drenaje radica en que, en muchos supuestos, las cuencas hidrográficas no siguen los límites o fronteras de los estados y entonces los estados que poseen una importante porción de su territorio dentro de cuencas compartidas o transfronterizas. Ante una Cuenca que presenta esas características y adquiere la naturaleza de recurso compartido, la división entre lo nacional e internacional se torna compleja. Surge así el interrogante: ¿podrían esos estados que comparten el recurso hídrico ignorar su naturaleza en su legislación nacional? Se opta por una respuesta negativa, estos casos patentizan la necesidad de un enfoque que, respetando los principios fundantes de cooperación entre estados, posibiliten el manejo sustentable y la gobernanza del recurso compartido.

Como ya se ha señalado, las cuencas hídricas son en su mayoría interjurisdiccionales, pues recorren más de una provincial, y en algunos casos su recorrido es internacional.

La ley 25.688 reavivó una discusión de larga data: la referida a la competencia en materia de cuencas que abarcan el territorio de diferentes jurisdicciones, es decir, la cuestión federativa de quién tiene la potestad constitucional de regular el uso compartido de las aguas que corren por más de una provincia, a la que se suma la controversia que gira en torno a quién corresponde la decisión superior cuando se suscitan disputas respecto a obras o actividades a ejecutarse en una jurisdicción que puedan afectar a otras o al manejo racional y equitativo de la unidad.

La postura inicial del Gobierno Nacional fue la asunción de facultades normativas con la finalidad de racionalizar y armonizar el manejo de las cuencas interprovinciales. Parte de la doctrina y jurisprudencia ha sostenido que el dominio del agua, sea interprovincial o no, corresponde a las provincias en que se encuentre.

Sin embargo, ese dominio público de las provincias no es exclusivo, por cuanto ellas deberán permitir los usos sujetos a la legislación y jurisdicción nacional (como el navegatorio) y deben respetar las limitaciones y prohibiciones establecidas por Código Civil (art. 2646) respecto a su uso y goce. Su *jus abutendi* se halla restringido ya que no pueden pasar aguas del dominio público al privado ni degradarlas (ley 2.797). Coincidiendo con Valls se sostiene que la incorporación del agua al dominio público de las provincias es solamente un paso hacia el manejo integral de las cuencas por no concentrar el poder de decisión sino distribuirlo entre los titulares de ese dominio y el gobierno federal que ejerce la jurisdicción delegada por la Constitución Nacional. Por ello, en el caso de una cuenca interprovincial debe concurrir la voluntad de pluralidad de provincias. Solo la concertación de todas esas voluntades logra alcanzar el objetivo del manejo integral e integrado (Martínez, 2004). Las soluciones doctrinarias respecto a la regulación de las aguas y cuencas interjurisdiccionales son: 1. Regulación por el Congreso Nacional, 2. Regulación por tratado interprovincial

Los poderes públicos han adoptado, alternativamente, ambas orientaciones doctrinarias.

Desde la práctica, en la búsqueda de superar las dificultades interpretativas en lo referido a los ríos y cuencas interprovinciales, se crearon organismos federales, como ámbitos de concertación, invitando a las provincias implicadas a adherir. Por su parte las provincias utilizaron la herramienta brindada por el tratado interprovincial para acordaran entre sí las normas que consideraron más adecuadas para la administración de las cuencas por ellas compartidas. También, el Estado Nacional participó con las provincias en acuerdos que dieron lugar a la creación de Comités de Cuencas Hídricas.

Asimismo, y con la finalidad de evitar inconvenientes en lo referente a la toma de decisiones derivadas de la pluralidad de normativa y jurisdicciones, se han realizado acuerdos interjurisdiccionales que adoptan la forma de ley de adhesión o de acuerdo interjurisdiccional.

Este proceso de federalismo de concertación, de desarrollo dispar, presenta distintos grados de organización institucional de organismos de cuencas hídricas interjurisdiccionales.

Los organismos interjurisdiccionales de cuenca pueden ser clasificados en dos categorías (Cavalli, 2007): los que tienen personería jurídica y los que carecen de ella.

#### **Un caso paradigmático: La Cuenca Matanza-Riachuelo. La autoridad de Cuenca.**

Merece mención especial el caso de esta Cuenca, caracterizada por la superposición de varias jurisdicciones (nacional, provincial –Provincia de Buenos Aires– CABA y municipal (11 municipios). Son múltiples los órganos competentes y existe una gran diversidad de normas jurídicas dispersas de esas jurisdicciones, aplicables a la cuenca. Existieron intentos fallidos de coordinar el accionar entre las autoridades jurisdiccionales involucradas y órganos competentes.

Finalmente, y en el marco de una contienda judicial promovida como consecuencia de la difícil situación ambiental y el daño ambiental colectivo, se constituye la actual Autoridad de la Cuenca Matanza-Riachuelo (ACUMAR).

#### **El ámbito internacional: Los acuerdos suscriptos por Argentina**

Como se conoce, Argentina posee varios ríos limítrofes internacionales, importantes ríos transfronterizos o sucesivos y una enorme cuenca hidrográfica, con varias subcuencas.

Corresponde analizar los principales instrumentos internacionales concluidos para su regulación, atender a su alcance y los organismos constituidos para lograr los fines propuestos.

Alguno de ellos, vinculados con la gobernanza de las cuencas compartidas, son considerados por los expertos entre los más relevantes en Sudamérica (Iza, Rovere, 2006)

**Tratado de la Cuenca del Plata:** Una regulación integral para el manejo sustentable del recurso: Suscrito en Brasilia en 1969 entre Argentina, Bolivia, Brasil, Paraguay y Uruguay, es un acuerdo marco para promover el desarrollo armónico y equilibrado, el óptimo aprovechamiento de los recursos naturales y el desarrollo sustentable de la cuenca. Adopta el concepto de cuenca, toda vez que se refiere a la “Cuenca del Plata y de sus áreas de influencia directa y ponderable”. Es considerado la piedra angular de la integración física regional, puede ser considerado como precursor, tanto en materia de protección ambiental como en la generación de una infraestructura y comunicaciones acordes con lo que, más de dos décadas después, sería el MERCOSUR.

**Tratado del Río de la Plata y su Frente Marítimo:** Fue suscripto por Argentina y Uruguay, en Montevideo en 1973. Comprende dos partes principales: Río de la Plata y Límite Lateral Marítimo. Fuera del Río de la Plata, el Tratado regula el llamado Límite Lateral Marítimo. Crea la Comisión Administradora.

**Estatuto del Río Uruguay:** La regulación de un curso de agua compartido. El “Estatuto del Río Uruguay”, suscrito entre la Argentina y Uruguay el 26 de Febrero de 1975 reconoce como principal antecedente “El Tratado de Límites del Río Uruguay” de 1961. La Comisión Administradora del Río Uruguay (CARU) es un organismo internacional creado por las partes como concreción de su voluntad de ambas de institucionalizar un sistema de administración global del Río Uruguay en el tramo compartido, con el propósito de contar con un mecanismo idóneo para un “óptimo y racional aprovechamiento del Río” (Art.1°) Los diferentes usos del río requieren una regulación jurídica, por lo que la C.A.R.U ha dictado un conjunto de normas conocido como “Digesto sobre usos del Río Uruguay”.

**Acuerdo para el Aprovechamiento Múltiple de los Recursos de la Alta Cuenca del Río Bermejo y del Río Grande de Tarija:** Bajo la inspiración del Tratado de la Cuenca del Plata: En 1996, Argentina y Bolivia, haciendo uso de las facultades otorgadas por el citado Tratado, que prevé la suscripción de acuerdos específicos (art. 6), suscribieron en Orán, Salta, República Argentina, el acuerdo tendiente a establecer un mecanismo técnico jurídico permanente, responsable de la administración de la Alta Cuenca del Río Bermejo y del Río Grande de Tarija, para impulsar el desarrollo sustentable de su zona de influencia, optimizar el aprovechamiento de sus recursos naturales, generar puestos de trabajo, atraer inversiones y permitir la gestión racional y equitativa de los recursos hídricos y constituyó la Comisión Binacional para el Desarrollo de la Alta Cuenca del Río Bermejo y el Río Grande de Tarija.(COBINABE).

**Acuerdo Constitutivo de la Comisión Trinacional para el Desarrollo de la Cuenca del Río Pilcomayo:** Suscripto entre Argentina, Bolivia y Paraguay en La Paz, en 1995, constituye la Comisión Tripartita, para cumplir los objetivos de la Declaración de Formosa, (1994).

**El Acta de Santiago sobre Cuencas Hidrológicas:** El eje de un sistema de instrumentos complementarios de neto corte ambiental. El manejo integral de cuencas hidrográficas. Fue suscrita por los cancilleres de la República Argentina y la República de Chile el 26 de junio de 1971. Ha servido de base al Protocolo sobre Recursos Hídricos Compartidos, adicional al Tratado sobre Medio Ambiente entre Chile y Argentina, firmado en Buenos Aires, en 1991. Este Protocolo, partiendo del concepto de manejo integral de las cuencas hidrográficas resalta el deber de no causar perjuicio a los recursos hídricos compartidos, a la cuenca común o al ambiente; establece un Grupo de Trabajo dentro de la Subcomisión de Medio Ambiente para determinar y priorizar los recursos hídricos compartidos y elaborar los planes generales de utilización; y determina la necesidad de realizar una evaluación de impacto ambiental para la introducción de especies exóticas en los recursos hídricos compartidos.

#### **El ámbito de integración regional: Mercosur**

Argentina es uno de los estados parte del Mercado Común del Sur (Mercosur), constituido por el Tratado de Asunción de 1991, al igual que Uruguay, Brasil y Paraguay. Mediante acuerdos posteriores, Chile (1996) y Bolivia (1997) han adquirido el carácter de estados asociados.

Por tanto, corresponde, para completar el panorama, atender a la principal normativa surgida en el seno del Mercosur de implicancia en la materia.

#### **Acuerdo Marco sobre Medio Ambiente del MERCOSUR**

Suscripto por los estados parte en Asunción el 22 de junio de 2001. El Acuerdo tiene por objeto el desarrollo sustentable y la protección del ambiente, mediante la articulación de las dimensiones

económicas, sociales y ambientales, contribuyendo a una mejor calidad del ambiente y de la vida de la población (art. 4°).

**De una discreción justificada por la novedad y el enfoque: Acuerdo sobre el Acuífero Guaraní en el marco del Mercosur.** El Acuífero Guaraní, con una extensión calculada en más de un millón de Km<sup>2</sup>, es uno de los reservorios de agua subterránea más grandes del mundo. Es un recurso compartido entre los estados parte del Mercosur. El acuerdo fue suscripto, en el 39º Encuentro Regional de Presidentes del Mercosur realizado en San Juan, República Argentina el 2 de agosto de 2010. La importancia del instrumento radica en que en pocos años el Mercosur logró sancionar un verdadero Estatuto para el Sistema Acuífero Guaraní. La asignatura pendiente del instrumento es su silencio respecto a la gestión conjunta e integrada del agua subterránea con las demás aguas de la cuenca en que yace, su valor destacable es haber provisto al Acuífero Guaraní un verdadero estatuto.

---

## 6. BIBLIOGRAFÍA

Aller, L.; Bennett T.; Lehr, J.; Petty, R. y G. Hackett. 1987. "DRASTIC: a standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings". Robert S Keer Environmental Research Laboratory Office of Research and Development U.S. Environmental Protection Agency, ADA, Oklahoma 74820. USA.

Appelo, C. y Postma, D. 1993. *Geochemistry, groundwater and pollution*. Balkema, 536 pp.

Amstrong, D.E; Conrad, J.G. 1974. Non biological degradation of pesticides. En: W. D. Guenzi (Edit.) *Pesticides in soil and water*. Soil sci. soc. Am. Inc. Pub. Madison.

Balke, K. D. 1994. *Well Construction and Water Catchment*. International Advanced Studies Course. Hydrogeology and Engineering of Tropical and Subtropical Regions. Institut fur Geologie und Palaontologie, Tübingen, Germany.

Balke, K. D. 1995. *Hidrogeología de Regiones Tropicales y Subtropicales*. Tomo I. International Advanced Studies Course. Hydrogeology and Engineering of Tropical and Subtropical Regions. Institut fur Geologie und Palaontologie, Tübingen, Germany. Cátedra de Hidrogeología. Universidad Nacional de Salta, Argentina.

Bear, J., 1972. *Dynamics of fluids in porous media*. Elsevier, 764 pp.

Boulding, J.R. 1995. *Practical handbook of soil, vadose zone and groundwater contamination: assessment, prevention and remediation*. CRC. Press. Lewis Publishers. 948 pp.

Boulton, N. S. 1954. The drawdown of the water – table under nonsteady conditions near a pumped well in an unconfined formation. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers (part III)*, pp 564-579.

Bundschuh, J y G. Ehardt. 1995. *Hidrogeología Aplicada*. Tomo IX. Flujo y Transporte en Aguas Subterráneas. Modelos Analíticos y Numéricos. Fundamentos, Ejemplos y Ejercicios. Universidad Técnica de Darmstadt, Alemania. Universidad Nacional de Salta, Argentina. Cátedra de Hidrogeología. Universidad de Tübingen, Alemania, Hydrogeology of Tropical and Subtropical Regions.

Caballero, J, 1996. *Movilidad del herbicida glifosato a través de la zona no saturada*. Tesis de Master. UPC. 230 pp.

Candela, L., Varela, M, 1993. *La zona no saturada y la contaminación de las aguas subterráneas*. Teoría medición y modelos. CIMNE, 322 pp.

Campbell, G., 1974. A simple method for determining unsaturated hydraulic conductivity from moisture retention data. *Soil Science*, 117: 311-314.

Chapelle, F.H, 1992. *Ground-water microbiology and geochemistry*. John Wiley. 423 pp.

Custodio, E y M.R Llamas. 1996. *Hidrología Subterránea*. Tomos I y II. Segunda Edición Corregida. Editorial Omega. España.

Dalton, F.N.; Herkelrath, W.N; Rawlings, D.S. y Rhoades, J.D, 1984. Time-domain reflectometry: simultaneous measurements of soil water content and electrical conductivity in a single probe. *Science*, 224: 989-990.

Davis, S y R. De Wiest. 1971. *Hidrogeología*. Ediciones Ariel. Barcelona, España.

Dean, T.J; Bell, J.P; Baty, A.J.B. 1987. Soil moisture measurements by an improved capacitance technique. Part 1. Sensor, design and performance. *Journ of Hydrol.*, 93: 67-78.

Ebhardt, G y J. Bundschuh. 1995. *Hidrogeología Aplicada*. Tomo XV. Depósitos de Residuos e Industrias Abandonadas. Contaminación, Saneamiento y Protección de las Aguas Subterráneas. Universidad Técnica de Darmstadt, Alemania. Universidad Nacional de Salta, Argentina. Cátedra de Hidrogeología. Universidad de Tübingen, Alemania, *Hydrogeology of Tropical and Subtropical Regions*.

EPRI, 1985. A review of field-scale physical solute transport processes in saturated and unsaturated porous media. EA -4190 Research Project 2485-5. Tennessee Valley authority.

Erven. 1998. Vulnerabilidad a la contaminación de las aguas subterráneas por actividades urbanísticas en la comunidad valenciana. Serie: Publicaciones de divulgación técnica. Colección: Cartografía Temática. N°2.

Fetter, C.W. 1988. *Applied Hydrogeology*. Second Edition. Macmillan.

Freeze, R.A. y J.A. Cherry (1979). *Groundwater*. Prentice Hall. 604 pp.

Formento, S y A. Ferrazzino. 2003. El Agua: Su Normativa Jurídica. Apuntes Agroeconómicos. Facultad de Agronomía. Universidad de Buenos Aires. Año 1. N° 2. [www.agro.uba.ar](http://www.agro.uba.ar).

Foster, S. 1987. Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy. *Vulnerability of Soil and Groundwater Pollutants*. TNO Committee on Hydrological Research Information N°38. Ed. By W. Van Duijvenbooden and H. G. Van Waegenigh, The Hague: G9-86.

Foster, S.; Ventura, M. y R. Hirata. 1.987. Contaminación de las aguas subterráneas. Un enfoque ejecutivo de la situación en América Latina y el Caribe en relación con el suministro de agua potable. CEPIS (CENTRO DE PLANEAMIENTO DE INGENIERÍA SANITARIA Y CIENCIAS DEL AMBIENTE) Programa Regional de la Prevención y Control de la contaminación de Aguas Subterráneas; Organización Mundial de la Salud; Organización Panamericana de la Salud (Programa de Salud Ambiental, HPE), Lima, Perú.

Foster, S. y R. Hirata. 1.991. Determinación del riesgo de contaminación de aguas subterráneas. Una metodología basada en datos existentes. CEPIS (CENTRO DE PLANEAMIENTO DE INGENIERÍA SANITARIA Y CIENCIAS DEL AMBIENTE) Programa Regional de la Prevención y Control de la contaminación de Aguas Subterráneas; Organización Mundial de la Salud; Organización Panamericana de la Salud (Programa de Salud Ambiental, HPE), Lima, Perú.

Foster, S., B. Adams, M. Morales, S. Tenjo. 1.992. Estrategias para la protección de aguas subterráneas. CEPIS (CENTRO DE PLANEAMIENTO DE INGENIERÍA SANITARIA Y CIENCIAS DEL AMBIENTE) Programa Regional de la Prevención y Control de la contaminación de Aguas Subterráneas; Organización Mundial de la Salud; Organización Panamericana de la Salud (Programa de Salud Ambiental, HPE), Lima, Perú.

García, R. F., 2017. Exploración y Captación de Aguas Subterráneas. Doctorado en Ciencias Geológicas. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Universidad Nacional de Córdoba. Curso de postgrado.

García, R. F., 2015. Hidráulica de Captaciones. Maestría en Recursos Hídricos. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad Nacional de La Pampa. Curso de postgrado.

García, R. F., 2014. Captación de Aguas Subterráneas. Maestría en Recursos Hídricos. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad Nacional de La Pampa. Curso de postgrado.

García, R. F., 2010. Apuntes teóricos Hidrogeología. Escuela de Geología. Facultad de Ciencias Naturales. Universidad Nacional de Salta.

García Maurizzio, R. F., 2013. Geología de los Recursos Hídricos. 1° Edición. Asociación Civil Grupo Argentino de la Asociación Internacional de Hidrogeólogos (AIH-GA). 450 pág. ISBN 978-987-27407-2-6.

García, R. F y V. Rocha Fasola. 2013. Trabajos Prácticos Hidrogeología y Geología de los Recursos Hídricos. Escuela de Geología. Facultad de Ciencias Naturales. Universidad Nacional de Salta.

Gustafson, D.I., 1989. Groundwater Ubiquity Score: A simple method for assessing pesticide leachability. Environ. Sci. Technol. 8: 339-357.

Helferich, F, 1962. Ion Exchange. Mc Graw-Hill. 345 pp.

Hirata, R y A. Reboucas. 1999. La Protección de los Recursos Hídricos Subterráneos: Una Visión Integrada Basada en Perímetros de Protección de Pozos y Vulnerabilidad de Acuíferos. Boletín Geológico y Minero. Vol. 110-4 año 1999 (423-436).

Instituto Tecnológico Geominero de España. 1991. Guía Metodológica para la Elaboración de Perímetros de Protección de Captaciones de Aguas Subterráneas. Primera edición. ISBN: 84-7840-091-5.

Jury, W.A; Focht, D; Farmer, W, 1987. Evaluation of pesticide groundwater pollution potential from standard indices of soil-chemical adsorption and biodegradation. Journ. Env. Qual., 16(4): 422-428.

Kruseman y De Ridder. 1970. Analysis and Evaluation of Pumping Test Data. Bulletin 11. International Institute for Land Reclamation and Improvement. Wageningen. The Netherlands.

Koorevaar, P; Menelik, G; Dirksen, C. 1994. Elements of soil physics. Developments in soil science 13. Elsevier. 230 pp.

Langmuir, D. 1997. Aqueous Environmental Geochemistry. Prentice-Hall, 600 pp.

Lloyd, J.W y Heathcote, J.A. 1985. Natural Inorganic Hydrochemistry in relation to groundwater. Claredon Press, 296 pp.

Mariño, E y R. F. García. 2015. Aplicaciones de la Hidrogeoquímica. Escuela de Postgrado. Doctorado en Ciencias Geológicas. Facultad de Ciencias Naturales. Universidad Nacional de Salta. Curso de postgrado.

Martínez, M.; P. Delgado y V. Fabregat. 1998. Aplicación del Método DRASTIC para la evaluación del riesgo de afección a las aguas subterráneas por una obra lineal. Jornadas sobre la contaminación de las aguas subterráneas: un problema pendiente. Asociación Internacional de Hidrogeólogos - Grupo Español. Valencia.

Mattess, G; Foster, S.S.D and A. Ch. Skinner. 1985. Theoretical Background, Hydrogeology and Practice of Groundwater Protection Zones. UNESCO. International Association of Hydrogeologists. IUGS. Hannover: Heise, 1985. International contributions to Hydrogeology, Vol.6.

Menico, P.A y Schwartz, F. W. 1998. Physical and chemical hydrogeology. Wiley, 502 pp. DREVER, J.I. (1997). The geochemistry of Natural Waters. Prentice Hall, 3ª ed. 436 pp.

Rao, P.S.C; Hornsby, A; Jessup, R. 1985. Indices for ranking the potential for pesticide contamination of groundwater. Soil Crop. Sci. Soc. Florida. Proc., 44: 1-8.

Rocha, V y G. Baudino. 2002. Contaminación por nitratos en el norte de la ciudad de Salta Capital. Noroeste Argentino. Groundwater and human Development. ISBN 987-544-063-9.

Sauquillo Andes. 1993. Reflexiones sobre la planificación hidrológica. En Conceptos y métodos para la planificación hidrológica. Editor Joaquín Andreu. 388 pag. Editorial CIMNI. Barcelona. España.

Scow, K.M., 1982. Rate of biodegradation. En W.J. Lyman, W.F. Reeh y D.H. Rosenblatt (Edit). Handbook of chemical property estimation methods. McGraw-Hill Co. 9-1-9.85

Schulz, C. J y R. F. García. 2016. Planificación, Gestión y Protección de los Recursos Hídricos. Escuela de Postgrado. Doctorado en Ciencias Geológicas. Facultad de Ciencias Naturales. Universidad Nacional de Salta. Curso de postgrado.

Schulz, C. J y R. F. García. 2014. Geohidrología Ambiental. Escuela de Postgrado. Doctorado en Ciencias Geológicas. Facultad de Ciencias Naturales. Universidad Nacional de Salta. Curso de postgrado.

Schulz, C. J. 2011. Planificación y Gestión del Agua Subterránea en la República Argentina. V Congreso Argentino de Hidrogeología y VII Seminario Latinoamericano Sobre Temas Actuales de la Hidrología Subterránea. Salta, Argentina.

Schulz, C. 1998. La Planificación Hidrológica como base del código de aguas de La Pampa, XVIII Congreso Nacional del Agua y II Simposio de Recursos Hídricos del Cono Sur, Santa Fe, Argentina.

Shummugge, T.J; Jackson, T.J; Mckim, M.L. 1980. Survey of methods for soil moisture determination. Water Rour. Res. 16(6): 961-970.

Theis, C.V. 1935. The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using Groundwater storage. Trans Am. Geophysical Union, pp 519-534.

Thiem, G. 1906. Hydrologische Methoden. Leipzig: Gebhardt. P 56.

Vrba, J. and A. Zaporezec (Ed.). 1994. Guidebook on Mapping Groundwater Vulnerability. International Contribution to Hydrogeology, Vol 16. International Association of Hydrogeologists. Ed. Heisse. Hannover.

Zapozec A. 1989. Hidrogeologic mapping for groundwater protection in Recent advances in groundwater hydrology (J.E. Moore et al, eds), Amer. Institute of Hydrology, Minneapolis, MN, p. 588-597

Yaron, B; Gerstl, Z; Spencer, W.F. 1985. Behavior of herbicides in irrigated soils. En: Advances in soil science. Springer-Verlag. 3: 122-190.