

## **6. PERDURABILIDAD DE LA CONTAMINACION EN EL AGUA SUBTERRANEA**

### **6.1. Contaminación bacteriológica**

#### ***Factores que afectan a la supervivencia de los microorganismos***

*A. Características físicas del suelo*

*B. Factores químicos y ambientales del suelo*

### **6.2. Perdurabilidad de la contaminación química**

## 6. PERDURABILIDAD DE LA CONTAMINACION EN EL AGUA SUBTERRANEA

El criterio más empleado para la definición de los perímetros de protección es el de tiempo de tránsito que, como ya se vio, fundamenta su mecanismo de acción en asegurar que antes de llegar el contaminante a la captación pasará un tiempo suficiente para su degradación o inactivación. En este capítulo se recogen tablas y datos que permiten conocer y cuantificar la dinámica de mitigación de los contaminantes en el interior del acuífero.

### 6.1. Contaminación bacteriológica

El origen de la contaminación bacteriológica del agua subterránea es muy heterogéneo, pudiendo considerarse:

- Industrias alimentarias (mataderos, fábricas de conservas, fábricas de embutidos, etc.).
- Explotaciones ganaderas.
- Industrias en general (vertidos de vinazas, procesamiento de grasas, etc.).
- Vertidos urbanos, líquidos (alcantarillado) y sólidos (vertederos incontrolados).

Los vertidos industriales en general producen un gran volumen de bacterias pero sólo muy pocas especies son patógenas para el hombre, mientras que en vertidos urbanos, además de su gran volumen está el factor añadido de presentar una enorme variedad de especies parásitas. En los cuadros y figuras de este capítulo se analiza en detalle las tasas de supervivencia de los parásitos humanos más fácilmente encontrables en el agua subterránea.

Es preciso tener en cuenta que algunos de estos microorganismos encuentran en el medio hídrico una parte natural de su ciclo biológico, por lo que su permanencia en el agua será mucho mayor.

La cinética de degradación (eliminación en bacterias, inactivación en virus) sigue generalmente una ley exponencial del tipo:

$$C_t = C_0 \exp [-\lambda t (t-t_0)]$$

donde:

- $C_0$  = concentración inicial
- $C_t$  = concentración a un tiempo t
- $\lambda t$  = constante de eliminación de bacterias o de inactivación de virus

$\lambda t = 0,693/T$  siendo T el tiempo en el cual la mitad de bacterias o virus han desaparecido. T varía de 1 a 20 días para las bacterias y de 10 a 100 días para los virus.

A la vista de estos datos pudiera parecer que los tiempos de tránsito elegidos para dimensionar la zona próxima (ver capítulo 3) son excesivamente cortos, pero hay que considerar que los microorganismos no se encuentran simplemente en suspensión en agua sino que también se van a producir fenómenos de interacción con el material que forma el acuífero (Cuadros 4 a 8 y figuras 29 a 32).

**Cuadro 4 : Relación de microorganismos patógenos y de enfermedades infecciosas que producen, en los que el agua es principal (A), o circunstancial (B) vehículo de transmisión**

<b>A</b> <b>Grupo</b>	<b>Agente</b>	<b>Enfermedad</b>
<b>Vía de entrada oral</b>		
Virus	- Virus A de la hepatitis - Coxsackie	Hepatitis epidémica Afecciones gastrointestinales
Bacterias	- Salmonella typhi - Salmonella paratyphi - Shigella disenteriae - Vibrio cholerae	Fiebre tifoidea Fiebres paratíficas Disentería bacilar Cólera
Protozoos	- Entamoeba histolytica	Disentería amebiana
<b>Vía de entrada cutáneo-mucosa (contacto)</b>		
Virus	- Adenovirus	Conjuntivitis de las piscinas
Ritcketsiales	- Chlamydia oculo-genitalis	Conjuntivitis de inclusión
Gusanos (cercarias)	- Schistosomas - Fasciola hepática - Dracúncula medinensis	Schistosomiasis en países tropicales Distomatosis Dracunculosis
<b>B</b> <b>Grupo</b>	<b>Agente</b>	<b>Enfermedad</b>
<b>Vía de entrada oral</b>		
Virus	- Poliomiélicos - Echovirus	Parálisis Afecciones diversas
Bacterias	- Pasteurella tularensis - Leptospira - Escherichia coli enteropatógena	Tularemia Leptospirosis Colitis recién nacidos
Protozoos	- Balantidium coli - Leishmanias - Giardia lamblia	Balantidiasis Leishmaniasis Lambliasis
Gusanos	- Ascaris - Tenia equinococo	Ascariasis Hidatidosis
<b>Vía de entrada cutáneo-mucosa</b>		
Ritcketsiales	- Chlamydozoon trachomatis	Tracoma
Bacterias	- Bacillus anthracis - Brucellas - Leptospiras	Carbunco Fiebre de Malta Afecciones icterohemorrágicas

Fuente: Cabo et al, 1972.

**Cuadro 5: Resumen de los tipos y características de los microorganismos que pueden estar presentes en el agua**

Tipo	Célula	Tamaño	Forma	Nutrición	Condiciones de desarrollo		
					Tª	O <sub>2</sub>	pH
Bacterias	Procariótica	<1-2x1-4 micras	Esférica Helicoidal Cilíndrica	Autótrofa y Heterótrofa	0-20°C (psicrófilas) 25-40°C (mesófilas) 45-60°C (termófilas)	con O <sub>2</sub> libre (aerobias) sin O <sub>2</sub> libre (anaerobias) con/sin O <sub>2</sub> (anaerobias facultativas)	4-9 (óptimo: 6,5-7,5)
Hongos	Eucariótica	>5 micras diámetro	Filamentosa	Heterótrofa	0-62°C (óptimo: 22-30°C)	Anaerobios estrictos Aerobios	2-9 óptimo. 5-6
Algas	Eucariótica  Procariótica (verde-azuladas)	Variables  Como las	Esférica Bacilar Alargada bacterias	Autótrofa	0-90°C	Aerobias	
Protozoos	Eucariótica	>5 micras diámetro	Variable	Autótrofa y Heterótrofa	16-25°C	Aerobios y Anaerobios	3-9 (óptimo 6-8)
Virus	Molécula orgánica de ácido nucléico	15-150 nm	Poliédrica Helicoidal	Se reproducen por replicación. Permanecen en estado de latencia hasta que encuentran la célula huésped idónea para su reproducción.			

Fuente: ITGE, 1990.

**Cuadro 6: Valores medios del número de bacterias por gramo de heces humanas y animales**

Tipo de Bacteria	Hombre	Bovino	Ovino
Escherichia coli	1.3 x 10 <sup>7</sup>	7.2 x 10 <sup>5</sup>	8.9 x 10 <sup>5</sup>
Streptococos fecales	8.1 x 10 <sup>8</sup>	7.5 x 10 <sup>5</sup>	6.5 x 10 <sup>5</sup>
Streptococos bovis	58	3.8 x 10 <sup>5</sup>	7.1 x 10 <sup>5</sup>
Bifidobacterias	5.6 x 10 <sup>9</sup>	0	0
Rhodococcus coprophilus	0	2.1 x 10 <sup>4</sup>	1.2 x 10 <sup>4</sup>
Micromonospora	0	2.5 x 10 <sup>4</sup>	1.2 x 10 <sup>3</sup>
Streptomices	2.6 x 10 <sup>3</sup>	9.1 x 10 <sup>4</sup>	6.5 x 10 <sup>4</sup>

Fuente: Mara y Oragui, 1985.

**Cuadro 7: Virus humanos susceptibles de ser encontrados en medio hídrico**

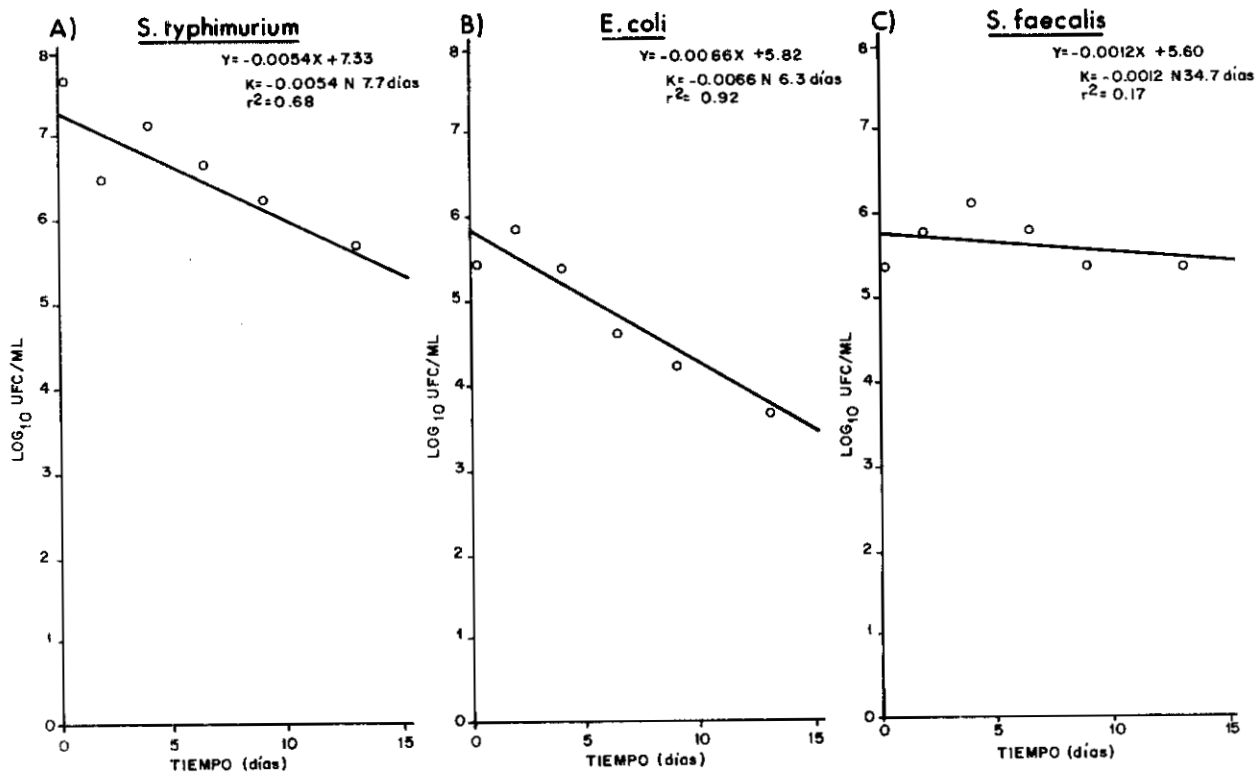
Familia	Género	Especie	Número de Serotipos	Excreción		Cultivo sobre células	Envuelta
				Orina	Heces		
<i>Picornaviridae</i>	Enterovirus	Virus polio	3	+	+	+	
		Virus Coxsackie A	23	?	+	+	
		Virus Coxsackie B	6	+	+	+	
		Virus Echo	32	?	+	+	
		Enterovirus nuevos	4	+	+	+	
		Virus de la hepatitis A	1	+	+	-	
<i>Réovirida</i>	Reovirus	Réovirus humanos	3	-	+	+	
	Rotavirus	Rotavirus humanos	3	-	+	-	
<i>Adenoviridae</i>	Mastadenovirus	Adénovirus humanos	34	+	+	+	
<i>Parvoviridae</i> o <i>Coliciviridae</i>	Parvovirus o Colicivirus	Agente de Norwalk	?	?	+	-	
<i>Papoviridae</i>	Papillomavirus	Papillomavirus	15	-	-	-	

Fuente: Matthes et al, 1988.

**Cuadro 8: Supervivencia de los virus en las aguas subterráneas y en el suelo**

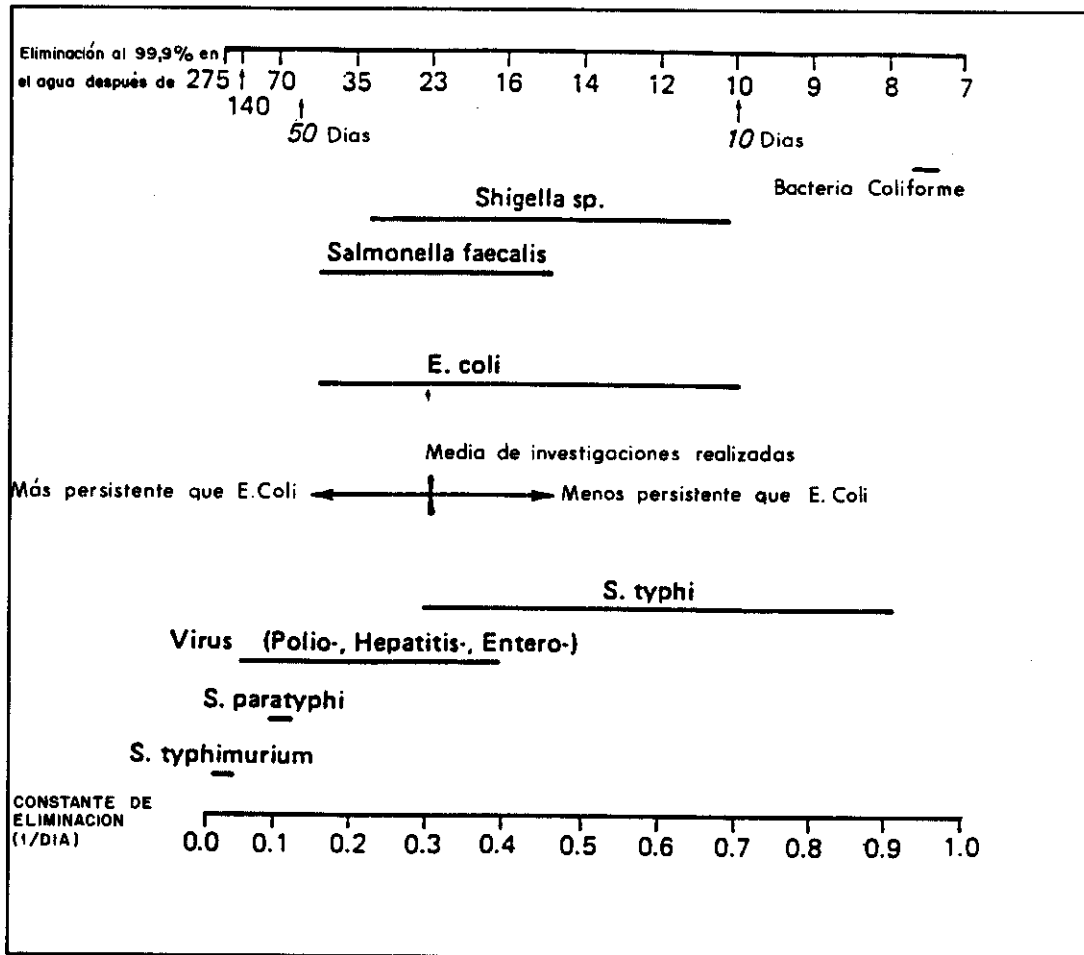
Virus	Aguas Subterráneas	Suelo
Virus en general	> = 28 días	—
Poliovirus	> = 250 días	91-175 días
Coxsackie A5, A14	> = 20 días	—
Colifagos X174, T4	> = 7 días	—
Enterovirus	—	15-25 días en suelo seco
Echovirus 1	—	21 días en suelo seco

Fuente: Benito de Santos, 1987.



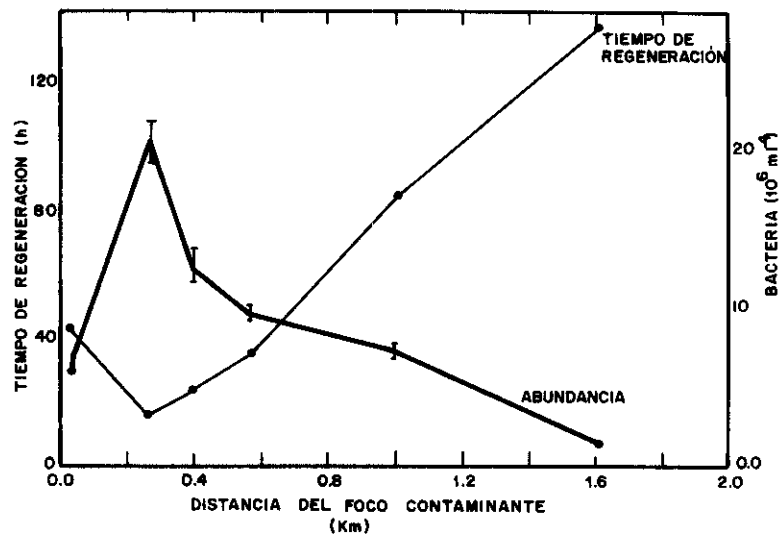
Fuente: Bitton et al. 1983

**Fig. 29 SUPERVIVENCIA DE VARIOS TIPOS DE BACTERIAS (*S.TYPHIMURIUM*, *S.FECALES* Y *E. COLI*) EN AGUAS SUBTERRANEAS. (K ES LA VELOCIDAD DE SEMIDESAPARICION DE LOS MICROORGANISMOS)**



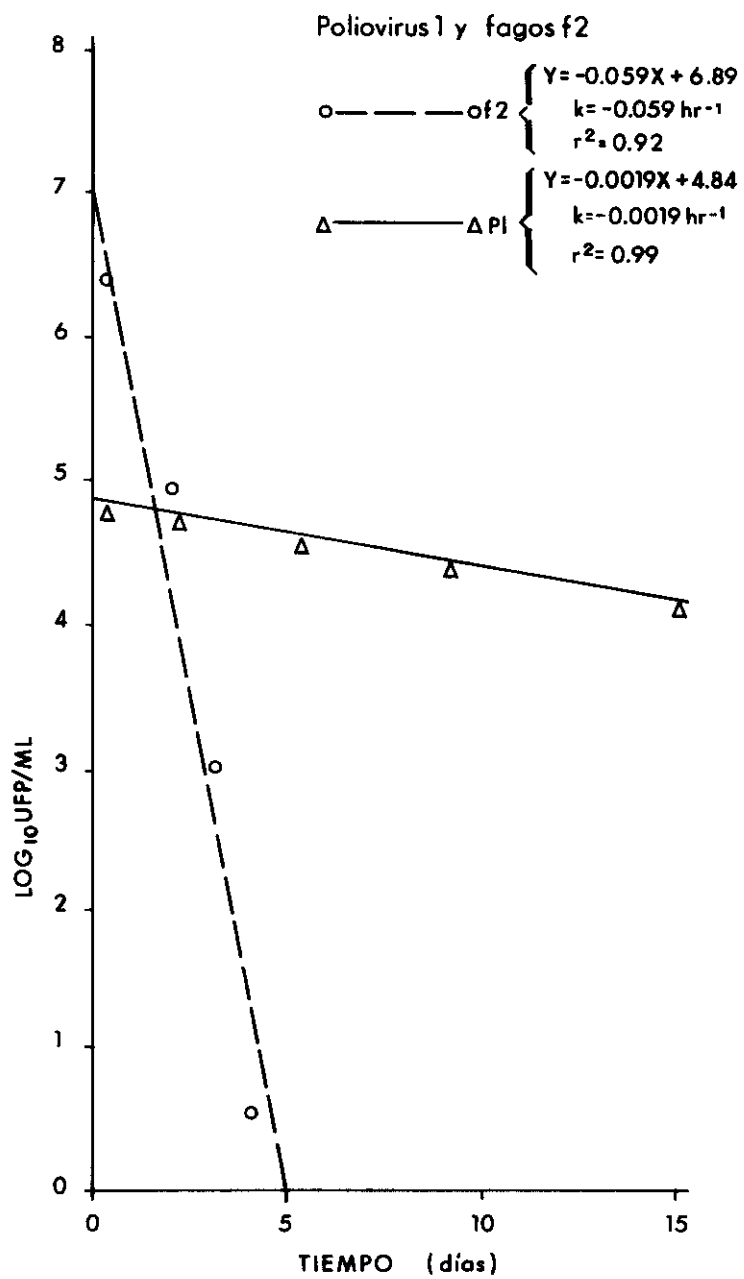
Fuente: Matthes, et al., 1985

Fig.30 CONSTANTE DE ELIMINACION Y ELIMINACION AL 99,9% DE LAS PRINCIPALES BACTERIAS Y VIRUS EN EL AGUA SUBTERRANEA.



Fuente: Harvey y George, 1987

Fig.31 VARIACION DEL CONTENIDO EN BACTERIAS Y DE SU TIEMPO DE REGENERACION EN LAS AGUAS SUBTERRANEAS CON LA DISTANCIA DESDE UN FOCO CONTAMINANTE.



Fuente: Blifton et al, 1983

**Fig.32 SUPERVIVENCIA EN AGUAS SUBTERRANEAS DE DOS TIPOS DE VIRUS (Poliovirus 1 y bacteriófagos f2)**



## FACTORES QUE AFECTAN A LA SUPERVIVENCIA DE LOS MICROORGANISMOS

Se indica a continuación la influencia que los factores medioambientales tienen en los microorganismos.

**Nutrientes.** La ausencia de nutrientes actúa como factor limitante del desarrollo bacteriano, además en bacterias que compiten por un mismo nutriente, la de crecimiento más rápido suele desplazar al resto. En un estudio reciente del ITGE (Estudio metodológico de los procesos de contaminación bacteriológica de las aguas subterráneas. Aplicación a los acuíferos del Norte de España, 1990) se encuentra una correlación entre el contenido en bacterias y fósforo en el agua estudiada, no obteniendo sin embargo, relación alguna con el contenido en nitrógeno.

**Temperatura.** La temperatura influye de forma directa sobre la tasa metabólica bacteriana, aumentando ésta con la temperatura.

Temperatura (°C)	Tiempo de regeneración (horas)
0	18,4
6	7,0
12	2,7
25	0,77
30	0,69

Cada organismo tiene un margen de temperaturas en el cual es posible su vida y temperaturas superiores a éstas son letales al causar daños irreparables en su citoplasma. Las temperaturas por debajo del margen raramente causan la muerte de la bacteria pero provocan un estado "latente" en el cual no se multiplican.

Las bacterias parásitas del hombre encuentran en el agua subterránea un medio hostil, desapareciendo de forma más rápida al elevarse la temperatura, así los coliformes fecales desaparecen según una ley:  $C = C_0 e^{-Kt}$ , variando el factor K con la temperatura de acuerdo con la fórmula  $K = K_{20^{\circ}\text{C}} 1,047^{(T^{\circ}\text{C}-20)}$ .

**Humedad.** Las bacterias se encuentran mejor en terrenos con cierta capacidad para retener la humedad y la mayor parte mueren rápidamente con la desecación. No obstante existen especies que mediante la formación de esporas son capaces de resistir condiciones de desecación (V.G. Clostridium s.p.).

**pH y potencial redox.** La mayoría de las bacterias crecen sólo entre pH 4 y 9, aunque el óptimo está entre 6,5 y 8,5 que corresponde al rango de pH de las aguas naturales.

El potencial redox del agua y de los sedimentos tienen también una gran importancia ecológica requiriendo los grupos bacterianos muy diferentes condiciones de óxido-reducción. Así las bacterias aerobias requieren más altos valores de Eh que las anaerobias. La actividad bacteriana puede modificar el potencial redox del agua, por ejemplo al variar su contenido en oxígeno.

**Luz.** La luz solar tiene efectos inhibidores sobre bacterias no pigmentadas influyendo factores tales como la intensidad de la radiación y la turbidez del agua. Los efectos de la luz se ven modificados por otros factores como la Tª.

**Presión hidrostática.** El gradiente de presión hidrostática es aproximadamente de una atmósfera cada 10 metros de profundidad. La mayor parte de las bacterias de suelos y aguas dulces no crecen a presiones superiores a doscientas atmósferas, aunque existen bacterias barófilas con óptimos cerca de las 500 atmósferas.

Experimentos realizados sobre E.Coli muestran que es capaz de sobrevivir perfectamente a sobrepresiones de 1.000 atmósferas.

No obstante estas elevadas presiones provocan cambios morfológicos, disminución de la movilidad y modificación en la multiplicación al alterar las características del ADN.

**Turbidez.** La turbidez del agua puede deberse a varias causas:

- Partículas finas de origen mineral
- Detritus constituidos por material inorgánico y orgánico
- Microorganismos

Las partículas orgánicas llevan una importante flora bacteriana y micótica en su superficie empleando la partícula como sustrato nutritivo. También las partículas minerales adsorben nutrientes en su superficie, encontrando allí los microorganismos un medio adecuado para su vida.

Puede constatarse que cuando un aumento de turbidez lleva parejo un aumento del número de bacterias se debe a materia orgánica en suspensión, si el aumento de turbidez no influye o lo hace de forma escasa sobre el número de bacterias se debe a materia inorgánica.

**Materia inorgánica.** La salinidad (es decir, la presión osmótica) influye de forma considerable en el tipo de microorganismos que pueblan el agua, existiendo

óptimos en un amplio rango (desde bacterias halófilas estrictas, marinas, a bacterias de agua dulce que no soportan concentraciones mayores de un 1%).

En general las bacterias de agua dulce viven en un rango óptimo de 10 a 50 gr/l de sales.

En vertidos urbanos y lagos contaminados encontramos con frecuencia bacterias tolerantes a las sales (hasta 15-25%).

El amonio y nitrito juegan un papel importante en el suministro de energía a las bacterias nitrificantes, capaces de producir una desnitrificación bajo condiciones anaerobias.

Algunos metales pesados parecen tener un efecto bactericida, (Cu, Hg, Ag, etc).

**Gases.** La mayoría de los microorganismos acuáticos son anaerobios facultativos (se adaptan a condiciones de presencia o ausencia de oxígeno) y según parece las fluctuaciones del contenido de oxígeno no afectan de forma considerable a la vida de bacterias aerobias obligatorias, que sólo se verán frenadas en su desarrollo por presiones parciales de oxígeno muy bajas. Sin embargo algunos organismos microaerófilos son inhibidos por concentraciones altas de oxígeno.

Existe un grupo de bacterias que emplean el metano como fuente de energía, mediante procesos de oxidación; otras emplean el SH<sub>2</sub> que es generalmente tóxico para el resto.

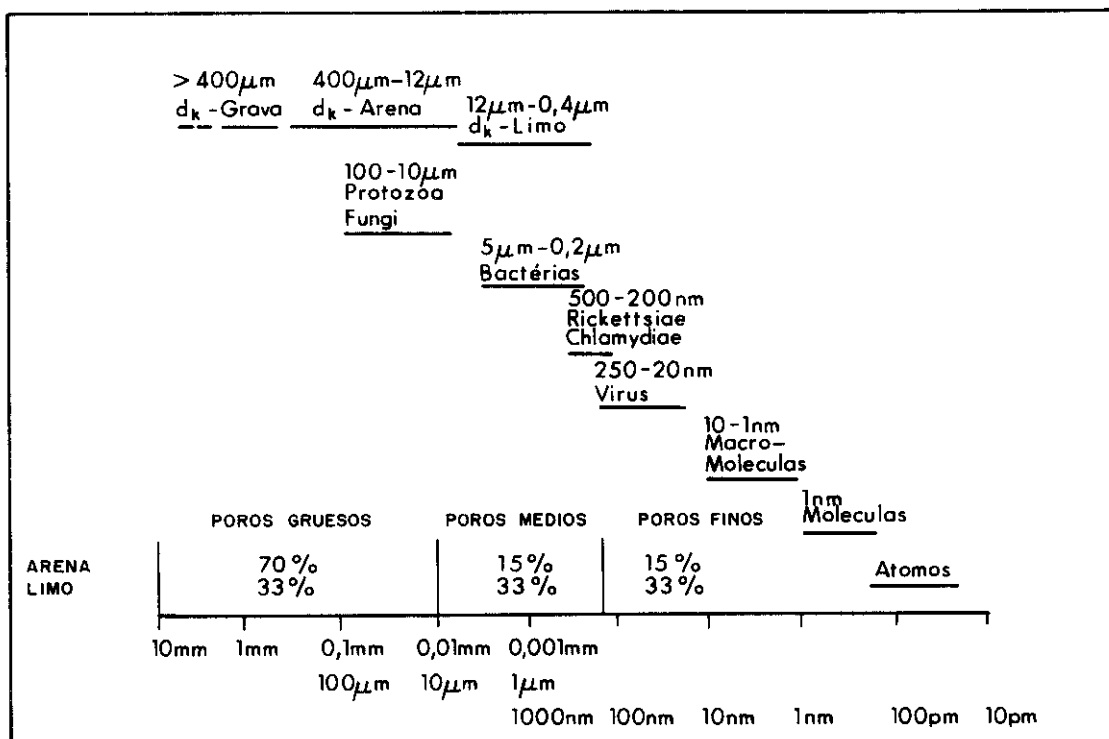
No debe olvidarse que las bacterias patógenas se encuentran en el suelo en un entorno extraño, donde existe un fuerte competencia con las pobladoras naturales de este medio, por ello la permanencia es mayor por ejemplo es suelos previamente esterilizados.

Al discurrir por el acuífero se producen fenómenos de filtración que pueden llegar a eliminar totalmente los contaminantes biológicos, (especialmente en el caso de helmintos que son de mayor tamaño, pero también bacterias y hongos). En la figura 33 se comparan los tamaños de bacterias, protozoos y hongos con el tamaño de grano de los materiales del acuífero.

Los factores que afectan a la infiltración y movimiento de las bacterias en el suelo (Crane and Moore, 1984) pueden resumirse en:

**A) Características físicas del suelo**

1. Textura
2. Distribución del tamaño de partículas
3. Tipo y contenido en arcillas



Fuente: Mattheis et al, 1988

**FIG. 33 COMPARACION Y TAMAÑO DE BACTERIAS, VIRUS Y MOLECULAS CON DIAMETROS EQUIVALENTES DE LOS POROS**

4. Tipo y contenido de materia orgánica
5. Capacidad de intercambio catiónico
6. Distribución del tamaño de poro

La coagulación de las bacterias con materia coloidal también puede aumentar la velocidad de filtración y sedimentación.

**B. Factores químicos y ambientales del suelo**

1. Temperatura
2. Contenido de humedad
3. Flujo de agua en el suelo
4. Tipo y concentración de iones en la solución del suelo
5. pH y potencial redox
6. Densidad y dimensiones de las bacterias
7. Naturaleza de la materia orgánica
8. Competencia con la microflora natural del suelo

Estudios realizados sobre el movimiento de bacterias en acuíferos contaminados ponen de manifiesto que dicho movimiento responde a un modelo de transporte coloidal. Bajo ciertas condiciones la movilidad de algunas bacterias puede aproximarse a la de un trazador conservativo, aunque influirán también factores tales como adsorción, filtración, muerte y competencia con otros organismos.

En el cuadro 9 están recogidos los factores que influyen con mayor peso en el movimiento y supervivencia de estos microorganismos.

**Cuadro 9: Factores que afectan al movimiento y supervivencia de los virus en el suelo**

**Movimiento de los virus**

<b>Factor</b>	<b>Efecto</b>
Tipo de suelo	Los de textura fina retienen mejor a los virus Oxidos de hierro aumentan la adsorción
pH	La adsorción aumenta cuando el pH disminuye
Cationes	La adsorción aumenta en presencia de cationes
Sustancias orgánicas	Compiten con los virus en la adsorción
Tipos de virus	La adsorción varía con el tipo de virus
Velocidad de flujo	A mayor velocidad menor adsorción del virus al suelo
Flujo no saturado/flujo saturado	Los virus se mueven menos en flujo no saturado

**Supervivencia de los virus**

<b>Factor</b>	<b>Efecto</b>
Temperatura	Las altas temperaturas son perjudiciales
Desecación	Los virus se reducen más en suelos secos
Luz solar	Perjudicial en la superficie
pH del suelo	Controla la adsorción de los virus al suelo
Cationes	Contribuyen a estabilizar los virus en el suelo
Textura del suelo	Las arcillas y sustancias húmicas aumentan la retención de los virus
Factores biológicos	No hay una tendencia clara

Fuente: Bitton y Gerba, 1984.

La dispersión es un mecanismo especialmente importante en la alteración del número de bacterias.

Los virus son fuertemente adsorbidos sobre materiales coloidales (menos sobre arenas), aumentando la adsorción al disminuir el pH. El contenido en cationes disminuye la movilidad de los virus.

Los virus así retenidos lo son de modo reversible de forma que una variación del pH, una fuerte lluvia etc., pueden removerlos provocando episodios de fuerte incremento en su concentración no relacionados con un hecho contaminante concreto.

Un elevado contenido en materia orgánica aumenta la permanencia de microorganismos en el agua, incluso puede permitir su reproducción, de hecho las

bacterias, por ejemplo, no suelen encontrarse libres en el agua sino que suelen estar agrupadas alrededor de materia orgánica en suspensión que les sirve como sustrato.

La presencia de ciertos contaminantes, como metales pesados (que impiden el desarrollo bacteriano), detergentes (que provocan la inactivación de virus), etc., también deberá ser tenida en cuenta.

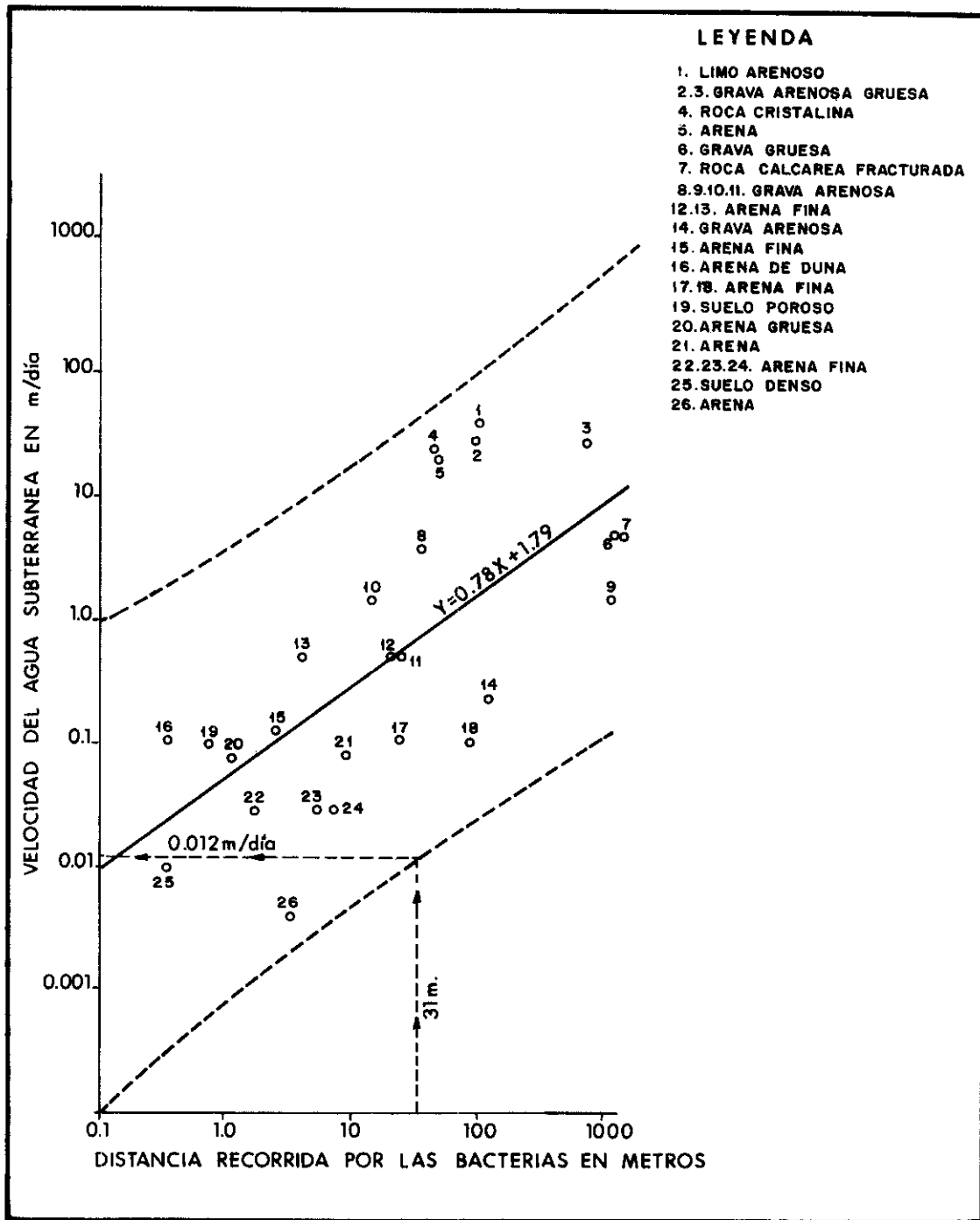
En los cuadros 10 a 12 y figuras 34 a 36 se cuantifica la importancia de alguno de los factores estudiados.

La figura 36 es especialmente importante, en ella se muestra como la distancia que las bacterias pueden recorrer es muy variable y está directamente relacionada con el tipo de materiales.

**Cuadro 10: Constantes de inactivación de virus en aguas subterráneas a  $10 \pm 1^\circ\text{C}$  durante un tiempo de observación de 260 días**

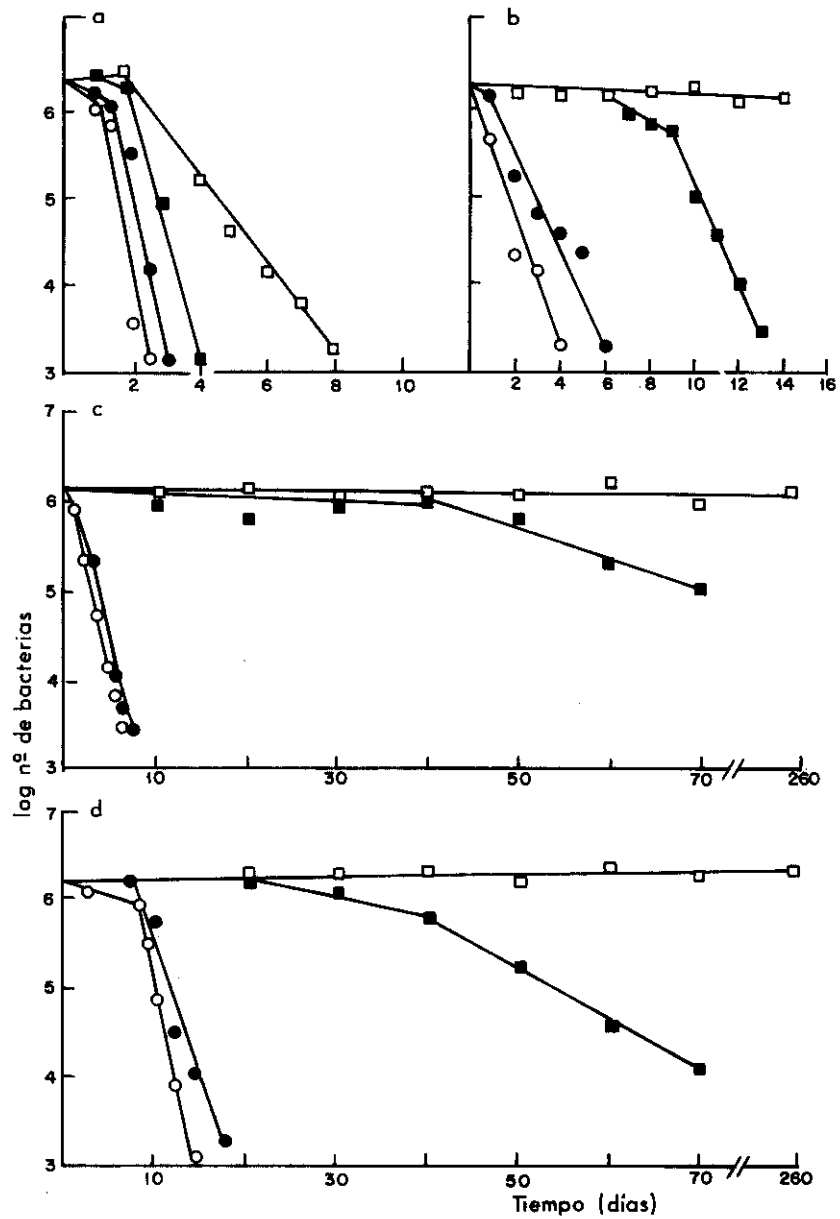
Condiciones	Virus			
	Coxsackie B1	Coxsackie A9	Echo 7	Polio 1
Agua subterránea no tratada	0,0186	0,0265	0,0186	0,0129
Agua subterránea desionizada	0,0401	0,0314	0,0382	0,0322
Agua subterránea en autoclave	0,0123	0,0189	0,03220	0,0103
Agua subterránea en autoclave + arena gruesa	0,00927	0,0301	0,0123	0,0163
Agua subterránea en autoclave + arena media	0,0146	0,0311	0,0175	0,0276
Agua subterránea en autoclave + arena fina	0,0084		0,0157	0,0177

Fuente: Matthes et al, 1982.



Fuente: Mac Ginnis, 1983

**Fig. 34** DISTANCIA RECORRIDA POR LAS BACTERIAS EN MEDIO SATURADO

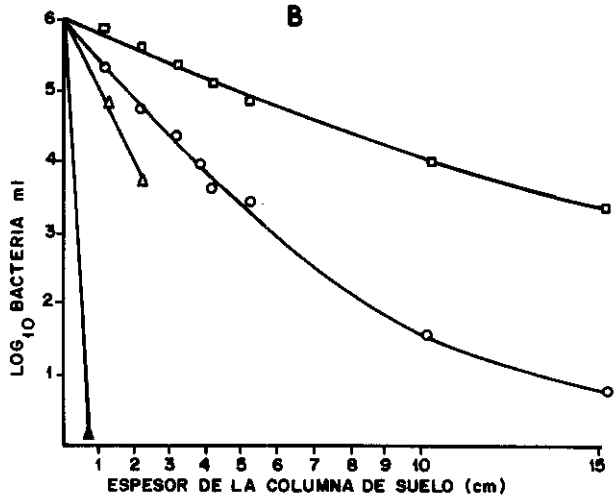
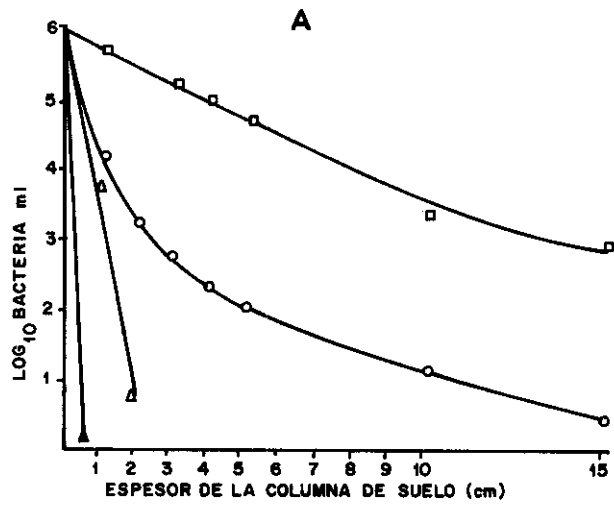


Fuente: Flint, 1987

**LEYENDA**

- NO TRATADA
- FILTRADA CON FILTRO WHATMAN
- FILTRADA CON FILTRO MILLIPORE DE 0,45 micro-m
- ESTERILIZADA BAJO DIFERENTES CONDICIONES DE TEMPERATURA:  
a) 37°C, b) 25°C, c) 15°C y d) 4°C

**Fig. 35 SUPERVIVENCIA DE ESCHERICHIA COLI EN AGUA DE RIO.**



**LEYENDA**

- SUELO ARENOSO
- MARGA ARCILLO-ARENOSA
- △ ARCILLA NEGRA
- ▲ ARCILLA

Fuente: Weaver et al., 1978, en Crane and Moore, 1984

**Fig.36 DISMINUCION DEL NUMERO DE BACTERIAS (ESCHERICHIA COLI (A) Y STREPTOCOCOS FECALES(B)) CON LA PROFUNDIDAD EN SUELOS ARENOSOS Y ARCILLOSOS.**

**Cuadro 11: Influencia del contenido en materia orgánica - Adsorción de poliovirus 2 por los suelos y minerales**

	pH	Carbono orgánico (mg/g)	Capacidad de adsorción del poadma (mg/m <sup>2</sup> )	% Adsorción Poliovirus Vaccinal	
				Media	Mínima
Tierra Arcillosa	7,6	16	1,1	75	43
Turba	7,2	200	14	79	16
Oxido de hierro hidratado	7,1	0	0,0005	99,99	99,99
Magnetita	8,9	0,4	0,06	99,98	99,94

Fuente: Matthes et al, 1988.

**Cuadro 12: Influencia del tipo de virus, profundidad de infiltración de enterovirus en una columna de arena 1% de virus recuperados**

Profundidad (cm)	Polio 1	Echo 7	Cox A9	Cox B1
1	26,08	58,70	7,55	30,03
2	55,05	22,30	13,60	30,00
3	14,49	10,55	28,71	30,00
4	2,61	5,86	29,00	7,9
5	1,45	1,05	15,77	1,42
6	0,26	1,05	2,87	0,30
7	0,03	0,22	0,75	0,14
8	0,026	0,1	0,75	0,08
9	0,014	0,1	0,70	0,003
10	0,003	0,06	0,29	0,001
11	< 0,0001	0,0001	0,25	0,0001

Fuente: Dizer et al, 1985.



En el caso de acuíferos kárstico o fisurados, donde se produce una rápida circulación del agua, la mayor parte de los fenómenos depuradores anteriormente citados no existen o se dan de forma atenuada, no existe apenas filtración, el tiempo de tránsito es mucho menor impidiendo que de tiempo a la actuación de otros factores. En estos acuíferos se observa como el contenido en bacterias en el agua subterránea se encuentra estrechamente ligado a la turbidez, debido a que las características del flujo del agua influyen considerablemente en los procesos de sedimentación-movilización; así puede verse, como tras una fuerte lluvia aumentan considerablemente las bacterias en agua (arrastre desde superficie mas remoción de las sedimentadas en los huecos o fracturas), incluso fuertes bombeos tienen este efecto.

A este respecto estudios realizados en el ITGE muestran como la velocidad de percolación influye notablemente sobre el contenido de microorganismos en el agua, debido sin duda a que una mayor velocidad implica una mayor facilidad para mover bacterias que de otra forma permanecerían sedimentadas.

En conclusión puede decirse que la zona próxima o de restricciones máximas permite (cuando es diseñada según criterios de tiempo de tránsito) una depuración adecuada del agua dando un valor a este criterio de 50-60 días, pues no sólo se depura por la cinética normal de eliminación o inactivación, sino que también intervienen otros factores. Los medios kársticos o fisurados suponen un problema especial por sus características cinéticas.

## 6.2. Perdurabilidad de la contaminación química

La contaminación química, al igual que la biológica, se ve afectada al atravesar el acuífero por procesos capaces de modificar, tanto su concentración inicial, como su naturaleza. En el capítulo 7.3. se explican los procesos implicados en la degradación de los compuestos químicos, a título de ejemplo en el cuadro 13.1. se resumen para varias sustancias, cuya presencia es frecuente en el agua subterránea, los valores de permanencia. En alguna de ellas, la vida media es muy elevada, así por ejemplo, el pesticida DBC perdura 10 semanas en la zona no saturada, aumentando a 10 años en la saturada.

La movilidad de los diferentes contaminantes químicos depende básicamente de su naturaleza y condiciones del medio que les rodea, por su importancia se analizan tres casos:

- *Metales pesados:* Su mayor o menor movilidad va a depender de los aniones presentes en el medio

con los que combinarán formando compuestos más o menos solubles (carbonatos, sulfatos, hidróxidos, cloruros, sulfuros, etc). También forman complejos con los ácidos húmicos quedando retenidos de forma irreversible.

Las arcillas, hidróxidos y ácidos húmicos pueden retener metales mediante procesos de adsorción y de intercambio iónico, procesos estos que presentan una cierta selectividad:

Los hidróxidos de hierro fijan preferentemente: Zn, Cu, Pb, Hg, Cr.

Los hidróxidos de aluminio: Cu, Ni, Co, Cr, Mo.

Las arcillas: Zn, Cu, Pb y Hg.

A su vez estos metales pueden ser desorbidos por otros iones competidores.

Variaciones en Tª, pH, Eh, etc, influyen notablemente en la dinámica de estos procesos.

Todos estos fenómenos tienen como resultado un doble efecto, por un lado los metales son retenidos de forma que su concentración disminuye en el agua subterránea, por otro cuando se trata de fenómenos reversibles se produce un retardo en el paso del contaminante a través del acuífero, viajando a menor velocidad que el agua.

- *Hidrocarburos:* Su origen es muy diverso, pero prácticamente siempre ligado a actividades urbanas o industriales. En un primer momento y antes de infiltrarse en el terreno se pierden gran parte de sus compuestos volátiles, siendo posteriormente la dilución (en pequeña medida) y principalmente la degradación bacteriana, los responsables de su desaparición.

El movimiento de estas sustancias en el subsuelo va a estar muy ligado a su viscosidad (frecuentemente elevada), su miscibilidad con el agua (generalmente muy baja) y la forma en que fueron vertidas (en especial cuando se vierten como emulsión en agua lo que facilita su transporte).

Como generalmente son menos densas que el agua se sitúan sobre la superficie de ésta, extendiéndose posteriormente; variaciones en el nivel piezométrico tienen como efecto que puedan llegar a lugares bastante profundos de la zona saturada.

- *Plaguicidas:* En el transporte tendrá vital importancia su solubilidad en agua (Cuadro 13.1) siendo más rápidamente transportados aquellos cuya solubilidad sea elevada. Los fenómenos de adsorción pueden llegar a retener algunos de

forma completa pero será la degradación bacteriana el factor predominante en su eliminación. La degradación del pesticida no siempre conduce a un compuesto menos tóxico, al contrario, es frecuente que se produzcan activaciones

que den lugar a productos más peligrosos que la sustancia madre.

En el cuadro 13.2. se ven los procesos químicos que sufren en el suelo los principales elementos implicados en procesos contaminantes.



**Cuadro 13.1: Persistencia de sustancias orgánicas en el suelo y en el agua subterránea**

**Sustancias orgánicas**

**Vida media estimada (años)**

	En el agua subterránea	En los suelos
<i>- Hidrocarburos</i>		
Benceno		1
Tolueno		0.3
Xileno		0.3
Etilbenceno		0.3
C <sub>3</sub> Benceno		0.6
Naftaleno		0.6
<i>- Hidrocarburos halogenados</i>		
Diclorometano		10
Triclorometano		2
1,1,1, Triclorometano		1
Diclorobenceno		1
<i>- Pesticidas * (Baja solubilidad en agua)</i>		
Chlordano		2 a 4
DDT		3 a 10
Dieldrin		1 a 7
Heptachloro		7 a 12
Toxapheno		10
DDVP		0.047 (17 días)
Methyl demeton S		0.071 (26 días)
Thimet		0.005 (2 días)
<i>- Pesticidas ** (Alta solubilidad en agua)</i>		
EDB	5.8	0.04-0.35 (2-18 semanas)
DBCP	28.5 a 140	0.2 (10 semanas)
Aldicarb	0.2 a 12.5	0.08-0.15 (4-8 semanas)
Atrazina	0.2 a 2	0.08-11 (4-57 semanas)
Carbofurano	0 a 1	0.02-0.7 (1-37 semanas)

Fuente: • Matthes et al, 1985.

\*\* Cohen et al, 1984.

**Cuadro 13.2: Componentes y procesos químicos en el suelo**

Elemento	Símbolo	Solutos	Proceso químico en el suelo						
			Cambio iónico		Redox		Precipitados insolubles más comunes	Adsorción específica	Complejos insolubles orgánicos
			Catiónico	Aniónico	Forma oxidada	Forma reducida			
<b>GRUPO PRIMERO</b>									
Litio	Li	Li <sup>+</sup>	O-I				Ninguno	No	No
Sodio	Na	Na <sup>+</sup>	O-I				Ninguno	No	No
Nitrógeno	N	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	O-I		NO <sub>3</sub> , NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	N <sub>2</sub> O, N <sub>2</sub>	Ninguno	M, I, V (m)	No
Potasio	K	K <sup>+</sup>	O-I				Ninguno	M, I, V (m)	No
Rubidio	Rb	Rb <sup>+</sup>	O-I				Ninguno	M, I, V (m)	No
Cesio	Cs	Cs <sup>+</sup>	O-I				Ninguno	M, I, V (m)	No
Magnesio	Mg	Mg <sup>2+</sup>	O-I				P, C, S <sub>1</sub>	No	d
Calcio	Ca	Ca <sup>2+</sup>	O-I				P, C, S <sub>1</sub>	No	d
Estroncio	Sr	Sr <sup>2+</sup>	O-I				P, C, S <sub>1</sub>	No	d
Bario	Ba	Ba <sup>2+</sup>	O-I				P, C, S <sub>1</sub>	No	d
<b>GRUPO SEGUNDO</b>									
Cloruro	Cl	Cl <sup>-</sup>	O-I					No	No
Nitrógeno	N	CN <sup>-</sup>	O-I				{ NO <sub>3</sub> , NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> N <sub>2</sub> O, N <sub>2</sub>	Ninguno	No
Nitrógeno }	N	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	O-I					Ninguno	No
Azulfre }	S	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	O-I				{ S <sub>2</sub> S <sub>2</sub> <sup>-</sup> S <sup>2-</sup> , SO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	Cationes divalentes	Hf (d)
Selenio	Se	SeO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	O-I		Se O <sub>2</sub> <sup>+</sup>		Cationes divalentes, Fe <sup>2+</sup>	Hf (d)	No
<b>GRUPO TERCERO</b>									
Fluor	F	F <sup>-</sup>	O-I				CaF <sub>2</sub>	Hf, Ha (i)	No
Fósforo	P	H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> <sup>-</sup> , HPO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	O-I				(Fe, Al, Ca) P	Ma, Hf, Ha (i)	No
Fósforo }	P	Poli-P, Meta-P	O-I					Ma, Hf, Ha (i)	No
Arsénico	As	H <sub>2</sub> AsO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	O-I				Coppta, con (Fe, Al, Ca) P	Ma, Hf, Ha (i)	No
Silice	Si	Si (OH) <sub>4</sub>	O-I				(Fe, Al, SiO <sub>2</sub> )	..	No
Molibdeno	Mo	MoO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	O-I				Coopta con (Fe, Al, Ca) P	Ma, Hf, Ha (i)	No
Boro	B	B (OH) <sub>3</sub>						Hf, Ha (d)	No
Carbón	C	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>					CaCO <sub>3</sub> , MgCO <sub>3</sub>		No
<b>GRUPO CUARTO</b>									
Aluminio	Al	Al <sup>3+</sup> , Al (OH) <sub>3</sub> <sup>+</sup>	O-I				H, P		m
Berilio	Be	Be (OH) <sub>2</sub> <sup>+</sup>	O-I				H		
Vanadio	V	VO <sub>2</sub> <sup>+</sup>	O-I				H		
<b>GRUPO QUINTO</b>									
Hierro	Fe	Fe <sup>2+</sup>	O-I		Fe <sup>2+</sup>		H, P, C, S <sub>1</sub> , Sr	Ma, O (i)	i
Manganeso	Mn	Mn <sup>2+</sup>	O-I		Mn <sup>2+</sup>		H, Sr	Ma, O (i)	m
<b>GRUPO SEXTO</b>									
Plata	Ag	Ag <sup>+</sup>	O-I				Ag, Cl, Sr	I-O (i)	i
Plomo	Pb	Pb <sup>2+</sup>	O-I				H, S <sub>1</sub> , C, Sr	I-O (i)	i
Mercurio	Hg	Hg <sup>2+</sup>	O-I				HgO, Sr	I-O (i)	i
Cadmio	Cd	Cd <sup>2+</sup>	O-I				Coppt (Fe, Al), H	I-O (i)	i
Cinc	Zn	Zn <sup>2+</sup>	O-I				Coppt (Fe, Al), H	I-O (i)	i
Cobre	Cu	Cu <sup>2+</sup>	O-I				Coppt (Fe, Al), H	I-O (i)	i
Níquel	Ni	Ni <sup>2+</sup>	O-I				Coppt (Fe, Al), H	I-O (i)	i
Cobalto	Co	Co <sup>2+</sup>	O-I				Coppt (Fe, Al), H	I-O (i)	i
Cromo	Cr	Cr <sup>2+</sup>	O-I				Coppt (Fe, Al), H	I-O (i)	i
<b>GRUPO SEPTIMO</b>									
		Orgánico no descompuesto					Si	I (i)	
		Orgánico macromoléculas					Si		
		Orgánico no polar					Si		
		Orgánico polar					Si	I (d)	
		Orgánico catiónico	O-I				Si	I (i)	
		Orgánico aniónico		O-I			Si	I-O	
		Orgánico quelatos metálicos					Si		
<b>Notas:</b>	I: Componentes inorgánicos del terreno O: Componentes orgánicos del terreno d: Interacción débil m: Interacción moderada i: Interacción intensa			P: Fosfato C: Carbonato S <sub>1</sub> : Sulfato Sr: Sulfuro H: Hidróxido		M: Mica I: Illita V: Vermiculita Mt: Montmorillonita Ma: Minerales arcillosos		Ha: Hidróxido de aluminio Hf: Hidróxido de hierro	

Fuente: FAO, 1975.