

# **HIDROGEOLOGÍA AMBIENTAL**

## **I**

**Dr. Miguel Auge**

**Profesor Titular de Hidrogeología**

UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES

FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES

DEPARTAMENTO CIENCIAS GEOLÓGICAS

[auge@gl.fcen.uba.ar](mailto:auge@gl.fcen.uba.ar)

**BUENOS AIRES 2004**

# **TEMAS**

<b>1. DEFINICIÓN</b>	<b>1</b>
<b>2. EL AGUA EN EL PLANETA</b>	<b>1</b>
<b>3. EL AGUA EN ARGENTINA</b>	<b>4</b>
<b>4. APTITUD</b>	<b>5</b>
<b>5. CONTAMINACIÓN</b>	<b>5</b>
5.1. Natural	5
5.2. Artificial directa	5
5.2.1. Urbana	5
5.2.2. Rural	5
5.2.3. Doméstica	6
5.2.4. Industrial	6
5.2.5. Agropecuaria	7
5.3. Artificial inducida	7
<b>6. ZONA SUBSATURADA</b>	<b>8</b>
6.1. Química	8
6.2. Generalidades	8
6.3. Comportamiento de los contaminantes más comunes	9
6.3.1. Nitratos	9
6.3.2. Pesticidas o plaguicidas	11
6.3.3. Metales pesados	12
6.3.4. Hidrocarburos	12
<b>7. ZONA SATURADA</b>	<b>13</b>
7.1. Puntual	14
7.2. Difusa	15
7.3. Flujo	17
7.4. Transporte	17
7.5. Propagación	17
<b>8. PROTECCIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA FRENTE A LA CONTAMINACIÓN Y AL AGOTAMIENTO</b>	<b>24</b>
8.1. Medidas	24
8.2. Monitoreo	25
8.3. Vulnerabilidad	29
8.3.1. Acuífero libre	29
8.3.2. Acuífero confinado	30
8.3.3. Acuífero semiconfinado	30
8.3.4. Grado de vulnerabilidad	31

<b>8.4. Perímetros de protección</b>	<b>36</b>
8.4.1. Zona inmediata	36
8.4.2. Zona próxima	36
8.4.3. Zona alejada	37
<b>9. IDENTIFICACIÓN Y REMEDIACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN CON HIDROCARBUROS EN EL SUELO Y EL AGUA SUBTERRÁNEA</b>	<b>38</b>
9.1. Diagnóstico	38
9.1.1. Recopilación de información	38
9.1.2. Verificación in situ	38
9.1.3. Muestreo de suelo y agua	38
<b>10. CRITERIOS PARA DECIDIR SOBRE LA NECESIDAD DE LIMPIAR EL SUELO</b>	<b>41</b>
10.1. Concentraciones existentes	41
10.2. Movilidad ambiental	42
10.3. Relación de calidad suelo – agua	42
10.4. Salud de plantas y animales	43
10.5. Salud humana	43
10.6. Consideraciones estéticas	43
10.7. Límites de detección analítica	44
10.8. Uso de la tierra	44
<b>11. TÉCNICAS PARA LA REMEDIACIÓN DEL SUELO Y DEL AGUA</b>	<b>45</b>
11.1. Tratamiento de suelos	45
11.1.1. Incineración	45
11.1.2. Biocorrección	45
11.1.3. Reacciones químicas	46
11.1.4. Lavado	46
11.1.5. Solidificación y estabilización	46
11.1.6. Terraplenamiento	46
11.2. Factibilidad técnica para la extracción y el tratamiento de agua subterránea.	47
<b>12. BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>50</b>

## **FIGURAS**

1. Distribución del agua en el planeta	2
2. Contaminación industrial	6
3. Salinización por bombeo	7
4. Distribución del agua en el subsuelo	8
5. Contaminación por pozos ciegos	9
6. Contaminación urbana	10
7. Zona saturada	13
8. Contaminación por bombeo	14
9. Contaminación puntual	15
10. Tiempo de tránsito zona subsaturada	16
11. A, B y C. Circulación en la zona saturada	18
11. D	19
12.A. Pluma de contaminación agrícola	19
12.B.	20
13. Río efluente	20
14. Cambio en la condición de un río efluente	21
15. Río influente	21
16. Flujo en un acuífero heterogéneo libre	21
17. Flujo en un acuífero heterogéneo confinado	22
18. Contaminación por un HC liviano	23
19. Contaminación por oscilación de la superficie freática	23
20. Inversión del flujo por bombeo	23
21. Red de flujo subterráneo- La Plata	28
22. Vulnerabilidad respecto a la profundidad	29
23. Vulnerabilidad respecto a la permeabilidad vertical	29
24. Vulnerabilidad de un acuífero confinado	30
25. Vulnerabilidad de un acuífero semiconfinado	30
26. Contaminación de un acuífero semiconfinado por bombeo	31
27. Mapa de vulnerabilidad acuíferos semiconfinados	32
28. Potenciales hidráulicos naturales; acuífero libre-semiconfinado	34
29. Potenciales hidráulicos alterados por bombeo	35
30. Continuidad y propiedades del acuitardo	35
31. Selección para el muestreo vertical del suelo	39
32. Transporte de contaminantes por flujo lateral	40
33. Movilidad en función de la permeabilidad	42
34. Disposición de contaminantes en terraplenes y excavaciones	47
35. Flujo de agua subterránea contaminada en una refinería de HC	48

## **CUADROS**

1. Agua en la Tierra	2
2. Extracción de agua en Europa	3
3. Uso de agua en el mundo	3
4. Consumo de agua en Buenos Aires y La Plata	4
5. Propiedades de plaguicidas	12
6. Normas de potabilidad EPA	59
7. Norma de potabilidad EUA, Canadá, CEE y OMS	61
8. Norma de potabilidad Canadá	63
9. Valores indicativos para sitios contaminados - Holanda	70

<b>10. Parámetros microbiológicos CE</b>	<b>71</b>
<b>11. Norma de potabilidad OSN</b>	<b>72</b>
<b>12. Norma de potabilidad CAA</b>	<b>74</b>
<b>13. Ley 24.051. Desechos peligrosos</b>	<b>75</b>

## ***TABLAS***

<b>I. Tiempo de tránsito (medio no saturado)</b>	<b>16</b>
<b>II. Tiempo de tránsito (medio saturado)</b>	<b>16</b>
<b>III. Espesor de la zona subsaturada</b>	<b>31</b>
<b>IV. Permeabilidad vertical de la zona subsaturada</b>	<b>31</b>
<b>V. Diagrama de vulnerabilidad (acuífero libre)</b>	<b>32</b>
<b>VI. Vulnerabilidad acuífero semiconfinado (pot. hidr.)</b>	<b>36</b>
<b>VII. Vulnerabilidad acuífero semiconfinado (transmisiv. vert.)</b>	<b>36</b>

## **1- DEFINICIÓN**

La hidrogeología ambiental trata sobre las características y el comportamiento del agua subterránea y su relación con el ambiente. Dado que al ambiente lo componen los recursos naturales y el hombre, en el análisis ambiental del agua subterránea, deben considerarse las vinculaciones e incidencias mutuas entre ésta, el suelo, el aire, el agua superficial, el agua meteórica y la biota (animales, vegetales y el hombre).

Si bien la hidrogeología ambiental, con esta denominación específica, es relativamente moderna, ya en la antigüedad se le prestó especial atención a la incidencia ambiental en la aptitud de las aguas superficiales y subterráneas (Ej. contaminación en los acueductos romanos o deterioro en la calidad de los pozos de Artois - Francia).

Un concepto trascendente desarrollado por los investigadores soviéticos, es el que se refiere a la globalidad de la preservación ambiental. Esto es, que los recursos deben protegerse en forma integral, o dicho de otra manera, que es prácticamente imposible preservar sólo a algunos de ellos en detrimento de los otros. En efecto, la preservación del suelo o del agua superficial, no podrá lograrse si el aire está contaminado, pues la caída directa o el arrastre por la lluvia, harán que los contaminantes lleguen al suelo y a los ríos o lagos y desde allí, infiltrándose, ingresen al subsuelo y alcancen al agua subterránea.

## **2- EL AGUA EN EL PLANETA**

En el cuadro 1 y en la figura 1, se indica la distribución del agua en nuestro planeta, a partir de una compilación de datos publicados por Nace (1969) y Lvovitch (1967).

De ellos se desprende un neto predominio de las aguas marinas (más del 97% del total) que evidentemente constituyen la reserva más importante para los usos corrientes del futuro (agua potable, riego, uso industrial). Lamentablemente, al presente, el costo de la desalación del agua de mar es muy elevado, por lo que sólo existen pocas plantas de tratamiento en el mundo, donde no hay otra alternativa para la provisión (Kuwait) o en sitios turísticos con alto poder económico (Islas Canarias).

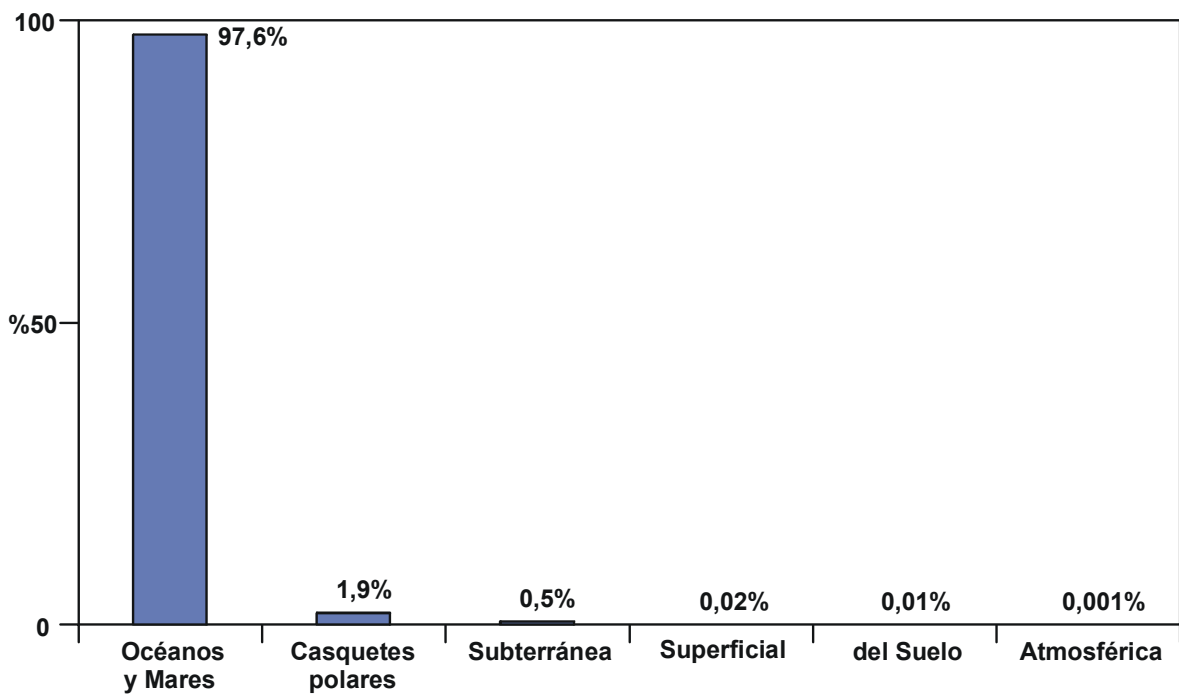
La mayor concentración de agua dulce (1,9%) se ubica en los casquetes polares en forma de hielo, lejos de los ámbitos poblados.

De las aguas continentales, el volumen almacenado hasta unos 1.000 m de profundidad (0,5%) supera con amplitud al que instantáneamente pueden contener los ríos y los lagos del mundo (0,02%).

**CUADRO 1**

	<b>AGUA EN LA TIERRA</b>			
	<b>Area km<sup>2</sup>.10<sup>6</sup></b>	<b>Volumen km<sup>3</sup>.10<sup>6</sup></b>	<b>%</b>	<b>Altura equivalente (m)</b>
Océanos y Mares	362	1.350	97,6	2.650
Casquetes polares	17	26	1,9	50
Subterránea	131	7	0,5	14
Superficial	1,5	0,3	0,02	0,6
del Suelo	131	0,2	0,01	0,4
Atmosférica	510	0,02	0,001	0,04
<b>Total</b>	<b>510</b>	<b>1.383</b>	<b>100,03</b>	<b>2.715</b>

**Fig. 1**



Algunos ríos, sin embargo, tienen caudales sorprendentes, caso del Río de la Plata que con un módulo de 20.000 m<sup>3</sup>/s, sería hábil por sí solo para abastecer a la población mundial actual (6.000 millones), a razón de 290 l/día por habitante.

De cualquier manera, el agua superficial está más expuesta a la contaminación y generalmente es mucho más cara, por el tratamiento que necesita para su potabilización, que la subterránea. Por ello, en la mayoría de los países desarrollados, que se caracterizan por optimizar los usos de los recursos naturales, el empleo de agua subterránea para consumo humano, supera apreciablemente al del agua superficial (cuadro 2).

**CUADRO 2**

<b>EXTRACCIÓN DE AGUA EN EUROPA</b>		
	TOTAL km <sup>3</sup> /año	agua subterránea para uso humano %
Alemania	6,24	67
Bélgica	0,57	76
Dinamarca	0,70	98
Francia	5,00	50
Holanda	1,15	63
Inglaterra	2,50	32
Italia	9,95	36

También resulta interesante indicar el consumo total de agua en el mundo y su evolución histórica, así como la distribución en relación al uso (cuadro 3).

**CUADRO 3**

<b>USO DEL AGUA EN EL MUNDO</b>							
	Consumo total	Agricultura		Industria		Agua potable	
año	km <sup>3</sup> /año	km <sup>3</sup> /a	(%)	km <sup>3</sup> /a	(%)	km <sup>3</sup> /a	(%)
1900	400	350	87,5	30	7,5	20	5
1950	1100	820	74,5	220	20	60	5,5
1975	3000	2200	73	650	22	150	5
2000	5000	3400	68	1250	25	350	7



Del cuadro 3 se desprende el neto predominio de la agricultura como consumidor de agua, alrededor del 70% del total extraído desde 1900, frente al **consumo humano** que sólo incidió en el 6%.

### 3 - EL AGUA EN ARGENTINA

Alrededor del 75% del territorio argentino es árido o semiárido; o sea presenta déficit en el balance hídrico. A esto, se agrega el hecho de que sólo dos regiones tienen abundante agua superficial potabilizable (Mesopotamia y Cordillera Patagónica). Por ello el agua subterránea juega un rol importantísimo en la provisión para consumo humano y para riego. A nivel del país, aproximadamente un 50% del abastecimiento para consumo humano es de origen subterráneo. En el cuadro 4 se indican los consumos locales del Conurbano de Buenos Aires y de La Plata, durante 1990.

**CUADRO 4**

<b>CONSUMO DE AGUA EN EL CONURBANO DE BUENOS AIRES – 1990</b>			
Población 8,9 millones			
	hab.	agua sup. hm <sup>3</sup>	agua subt. hm <sup>3</sup>
Población servida	3,5.10 <sup>6</sup>	383	256
Población no serv.	5,4.10 <sup>6</sup>		100
Industria		100	300
Riego			120
<b>Total:</b>		<b>483 (38%)</b>	<b>776 (62%)</b>
<b>LA PLATA</b>			
Población 700.000			
	hab.	agua sup. hm <sup>3</sup>	agua subt. hm <sup>3</sup>
Población servida	0,5.10 <sup>6</sup>	55	50
Población no serv.	0,2.10 <sup>6</sup>		4
Industria		30	2
Riego			110
<b>Total:</b>		<b>85 (34%)</b>	<b>166 (66%)</b>

Del cuadro se desprende que en el Conurbano, el mayor volumen de agua se destinó en 1990 al consumo humano (739 hm<sup>3</sup>) sobre un total de 1259 hm<sup>3</sup>; o sea el 59%, seguido por la industria (400 hm<sup>3</sup>, el 32%) y finalmente el riego (120 hm<sup>3</sup>, el 9%). De la demanda total, un 62% se cubrió con agua subterránea y un 38% con agua superficial.

Algo parecido sucede en relación al empleo de agua subterránea en La Plata, aunque aquí el índice respecto al total es algo mayor (66%). Sin embargo, en La Plata el volumen para riego (110 hm<sup>3</sup>) fue prácticamente igual que el utilizado para consumo humano (109 hm<sup>3</sup>) y ampliamente superior al empleado para la industria (32 hm<sup>3</sup>).

#### 4 - APTITUD

La aptitud de un recurso natural, en este caso del agua subterránea, depende de su calidad y también de la disponibilidad y productividad respecto del uso requerido. Así por ejemplo un acuífero de baja salinidad resulta inapto para regar, si tiene baja productividad, lo que deriva en pozos de muy escaso caudal.

El manejo inadecuado de un acuífero (sobreexplotación), afecta su reserva y productividad, generando un deterioro al que generalmente se les asocian otros procesos de degradación (salinización, contaminación artificial, etc.).

#### 5 - CONTAMINACIÓN

Es la alteración de las propiedades físicas, químicas y/o biológicas del agua por la acción de procesos naturales o artificiales que producen resultados indeseables. Las **características físicas** más comunes son: temperatura, pH, turbidez, olor, color y las **químicas**: SDT, tipo y concentración aniónica, tipo y concentración catiónica, otros compuestos solubles, etc. **Características biológicas**: modificación de la composición biológica natural, ya sea introduciendo nuevos organismos o eliminando los existentes.

Además la contaminación puede ser **natural** y **artificial** y esta última, **directa o inducida**.

**5.1. Natural.** Es común, la salinización por contacto con sedimentos marinos y salinos, o yacimientos metalíferos (Pb, Hg, Zn, Cu, Ag), no metalíferos o radiactivos y la incorporación de oligoelementos como F y As, a partir de sedimentos de origen volcánicos.

**5.2. Artificial directa.** Es la más frecuente y se la puede clasificar de acuerdo al sitio donde se produce o a la actividad que la genera (**urbana** y **rural**) o (**doméstica, industrial, agropecuaria**).

**5.2.1. Urbana:** vertidos domésticos; residuos de los escapes de los motores; pérdidas en las redes cloacales; lixiviados de basuras o rellenos sanitarios; humos y desechos líquidos, sólidos y semisólidos de la industria.

**5.2.2. Rural:** el origen de los contaminantes y las fuentes de polución, se detallan en el punto 5.2.5.

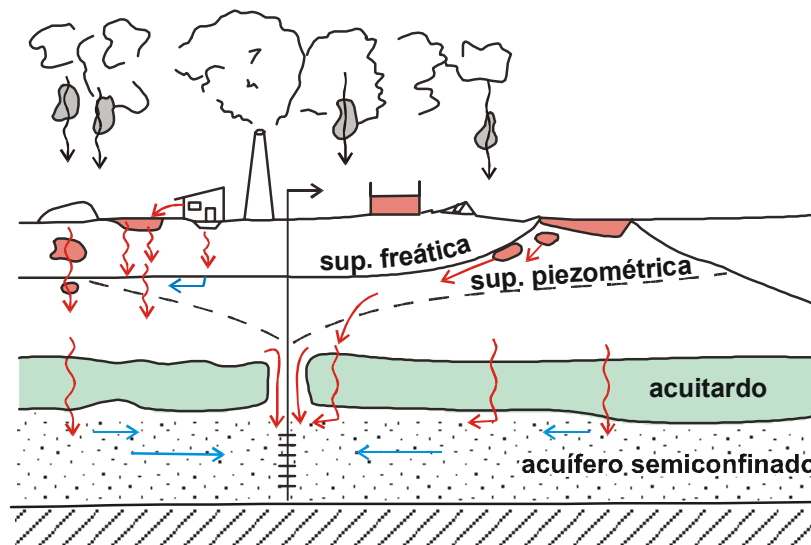
**5.2.3. Doméstica:** vertido de jabones, detergentes, lavandina, materia orgánica (alimentos, fecal, basura en general). Cuando no se dispone de desagües cloacales, el resultado es la generación de ambientes propicios para la reproducción bacteriana y la formación de  $\text{NH}_3$ ,  $\text{NO}_2^-$  y  $\text{NO}_3^-$ .

**5.2.4. Industrial.** Contaminación de la atmósfera por la eliminación de humos y otros compuestos gaseosos y del suelo y el agua por vertidos líquidos, sólidos y semisólidos. Además por la infiltración de los contaminantes atmosféricos, que caen solos o arrastrados por la lluvia.

La industria produce la gama más numerosa y variada de contaminantes. En los países desarrollados, a fines de la década de 1980, se estimaba en aproximadamente 1 millón la nómina de compuestos orgánicos. De estos, unos 40.000 se producen y se utilizan en forma corriente, pese a que un número significativo es tóxico en diferente grados. A los citados hay que agregarle los metales pesados, fenoles, hidrocarburos, plaguicidas, etc.

De los mencionados, algunos son altamente tóxicos, aún en concentraciones de millonésimas de gramo por litro de solución.

**Fig. 2**



En la figura 2 se reproduce esquemáticamente la producción industrial de contaminantes, la emisión al aire y los vertidos sobre el suelo y en el subsuelo.

Los humos contienen contaminantes en diferentes estados (sólido, líquido, gaseoso) que deterioran al aire y luego llegan al suelo por su propio peso o arrastrados por la lluvia. Generalmente tienden a concentrarse en las depresiones topográficas (ríos, lagos, lagunas), llevados por el escurrimiento superficial, o a infiltrarse y pasar al subsuelo, si existen condiciones favorables para ello.

En la figura, se aprecia también la migración a través de capas de baja permeabilidad (acuitardos), favorecida por el bombeo del acuífero semiconfinado

subyacente, lo que genera una sobrecarga favorable al acuífero libre sobrepuesto. Este proceso fue el que permitió la migración de los  $\text{NO}_3^-$  contenidos en el Acuífero Pampeano hacia el Puelche infrapuesto, con el consecuente deterioro en la calidad de este último, en el Conurbano de Buenos Aires y en La Plata.

**5.2.5. Agropecuaria.** Empleo de plaguicidas y fertilizantes para mejorar la productividad. Los primeros (organoclorados u organofosforados), son altamente tóxicos (DDT, Aldrín, Dieldrín, Paratión, Malatión, Folidol, etc.). Fertilizantes (materia nitrogenada, fósforo y potasio). La materia nitrogenada se oxida a  $\text{NO}_3^-$  que es muy soluble, estable y móvil, mientras que el P, el K y sus derivados son fijados con facilidad por las partículas arcillosas del suelo.

Otra fuente de contaminación en el ámbito rural, es la producida por las heces del ganado en corrales, tambos y bebederos, y especialmente en los feed lots, que concentran altas cargas de materia orgánica. En estos casos al deterioro en la calidad bacteriológica, hay que agregarle un fuerte incremento en el tenor de  $\text{NO}_3^-$ .

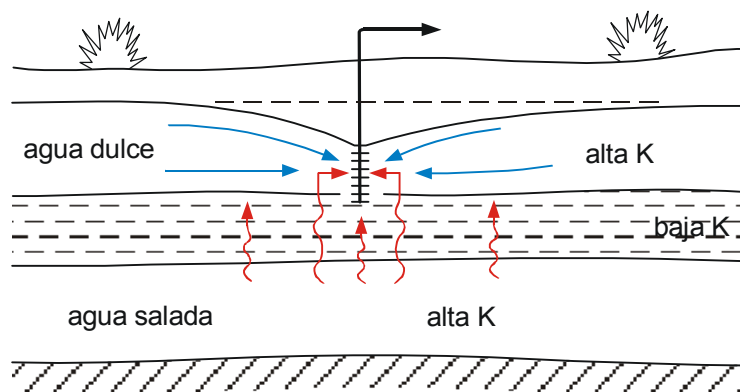
La solubilidad, movilidad y degradabilidad, condicionan el comportamiento del contaminante en relación a su permanencia y perdurabilidad en el medio. Así, las bacterias provenientes de los vertidos fecales, rara vez subsisten mas de 50 días en el agua si esta no posee una adecuada concentración de materia orgánica.

Los  $\text{NO}_3^-$  por su parte pueden mantenerse en solución en forma casi indefinida, salvo que sean reducidos a  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{NH}_3$  o  $\text{NH}_4^+$ , por el potencial redox del medio o por actividad bacteriana.

### 5.3. Artificial inducida

Es la que deriva de la sobreexplotación; la más común es la salinización en acuíferos costeros, o por ascenso de agua salada de fondo en acuíferos continentales (figura 3). Otro caso frecuente es el que se menciona en el punto 6.3.1 respecto a los  $\text{NO}_3^-$

Fig. 3



## 6 - ZONA SUBSATURADA

Es la sección que se ubica inmediatamente por encima de la superficie freática y en ella coexisten los 3 estados de la materia (sólido, líquido y vapor).

La zona subsaturada posee gran trascendencia hidrogeológica, no sólo en el aspecto dinámico sino también geoquímico, pues es en ella, particularmente en su franja más superficial (faja edáfica), donde se produce la mayor incorporación de las sales solubles que caracterizan al agua subterránea de ciclo. Además, la zona **subsaturada o de aireación, o no saturada**, es un efectivo filtro natural frente a los contaminantes, en su recorrido descendente hacia la zona saturada, o del agua subterránea propiamente dicha. En la figura 4 se representa la distribución del agua en el subsuelo.

### 6.1. Química

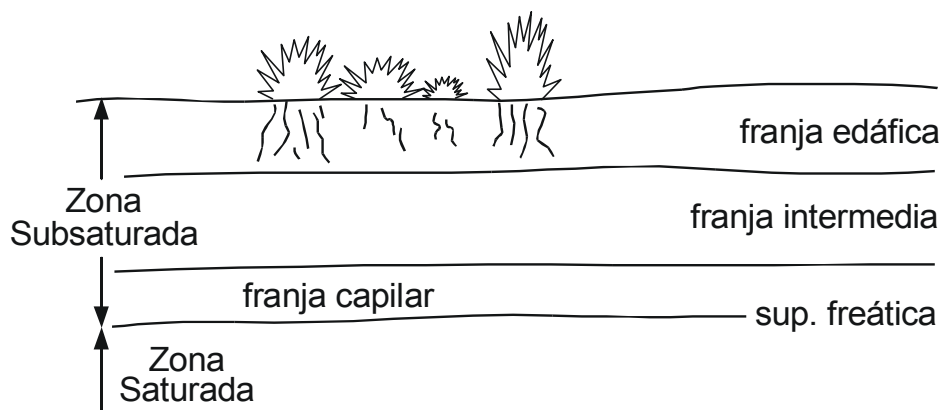
Los procesos químicos que afectan la concentración de un soluto son tan variados, que incluso algunos presentan una componente física o biológica dominante (adsorción, degradación). Otros, netamente químicos, son: intercambio iónico, disolución - precipitación, oxidación - reducción, modificaciones en el pH, formación de complejos iónicos, etc.

### 6.2. Generalidades

La eficacia de la zona subsaturada para impedir o dificultar el acceso de los contaminantes al agua subterránea deriva de: la capacidad de fijación que poseen los microporos, la interacción del sólido, agua, contaminante y aire, el intercambio iónico, la actividad biológica, la adsorción sobre las partículas finas, la formación de complejos de baja solubilidad, etc.

Dentro de la zona subsaturada, la franja edáfica (hasta donde penetran las raíces) es la más efectiva como filtro natural, debido a su alto contenido en materia orgánica y fuerte actividad biológica (figura 4).

Fig. 4



Los contaminantes persistentes y estables ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ) no son retenidos en la zona de aireación, aún cuando ésta presente baja permeabilidad y espesor considerable, cuando existe excedente en el balance hídrico e infiltración efectiva (zonas húmedas).

### 6.3. Comportamiento de los contaminantes más comunes

#### 6.3.1. Nitratos

La contaminación con  $\text{NO}_3^-$  se ha convertido en una de las causas principales de deterioro del agua subterránea, tanto en los países desarrollados como en los en desarrollo.

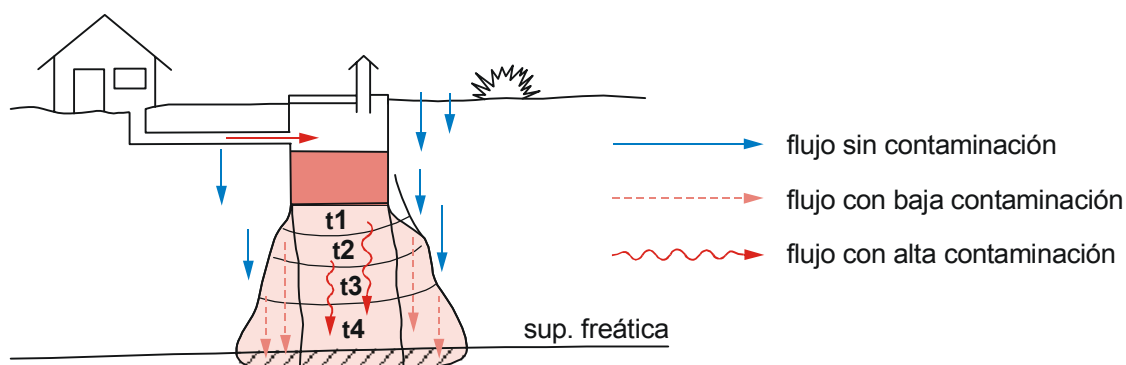
También se presenta en los ámbitos urbanos, provistos de servicios sanitarios y en aquellos que no los tienen; en pequeñas ciudades o poblados y en las megalópolis (México, Sao Paulo, Buenos Aires, Lima); en las comarcas rurales y en los emplazamientos industriales.

En definitiva, en la actualidad, la contaminación con  $\text{NO}_3^-$  aparece como la más difundida geográficamente y vinculada a la mayor parte de las actividades humanas.

En los **centros urbanos carentes de servicios cloacales** los  $\text{NO}_3^-$  derivan de la degradación de la materia orgánica, mayormente de origen fecal. Los pozos ciegos o negros, en los que se vierten los desechos fecales, son las fuentes de emisión principales.

El espesor y la permeabilidad de la zona subsaturada condicionan la velocidad y el tiempo de tránsito hasta la saturada, favoreciendo la disminución en la concentración, por dilución, en el caso de producirse infiltración efectiva de agua no contaminada (figura 5). Sin embargo, la zona de aireación por sí sola, no es hábil para detener a los  $\text{NO}_3^-$  cuando existe flujo vertical descendente.

Fig. 5

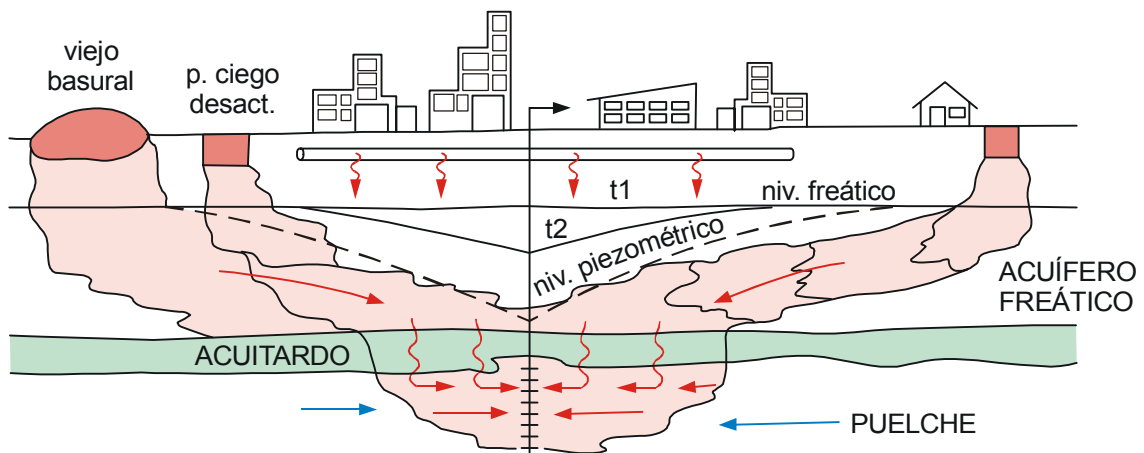


En las **ciudades con servicios cloacales**, los  $\text{NO}_3^-$  derivan de pérdidas en las redes, de aportes provenientes de los suburbios, que carecen o tienen poca cobertura cloacal, de viejos pozos ciegos que estaban situados en los cascos urbanos, y fueron reemplazados posteriormente por las redes sanitarias y en algunos casos, de antiguos

repositorios de basura que estuvieron emplazados en la vecindad del ejido poblado y que luego de desactivados, fueron empleados como terrenos para viviendas o parqueizados.

En los ámbitos urbanos es frecuente que la contaminación con  $\text{NO}_3^-$  no sólo deteriore la calidad del agua freática, sino también la de acuíferos semiconfinados, como sucede en gran parte del Conurbano de Buenos Aires y en La Plata, donde la contaminación es de tipo areal o regional y llega al acuífero inferior (semiconfinado), luego de atravesar el acuitardo que lo separa de la capa freática, por el proceso de filtración vertical descendente (figura 6).

Fig. 6



Este proceso se genera por la disminución de presión hidráulica en la base del acuitardo, derivada de la importante extracción a que está sometido el acuífero semiconfinado, para agua potable y uso industrial.

En la zona subsaturada, la materia orgánica se degrada por actividad biológica, generando aminas las que producen nitrógeno orgánico y éste a su vez pasa a  $\text{NO}_2^-$  y a  $\text{NH}_4^+$ , que son inestables y se oxidan rápidamente para formar  $\text{NO}_3^-$ , que es la forma más estable y móvil de la materia nitrogenada.

En el **campo**, los  $\text{NO}_3^-$  derivan de fertilizantes a base de abonos, sulfato de amonio o urea, en los sitios cultivados y de la bosta y orín existentes en corrales, tambos, feed lots y en la vecindad de bebederos. También es común encontrar tenores altos de  $\text{NO}_3^-$ , derivados de los pozos ciegos que se utilizan para las descargas fecales de las viviendas rurales. En general este tipo de contaminación es puntual o localizada, particularmente la vinculada a corrales y pozos ciegos.

En la faja cultivada que rodea a La Plata, también tiene carácter local, pese a que la carga de materia orgánica y nitrogenada que se aplica al suelo para mejorar su productividad es alta.

La **industria** que produce alimentos, la que faena, la que embute carnes y la que procesa y fabrica productos lácteos, genera desechos con alta proporción de materia orgánica, que si no son adecuadamente tratados y dispuestos, darán lugar a la

formación de  $\text{NO}_3^-$ , que pueden contaminar al agua subterránea luego de atravesar la zona subsaturada.

### 6.3.2. Pesticidas o plaguicidas

Se agrupa con estas denominaciones a los herbicidas, insecticidas y fungicidas. Se trata de sustancias químicas de composición muy diversa, en general de carácter orgánico y de alta toxicidad aún en muy bajas concentraciones ( $\mu\text{g/l}$ ).

Los pesticidas se pueden clasificar en: **organoclorados**, altamente tóxicos y persistentes en el suelo y los vegetales; **organofosforados**, también tóxicos, pero con alta movilidad y baja persistencia y los **carbamatos**, cuyo comportamiento en el suelo es similar a los organofosforados.

**Organoclorados (OCI)**. Se caracterizan por un importante efecto residual (persistencia) y por su baja solubilidad y movilidad. Justamente el efecto residual y su alta toxicidad, agravada por el efecto acumulativo en el organismo, hizo que algunos fueran prohibidos en los países del Norte, como el DDT, que es uno de los más conocidos. Actualmente en Argentina, está prohibido el uso de todos los organoclorados.

Felizmente, los OCI están compuestos por moléculas grandes por lo que son fijados con facilidad en el suelo, especialmente por las partículas arcillosas. Ello inhibe su movilidad y hace muy difícil que puedan atravesar la zona subsaturada y alcanzar al agua subterránea. En sitios donde la zona de aireación es delgada (menos de 2 m) y compuesta por material aluvial mediano y grueso (arena, grava) los organoclorados pueden llegar hasta el agua freática. Otros OCI usados con frecuencia como plaguicidas son el Aldrín, Dieldrín, Heptacloro y Lindano, todos con vidas medias o persistencia en el suelo del orden de años.

**Organofosforados (OP)**. Son más solubles y móviles que los OCI, pero mucho menos persistentes. Los más utilizados son: Malatión, Paratión, Fentión y Dimetoato. Sus vidas medias en el suelo van de semanas a meses.

**Carbamatos (Cb)**. Son los más solubles y se comportan de manera similar a los OP, tanto en movilidad como en persistencia. El más empleado es el Carbaryl.

En el cuadro 5, se indican los plaguicidas más utilizados en Argentina, el índice de solubilidad y la persistencia en el suelo.



**CUADRO 5**

	<b>solubilidad mg/l</b>	<b>persistencia en el suelo años</b>
<b>Organoclorados (OCI)</b>		
Aldrín	180	1 – 4
Dieldrín	195	1 – 7
DDT	25	3 – 10
Heptacloro		7 – 12
Lindano	6800	
<b>Organofosforados (OP)</b>		días
Malatión		
Paratión		100
Fentión		
Dimetoato		122

El efecto producido por los distintos pesticidas en el organismo del hombre y de los animales es poco conocido. Sin embargo, la EPA (Environmental Protection Agency de EUA) considera que la mayoría son potencialmente cancerígenos o generadores de alteraciones en el sistema nervioso, hepático o renal y por ello, les fija límites máximos en el agua que van desde unidades de ug/l a décimas de ug/l (cuadro 6).

**6.3.3. Metales pesados.** Forman un grupo de compuestos poco solubles y altamente tóxicos, en bajas concentraciones. La mayoría de las normas les asigna límites de potabilidad mayores, que a los pesticidas y las más severas se refieren al Cd y al Hg (cuadros 6, 7, 8, 9, 10, 11 y 12).

Los metales pesados más comunes son Cd, Mn, Pb, Cu, Cr, Ni y Zn y derivan de contaminación, principalmente de la producida por la industria. Más raro es que tengan origen natural, generalmente en sedimentos relacionados con yacimientos metalíferos.

En general no se presentan como iones libres, sino formando complejos aniónicos asociados a compuestos orgánicos, de baja movilidad, aunque esta depende de su grado de oxidación; el Cr<sup>+3</sup> p.ej. es fácilmente retenido por el terreno, pero como Cr<sup>-4</sup> es mucho más móvil.

**6.3.4. Hidrocarburos** Los HC son compuestos orgánicos que por sus características, conviene tratarlos independientemente. En efecto, se diferencian de los plaguicidas, por su densidad, volatilidad e inmiscibilidad.

Si bien existen excepciones, los HC más comunes suelen ser menos densos que el agua, es frecuente que se volatilicen en mayor o menor medida y en general son

inmiscibles en agua, por lo que pueden presentarse formando una fase líquida no acuosa (FLNA).

La propagación de un HC en la zona subsaturada depende de las características propias del suelo, o la roca que la forma (porosidad, permeabilidad, composición mineralógica, anisotropía, heterogeneidad, espesor) y del grado de saturación que presente, por un lado y de las propiedades del HC por el otro (densidad, viscosidad, solubilidad).

En términos generales los HC se pueden clasificar en parafínicos, nafténicos, aromáticos volátiles y aromáticos polinucleares, ordenamiento en el que acrecientan su solubilidad.

Para la propagación vertical de un HC libre, se puede utilizar la siguiente ecuación (Kozlovsky, 1984):

$$p = \frac{HCi \cdot 1000}{Ai \cdot Cs}$$

p: profundidad alcanzada por el HC (m)

HCi: cantidad de producto infiltrado (m3)

Ai: área en la que se produjo la infiltración (m2)

Cs: capacidad de retención del suelo frente al HC (l/m3)

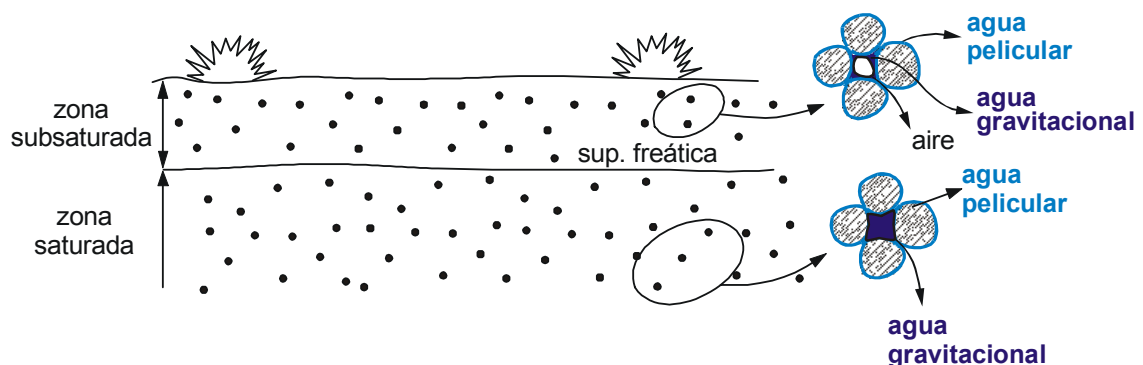
Las magnitudes de Cs en función de la granometría de la zona subsaturada son:

grava y grava arenosa	5 l/m3
arena gruesa	8 "
arena mediana	15-25 "
arena fina y arena arcillosa	40 "

## 7. ZONA SATURADA

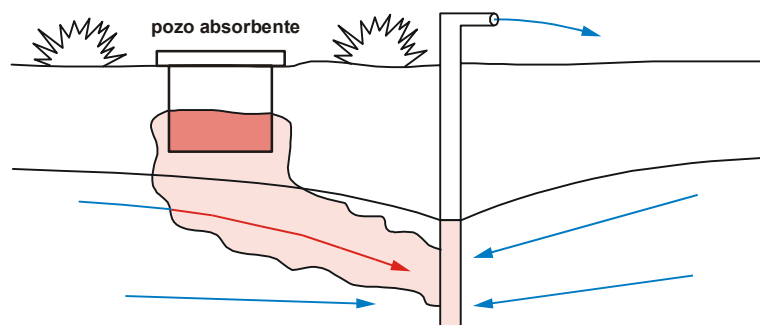
En la zona saturada sólo se presentan los estados líquido (agua) y sólido (sedimentos).

Fig. 7



El agua contenida en la zona de saturación es de dos tipos. Una prácticamente inmóvil, está adherida a la superficie de los clastos con una fuerza superior a la de la gravedad, generalmente denominada **pelicular**. La otra, que se dispone recubriendo a la pelicular, es móvil bajo la acción gravitatoria, por lo que se llama **agua gravitacional** y dado que es la que se extrae en las obras de captación, resulta la más peligrosa como medio de transporte de eventuales contaminantes (figura 8).

**Fig. 8**



El desplazamiento de un contaminante en el agua, está controlado por varios factores: la solubilidad, la reactividad con el agua y con el suelo, el tamaño molecular, la relación disolución - precipitación, la permeabilidad y porosidad del medio, la persistencia, la difusión molecular, la dispersión mecánica, etc.

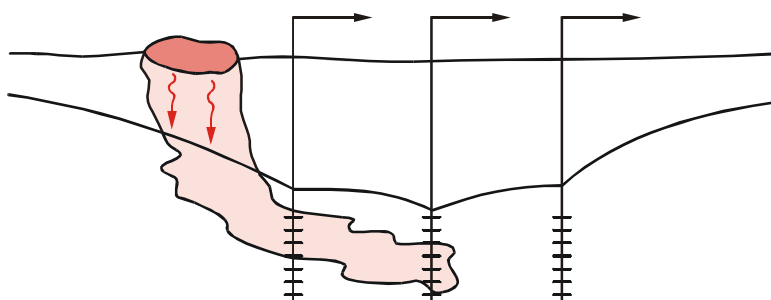
De cualquier manera, la velocidad de propagación no puede ser mayor que la del agua subterránea y el sentido seguirá al del flujo hidráulico. Algunos compuestos altamente solubles y móviles y que no reaccionan con el componente sólido ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ), se mueven prácticamente a la misma velocidad que el agua y por ello se los emplea como trazadores. Los  $\text{NO}_3^-$ , sin embargo, pueden ser reducidos por el medio, o por bacterias desnitrificantes que, en el caso de existir, modifican significativamente su concentración.

Dado que al tratar el tema en la zona subsaturada, se hizo referencia a los contaminantes generados por diferentes tipos de actividades y a sus características específicas, aquí se tratará sobre el comportamiento dinámico de los mismos.

En lo que hace al volumen del recurso deteriorado, se puede clasificar a la contaminación en: **puntual y difusa**.

**7.1. PUNTUAL.** Afecta a un volumen reducido del acuífero, extendiéndose sobre una superficie pequeña (Ej. contaminación que afecta a un pozo o a unos pocos pozos) y se caracteriza por presentar elevadas concentraciones (figura 9).

**Fig. 9**



**7.2. DIFUSA** Afecta a volúmenes significativos del acuífero y en general presenta concentraciones relativamente bajas del o los contaminantes, pero es de más difícil corrección que la puntual. En el ejemplo de la figura 8, la contaminación deteriora al acuífero freático, que es el más expuesto, pero también al semiconfinado subyacente, mediante el flujo descendente a través del acuitardo. Este mecanismo es el responsable del incremento en los tenores de  $\text{NO}_3^-$  registrados en el Acuífero Puelche (semiconfinado) en el Conurbano Bonaerense y en La Plata.

La llegada de un contaminante no reactivo (no se separa del agua, ni reacciona, ni es retenido por el terreno) a un pozo, se produce luego de su pasaje a través de las zonas subsaturada y saturada.

A efectos de disponer de órdenes de magnitud respecto al tiempo de tránsito, considerando un medio isótropo y homogéneo, se pueden emplear las siguientes ecuaciones para contaminaciones de tipo puntual (Custodio, 1994):

$$T_s = E \cdot h_r / R \qquad t_s = d \cdot m / K \cdot i$$

$T_s$ : tiempo de tránsito por la zona subsaturada

$E$ : espesor de la zona subsaturada

$R$ : recarga local

$h_r$ : humedad relativa del suelo

$t_s$ : tiempo de tránsito por la zona saturada

$d$ : distancia horizontal (foco - captación)

$m$ : porosidad efectiva

$K$ : permeabilidad

$i$ : gradiente hidráulico

La ecuación para el medio subsaturado es demasiado simplista, pues no considera la permeabilidad vertical del mismo.

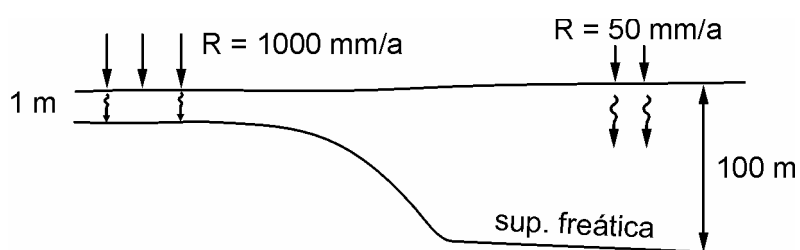
En la tabla I, se indican los tiempos de tránsito a través del medio subsaturado y saturado, para condiciones de recarga baja, media y alta (Custodio, 1994)

**TABLA I**

Medio no saturado									
E (m)	1	1	1	10	10	10	100	100	100
R (m/año)	0,05	0,2	1	0,05	0,2	1	0,05	0,2	1
hr	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Ts (años)	2	0,5	0,1	20	5	1	200	50	10

De la tabla se desprende que, en función de los parámetros utilizados, los extremos para el tránsito en el medio subsaturado son 1 mes y 200 años. En el primer caso para una condición de recarga alta (1.000 mm/año) y reducido espesor de la zona de aireación (1 m) y el segundo, para 100 m de zona subsaturada y baja recarga (50 mm/año).

**Fig. 10**



**TABLA II**

Medio saturado						
d (m)	10	10	10	1000	1000	1000
K (m/días)	1	10	100	1	10	100
m	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
l	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025
v (días)	100	10	1	10000	1000	100
v (años)	0,3	0,03	0,003	30	3	0,3

En la tabla II se señalan los tiempos de tránsito en medio saturado, para distancias de 10 y 1.000 m, entre el punto de ingreso y el pozo, con permeabilidades de 1, 10 y 100 m/d, porosidad efectiva del 25% y gradiente hidráulico del 2,5%, apreciándose que el tránsito puede variar entre 1 día y 27 años, considerando condiciones extremas.

Si la contaminación es **difusa**, abarca un volumen significativo del acuífero y la relación entre las concentraciones de entrada y salida del sistema, en condición de flujo estacionario es:

entrada - salida = aumento en el medio

$$c_e \cdot R - c_s \cdot R = V dc/dt$$

R: recarga = descarga

$c_e$ : concentración que la recarga adquiere a partir de la polución difusa (concentración de entrada)

$c_s$ : concentración en el punto de muestreo (concentración de salida)

V: volumen de agua en el acuífero

$$t_m = V/R \quad t_m: \text{ tiempo medio de renovación}$$

$$(C_e - C_s)/(C_e - C_o) = \exp [1/t_m (t-t_a)]$$

$C_o$ : concentración inicial (nivel base o background)

$t_a$ : tiempo de tránsito por la zona subsaturada

t: tiempo a partir del ingreso del contaminante al medio

La interpretación matemática del transporte de un contaminante, se puede hacer mediante las ecuaciones de **flujo** y **de transporte de masa**.

### 7.3. FLUJO

$$\text{div}(k \text{ grad } h) + F = S_v dh/dt$$

k: tensor de permeabilidad

h: potencial hidráulico

F: término volumétrico (entrada/salida.tiempo)

$S_v$ : almacenamiento específico

### 7.4. TRANSPORTE

$$m \cdot \text{div}(D \cdot \text{grad } c) - m \cdot \text{div}(V \cdot c) + Q = dc/dt$$

m: porosidad

V: veloc. intergranular del agua

D: dispersividad

t: tiempo

c: concentración del soluto

Q: término volumétrico del soluto por unidad de volumen del acuífero

### 7.5. PROPAGACION

La forma de producirse, de propagarse, de situarse y la intensidad de la contaminación, dependen de las características y ubicación de la fuente de polución, de las propiedades del contaminante (reactivo - no reactivo) de su movilidad, de la recarga y de las características del medio (permeabilidad, porosidad, anisotropía, heterogeneidad), que inciden en las del agua (gradiente hidráulico, velocidad de flujo). Por ello, existe una variedad muy grande de situaciones, en realidad una para cada

caso, lo que hace muy difícil realizar generalizaciones. Sin embargo, se hará mención a las más frecuentes.

En la figura 11 (Custodio, 1994), se aprecia la propagación de un contaminante localizado o focalizado, a través de un acuífero libre, siguiendo el sentido principal del flujo.

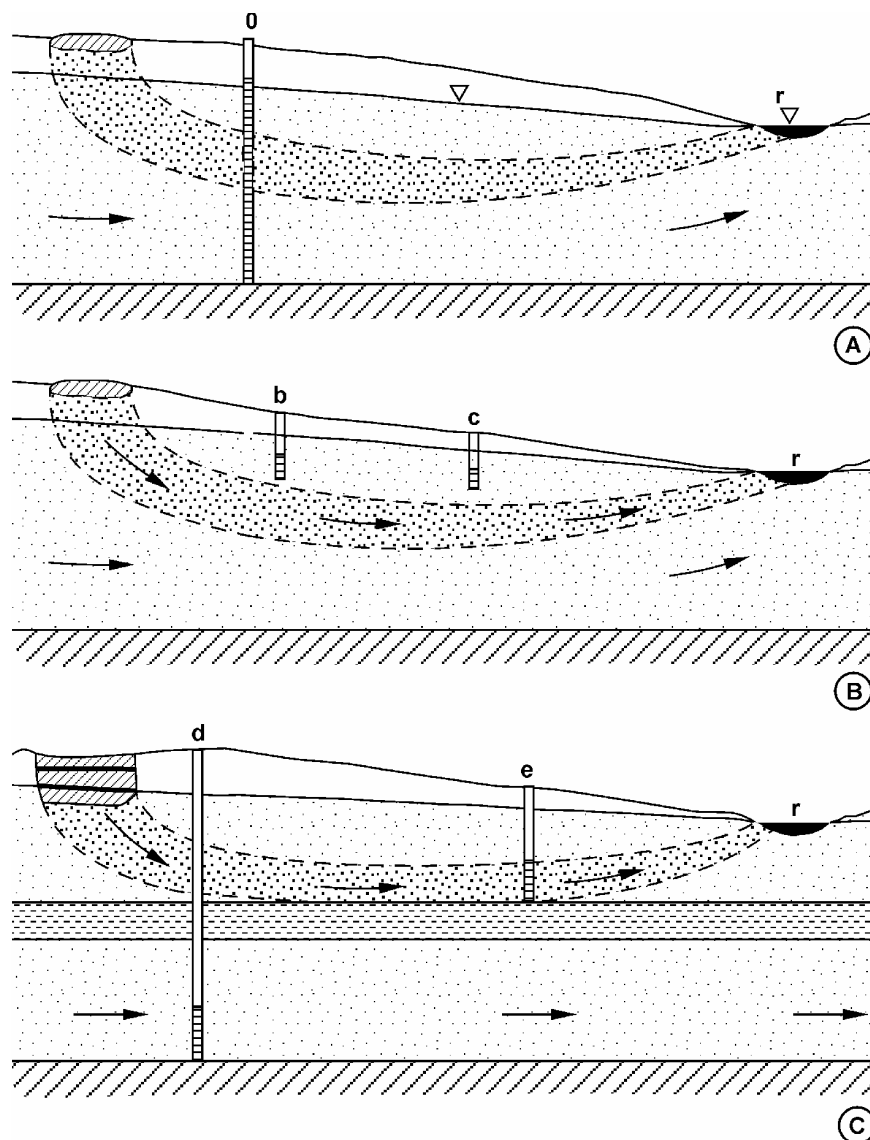
El pozo a va a brindar una muestra bastante diluida en la concentración del contaminante, particularmente si se la extrae por bombeo, debido a la longitud del filtro (A).

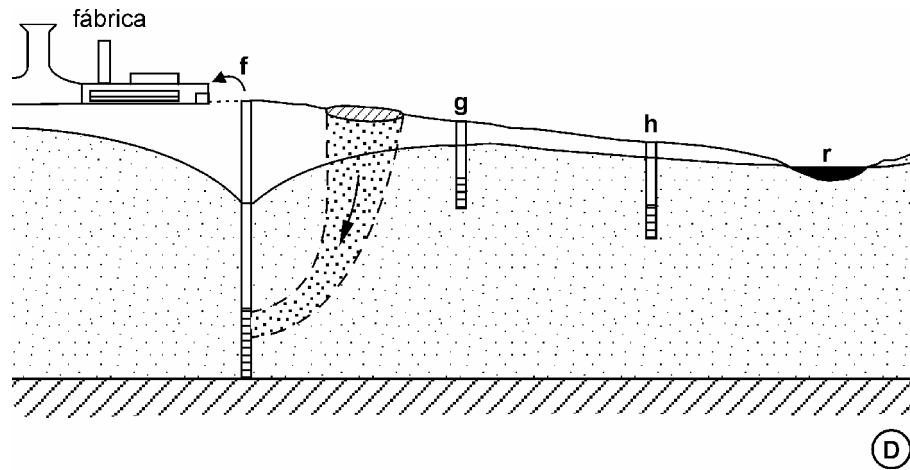
Los pozos b y c (B), no registran contaminación alguna, toda vez que su profundidad es menor a la que se ubica la pluma de contaminación.

El pozo d tampoco detecta contaminación, pues capta de un acuífero subyacente, pero sí lo hará el e más alejado de la fuente (C).

Finalmente en (D), el bombeo industrial invierte el sentido del flujo, evitando la llegada del contaminante al río, al menos mientras se mantenga el cono de depresión.

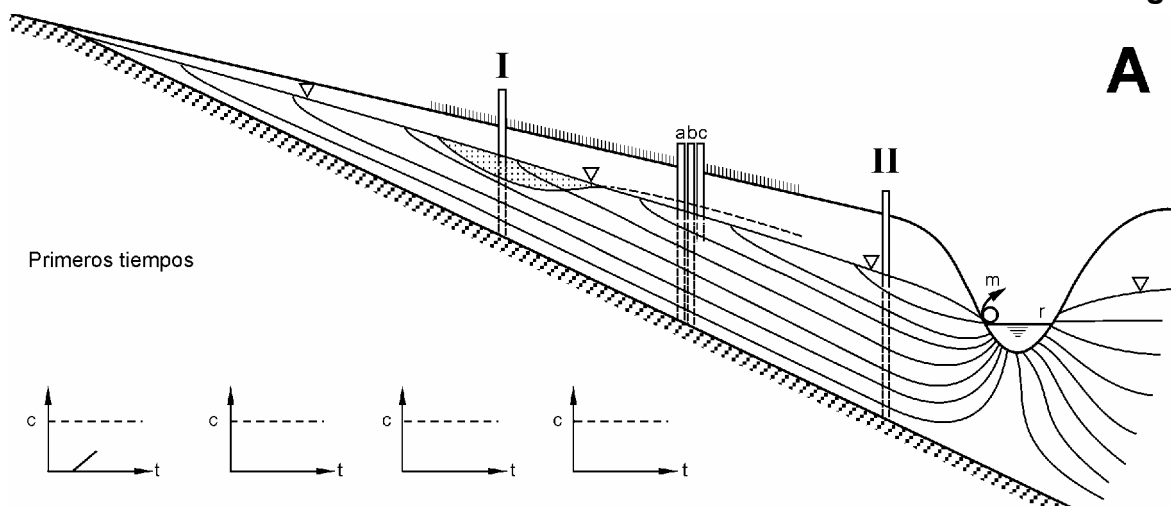
Fig. 11



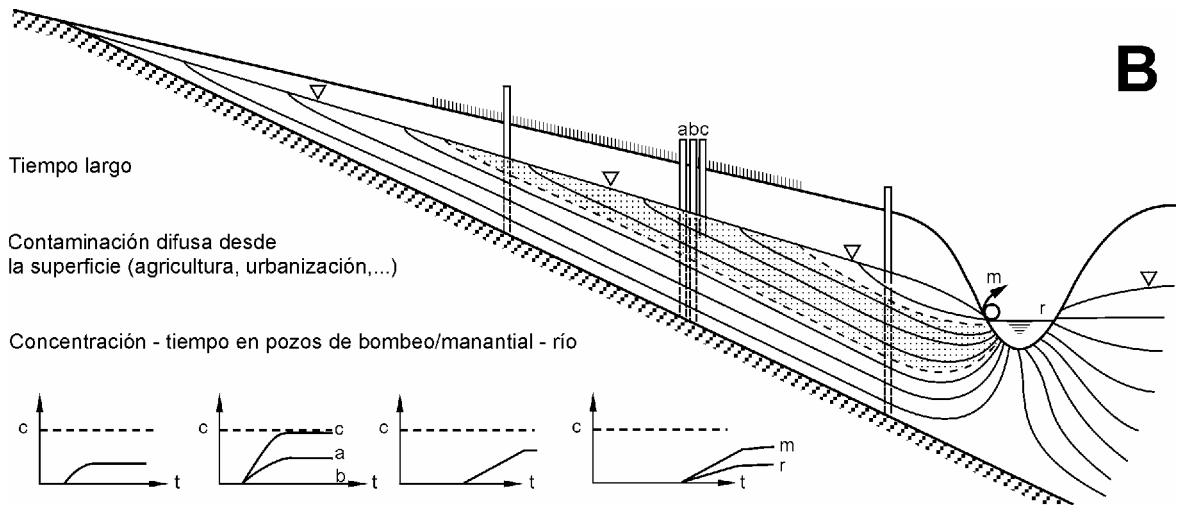


En la figura 12 (Custodio, 1994), se ejemplifica la evolución de un pluma de contaminación agrícola. Luego de alcanzar la superficie freática, el contaminante comienza a migrar en dirección del flujo; la dispersión mecánica y la difusión molecular permiten, junto con la persistencia de la entrada al medio, el incremento en el volumen de la pluma. Para tiempos cortos (A), el único pozo que detecta la contaminación y bastante diluida por su posición es el I. El grupo de los pozos (a b y c), el manantial y el río, no registran contaminación alguna. Para tiempos largos (B), la propagación de la pluma crece llegando al manantial y al río. En el grupo de pozos, el **a** observa una concentración diluida, el **b** no resulta afectado y el **c** registra la contaminación sin dilución. En el pozo II también se muestrea mezcla de agua contaminada y sin contaminar.

Fig. 12





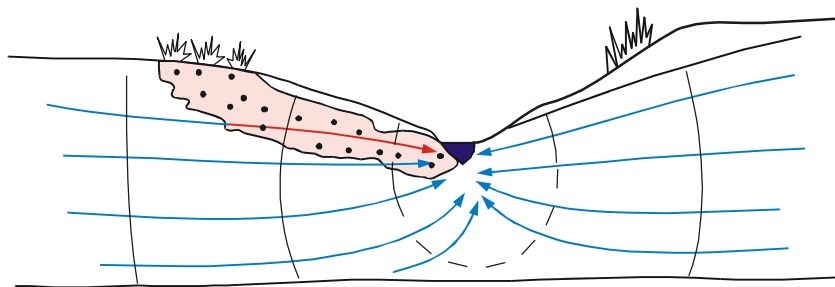


**Efecto de contaminación difusa (agrícola) en un acuífero libre homogéneo. Primero debe penetrar la contaminación a través del medio no saturado, y el medio saturado es alcanzado en primer lugar allí donde el espesor del medio no saturado sea menor (o la recarga sea mayor). El río (r) y los manantiales (m) reciben la contaminación diferida y diluída. El pozo mas aguas arriba es el primero en detectar el efecto poco diluído a causa de la mezcla vertical que produce. En el grupo a, b, c, el pozo a produce una mezcla, el b no resulta afectado y el c acaba recibiendo la contaminación sin dilución. Los gráficos indican la evolución temporal de concentraciones.**

La relación de potenciales hidráulicos entre el agua superficial y la subterránea, controla la posibilidad de que se produzca contaminación de una de ellas, a partir de la otra.

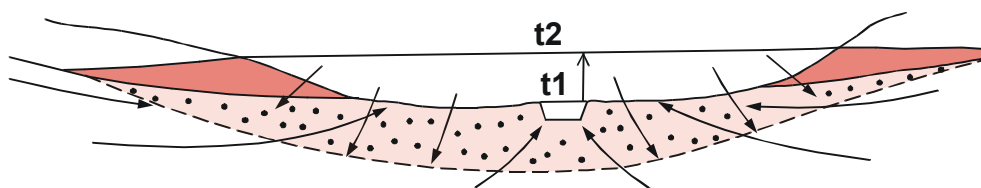
Así, si el río es **efluente** (recibe aporte subterráneo), no es posible que exista contaminación difusa del agua subterránea a partir de la superficial,

**Fig. 13**



pero sí de esta última, como resultado del aporte subterráneo (figura 13). Solamente puede producirse contaminación localizada en la vecindad de las márgenes, si el tirante del río sube y se invierte la relación de potenciales hidráulicos (figura 14).

Fig. 14



- t1: tirante del río agua normal.
- t2: " " " en crecida
- margen contaminada con agua superficial
- ⋯ mezcla de agua subterránea y superficial

Cuando el río retorna a su tirante normal, la condición hidráulica vuelve a la indicada en la figura 13.

El agua subterránea corre peligro cierto de contaminación a partir del agua superficial, si el río es influente (figura 15).

Fig. 15

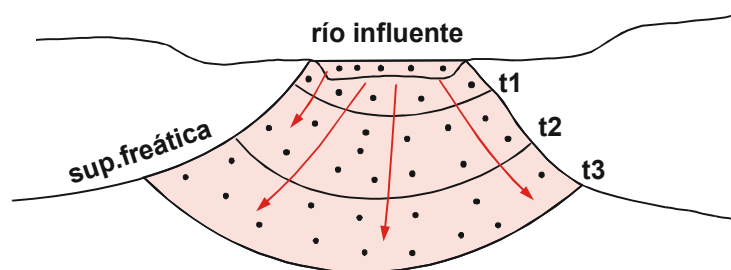
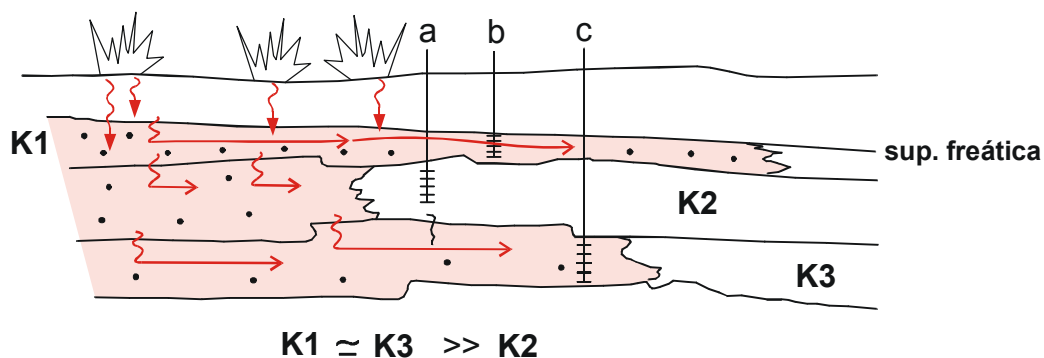


Fig. 16



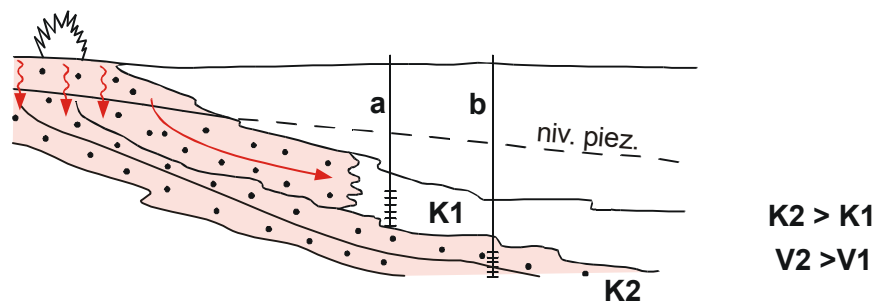
En un acuífero heterogéneo como el de la figura 16, la contaminación difusa desde superficie, se propaga con relativa facilidad a través del medio 1. Parte de ella llega al medio 2, donde la velocidad disminuye notoriamente debido a su baja permeabilidad. En 3, por el aumento de la permeabilidad, vuelve a incrementarse la velocidad de propagación.

El pozo (b) registra la pluma de contaminación en un tiempo ( $t_1$ ) pero no el (a), más cercano a la fuente de polución debido a la baja velocidad de propagación en el medio 2. El 3, más profundo, pese a manifestar un retardo respecto al medio 2 frente al flujo vertical, presenta un mayor desplazamiento lateral de la pluma, que es identificada por el sondeo (c), en un tiempo  $t_2$ , mientras que el sondeo (a), aún no la registra.

En caso de cesar el ingreso de contaminantes al sistema subterráneo, la recarga será mucho más activa en los medios 1 y 3, lo que dará lugar a una disminución relativamente rápida de la contaminación por dilución. El medio 2, debido a su baja dinámica, recibirá menor aporte y por ende el proceso de dilución será bastante más lento, lo que permitirá una mayor persistencia de la contaminación.

En un acuífero confinado, la polución puede producirse en el ámbito de recarga, generando contaminación difusa. Como en el caso anterior, si el acuífero es heterogéneo y la unidad geológica presenta estratificación gradada, casi seguramente  $K_2 > K_1$  y la velocidad de propagación por el medio 2 ( $V_2 > V_1$ ), por lo que la pluma avanza más rápidamente en 2 que en 1 y es detectada antes en el pozo b (figura 17).

Fig. 17



Si finaliza el aporte de contaminantes, en el pozo **a** se seguirá registrando la contaminación bastante tiempo después de su desaparición en el sondeo **b**.

Los ejemplos demuestran claramente la incidencia que ejerce el medio (mayor o menor heterogeneidad) y la dinámica del agua subterránea, en los procesos de contaminación y lo complicado que resulta detectarla y cuantificarla.

Por ello, para lograr un seguimiento adecuado (monitoreo) es necesario conocer las características y el comportamiento hidrogeológico de los acuíferos y de sus unidades asociadas.

Un caso particular, es el de los hidrocarburos, dado que la mayoría son inmiscibles (forman una fase líquida no acuosa). Muchos son menos densos que el agua (flotan), pero también los hay más pesados (solventes orgánicos - triclorobenceno, tricloroetileno, tetracloruro de carbono, etc).

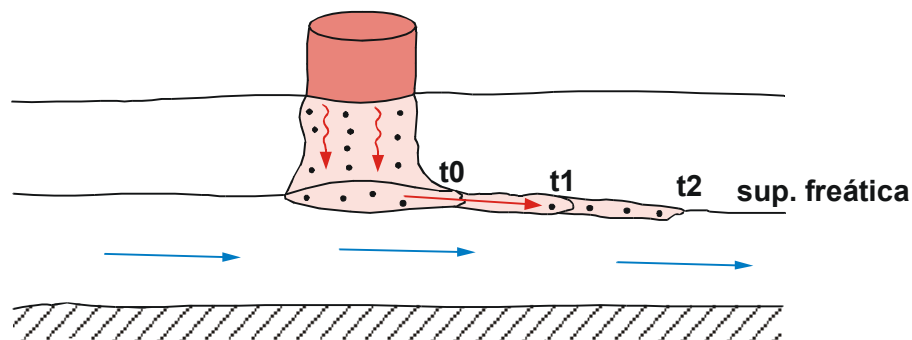
En el primer caso (figura 18) los HC, luego de atravesar la zona subsaturada, llegan a la saturada, dejando una **mancha** en la primera, de hidrocarburos inmóviles

(saturación irreductible). La mancha origina la contaminación del agua que se infiltra, debido a que una fracción de los HC es soluble.

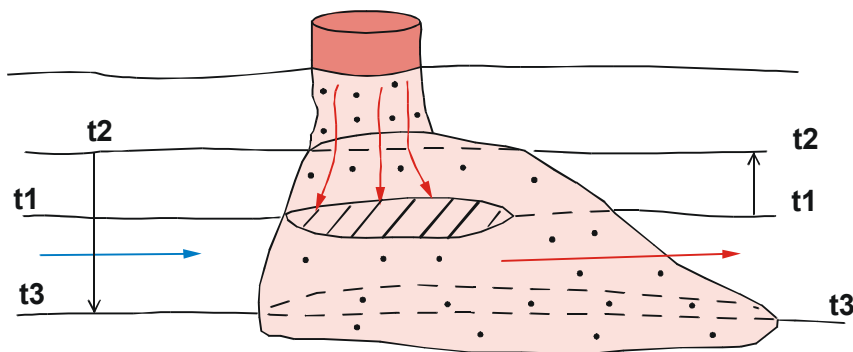
Una vez instalada sobre el agua freática, la acumulación de HC se desplaza lateralmente arrastrada por el flujo hidráulico, pero a una velocidad bastante menor que el agua, relación en la que influye notoriamente la viscosidad del HC.

La oscilación de la superficie freática desplaza verticalmente al HC, dando lugar a una mancha que puede ubicarse por encima o por debajo del nivel del agua subterránea (figura 19). Esta situación se magnifica cuando la superficie hidráulica está influenciada por el bombeo (figura 20).

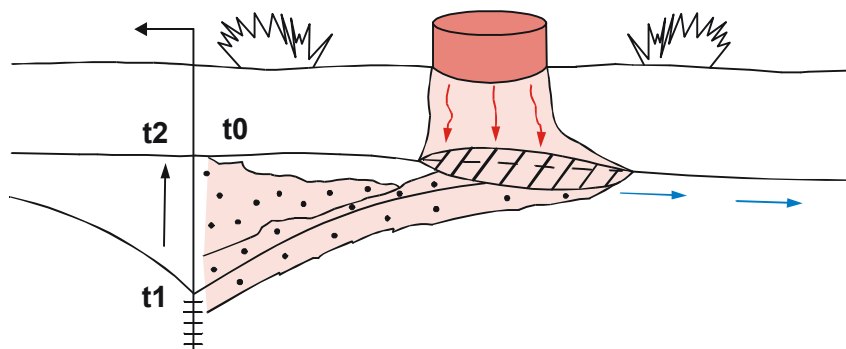
**Fig. 18**



**Fig. 19**



**Fig. 20**



En el punto 6.3.4 se mencionó la ecuación para estimar la propagación vertical de un HC en la zona subsaturada y seguidamente se desarrolla otra, empleada por el mismo autor, para establecer la propagación areal de un HC en su fase líquida, sobre la superficie freática o la franja capilar.

$$A_g = (V_i - V_s) \cdot 1000/D_o$$

$$V_s = A_i \cdot H \cdot u_o/1000$$

$A_g$ : superficie de propagación de la fase líquida de HC (m<sup>2</sup>)

$V_i$ : cantidad de HC infiltrado (m<sup>3</sup>)

$V_s$ : cantidad de HC retenido en la zona de pasaje (m<sup>3</sup>)

$D_o$ : espesor del HC sobrenadante (mm)

$A_i$ : área en la que se produjo la infiltración (m<sup>2</sup>)

$H$ : espesor de la zona subsaturada (m)

$u_o$ : capacidad de retención del suelo seco frente al HC (l/m<sup>3</sup>)

La permeabilidad del medio frente a un HC varía notoriamente respecto del agua. De cualquier manera, un HC puede fluir si su saturación residual llega alrededor del 20%, índice bastante similar al que necesita el agua (20 al 22%)

En términos generales se pueden asumir las siguientes permeabilidades para HC, en función de los respectivos índices de saturación:

**índice de saturación con HC:** 80, 60, 45 y 20%, permeabilidad relativa: 75, 45, 23 y 0% respectivamente.

## **8. PROTECCIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA FRENTE A LA CONTAMINACIÓN Y AL AGOTAMIENTO**

Las medidas para proteger al agua subterránea de la contaminación, están orientadas a prevenirla, a eliminar sus consecuencias y a preservar su calidad, para asegurar un uso efectivo de la misma.

Dado que la contaminación del agua subterránea está íntimamente relacionada con el estado del agua superficial, la atmósfera, la lluvia y el suelo, su protección debe encararse al mismo tiempo y sobre la base de pautas que apunten a la preservación del ambiente en forma global.

### **8.1. Medidas**

Dentro de las medidas de naturaleza técnica, se pueden citar:

- \* creación de sistemas cerrados para la disposición de residuos líquidos industriales y urbanos.
- \* empleo de tecnología limpia o que genere pocos residuos.
- \* tratamiento de las aguas servidas.

- \* verificación y reparación de pérdidas en los sistemas de saneamiento (desagües cloacales).
- \* aislamiento de las aguas contaminadas respecto de las aptas.
- \* desactivación y reemplazo de los pozos ciegos o fosas sépticas por redes cloacales.
- \* eliminación o purificación de emisiones gaseosas y humos.
- \* limitación en el empleo de fertilizantes y pesticidas en la actividad agropecuaria.
- \* creación de territorios especiales para la preservación del agua y de los otros recursos naturales (suelo, aire, biota).

La experiencia indica que la restauración de la calidad de un acuífero deteriorado por el ingreso de uno o varios contaminantes, constituye una tarea sumamente complicada en el aspecto técnico y generalmente de elevado costo. Es prácticamente imposible restaurar un acuífero a su condición original y con frecuencia, ni siquiera se logra recomponerlo para las exigencias que requiere el uso. En definitiva, es válido para los recursos naturales en general y para el agua subterránea en particular, el apotegma de la medicina: **es preferible prevenir que curar.**

En este sentido, no debe olvidarse la escasa dinámica que posee el agua subterránea si se la compara con el agua superficial o el aire, por lo que los procesos de contaminación insumen tiempos prolongados para producirse y manifestarse (años, decenios, centenios y hasta milenios), pero también para mejorar su condición frente a la polución. Por ello, en la generalidad, es mucho más sencillo y rápido, restaurar la calidad de un río que la de un acuífero.

Otros factores trascendentes en la prevención para evitar el deterioro del agua subterránea, son las normas, regulaciones y leyes, que traten sobre la utilización, las concentraciones máximas admitidas para diferentes usos y las cargas de contaminantes permitidas en los efluentes industriales, urbanos y agrícolas.

## 8.2. Monitoreo

El primer paso para un adecuado sistema de prevención hidrogeológico, es la instalación de una **red para el monitoreo** de niveles y calidad del agua subterránea. El término monitoreo implica seguimiento y por lo tanto, se refiere a mediciones y muestreos reiterados (periódicos). La periodicidad del monitoreo, depende de variados factores: régimen de flujo (natural o artificial - extracción); fuentes reconocidas o potenciales de contaminación (ubicación y características), carga, movilidad, persistencia y toxicidad de los contaminantes; tamaño del acuífero; comportamiento hidráulico (libre, semiconfinado o confinado); características y espesor de la zona subsaturada; características y posición de la zona de recarga y profundidad de los acuíferos semi y confinados; relación exceso - déficit y periodicidad de la recarga; etc.

La mayoría de estos factores incide también en la distribución y separación de los pozos para monitoreo, cuya principal virtud consiste en que sean hábiles para

brindar valores representativos de los potenciales hidráulicos y para permitir un muestreo que también sea representativo de la calidad del acuífero.

La condición señalada, no sólo debe cumplirse espacialmente, sino también en el tiempo y en este sentido, los pozos que integren la red, debe elegirse teniendo presente el lapso previsto para el monitoreo de forma de disponer de puntos estables, que permitan una fácil medición y muestreo. Además deberán tener libre acceso en los momentos elegidos para los registros.

Los requerimientos mencionados no son fáciles de cumplimentar, especialmente en las redes que se utilizan para monitorear a nivel regional (más de 50.000 hectáreas), dado que para esta tarea, generalmente se emplean pozos existentes, construidos con otra finalidad (agua potable, riego, uso industrial o doméstico, etc).

Pozos exclusivamente para monitoreo, suelen perforarse en acuíferos bajo explotación, o en terrenos industriales, o en la cercanía de basurales, pero cubriendo superficies mucho menores que la citada (hectáreas a cientos de ha).

En estos casos, lógicamente el espaciado es mucho menor y aunque éste depende, como ya se dijo, de variados factores, a título ilustrativo se puede señalar que para un monitoreo regional es satisfactorio contar con 1 pozo cada 500 a 2.000 ha, mientras que para otro local, particularmente para monitorear hidrocarburos, es necesario disponer de 2 a 5 pozos por ha.

Además del tamaño del ámbito a monitorear, el número y la distribución de los pozos, depende en gran medida de la dinámica del acuífero y más específicamente de la dinámica del agua contaminada.

Es muy conveniente detectar el límite entre el agua contaminada y la que no lo está, para conocer su desplazamiento espacial y temporal. Para ello, se eligen o ubican pozos en secciones caracterizadas por ambos tipos de agua.

Si el acuífero es confinado o semiconfinado, debe asegurarse la aislación entre éstos y el freático, que normalmente es el más expuesto a la contaminación. En los acuíferos semiconfinados, con filtración vertical descendente, es común la contaminación difusa a través de los acuitardos y no por mala aislación o estado de las cañerías (caso del Acuífero Puelche en el Conurbano y en La Plata).

Otro elemento a tener muy en cuenta, es la técnica para el muestreo y preservación de las muestras.

En efecto, algunos contaminantes se presentan en concentraciones muy bajas (millonésimas de gramo por litro) y aún así son altamente tóxicos (plaguicidas, metales pesados, hidrocarburos alifáticos, HC aromáticos, sustancias radiactivas). Por ello, el muestreo debe efectuarse con sumo cuidado, empleando el equipamiento y el instrumental adecuado para cada caso, con el objeto de evitar pérdidas (HC aromáticos volátiles), o la introducción accidental de la misma sustancia que se quiere detectar (bomba o roscas lubricadas con aceite, si se va a determinar HC).

El personal debe estar bien aseado, con ropa limpia y el manipuleo debe efectuarse con suma precaución.

En los casos de determinaciones analíticas con precisión de ug/l, no es conveniente reiterar el uso del equipo de muestreo; o sea, se utiliza un equipo diferente en cada pozo, para evitar la contaminación cruzada. En estos casos es conveniente establecer el fondo o background ambiental para deducirlo de las concentraciones del contaminante registradas en el agua. Esta práctica se emplea corrientemente cuando se muestrea para HC totales o metales pesados, en las refinerías o plantas de almacenamiento de HC.

Las muestras, para determinar el fondo del contaminante, se llaman "blancos" y en general son de agua destilada.

Las muestras tomadas en los sondeos, deben disponerse en recipientes que se adecuen a sus características p.ej. para preservar HC, el envase debe ser de vidrio color caramelo y además, deben acidificarse con HCl hasta pH 3 y mantenerse enfriadas a unos 3° C, para evitar su degradación.

Para los metales pesados, se emplean los mismos recipientes, también se mantienen enfriados, pero luego de bajar el pH a 2 con HNO<sub>3</sub>.

Lógicamente que la calidad del laboratorio, particularmente en la precisión que logre en la determinación de contenidos tan bajos, juega un rol preponderante en el éxito de los trabajos.

En relación al **monitoreo para establecer el estado hidráulico de un acuífero**, lo que se hace es medir periódicamente los niveles de agua en los pozos que integran la red y en el caso de existir, en los sitios donde se concentra la descarga natural p.ej. manantiales.

La variación en la posición de la superficie freática de un acuífero libre, indica variación del volumen de agua almacenada, (si asciende aumenta, si desciende disminuye), mientras que la variación en la posición de la superficie piezométrica de un acuífero confinado, si se produce por encima del techo impermeable del mismo, es producto de diferencias en la presión hidráulica.

En los acuíferos semiconfinados, la modificación en la posición de su superficie hidráulica, puede derivar de variaciones en la presión hidráulica, de cambios en el volumen almacenado, o de ambos.

Las variaciones en la reserva pueden deberse a procesos naturales (relación recarga-descarga) o artificiales (extracción).

En el primer caso, durante los períodos de exceso (recarga superior a descarga) la tendencia general es al ascenso del nivel, en los tres tipos de acuíferos. En los lapsos de déficit, sucede lo contrario. A estos cambios se los denomina estacionales porque se producen en el transcurso del año hidrológico. Otros, de mayor duración (plurianuales), derivan de ciclos climáticos secos o húmedos y normalmente abarcan



varios años y aún decenios, como en Oeste de la Provincia de Buenos Aires, donde desde 1965 la precipitación está por encima de la media registrada desde 1900/65.

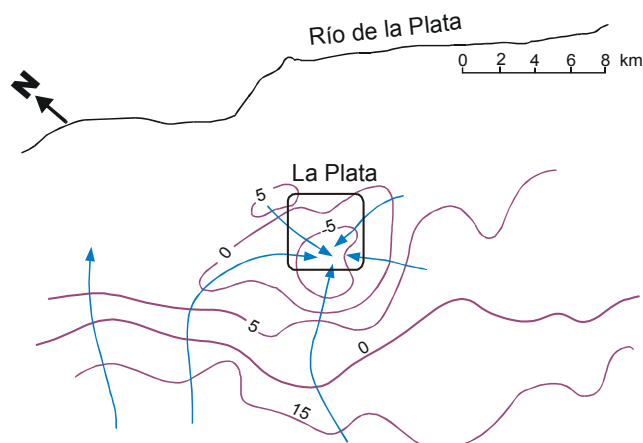
En la generalidad, las variaciones de los potenciales hidráulicos producidas artificialmente, superan con amplitud a las que se originan naturalmente.

En sitios sometidos a extracción para consumo humano, riego o uso industrial, la tendencia es declinante y si la disminución de la reserva resulta significativa, se dice que el acuífero está sobreexplotado.

En definitiva, el objetivo principal del monitoreo hidráulico, es efectuar un seguimiento de la evolución del agua almacenada. Para ello, los niveles deben medirse en reposo, o sea sin que haya incidencia del bombeo. Lamentablemente, en la mayoría de los centros urbanos que se abastecen con agua subterránea esto resulta prácticamente imposible, debido a que los pozos funcionan en forma continuada y en el mejor de los casos, sólo se puede sacar temporariamente de servicio a algunos de ellos. En estos lugares, la red de flujo subterráneo presenta una marcada distorsión, con fuertes cambios en los gradientes y en las velocidades y con la aparición de las formas hidráulicas que tipifican a la extracción (conos de depresión). Los pozos de observación para el monitoreo deben ubicarse de manera que permitan definir las características de los conos de depresión (extensión lateral y vertical, gradientes hidráulicos), pero también de los ámbitos vecinos no distorsionados por el bombeo.

Esta será la única manera de poder cuantificar, conociendo la magnitud de otro parámetro hidráulico trascendente (transmisividad), el caudal que ingresa al o a los conos de depresión, para comparar dicho caudal con el que se extrae por bombeo, a fin de establecer la relación entre ambos. En la figura 21 se representa la red de flujo ocasionada por la extracción para el abastecimiento de agua potable a La Plata (50 hm<sup>3</sup>/a). El embudo hidráulico está delimitado por la equipotencial de 0 m que tiene una longitud de 32 km; considerando además el gradiente hidráulico ( $6,1 \cdot 10^{-3}$ ) y la transmisividad medios (550 m<sup>2</sup>/d), el caudal que ingresa al cono a través de la línea de 0 m es de 107.000 m<sup>3</sup>/d (39 hm<sup>3</sup>/a).

**Fig. 21**

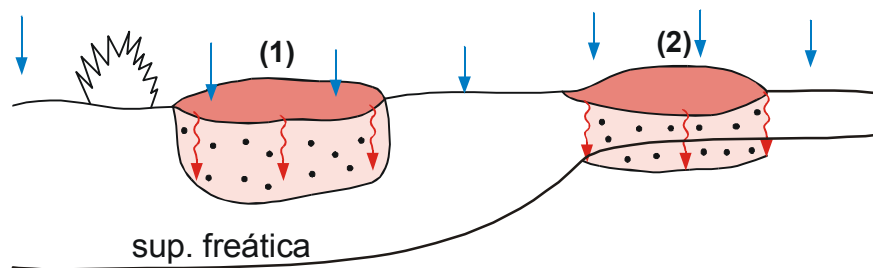


### 8.3. Vulnerabilidad

Es un concepto cualitativo, que en la generalidad se refiere al grado de protección natural de un acuífero frente a la contaminación. Por ello, también se la conoce como **protección o defensa natural**.

La vulnerabilidad, es función inversa de la profundidad de yacencia (figura 22) y directa de la permeabilidad vertical (K) de la zona subsaturada (figura 23), en el caso de acuíferos libres. Los acuíferos confinados son más vulnerables en sus ámbitos de recarga y los semiconfinados dependen de la aislación que les brinden sus acuitardos.

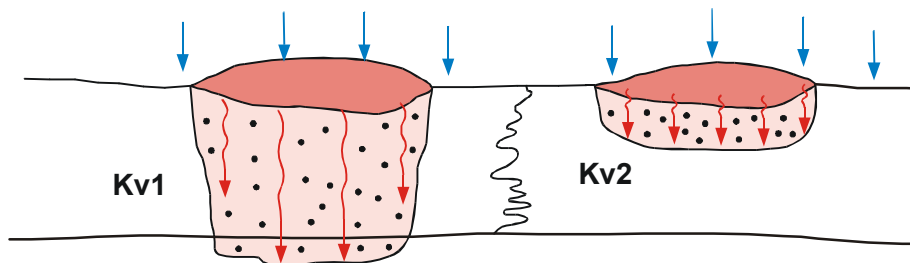
Fig. 22



#### 8.3.1 Acuífero libre

En (1) la profundidad a que se ubica la superficie freática, le otorga un espesor considerable a la zona subsaturada respecto a (2), hecho que favorece la fijación de algunos contaminantes y la atenuación en la concentración de otros. En (2), la cercanía del agua subterránea a la superficie y a la fuente de contaminación, hace que la atenuación de la polución en su paso por la zona subsaturada, sea poco efectiva (figura 23).

Fig. 23

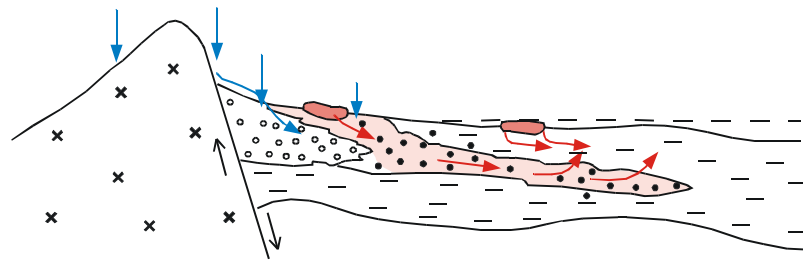


Si la permeabilidad vertical en 1 es mucho mayor que en 2 ( $Kv1 \gg Kv2$ ) la velocidad de desplazamiento de la pluma en (1) es mucho mayor que en (2). De cualquier manera, si el aporte se mantiene y los contaminantes son suficientemente móviles y persistentes, la pluma también puede alcanzar al agua freática en (2), aunque con mayor retardo y dilución (figura 23).

### 8.3.2. Acuífero confinado

Está directamente expuesto en sus afloramientos que son los sitios por donde se produce la recarga. Ya en una posición alejada de la serranía, la granometría disminuye hasta hacerse muy fina (pelítica) y constituir un efectivo sellante litológico. A esto se le agrega la posición de la superficie piezométrica, que frecuentemente se ubica por encima del suelo (acuífero surgente), lo que impide el flujo vertical descendente y por ende la contaminación en profundidad (figura 24).

Fig. 24



### 8.3.3. Acuífero semiconfinado

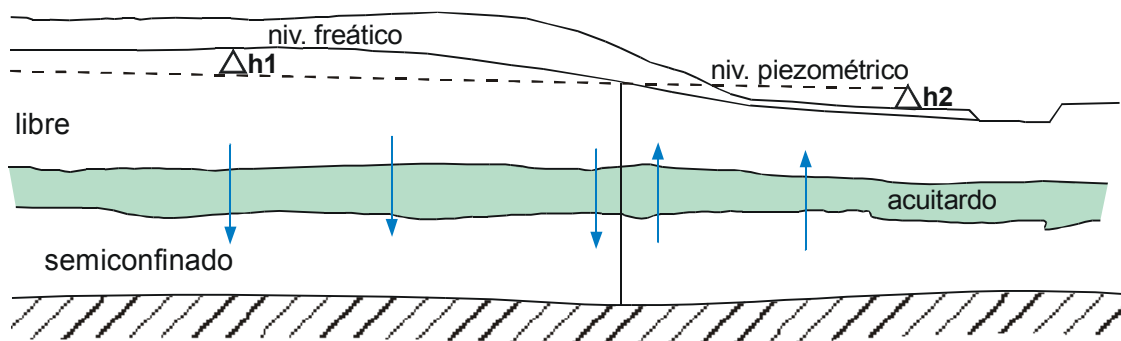
La vulnerabilidad de este tipo de acuífero, está controlada por las propiedades físicas y geométricas de los acuitardos (permeabilidad vertical, porosidad y espesor) y también por la diferencia de potencial hidráulico que guarda con el libre sobrepuesto.

Esta diferencia, que bajo condiciones de no alteración generalmente es pequeña (algunos dm a pocos m), se magnifica en los ámbitos bajo explotación, donde puede alcanzar decenas y aún centenas de metros.

En la figura 25 se señala la relación hidráulica natural con un  $h_1$  favorable al acuífero libre, que define el sector de recarga del semiconfinado y un  $h_2$ , favorable a este último que tipifica al ámbito de descarga.

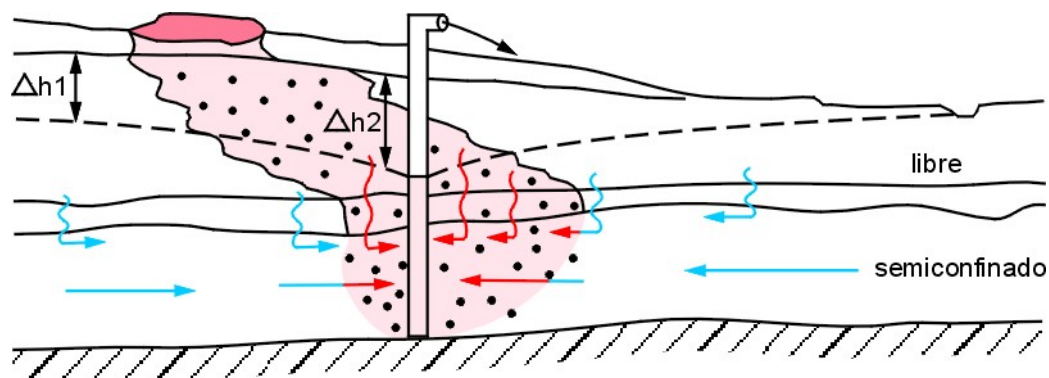
El acuífero semiconfinado sólo puede contaminarse a partir del libre en el ámbito de recarga, pero no en el de descarga.

Fig. 25



En la figura 26 la extracción generó una nueva relación hidráulica entre los dos acuíferos, cuya consecuencia más trascendente respecto a la vulnerabilidad del semiconfinado, es el descenso de su superficie piezométrica con la consecuente sobrecarga hidráulica del libre en el techo del acuitardo, lo que facilita la filtración vertical descendente y el acceso de contaminantes al semiconfinado.

Fig. 26



#### 8.3.4. Grado de vulnerabilidad

Establecer en forma cuantitativa el grado de vulnerabilidad de las unidades hidrogeológicas no es tarea sencilla, en virtud de lo variado de los factores que inciden en ella. Sin embargo, reduciendo las variables a considerar sólo a 2 (espesor y permeabilidad de la zona subsaturada), se puede lograr una caracterización semicuantitativa, referida a la **vulnerabilidad relativa de los acuíferos libres**.

En relación al espesor de la zona subsaturada ( $e$ ) se consideran cinco casos (tabla III).

TABLA III

espesor de la zona subsaturada					
m	< 5	5 - 15	15 - 30	30 - 50	>50
índice	5	4	3	2	1

El índice 5, representa la condición más vulnerable (menos protegida) y el 1 la más protegida frente a la contaminación.

En relación a la permeabilidad media vertical de la zona de aireación se tiene (tabla IV).

TABLA IV

permeabilidad vertical de la zona subsaturada					
m/día	< $1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3} - 0,01$	0,01 - 1	1 - 50	50 - 500
índice	1	2	3	4	5
	muy baja	baja	media	alta	muy alta

**5:** con permeabilidades verticales ( $K_v$ ) de 50 a 500 m/día, está representado por arena mediana y gruesa, grava arenosa y grava.

**4:**  $K_v$  de 1 a 50 m/d, por arena muy fina a limosa, arena fina y arena mediana a gruesa.

**3:**  $K_v$  de 0,01 a 1 m/d, por limo y limo arenoso.

**2:**  $K_v$  de 0,001 a 0,01 m/d, por limo y limo arcilloso.

**1:**  $K_v <$  de 0,001 m/d, por arcilla y arcilla limosa.

Tomando la permeabilidad vertical ( $K_v$ ) vuelve a ser 5 el más vulnerable y 1 el más protegido.

Considerando ambas variables en forma conjunta, se tiene que su suma varía entre extremos de 2 a 10 (2 resulta el menos vulnerable y 10 el más vulnerable).

Con el objeto de disponer de órdenes de magnitud respecto a la vulnerabilidad del agua subterránea frente a la contaminación y facilitar la elaboración de la cartografía correspondiente, se asumen 3 condiciones:

**e +  $K_v$  de 2 a 4 (grupo I - vulnerabilidad baja)**

**e +  $K_v$  de 5 a 7 (grupo II - vulnerabilidad media)**

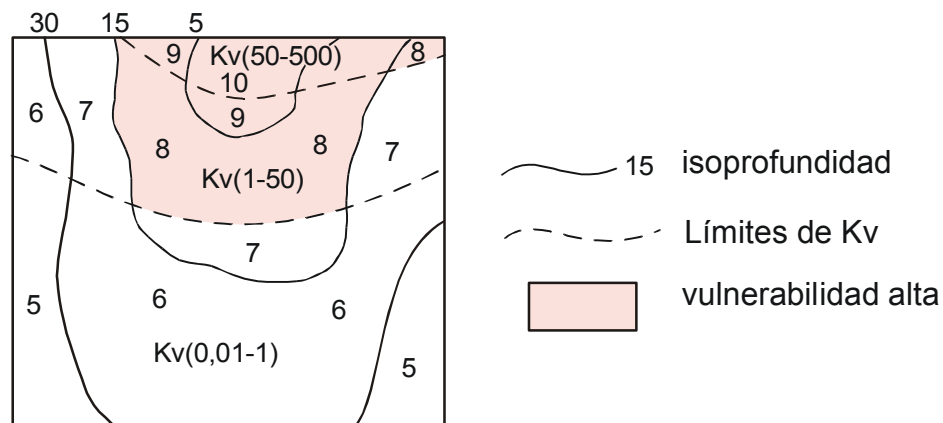
**e +  $K_v$  de 8 a 10 (grupo III - vulnerabilidad alta)**

En la tabla V se esquematiza la distribución de los campos mencionados.

**TABLA V**

<b><math>K_v</math></b>	<b>1</b>	<b>6</b>	<b>5</b>	<b>4</b>	<b>3</b>	<b>2</b>
	<b>2</b>	<b>7</b>	<b>6</b>	<b>5</b>	<b>4</b>	<b>3</b>
	<b>3</b>	<b>8</b>	<b>7</b>	<b>6</b>	<b>5</b>	<b>4</b>
	<b>4</b>	<b>9</b>	<b>8</b>	<b>7</b>	<b>6</b>	<b>5</b>
	<b>5</b>	<b>10</b>	<b>9</b>	<b>8</b>	<b>7</b>	<b>6</b>
		<b>5</b>	<b>4</b>	<b>3</b>	<b>2</b>	<b>1</b>
<b>E</b>						

**Fig. 27**



Para tener una visión areal del grado de vulnerabilidad del agua subterránea freática frente a la contaminación, es necesario elaborar un mapa donde se reproduce la profundidad del agua subterránea, junto con las variaciones de la permeabilidad vertical (figura 27).

Del mapa se desprende que el sector más vulnerable es el que contiene al río (sector rayado) y que los más alejados, presentan una mejor protección (vulnerabilidad media).

Los mapas de **vulnerabilidad**, deben acompañarse con los de **riesgo** en los que se señala la ubicación de las fuentes reales o potenciales de emisión de contaminantes (zonas urbanas, con la indicación de los sectores cubiertos con desagües cloacales, basurales, terrenos cultivados, emplazamientos industriales, sectores ganaderos, etc).

Especialmente interesa conocer la materia prima utilizada y los efluentes vertidos por la industria y, pese a que es mucho más difícil de establecer, la carga de contaminantes que produce la actividad industrial. Algo similar ocurre con los terrenos cultivados, donde es importante determinar el tipo y el volumen aplicado de fertilizantes y pesticidas, con el objeto de orientar las determinaciones analíticas de laboratorio.

En relación a la **cuantificación de la vulnerabilidad de los acuíferos confinados y semiconfinados**, se toma en cuenta: el espesor, la distribución, la litología y las propiedades hidráulicas del acuicludo o del acuitardo que actúa como techo y la relación de potenciales hidráulicos con el o los acuíferos superpuestos.

No resulta sencillo diferenciar con certeza si un acuífero es confinado o semiconfinado. Es más, el confinamiento absoluto no existe en la naturaleza y por ello, es más frecuente la existencia de acuíferos, semiconfinados que confinados.

Los ensayos de bombeo brindan valores del coeficiente de almacenamiento del acuífero principal y la permeabilidad vertical de los sellantes asociados (acuitardos, acuicludos), lo que puede orientar el análisis, pero en general son de corta duración y abarcan porciones hidrogeológicas relativamente reducidas.

La relación de niveles hidráulicos es un valioso indicador y en este sentido los acuíferos semiconfinados suelen presentar potenciales bastante parecidos a los del acuífero libre sobrepuesto, mientras que los confinados comúnmente poseen niveles piezométricos bastante diferentes a los freáticos.

La hidroquímica también puede ayudar y en este caso, salinidades y composiciones aniónicas y catiónicas similares, apuntan a una comunicación hidráulica efectiva.

Otros factores a tener en cuenta, son la desaparición de la capa freática en zonas donde se practica sobreexplotación de acuíferos más profundos y la contaminación de estos como consecuencia de la migración vertical descendente del agua freática.

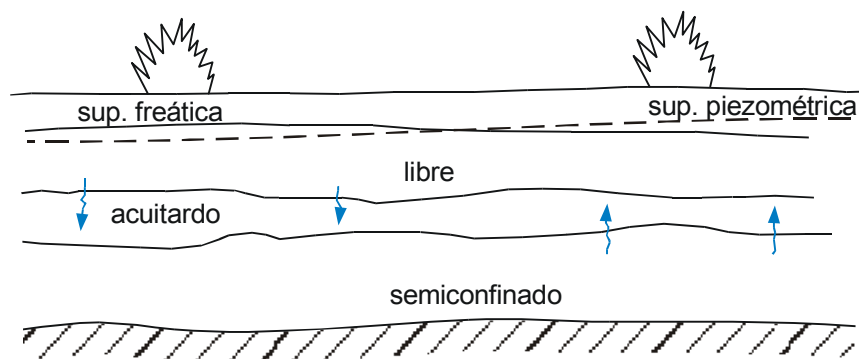
Ya se dijo que la vulnerabilidad de un acuífero confinado o parcialmente confinado, fuera de los ámbitos donde afloran o se ubican a poca profundidad, depende de 2 factores. Uno se refiere a la geometría y propiedades hidráulicas del sellante superior y el otro a la relación de los potenciales hidráulicos entre el confinado o el semiconfinado y el acuífero sobrepuesto, que generalmente es el freático.

La permeabilidad vertical del acuitardo o del acuicludo ( $K'$ ) y su transmisividad vertical ( $T' = K'/e'$ ) no son de fácil determinación. Una forma es mediante ensayos hidráulicos, pero estos en general brindan valores bastante más altos que los reales. Más preciso es comparar la freaticimetría con la piezometría de la misma zona y obtener un mapa residual, con las diferencias de potencial hidráulico entre el freático y el acuífero semiconfinado y a partir de este último, conociendo el flujo por el semiconfinado, estimar el valor de  $T'$ . Magnitudes de  $T'$  entre  $10^{-3}$  y  $10^{-6} \text{ día}^{-1}$  son típicas de acuíferos semiconfinados, mientras que las menores de  $10^{-6} \text{ día}^{-1}$  indican un alto grado de confinamiento y las mayores de  $10^{-3} \text{ día}^{-1}$  apuntan hacia acuíferos libres o semilibres. Un valor de  $T' = 5 \cdot 10^{-4} \text{ día}^{-1}$  significa que por cada metro de diferencia de potencial hidráulico entre el acuífero parcialmente confinado y el freático, pasarán por una superficie de  $1 \text{ m}^2$  del sellante,  $5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$  (0,5 litros) al cabo de 1 día.

Los potenciales hidráulicos relativos de las unidades hidrogeológicas involucradas, resultan fundamentales, pues condicionan el flujo vertical.

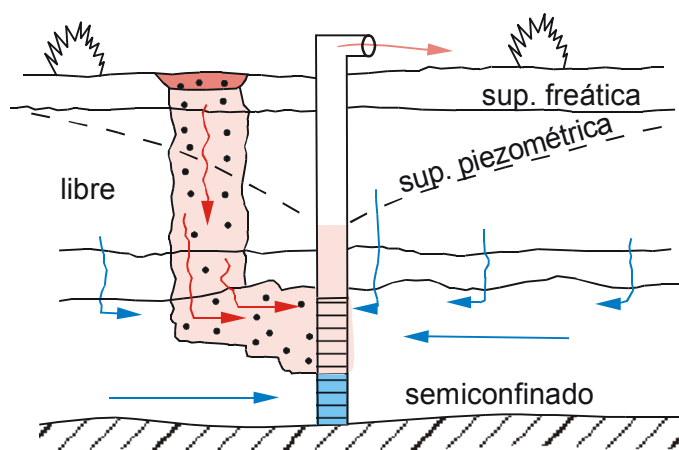
Si los niveles son parecidos el flujo vertical a través del acuitardo estará muy limitado (figura 28). La dinámica vertical se acentuará notoriamente en condiciones de alteración artificial (figura 29).

**Fig. 28**



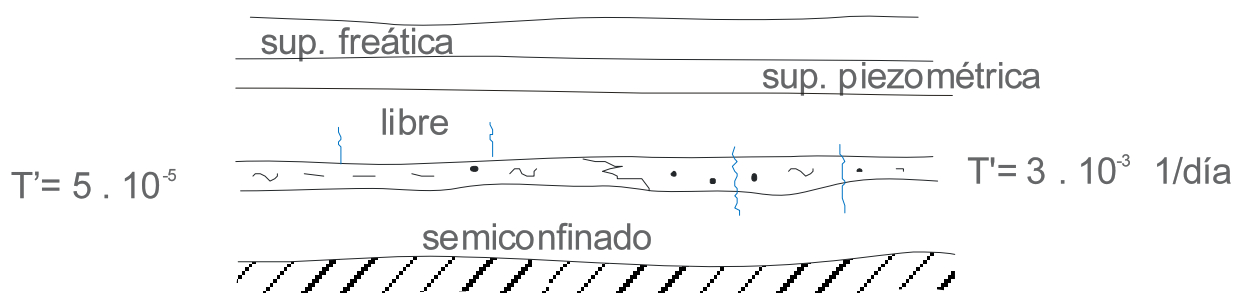
De los esquemas se desprende que la situación menos favorable para la protección del acuífero parcialmente confinado, se da cuando su potencial hidráulico es menor que el del freático; o sea existe un gradiente hidráulico vertical negativo en profundidad (figura 29).

Fig. 29



Otro factor que incide en la comunicación hidráulica es la continuidad areal y litológica del sellante, dado que los cambios faciales suelen modificar notablemente sus propiedades respecto a la transmisión de agua (figura 30).

Fig. 30



Considerando ambas variables (potenciales hidráulicos y transmisividades verticales) se pueden establecer 3 grados de vulnerabilidad (alta, media y baja), determinados primariamente por el gradiente vertical de potenciales hidráulicos y secundariamente por la  $T'$ . Resulta importante señalar que los potenciales hidráulicos pueden variar, tanto por causas naturales (períodos de exceso o déficit) como artificiales (extracción) y que ello puede modificar el sentido del flujo vertical. Por lo tanto debe seguirse periódicamente (monitoreo) la evolución espacial y temporal de los mismos.

Si se denomina  $H_1$  al potencial hidráulico del acuífero libre y  $H_2$  al del parcialmente confinado, se tiene (tabla VI)



**TABLA VI**

<b>H2 &gt; H1</b>	<b>vulnerabilidad baja</b>
<b>H2 ~ H1</b>	<b>vulnerabilidad media</b>
<b>H2 &lt; H1</b>	<b>vulnerabilidad alta</b>

A esto se le puede adicionar la resistencia hidráulica que ofrece el sellante al pasaje vertical (tabla VII).

**TABLA VII**

<b><math>T' &lt; 10^{-5}</math> 1/día</b>	<b>vulnerabilidad baja</b>
<b><math>10^{-5} &lt; T' &lt; 10^{-3}</math> 1/día</b>	<b>vulnerabilidad media</b>
<b><math>T' &gt; 10^{-3}</math> 1/día</b>	<b>vulnerabilidad alta</b>

#### **8.4. Perímetros de protección**

A efectos de cuidar la calidad del agua subterránea, se delimitan zonas de protección en derredor de las captaciones (perforaciones, manantiales, galerías filtrantes, drenes, etc). En ellas se imponen restricciones al uso del territorio y a toda actividad que implique o suponga riesgo de contaminación. Las restricciones suelen ser severas en las inmediaciones de las captaciones y se van disipando a medida que aumenta la distancia.

Las limitaciones en el uso y la zonificación varían de acuerdo a la reglamentación de cada país sobre el tema.

Según Custodio (1994), existe un denominador común que puede resumirse de la siguiente manera:

##### **8.4.1. Zona inmediata**

De 10 a 20 m alrededor de la captación; es propiedad del que capta. El sitio está cerrado y controlado; no se permite la circulación de personas ni vehículos ni el almacenamiento, manipulación y aplicación de ninguna sustancia peligrosa.

##### **8.4.2. Zona próxima**

Se delimita fundamentalmente para la protección a la contaminación bacteriológica y para un tiempo de tránsito que varía entre 50 y 100 días, lapso máximo de sobrevivencia bacteriana fuera de su hábitat propicio. En función del tipo de acuífero, de

la profundidad de la superficie freática, del tipo litológico y la permeabilidad vertical de la zona subsaturada, y del caudal de la captación, se fijan distancias de 50 hasta 300 m. Se toleran actividades no contaminantes, algunos almacenamientos bien controlados y en general, una circulación restringida de personas y vehículos.

### **8.4.3. Zona alejada**

En general se la extiende hasta límites naturales (bordes de acuíferos o divisorias subterráneas), a efectos de lograr tiempos de tránsito de por lo menos algunas decenas de años. Su extensión es variable, alcanzando comúnmente desde algunos cientos de metros hasta más de 1 km. Existen restricciones de uso del territorio para la industria y para urbanizaciones, como así también para ciertas prácticas agrícolas y a la existencia, diseño y conservación de vías de comunicación. Si el tamaño es muy grande, se la suele subdividir para graduar las restricciones.

El establecimiento de zonas de protección para el agua subterránea constituye una importante intervención en el ordenamiento territorial, toda vez que condiciona directa o indirectamente a las actividades agrícolas, ganaderas, forestales, industriales, de transporte y urbanas, por lo que en su fijación, deben participar otros organismos competentes, además de los dedicados a la gestión específica del agua.

Resulta evidente que para lograr una correcta protección, además del cuidado territorial, las captaciones deben estar diseñadas y construidas de forma de evitar el ingreso de contaminantes (encamisadas, con sus bocas cerradas, en recintos limpios, en sitios que no sean cubiertos por agua superficial, con equipos de bombeo que no pierdan lubricante, etc). Esto que parece redundante, muchas veces no se cumple por desidia, falta de conocimiento, deficiencias constructivas, o abaratamiento, pese a que constituye un factor fundamental en la preservación de la calidad del agua subterránea.

En los cuadros 6, 7, 8, 9, 10, 11 y 12, se mencionan las normas de calidad de agua utilizadas por los países de América del Norte, Europa y Argentina y las recomendadas por la Organización Mundial de la Salud (WHO - OMS)

El cuadro 6 es una normativa desarrollada por EPA para metales pesados, HC volátiles, pesticidas y policlorinados, además de  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{NO}_2^-$ , donde se indican los máximos admitidos para agua potable, los efectos que pueden producir sobre la salud y las fuentes más comunes de aporte al agua.

En el cuadro 7, se comparan, las normas vigentes de EUA, Canadá, Comunidad Económica Europea y OMS para sustancias inorgánicas tóxicas y no tóxicas, orgánicas, radiactivas, orgánicas volátiles y respecto al contenido bacteriológico.

El cuadro 8 es la norma canadiense, que contempla concentraciones máximas aceptables (MAC) para sustancias que se conoce o se sospecha que causan efectos adversos en la salud. Concentraciones máximas aceptables provisionarias (IMAC), para sustancias en las que la insuficiencia de datos toxicológicos impide fijar con certeza un

límite MAC. Factores estéticos (AO), son aquellos que le otorgan mal aspecto al agua (olor, color, sabor).

En el cuadro 9 de origen holandés, no sólo se cita la aptitud del agua, sino también la del suelo calificándolos en 3 niveles de acuerdo a la concentración de la sustancia considerada: A (background o fondo), B (valor indicativo para estudios adicionales) y C (valor indicativo para proceder a la limpieza).

El cuadro 10 trata sobre la norma bacteriológica para el agua potable elaborada por la CEE.

En el cuadro 11, se señalan los límites permisibles en un agua potable establecidos por OSN de Argentina y en el 12, los establecidos por el Código Alimentario Argentino.

En el cuadro 13 se reproducen los niveles guía de calidad de agua y de suelo, de acuerdo a lo establecido por la Ley 24.051 para residuos peligrosos vigente en Argentina.

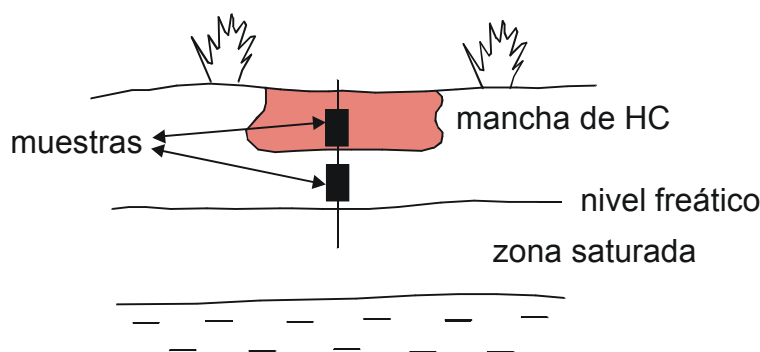
## **9. IDENTIFICACIÓN Y REMEDIACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN CON HIDROCARBUROS EN EL SUELO Y EL AGUA SUBTERRÁNEA**

### **9.1. DIAGNÓSTICO**

**9.1.1. Recopilación de información.** Especialmente la referida a la ubicación de los ductos enterrados, depósitos, tanques, plantas de bombeo o tratamiento, sitios de vertido, etc. También respecto al tipo de HC utilizado o producido (pesados, livianos, volátiles, etc.)

**9.1.2. Verificación in situ.** Reconocimiento del ámbito objeto. Identificación de derrames, lugares deprimidos donde se concentra el escurrimiento superficial. Recintos de tanques, piletas API, separadores, canales de descarga, etc. La finalidad del reconocimiento es establecer los lugares mas apropiados para el muestreo (los mas comprometidos).

**9.1.3. Muestreo de suelo y agua.** El muestreo de suelo y su descripción en boca de pozo tiene por objeto seleccionar las muestras que se enviarán a laboratorio. La descripción macroscópica se basa en el grado de impregnación, el olor y la iridiscencia. En general se diferencia: **sin impregnación, impregnación baja, media y alta**. La selección de las muestras se basa en las que presentan alta impregnación y las que carecen de ella; con el objeto de establecer el espesor contaminado (figura 31).

**Fig. 31**

Para delimitar espacialmente las **manchas**, además del perfil es necesario conocer la extensión areal. Con ello se puede estimar el volumen de suelo contaminado y ajustar los costos y las prácticas destinadas a la remediación. Para la delimitación areal, es necesario lograr una adecuada distribución de los sondeos exploratorios. El distanciamiento entre sondeos depende de la finalidad y grado de precisión previstos en el estudio, del grado de contaminación y de la movilidad de los contaminantes y de las condiciones físicas del medio (porosidad, permeabilidad, anisotropía, heterogeneidad). En términos generales, considerando refinerías o plantas de almacenamiento y despacho de HC, para las condiciones físicas de los suelos de las zonas llanas (limos, arcillas, limos arenosos y arenas finas de baja permeabilidad), es recomendable un distanciamiento que no supere los 50 m entre sondeos para lograr una adecuada definición areal de la contaminación (5 sondeos por hectárea).

La extracción de las muestras para enviar a laboratorio, se efectúa mediante un sacatestigos tipo Moretto o Terzaghi que se hinca en el suelo por golpeo. Debe prestarse especial cuidado en no introducir contaminantes durante la perforación y/o el muestreo, para lo cual no deben emplearse lubricantes (en las roscas de ensamble de las barras). También es necesario lavar minuciosamente toda la sarta del sondeo, incluido el sacamuestras, después de cada extracción. Finalmente, debe preservarse el aseo del personal (indumentaria limpia) y cuidar el manipuleo de las muestras. Las vainas de PVC deben sellarse en sus extremos mediante tapas a presión, para evitar o atenuar la pérdida de livianos por evaporación.

**El muestreo de agua** es conveniente realizarlo después de 1 semana o más de terminada y limpiada convenientemente la perforación, a fin de permitir el ingreso de los HC viscosos que presentan una dinámica mucho más lenta que la del agua. Las muestras deben envasarse en recipientes de vidrio color caramelo para evitar la fotoalteración.

Para conocer el valor de la contaminación ambiental, se expone un "blanco" de agua destilada destapado, en el sitio estudiado, durante el tiempo que duren los trabajos de perforación y muestreo. La concentración en HC y metales pesados del

blanco, deberá deducirse de la obtenida en las muestras para conocer la contaminación efectiva del agua.

Una precaución insoslayable consiste en evitar contaminaciones “cruzadas”, por el uso del mismo equipo de muestreo en sondeos con agua contaminada, en otros que no lo están. Para ello se pueden utilizar dos procedimientos: el más conveniente es no reiterar el uso del equipo de muestreo; o sea emplear uno diferente en cada pozo. El otro, más económico, consiste en limpiar adecuadamente el equipo de muestreo (bomba, cañería, válvula, etc.) luego de cada toma.

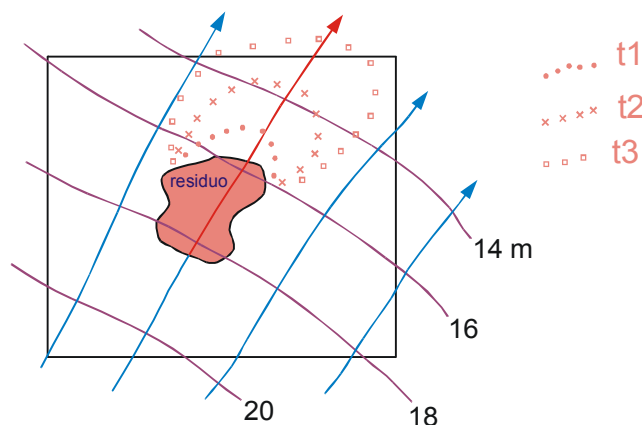
Las muestras deben acidificarse con HCl hasta un pH de aproximadamente 3 y mantenerse en frío (unos 3° C) hasta su llegada al laboratorio, para evitar la alteración de los HC. Para ello se utilizan conservadoras de hielo portátiles durante el muestreo.

Los resultados de laboratorio, tanto en las muestras de suelo como en las de agua, resultan los factores determinativos para decidir sobre la necesidad de remediación y definir las técnicas a utilizar para ello.

En la Argentina tiene vigencia la Ley 24.051 (cuadro 13), que trata sobre la aptitud del agua y del suelo para diferentes usos. De ellos el que más interesa a la actividad petrolera es el uso industrial. En la Ley se consideran las concentraciones máximas de la mayoría de los HC y sus derivados (BTEX, aromáticos polinucleares, livianos, fenoles, metales pesados, etc.) y aquellos que no están contemplados (HC total) se pueden obtener de otras normas como la Holandesa.

Además de la contaminación hidrogeológica vertical (comunicación entre acuíferos, intercalación de capas impermeables, zonación química) y del gradiente hidráulico en profundidad, uno de los factores más trascendentes es el flujo lateral, cuyo conocimiento se logra a partir del mapa con curvas equipotenciales, que permite visualizar el sentido del flujo subterráneo y establecer los gradientes hidráulicos laterales (figura 32).

**Fig. 32**



Las direcciones de flujo son perpendiculares a las líneas equipotenciales y el agua se mueve desde los mayores hacia los menores potenciales hidráulicos. En el ejemplo el agua subterránea fluye de SO a NE atravesando el predio de la refinería.

Si los procesos de refinación o almacenamiento generaron contaminación, la misma puede propagarse por fuera del predio, hacia el Norte, pero no hacia el Sur. Por lo tanto, de existir agua contaminada en el Sur de la refinería, no proviene de la misma, salvo que en algún momento se hubiese invertido el sentido del flujo, hecho que suele acaecer cuando existe extracción cercana (bombeo).

Con los gradientes hidráulicos y las permeabilidades de las unidades hidrogeológicas que se obtienen mediante ensayos de bombeo, se pueden estimar las velocidades de flujo del agua subterránea, que en ambientes llanos como el de la Provincia de Buenos Aires, varían entre mm y cm por día.

Otro factor a tener en cuenta debido a que genera manchas en sentido vertical, es la oscilación de la superficie freática. En efecto el HC sobrenadante es desplazado por el movimiento del agua, dando lugar a manchas que pueden ubicarse por encima o por debajo del nivel medido (figura 19). El sobrenadante correspondiente al nivel en to, se desplaza hacia arriba (t1) y posteriormente hacia abajo (t2), originando un sector manchado en el perfil que abarca desde t1 a t2 y un aumento en el tamaño lateral de la mancha original, debido a los fenómenos de dispersividad y difusividad.

## **10. CRITERIOS PARA DECIDIR SOBRE LA NECESIDAD DE LIMPIAR EL SUELO**

Han variado en los últimos 10/15 años. Hasta principios de 1980, se empleaba solamente la concentración de los contaminantes, mientras que en la actualidad los entes reguladores de América del Norte, Europa, Australia y Nueva Zelanda consideran otros factores como:

- 1 - Concentraciones existentes
- 2 - Movilidad ambiental
- 3 - Relación de calidad suelo - agua
- 4 - Salud de plantas y animales
- 5 - Salud del hombre
- 6 - Estética
- 7 - Límites de detección analítica
- 8 - Uso de la tierra

### **10.1. Concentraciones existentes**

Se refiere al nivel base o background de los suelos frente a diversas sustancias, cuya presencia deriva de procesos naturales. Por lo tanto las concentraciones referidas son previas al deterioro artificial. En general se las emplea como umbrales de optimización para los tratamientos correctivos. °

Generalmente no se dispone de información respecto a la concentración existente en el suelo, es más común la referida al agua superficial y más rara la del agua subterránea. La variabilidad del contaminante dificulta la interpretación Ej. Cu y Se (móviles). Resulta más fácil determinar el background del Hg y Co debido a que presentan mayor uniformidad temporal en sus concentraciones.

## 10.2. Movilidad ambiental

Es la habilidad que posee una sustancia para trasladarse en el medio ambiente. En términos generales los componentes que presentan mayor movilidad son los más solubles ( $\text{Cl}^-$ ) y los más volátiles (BTEX). Es conveniente señalar que la movilidad no sólo depende de las propiedades de la sustancia, sino también de las características del medio. En efecto, un suelo arcilloso (muy poco permeable) hará que el  $\text{Cl}^-$  en solución tenga menos movilidad que un hidrocarburo viscoso en otro de alta permeabilidad (grava o arena).

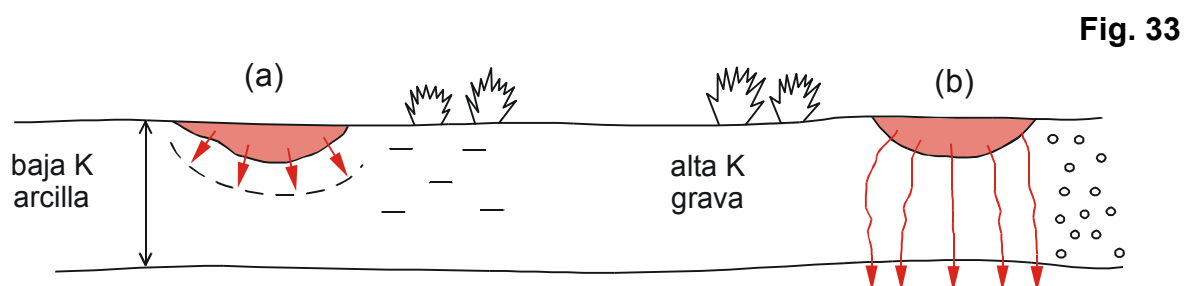
En definitiva, el concepto de movilidad apunta a establecer si los contaminantes pueden salir del sitio objeto. En este aspecto resulta importante conocer la dinámica del agua subterránea, tanto en lo referente a su dirección, como velocidad (figura 32).

## 10.3. Relación de calidad suelo - agua

Esta relación aparece como obvia pero no siempre es así. En la generalidad de los casos, donde el suelo está contaminado, el agua también lo está o presenta un riesgo potencial de estarlo.

La permeabilidad del suelo, la profundidad del agua, la movilidad del contaminante y el clima, son factores determinantes en relación al deterioro del suelo y del agua subterránea.

En la figura 33 se indica la incidencia de la **permeabilidad, que al ser muy baja en (a) limita la movilidad** del contaminante impidiendo que alcance al agua subterránea. En (b), la presencia de grava (alta permeabilidad) facilita el desplazamiento y la llegada del contaminante al agua freática.



La **zona de aireación o subsaturada** se caracteriza por presentar los tres estados de la materia (sólido, gas y líquido). El sólido es la partícula del suelo, el gas es aire y el líquido agua. En lo referente a la contaminación del agua subterránea, su principal virtud es que actúa como un efectivo filtro natural frente al desplazamiento de

los contaminantes. Por ello, cuanto mayor es su espesor, tanto mayor será su efectividad para fijarlos.

Ya se citó a la **movilidad** como una de las propiedades básicas para decidir sobre la limpieza. Aquellas sustancias que tienen baja movilidad en el suelo pueden no alcanzar al agua subterránea aunque ésta se ubique a poca profundidad. Caso de los pesticidas organoclorados, que son efectivamente fijados por el suelo debido a su gran tamaño molecular. Otro contaminante adsorbido por los componentes arcillosos del suelo, es el  $K^+$ . Un comportamiento totalmente opuesto exhiben los nitratos, que son altamente móviles y estables, por lo que, si su concentración es alta en el suelo, es muy factible que también lo sea en el agua subterránea.

En regiones de **clima** húmedo, el excedente en el balance hídrico se transforma en escorrentía y en infiltración. Este último proceso favorece el transporte de los lixiviados a través de la zona subsaturada hasta el agua freática. Además otra característica de las comarcas húmedas, es la escasa profundidad a que se ubica la superficie freática (la zona subsaturada presenta un espesor reducido y ello facilita la llegada de los contaminantes a la zona de saturación).

#### **10.4. Salud de plantas y animales**

En lo referente a las plantas, la mayoría de la información existente considera a los contaminantes capaces de producir trastornos en los cultivos (boro, cobre, níquel y cinc.)

Respecto a los animales, el tratamiento más frecuente es de las sustancias que pueden perjudicar a los de pastoreo (molibdeno, selenio y cobre).

#### **10.5. Salud humana**

En la mayoría de las normas internacionales, constituye el factor determinante para decidir sobre la necesidad de **limpiar**.

En lo que concierne al suelo, se consideran aquellos contaminantes que eventualmente puedan incorporarse a los vegetales de consumo (verdura y frutas). Sin embargo, el recurso a tener más en cuenta es el agua, toda vez que es muy frecuente el abastecimiento a partir de pozos domiciliarios en las cercanías de las plantas mencionadas.

La mayoría de los componentes naturales de los HC y de los derivados, producto de su refinación, son altamente tóxicos, aún en concentraciones de millonésimas de gramo por litro de solución (Ej: Pb 200, Hg 2, Benceno 5, Tolueno 50, Aromáticos totales 100, Naftaleno 30, Pireno 100, Polinucleares totales 200).

#### **10.6. Consideraciones estéticas**

Las manchas de HC en el agua superficial o en el suelo, así como los olores, afectan estéticamente al ambiente. Esto, generalmente constituye un efecto



secundario, toda vez que cuando se manifiestan alteraciones en la estética ambiental, la afectación del recurso ya es severa.

La cuantificación del daño estético es complicada, por ello MOE de Ontario, aplica apreciaciones cualitativas para evaluar la calidad del suelo retirado de una planta industrial cuyos óptimos son los siguientes:

- suelo sin olor
- suelo sin decoloración ni manchas
- suelo sin iridiscencia en agua

### **10.7. Límites de detección analítica**

Este criterio se utilizó durante mucho tiempo para los suelos de uso residencial y rural, particularmente para aquellos contaminantes cuya acción se reconoce como nociva para el ser humano. Para los de uso industrial, generalmente se aplicó un límite equivalente a un múltiplo del primero.

El mejoramiento de las técnicas de detección logrado en los últimos tiempos (ug/kg) y el aumento en el conocimiento del daño que algunos contaminantes producen en el organismo, modificó el umbral de cuantificación analítica como borde superior para la remediación. Sin embargo es mucho lo que queda por investigar, especialmente sobre el grado de agresividad biológica de los contaminantes. En este sentido, a fines de 1980, se estimaban en un millón los compuestos orgánicos producidos por la industria de los países desarrollados. De ellos, unos cuarenta mil eran de uso corriente en América del Norte y Europa, muchos de ellos altamente tóxicos y de éstos la EPA monitoreaba regularmente 240.

Otro factor trascendente en este aspecto, es la asepsia necesaria para el muestreo, el envasado, la conservación y el traslado al laboratorio, que resultan imprescindibles para evitar la contaminación cruzada. Con el objeto de establecer el umbral ambiental (background) se emplean los **blancos**, para cuya extracción, manipuleo y análisis deben tomarse las mismas precauciones que para las muestras.

### **10.8. Uso de la tierra**

La utilización del suelo es otro de los criterios empleados con frecuencia para la corrección (remediación).

En términos generales se puede subdividir al uso en: residencial, agrícola e industrial, aunque también existen otros como: recreación, comercial, parques, pavimentos, jardines domésticos, espacios públicos, etc. En virtud del riesgo que implica la contaminación en los diferentes sitios, el suelo para uso industrial es el que posee menor exigencia normativa.

El criterio de **polifuncionalidad**, propuesto por los países bajos (Moen 1988), establece la preservación del suelo en función de sus usos posibles (cultivos, medio que contiene al agua potable, recurso en el se desarrollan las plantas y animales, etc).

## 11. TÉCNICAS PARA LA REMEDIACIÓN DEL SUELO Y DEL AGUA

La corrección de los suelos contaminados y de las aguas asociadas puede hacerse: **in situ, dentro del sitio o fuera del sitio.**

**Corrección in situ.** El material es tratado y los contaminantes eliminados o degradados en el mismo sitio en que ocurrió la contaminación.

**Corrección dentro del sitio.** En este caso los materiales contaminados son trasladados a lugares más adecuados, pero dentro de la misma refinería o depósito de HC, donde se los pueda tratar, ej. biocorrección o land farming.

**Corrección fuera del sitio.** Debe preservarse cuidadosamente la carga durante el traslado para evitar el deterioro de ambientes “sanos” ocasionados por eventuales derrames o pérdidas de la sustancia contaminada.

### 11.1. Tratamiento de suelos

Las tecnologías de uso más frecuente incluyen: 1- incineración 2- biocorrección 3 - reacciones químicas 4- lavado 5- solidificación y estabilización 6- terraplenamiento.

**11.1.1. Incineración.** Se logra por: horno rotativo, inyección líquida, lecho fluidizado, infrarrojo o vitrificación.

**Horno rotativo.** Consiste en un cilindro revestido de material refractario, cuyo eje se dispone unos 5° respecto de la horizontal y que gira con una velocidad de 0,3 a 1,5 m/minuto.

**Inyección líquida.** Es una cámara de combustión vertical asistida por un quemador en el que se inyecta el desecho líquido de baja viscosidad.

**Lecho fluidizado.** Es otro tipo de incinerador que se basa en la circulación de aire caliente.

Para los tres casos citados hay que considerar tanto los sólidos que quedan en los hornos como las cenizas y gases emitidos durante la operación. Otro de los inconvenientes que presenta esta técnica es su elevado costo.

**Infrarrojo.** Se basa en la temperatura producida por elementos radiantes de tipo infrarrojo.

**Vitrificación.** Se realiza in situ, mediante electrodos que se hincan en el suelo a diferentes profundidades. El espacio que separa los electrodos es cubierto con una capa de grafito para compensar la baja conductividad del suelo. Las superficies tratadas varían entre 10 y 100 m<sup>2</sup> con una profundidad máxima de 5 m. Las temperaturas de funcionamiento son del orden de los 1.000 a 2.000 °C.

**11.1.2. Biocorrección.** Consiste en la transformación de contaminantes en moléculas menos complejas y tóxicas, por la acción de microbios que se presentan naturalmente en el suelo o en el agua, por enzimas, o por microorganismos logrados por la ingeniería genética. Los primeros sistemas de biorremediación, hoy casi en desuso, pero que

actuaban en forma muy eficaz, fueron las cámaras sépticas, empleadas para purificar las aguas servidas antes de su vertido a los pozos negros o ciegos.

Los niveles mas altos de degradación logrados por biocorrección, no superan el 90 %. Los tiempos de tratamiento son prolongados y en su efectividad final influye el contenido en el suelo de: humedad, oxígeno y materia orgánica, temperatura, pH, nutrientes, etc. En algunos casos se ha practicado la inyección bacteriana en sitios determinados del perfil del suelo o de la zona saturada, en coincidencia con los sectores que manifiestan más alta contaminación. Sin embargo la mayor actividad bacteriana se da en los primeros 20-30 cm del perfil, que es donde existe mayor aireación, disminuyendo notoriamente en profundidad.

Los lodos contaminados con HC deben secarse previamente a su disposición y la concentración final no debe superar al 10% de hidrocarburo en relación al peso del suelo seco, con el que se mezcla y se esparce en capas de 20 a 30 cm de espesor. Es necesario arar periódicamente para facilitar la aireación y controlar el pH y el contenido de humedad, a fin de facilitar la actividad bacteriana.

**11.1.3. Reacciones químicas.** Como la reducción del Cr o la oxidación del Pb orgánico (tetraetilo de Pb) a plomo metálico.

**11.1.4. Lavado.** El suelo puede ser lavado antes de su disposición para disminuir la carga de contaminantes. Se emplean solventes o “jabones” (tensoactivos). Luego se tratan los lixiviados, generalmente por incineración.

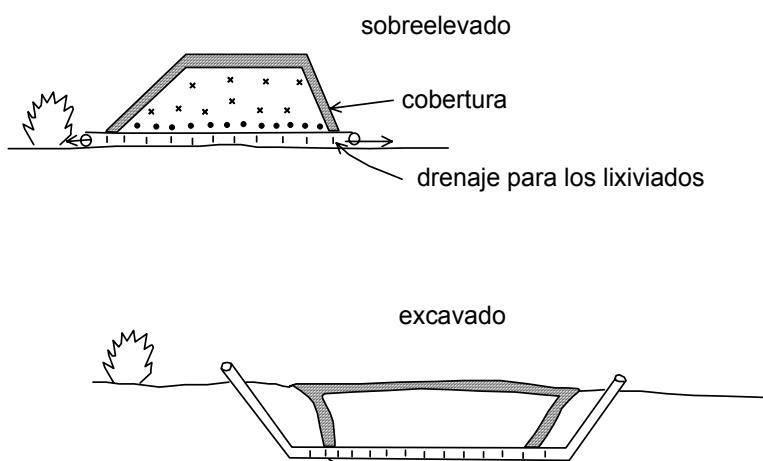
**11.1.5. Solidificación y estabilización.** EPA considera por lo menos 6 categorías para lograr solidificación y estabilización:

a) cemento b) cal más puzolanas c) asfaltos d) polímeros orgánicos e) vitrificación y f) otros.

Hasta el presente no se ha podido comprobar efectividad a largo plazo de este tratamiento.

**11.1.6. Terraplenamiento.** La disposición en excavaciones o como rellenos sobre elevados son prácticas comunes para los residuos peligrosos (figura 34).

**Fig. 34**



### 11.2. Factibilidad técnica para la extracción y el tratamiento de agua subterránea

Para establecer la factibilidad técnica de la extracción del agua contaminada, es necesario conocer el comportamiento hidrogeológico de las unidades deterioradas (permeabilidad, porosidad, espesor, direcciones de flujo, gradientes hidráulicos, velocidades de flujo, etc.) y prever el sistema de tratamiento para su disposición de acuerdo a las exigencias de las normas correspondientes.

Es importante señalar que resulta imposible extraer la totalidad del agua intersticial contaminada, aún con HC livianos o miscibles. Del volumen total de agua poral, sólo una fracción es efectivamente recuperable por acción gravitatoria (porosidad efectiva). La diferencia entre el volumen total de agua y el efectivamente recuperable es mayor en los sedimentos de grano fino (arcilla) que en los medianos o gruesos (arena y grana).

A modo de ejemplo se citan las siguientes porosidades medias:

<b>POROSIDAD EFECTIVA</b> %	<b>MATERIAL</b>	<b>POROSIDAD TOTAL</b> %
<b>0 - 5</b>	<b>Arcilla</b>	<b>40 - 60</b>
<b>10 - 20</b>	<b>Arena</b>	<b>20 - 45</b>
<b>15 - 25</b>	<b>Grava</b>	<b>25 - 40</b>

Los sistemas de extracción: pozos de gran diámetro (1 a 5 m), perforaciones de diámetro reducido (5 a 50 cm) o colectores horizontales, dependerán de las propiedades físicas e hidráulicas de las unidades hidrogeológicas afectadas (permeabilidad, espesor, continuidad, productividad, profundidad) y del tipo de contaminante (inmiscible, miscible, viscoso, fluido, liviano, pesado, volátil, etc.).

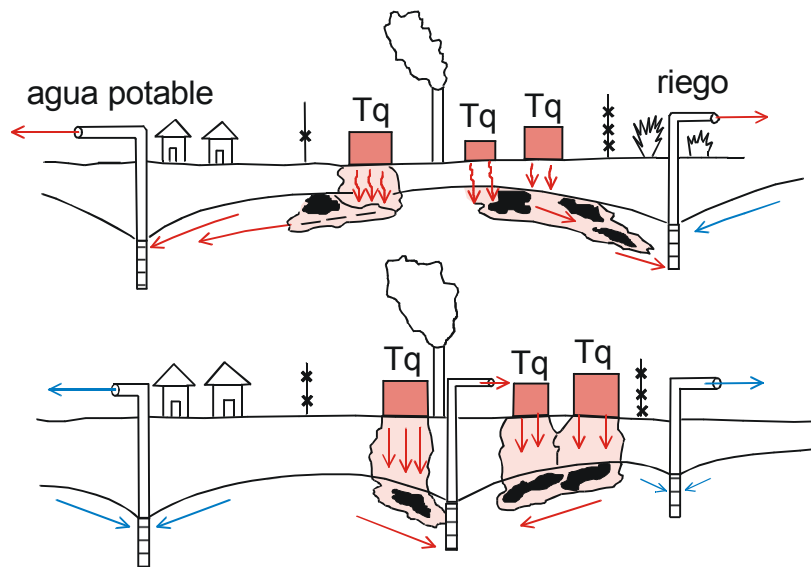
En términos generales se adopta el sistema de pozos de gran diámetro, a veces combinado con colectores horizontales en medios de baja permeabilidad y por ende de

escasa productividad y las perforaciones de pequeño diámetro en los sistemas de mediana y alta permeabilidad.

Se suelen utilizar algunas técnicas complementarias para mejorar la recuperación de HC con el agua, como la inyección de solventes o vapor de agua para fluidificar a los viscosos. El primero, sin embargo, encarece la extracción y a veces complica el proceso, pues a la extracción del contaminante hay que agregar la del solvente.

Ya se mencionó que por acción del bombeo, sólo puede extraerse una fracción del agua intersticial y que ésta es menor en los materiales de baja permeabilidad. Más complicado aún resulta extraer el contaminante, especialmente cuando es inmisible. Por ello una técnica de uso frecuente en las refinerías europeas, es la de evitar la salida de los HC en fase acuosa, fuera del predio de las mismas. De esta forma aunque no se logre una recuperación efectiva del contaminante, se preserva la calidad del agua subterránea de los ambientes vecinos, lo que resulta especialmente trascendente en los lugares en que se utiliza el agua subterránea para consumo humano, ganadero, o riego (figura 35).

Fig. 35



Los sistemas de recuperación por bombeo, necesariamente deben contemplar el tratamiento del agua previo a su vertido como efluente o reinyección profunda. El monitoreo resulta imprescindible y en la generalidad de los casos hay que practicar sondeos y construir piezómetros especialmente para ello.

Las técnicas de tratamiento más utilizadas son:

1- **Separación con aire.** Emplea torres para el almacenamiento temporario del agua contaminada, en las que se inyecta aire a presión. Es efectiva para separar volátiles. En BTEX el índice de recuperación puede llegar al 95%.

2- **Separación por gravedad.** Es de uso corriente en la industria petrolera; aprovecha la condición de inmiscibilidad en el agua, de muchos HC. Es hábil para lograr el tratamiento de volúmenes importantes. En HC inmiscibles se puede bajar la concentración hasta 15 mg/l.

3- **Adsorción con carbono.** Los lechos de carbono activado granular, suelen ser efectivos para eliminar algunos compuestos aromáticos de alto peso molecular y baja solubilidad (aromáticos polinucleares, índice de recuperación 95%) y también para fijar metales.

4- **Biodegradación.** La técnica consiste en lograr un contacto íntimo entre bacterias, oxígeno, elementos nutritivos y los HC en cuestión. Para ello se emplean grandes tanques o lagunas de aireación (biorreactores), con tiempos de residencia variables (alrededor de 24 hs). Se puede lograr hasta 0,1 - 1 mg/l de contaminante en solución.

5- **Ósmosis inversa.** Se aplica para extraer sales en solución, empleando membranas semipermeables y el principio de diferencia de presión osmótica entre soluciones de alta y baja concentración salina.

Concluyendo se puede sintetizar que:

- El diagnóstico sobre el estado del suelo y del agua subterránea frente a la contaminación con HC debe basarse en un muestreo representativo, para lo cual no sólo habrá que seleccionar adecuadamente la grilla areal, sino también la ubicación de los puntos a muestrear en el perfil.

- Durante la ejecución de los sondeos hay que prestar atención para no introducir HC en ellos, por lo que no deben emplearse lubricantes en las roscas, el agua de la inyección debe ser limpia y sumamente cuidadoso el manipuleo y envasado de las muestras.

- La selección de las muestras de suelo para las determinaciones analíticas de laboratorio, normalmente se efectúa mediante una apreciación macroscópica en boca de pozo, teniendo en cuenta el grado de impregnación, el olor y la iridiscencia.

- Para el muestreo de agua subterránea es conveniente que transcurra al menos una semana desde la finalización del sondeo, a fin de permitir el ingreso de los HC, especialmente los viscosos que tienen una dinámica mucho más lenta que el agua.

- La variación del potencial hidráulico en sentido vertical permite predecir la tendencia a la contaminación en profundidad. En el aspecto areal, la red de flujo subterráneo resulta imprescindible para determinar la ubicación de los sitios más comprometidos frente a la contaminación.

- Para remediar el suelo deteriorado, salvo muy raras excepciones, es necesario renovarlo, prepararlo, tratarlo y disponerlo nuevamente en el mismo sitio de donde se lo sacó o en otro. El costo del diagnóstico es notoriamente más bajo que el de la remediación (normalmente inferior al 5%) por lo que a fin de evitar movimientos innecesarios de suelos, hay que delimitar las manchas con la mayor precisión posible, lo que se logra con una adecuada distribución de sondeos y toma de muestras.

- La remediación del agua subterránea es bastante más complicada que la del suelo, debido a la baja recuperación de HC en relación al agua bombeada, particularmente si el HC es del tipo viscoso. Alguna mejora se puede lograr en el índice de recuperación, inyectando vapor de agua o sustancias tensoactivas. Sin embargo las dificultades en el mejoramiento de la calidad hace que una de las prácticas más utilizada sea contener al agua contaminada dentro de los límites del predio que originó la contaminación, lo que se consigue generando un cono de depresión por bombeo.

- Ninguna técnica de remediación tendrá resultado exitoso si se mantienen las fuentes de polución y el ingreso de los contaminantes al suelo y al agua. Por ello antes de intentar la limpieza, deben identificarse dichas fuentes a efectos de repararlas o desactivarlas (pérdidas en tanques y tuberías, derrames, vertidos, disposición de efluentes, etc.).

## **12. BIBLIOGRAFÍA**

ADAMS, B & FOSTER, S.S.D. 1992. Land-surface zoning for groundwater protection. J. Inst. Water & Environmental Management. London. 6 (3): 312-321.

ALBERTA ENVIRONMENT. 1991. Alberta User Guide for Waste Managers. Edmonton.

ALBERTA ENVIRONMENT. 1983. Guidelines for Disposal of Sulfur Containing Solid Wastes. Edmonton.

ALBERTA ENVIRONMENT. 1987. Guidelines for Industrial Landfills. Edmonton.

ALBERTA ENVIRONMENT. 1988. Guidelines for Land Treatment of Industrial Waste. Edmonton.

ALBERTA ENVIRONMENT. 1988. Hazardous Waste Storage Guidelines. Edmonton.

ALEKESEEV, V.S. & KOMMUNAR, GM 1976. Confined seepage structures and their design.. In: Artificial recharge of groundwater, p. 35-42. MDNTP Pub. (in Russian).

ALLER, L; BENNET,T; LEHR, J.H; PETTY, R.J & HACKETT, G. 1987. Drastic, a standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic setting U.S. Environmental Protection Agency, Ada, OK. EPA Report 600/2-87-035: 1-455.

ANDREU, J. 1993. Conceptos y métodos para la planificación hidrológica. CIMNE. Barcelona: 1-391.

ARPEL. 1995. Guía para el manejo de residuos sólidos de refinerías de petróleo. Alberta.

AUGE, M. 1993. Análisis ambiental en relación al estado del suelo y del agua subterránea en una refinería de petróleo del Conurbano Bonaerense. Seminario Hispano - Argentino sobre Temas Actuales de la Hidrología Subterránea. Actas: 383-395. Mar del Plata.

AUGE, M. 1996. Identificación y remediación de la contaminación ambiental con hidrocarburos en el suelo y el agua subterránea. Segundas Jornadas de Preservación de Agua, Aire y Suelo en la Industria Petrolera. Actas: 463-483. San Martín de los Andes.

AUGE, M. y M.I. NAGY 1996. Origen y Evolución de los nitratos en el suelo y el agua subterránea de La Plata - Argentina. Tercer Congreso Latinoamericano de Hidrología Subterránea. Actas: 1-12. San Luis Potosí – México.

AUGE, M. 1997. Deterioro de acuíferos por sobreexplotación y contaminación. Congreso Internacional sobre Aguas: 1- 40. UBA. Buenos Aires.

AUGE, M. 2002. Hidrogeología Ambiental – Quinto Curso de Posgrado. UBA. Inéd: 1-161. Buenos Aires.

AUGE, M. 2003. Vulnerabilidad de acuíferos. Conceptos y Métodos. Ebook: 1-38. Red IRIS. Red Académica y Científica de España en Internet. [www.tierra.rediris.es/hidrored/ebooks/vulnerabilidad.html](http://www.tierra.rediris.es/hidrored/ebooks/vulnerabilidad.html)

AUGE, M. 2004. Hidrogeología Ambiental – Sexto Curso de Posgrado. UBA. Inéd: 1-278. Buenos Aires.

BINDEMAN, N.N. Ed. 1975. Regional assessments of groundwater resources. Nauka Publ: 1-136. (in Russian).



BOCHEVER, F.M. 1968. The theory and practical methods of hydrogeological computations of groundwater development. Nedra Publ. Moscow: 325 p (in Russian).

BOCHEVER, F.M. & ORADOVSKAYA, A.E. 1972. Hydrogeological substantiation of protection of groundwatwer and water-supply wells from pollution. Nedra Publ. Moscow: 129 p (in Russian).

BOCHEVER, F.M. & ORADOVSKAYA, A.E. 1974 Methodological recommendations on prediction of wastewater distribution in aquifers. VODGEO Publ. Moscow: 126 p (in Russian)

BOCHEVER, F.M. & ORADOVSKAYA, A.E. 1976, # 2. Problems of groundwater pollution control. Sovetskaya Geologiya: 59-70 (in Russian).

BOCHEVER F.M; LAPSHIN, N.N & ORADOVSKAYA, A.E. 1979. Protection of groundwater from pollution. Nedra Publ. Moscow: 254 p (in Russian).

BOGOLYUBOV, K.S. & BURCHAK, T.V. 1976. Recharge structures of the open type. Design features and production computations. In Artificial recharge of groundwater: 21-35. MDNTP Publ. Moscow (in Russian).

BRITISH COLUMBIA MINISTRY OF THE ENVIRONMENT. 1989. Criteria for Managing Contaminated Sites in British Columbia. Victoria.

BURCHAK, T.V. 1978. Recharge basins. Budivel'nik Publ: 152 p (in Russian). Calculations for water-supply wells. Editor: BOCHEVER, F.M.

CANADIAN COUNCIL OF MINISTERS OF THE ENVIRONMENT. 1991. National Guidelines for the Landfilling of Hazardous Waste. Ottawa.

COHEN, S. 1992. Results of the national drinking water survey: pesticides, nitrates and well characteristics. Water Well Journal - Aug: 35-38.

CPPI (PACE) REPORT # 90-5. 1990. Waste Management Guidelines for Petroleum Refineries and Upgrades. Second Edition; prepared by Monenco Consultants Ltd. For Canadian Petroleum Products Institute. Ottawa.

CUSTODIO, E. 1989 a. Strict aquifer control rules versus unrestricted ground-water exploitation: comments on economic consequences. *Groundwater Economics. Developments in Water Science # 39*. Elsevier: 381-395.

CUSTODIO, E. 1989 b. The role of groundwater quality in the decision-making process for water resources. *Groundwater Management Quantity and Quality. Intern. Assoc. Scientific Hydrology Publ. # 188*: 87-99.

CUSTODIO, E. 1993 a. Hydrogeological and hydrochemical aspects of aquifer overexploitation. *Selected Papers. Intern. Assoc. Hydrogeologists. Heise*.

CUSTODIO, E. 1993 b. In groundwater overexploitation a new hydrogeological concept. *Ingegneria e Geologia degli Acquiferi Groundwater Geoengineering, IGEA, Rev. Sez. Ital. Acque Sotterranee, Assoc. Mineraria Subalpina. Torino. 2*: 5-14.

CUSTODIO, E. 1993 c. Aquifer intensive exploitation and over-exploitation with respect sustainable development. *Environmental Pollution: Science, Policy, Engineering. European Centre for Pollution Research. 2*: 509-516.

CUSTODIO, E. 1993 d. Protección de acuíferos y su correcta explotación: perímetros de protección. *La Economía del Agua. Sociedad General de Aguas de Barcelona. Barcelona*: 69-105.

CUSTODIO, E & DIJON, R. 1991. Groundwater overexploitation in developing countries. Report of an Interregional Workshop, Gran Canaria, Canary Islands, Spain. U.N. Dept. of Technical Cooperation for Development. New York. 1992: 1-116.

DUIJVENBOODEN, W. & WAEGENINGH, H.G. 1987. Vulnerability of soil and groundwater to pollutants. *TNO/RIVM, Proceedings and Information # 38, The Hague*: 1-143.

EPA 1987. Guidelines for delineation of wellhead protection areas. U.S. Environmental Protection Agency. Ada. OK.

FOMIN V.M. Editor 1978. Evaluation of changes in hydrogeological conditions under the human impact. *Nedra Publ. Moscow*: 264 p (in Russian).

FAVORIN, N.N. 1967. Artificial recharge of groundwater. *Nauka Publ. Moscow*: 198 p (in Russian).

FOSTER, S.S.D. 1987. Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy. Vulnerability of Soil and Groundwater to Pollutants. TNO/RIVM. Proceedings and Information 38: 69-86. The Hague:

FOSTER, S.S.D. & HIRATA, R. 1988-1991. Groundwater pollution risk assessment: a methodology using available data. WHO-PAHO/CEPIS: 1-78. Lima.

FRANKLIN, N. 1991. Disposal of Contaminated Soil; position paper for Petro-Canada Products.

GAZIZOV, M.S; BANKOVSKAYA, V.M. & MALYSHENKO, V.S. 1974. Management of the water regime is a promising direction of depletion and pollution control of water bodies. Vodnye Resursy # 1: 135-141 (in Russian).

GARRET, P. & T.L. POTTER. 1989. Groundwater Sampling Manual for Underground Storage Tank Sites. Depart. of Env. Port. Maine.

GOLDBERG, V.M. 1973. Hydrogeological forecasts of polluted groundwater movement. Nedra Publ: 1-170. Moscow. (in Russian).

GOLDBERG, V.M. 1979. Methodological guide on groundwater pollution control. SEV Publ: 1-63. Moscow. (in Russian).

GOLDBERG, V.M. 1979. Regime observations in connection with groundwater pollution control. In Studying and mapping on the groundwater regime. Nedra Publ: 40-46. Moscow. (in Russian).

GOLDBERG, V.M. 1980. Methodological recommendations of hydrogeological studies and forecasts of control of groundwater protection. VSEGINGEO Publ: 1-86. (in Russian).

GOLDBERG, V.M. 1983. Natural and artificial factors of groundwater protections. Byullyuten Moskovskogo Obshchestva Ispytatelei Prirody #2: 103-110. (in Russian).

HAIMES, Y.Y. 1992. Sustainable development; an holistic approach to natural resource management. Water international # 17: 187-192.

INTERA KENTING. 1991. Manual of Petroleum Contaminated Soil Treatment Technologies; prepared for Canadian Petroleum Products Institute National Petroleum Contaminated Soil Task Force. Nepean, Ontario.

JEDLITSCHKA, J. 1991. Qualitative aspects. The Management of Ground Water Resources: Preparation for a Ministerial Seminar. European Insitute for Water: 1-16. Paris - Bruxelles.

KHORDIKAINEN, M.A. 1974. On the methods of areal subdivision of the area of the URSS according to conditions of creation of artificial resources of groundwater. Razvedka i Okhrana Nedra # 1: 38-45. (in Russian).

KHORDIKAINEN, M.A. 1974. On artificial recharge of groundwater. Vodnye Resursy # 2: 170-179. (in Russian).

KHORDIKAINEN, M.A. 1975. Particularities of artificial recharge in fractured and karst groundwater reservoirs. Vodnye Resursy # 2: 122-132. (in Russian).

KHORDIKAINEN, M.A. 1977. Interaction of ground and surface waters and their integrated use in national economy exemplified by the Karakengir River Basin in the Dzhezkazgan industrial region. In: Surface and groundwater and water balance. VSEGINGEO Pub: 38-50. Moscow. (in Russian).

KHORDIKAINEN, MA 1979. Artificial recharge of groundwater in the area of water-supply wells of Tbilisi. In: Artificial recharge of groundwater. VSEGINGEO Publ: 37-42. Moscow. (in Russian).

KONOVOV, I.V. 1972. Preparation of river water and industrial waste water for artificial groundwater recharge. In: Problems of artificial recharge of groundwater of the arid zone of Ukraine. Naukova Dumka Publ: 67-71. Kiev. (in Russian).

KOVALENKO, G.G. & KHORDIKAINEN, M.A. 1979. Evaluation of artificial recharge of groundwater in the area of water-supply wells in the Sherubai-Nura Valley (district of Karaganda) using the analog modeling technique. In: Problems of evaluations of the safe yield of groundwater # 130: 57-71. VSEGINGEO Publ. Moscow. (in Russian).

LALLEMAND-BARRÉS, A. & ROUX, J.C. 1989. Guide méthodologique d'établissement des périmètres de protection des captages d'eau souterraine destinée à la consommation humaine. Manuels & Méthodes 19: 1-221. Editions du BRGM. Paris - Orléans.

LLAMAS, M.R. 1984. Política hidráulica y génesis de mitos hidráulicos en España. Cimbra: 16-25. Madrid.

LLAMAS, M.R. 1991. Consideraciones iniciales sobre el pasado, presente y futuro de las aguas subterráneas en España. Revista de Obras Públicas. Dic. 1991: 7-12. Madrid.

LAPHSIN, N.N. 1976. Calculations for water-supply wells under artificial recharge conditions. In: Artificial recharge of groundwater. MDNTP Publ: 42-52.. Moscow. (in Russian).

LUKNER, L. & SHESTAKOV, V.M. 1976. Modeling of groundwater flow. Nedra Publ: 1-407. Moscow.

MARTÍNEZ NAVARRETE, C; MORENO MERINO, L y LÓPEZ GETA, J.A. 1991. Análisis comparativo de los métodos para la determinación de perímetros de protección de las captaciones de aguas subterráneas. III Simposio sobre el Agua en Andalucía - Córdoba. ITGE I: 513-524. Madrid .

MATTHESS, G; FOSTER, S.S.D & SKINNER, A.CH. 1985. Theoretical background, hydrogeology and practice of groundwater protection zones. Intern. Contributions to Hydrogeology # 6: 1-204 . Inter. Assoc. Hydrogeologists. Heise.

MINISTERE DE L'ENVIRONNEMENT DU QUEBEC. 1990. Guide des Methodes de Conservation et d'Analyses des Echantillons d'Eau et de Sol.

MINKIN, E.L. 1967. Hydrogeological computations for delineation of zones of sanitary protection of water-supply wells. Nedra Publ: 1-124. Moscow. (in Russian).

MINKIN, E.L. 1972. Studies and approximate computations for groundwater protection. Nedra Publ: 1-112. Moscow. (in Russian).

MINKIN, E.L. 1972. Main problems of groundwater protection. Vodnye Resursy # 2: 25-30. (in Russian).

MINKIN, E.L. 1973. Interrelation between surface and groundwater and its importance to solution of some hydrogeological and water-management problems. Stroiizdat: 1-59. Moscow. (in Russian).

MIRONENKO, V.A; RUMYNIN, V.G & UCHAEV, V.K. 1980. Groundwater protection in mining regions. Nedra Publ: 1-320. Leningrad. (in Russian).

NATIONAL PETROLEUM REFINERS' ASSOCIATION REPORT AM-90-48. 1990. Treatment Technologies for Refinery Wastes and Wastewater's; address by D. Schleck. Washington.

PARRIAUX, A; MANDIA, J. & DUBOIS, J.D. 1990. The concept of protection zones in karstic mountains. Mém. 22nd. Congress Inter. Assoc. Hydrogeologists. XXII: 1136-1143. Lausanne

PÉREZ ADÁN, J. 1992. El pensamiento "ecológico" de Juan Pablo II. Estudios sobre la Encíclica "Centesimus Annus" : 333-350. Aedos - Unión Ed. Madrid.

PLOTNIKOV, N.A. & SYCHEV, K.I. 1976. Estimating the safe groundwater yield in the case of artificial recharge. Nedra Publ: 1-152. (in Russian).

PLOTNIKOV, N.I; PLOTNIKOV N.A & SYCHEV, K.I. 1978. Hydrogeological principles of artificial recharge of groundwater. Nedra Publ: 1-311. Moscow. (in Russian).

SAHUQUILLO, A. Ed. 1983. Utilización conjunta de aguas superficiales y subterráneas. Servicio Geológico de Obras Públicas. Madrid.

SHAMOV, G.I. 1969. Rivers sediments. Gidrometeoizdat: 1-378. Leningrad. (in Russian).

SHESTAKOV, V.M. 1961. Principles of hydrogeological computations for leakage from industrial waste water storage reservoirs. VODGEO Publ: 1-100. (in Russian).

SHESTAKOV, V.M. 1973. Groundwater dynamics. MGU Publ: 1-327.

STANKEVICH, R.A. & CHEREPANSKII, M.M. 1979. Problems of assessments of the effect of water-supply wells on the discharge of Byelorussian rivers. In: Particularities of formation of hydrogeological and engineering-geological conditions of Byelorussia. Nauka i Tekhnika Publ: 1-176. Minsk. (in Russian).

SYCHEV, K.I. 1975. Hydrogeological substantiation of artificial recharge of groundwater (Methodological recommendations). VSEGINGEO Publ: 1-100. Mscow. (in Russian).

SYCHEV, K.I. 1976. Particularities of hydrogeological and hydrological investigations in artificial recharge of groundwater. In: Proceedings of Workshop on Artificial Recharge. MDNTP Publ: 82-89. (in Russian).

SYCHEV, K.I. & KHORDIKAINEN, M.A. 1977. Methods of studies for substantiation of artificial recharge of groundwater. Principles of hydrogeological areal subdivision according to artificial recharge conditions. SEV Publ: 1-106. Moscow. (in Russian).

URSS Standard 2874-83 1983. Drinking water. Izdatelstvo Standartov: 1-8. Moscow. (in Russian).

USENKO, V.S. 1972. Artificial recharge and induced recharge wells. Nauka i Tekhnika Publ: 1-153. Minsk. (in Russian).

VRBA, J. 1991. Mapping of groundwater vulnerability: working paper. IAH Groundwater Protection Commission Meeting, Tampa, Fla. UNESCO-Intern. Hydrological Programme IV, Project M 1.2. (a).

WCED 1987. Our common future. World Commission on Environment and Development. Oxford Univ. Press, Oxford, U.K. Workshop on artificial recharge of groundwater.

ZAEZZHEV, N.M; GORBENKO, G.F. et al. Results of operations in artificial replenishment of confined groundwater in the Plain Crimea. In: Problems of artificial replenishment of groundwater in the arid zone of Ukraine. Naukova Dumka Publ: 35-41. Kiev. (in Russian).

EPA Promulgates

Phase II  
Contaminants

The U.S. Environmental Protection Agency (EPA) announced in the January 14, 1991 Federal Register that it has set final drinking water standards for 33 contaminants and has re-

proposed standards for another five. The regulations address 17 pesticides and 13 probable carcinogens.

These new regulations increase the number of federally enforceable standards to 60 for drinking water contaminants.

The new regulations set Maximum Contaminant Levels (MCL's) for four widely used pesticides (alachlor, aldicarb, atrazine and pentachlorophenol), 13 other pesticides, 10 volatile organic compounds (VOC's), PCB, eight inorganic-compounds including cadmium, nitrate and nitrite, and two chemicals used in treating drinking water. The 33 final MCL's will take effect in July 1992 and EPA anticipates five re-proposed MCLs will be implemented by January, 1993. Below is a list of the 38 contaminants and their MCL's.

CONTAMINANT	CURRENT FINAL MCL	MCL	HEALTH EFFECT	SOURCES
<b>Inorganic</b>				
Asbestos		7 MFL	benign tumor	natural mineral deposits, also in asbestos/cement (NC) pipe
Barium (2)	1.0	2.0	circulatory system	natural mineral deposits, oil/gas drilling operations paint and other industrial uses
Cadmium metal	0.01	0.005	kidney	natural mineral deposits, finishing; corrosion product in plumbing
Chromium	0.05	0.1	liver, skin, digestive system, kidney	natural mineral deposits, metal finishing, textile, tanning and leather industries
Mercury	0.002	0.002	kidney; nervous system	industrial/chemical manufacturing, fungicide, natural mineral deposits
Nitrate	10.0	10.0	methemoglobinemia "blue baby, syndrome"	fertilizers, feedlots, sewage; naturally in soil, mineral deposits
Nitrite		1.0	methemoglobinemia "blue baby syndrome"	unstable, rapidly converted to nitrate; prohibited in working metal fluids
Total Nitrate/Nitrite		10.0		
Selenium	0.01	0.05	nervous system	natural mineral deposits; by-product of copper mining/smelting
<b>Volatile Organics</b>				
o-Dichlorobenzene chemical		0.6	nervous system, lungs, liver, kidney	industrial solvent, manufacturing
cis-1,2 dichloroethylene		0.07	circulatory, liver, nervous system	industrial extraction solvent
trans-1,2 dichloroethylene		0.1	circulatory, liver, nervous system	industrial extraction solvent
1,2 Dichloropropane		0.005	probable cancer, liver, lungs, kidney	soil fumigant, industrial solvent
Ethylbenzene		0.7	kidney, liver, nervous System	present in gasoline and insecticides, chemical manufacturing
Monochlorobenzene		0.1	kidney, liver, nervous System	pesticide manufacturing, metal cleaner, industrial solvent



## CUADRO 6

<i>CONTAMINANT</i>	<i>CURRENT MCL</i>	<i>FINAL MCL</i>	<i>HEALTH EFFECT</i>	<i>SOURCES</i>
Tetrachloroethylene		0.005	probable cancer	dry- cleaning/industrial solvent
Toluene		1.0	nervous system, kidney, lungs	chemical manufacturing. gasoline additive. industrial solvent
Xylenes		10.0	liver. kidney, nervous system	paint/ink solvent, gasoline refining by-product. component of detergents
<b><i>Pesticides and PCBs</i></b>				
Alachlor		0.002	probable cancer	herbicide on corn and soybeans
Aldicarb (2)		0.003	nervous system	insecticide on cotton, potatoes
Aldicarb sulfone (2)	1	0.003	nervous system	degraded from aldicarb by plants
Aldicarb sulfoxide (2)		0.003	nervous system	degraded from aldicarb by plants
Atrazine		0.003	reproductive/and cardiac	widely used herbicide on corn and on non-crop land
Carbofuran		0.04	nervous system and reproductive	soil fumigant/insecticide on corn/cotton
Chlordane		0.002	probable cancer	soil insecticide for termite control, corn, potatoes
Dibromo-chloropropane DBCP, Nemaflume)		0.0002	probable cancer	soil fumigant on soybean, cotton; cancelled 1977
2,4-D (Formula 40, Weeder 64)	0.1	0.07	liver, kidney, nervous system	herbicide for wheat. corn. rangelands
Ethylene Dibromide - additive, (EDB, Bromofume)		0.00005	probable cancer	gasoline soil fumigant; solvent cancelled in 1984: limited uses continue
Heptachlor (H-34, Heptox)		0.0004	probable cancer	insecticide on corn: cancelled in 1983 except for use in termite control
Heptachlor epoxide		0.0002	probable cancer	soil and water organisms convert heptachlor to epoxide
Lindane	0.004	0.0002	nervous system, liver, kidney	insecticide for seed, lumbar, livestock
Methoxychlor (DMDT, Marlate)	0.1	0.04	nervous system, liver, kidney	alfalfa, livestock insecticide
Polychlorinated Biphenyls (PCBs, Aroclor)		0.0005	probable cancer	electrical transformers, plasticizers; banned in 1979
Pentachloropheno- chlorophenol (2)		0.001	probable cancer	wood preservative & herbicide; non-wood use banned in 1987
Toxaphene	0.005	0.003	probable cancer	insecticide/herbicide for cotton, so5,beans: cancelled in 1982
2,4,5-TP (Silvex)	0.01	0.05	nervous system, liver, kidney	herbicide on rangelands, sugarcane, golf courses; cancelled in 1983
<b><i>Treatment Techniques</i></b>				
Epichlorohydrin		0.01% dosed at 20mg/l	probable cancer, liver, kidney, lungs	epoxy resins and coatings; flocculents used in treatment
Acrylamide		0.005% dosed at 1 mg/l	probable cancer, nervous system	flocculents used in sewage/wastewater treatment

(1) Final MCL.s become effective July, 1992. At that time, the current MCL.s cease to be effective.

-(2) Levels for barium. aldicarb. aldicarb sulfone, aldicarb sulfoxide and pentachlorophenol are proposed. Final levels will be established by July 1, 1991.

million fibers per liter

## CUADRO 7

Summary comparison of US primary regulations with Canadian, EEC, and WHO guidelines				
Substance	US Maximum Contaminant Level* mg/L	Canadian Maximum Acceptable Limit † mg/L	EEC Maximum Admissible Concentration ‡ mg/L	WHO Guideline Value mg/L
<b>Inorganics</b>				
Arsenic	0.05	0.05	0.05	0.05
Barium	1.0	1.0	0.1	NS
Cadmium	0.01	0.005	0.005	0.005
Chromium	0.05	0.05	0.05	0.05
Fluoride	4.0	1.5	NSI	1.5
Lead	0.05	0.05	0.05	0.05
Mercury	0.002	0.001	0.001	0.001
Nitrate	10.0	10.0	50	10.0
Selenium	0.01	0.01	0.01	0.01
Silver	0.05	0.05	0.01	NS
<b>Microbials</b>				
Coliforms-orrmmiswu/100 ml	<1	10	0	0
Turbidity- min	1-5	5.0	0-4	< 1
<b>Organics</b>				
2,4-D	0.1	0.1	NS	0.001
Endrin '	0.0002	0.0002	NS	NS
Lindane	0.0004	0.004	NS	NS
Methoxychlor	0.1	0.1	NS	0.001
Pesticides (total)	NS	0.1	0.005	NS
Toxaphene	0.005	0.005	NS	NS
2,4,5-TP silvex	0.01	0.01	NS	
NS				
Trihalomethanes	0.10	0.35	0.001	0.03 (CHC1 <sub>3</sub> only)
<b>Radionuclides</b>				
Beta particle and photon activity	4 mrem	NS	NS	1.0 Bq/L§
Gross alpha particle activity	15 pCi/L	NS	NS	0.1 Bq/L§
Radium.226 + radium-228	5 pCi/L	1 Bq/L§	NS	NS
<b>Volatile organic chemical</b>				
Benzene	0.005	NS	NS	0.01
Carbon tetrachloride	0.005	NS	NS	0.003
1,1 .Dichloroethylene	0.007	NS	NS	0.003
1,2-Dichloroethane	0.005	NS	NS	0.01
para-Dichlorobenzene	0.075	NS	NS	NS .
1,1,1-Trichlorethane	02	NS	NS	NS
Trichloroethylene	0.005	NS	NS	0.03
Vinyl chloride	0.002	NS	NS	NS

\* Enforceable

† Nonenforceable

‡ No standard

§ Becquerels per litre

## CUADRO 7

Summary comparison of US secondary regulations with Canadian, EEC, and WHO guidelines					
Substance	US Secondary Maximum Contaminant Level*	Canadian Maximum Acceptable Limit*	EEC		WHO Guideline Value
			Guide Level*	Maximum Admissible concentration	
Chloride	250 mg/L	250 mg/L	25 mg/L	NS	250 mg/L
Color	15 cu	15 cu	1 mg Pt-Co/L	20 mg Pt-Co/L	15 cu
Copper	1 mg/L	1.0 mg/L	100 ug at treatment plant: 3.000 ug after 12 Hours in piping	NS	1.0 mg/L
Corrosivity	noncorrosive				
Fluoride	2 mg/l	1.5 mg/L		Water should not be aggressive Varies according to average temperature in the area	1.5 mg/L
Foaming manta	0.5 mg/L	NS		NS	Ns
Iron	0.3 mg/L	0.3 mg/L	50 ug/L	300 ug/L	0.3 mg/L
Manganese	0.05 mg/L	0.06 mg/L	20 ug/L		50 ug/L
0.1 mg/l					
Odor	3 TON		0 dilution number	2 dilution number at 54° F (12° C)	
pH	6.5-8.5	6.5-8.5	6.5-8.5	NS	6.5-8.5
Sulfate	250 mg/L	500 mg/L	25 mg/L	NS	400 mg/L
Total dissolved					
solids	500 mg/L	500 mg/L	NS	NS	1.000 mg/L
Zinc	5 mg/L	5 mg/L	100 ug at treatment ptant:5000 ug after 12 hours in piping	NS	5.0 mg/L

\*Nonenforceable

**NORMA CANADIENSE****Explanation of Terms****Maximum Acceptable Concentrations (MAC)**

Maximum acceptable concentrations have been established for certain substances that are known or suspected to cause adverse effects on health. They have been derived to safeguard health on the basis of lifelong consumption. To the extent possible, the use of drinking water for all usual domestic purposes, including personal hygiene, has been considered in the derivation of the guidelines. However, water of higher quality may be required for some special purposes, including renal dialysis.

Drinking water that continually contains substances at levels greater than the maximum acceptable concentrations will contribute significantly to consumers' exposure to these substances and may, in some instances, be capable of inducing deleterious effects on health. However, short-term excursions above the maximum acceptable concentrations do not necessarily mean that the water constitutes an undue risk to health. The amount by which, and the period for which, the maximum acceptable concentration can be exceeded without posing a health risk must be assessed by taking into account the toxicity of the substance involved. When the maximum acceptable concentration for a contaminant is exceeded, however, the minimum action required is immediate resampling. If the maximum acceptable concentration continues to be exceeded, the authorities responsible for public health should be consulted concerning appropriate corrective action.

**Interim Maximum Acceptable Concentrations (IMAC)**

In those instances where there were insufficient toxicological data to derive a maximum acceptable concentration (MAC) with reasonable certainty, interim values have been recommended, taking into account the available health-related data, but employing a larger factor to compensate for the additional uncertainties involved. An interim value was also established for those substances for which estimated lifetime risks of cancer associated with the guideline (the lowest level that was practicably achievable) were greater than those deemed to be essentially negligible. Because of the nature of interim maximum acceptable concentrations, they will be reviewed periodically, as new toxicological data and developments in methods of quantitation and/or treatment become available.

**Aesthetic Objectives (AO)**

These apply to certain substances or characteristics of drinking water which can affect its acceptance by consumers or interfere with practices for supplying good water. For certain parameters, both aesthetic objectives and health-related guidelines (maximum acceptable concentrations) have been derived. Where only aesthetic objectives are specified, the values are below those considered to constitute a health hazard.

## **Microbiological Characteristics\***

### **Coliform, Coliform Background, and Heterotrophic Plate Counts**

All water supplies should be routinely analysed for coliform bacteria and the general bacteria( population. This general population can be estimated from either background colony counts on the total coliform membrane filters or heterotrophic plate counts (HPC) as outlined in Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. Excessive concentrations of the general bacterial population can hinder the recovery of coliforms and thereby prevent the detection of a potential threat to public health.

The maximum acceptable concentration (MAC) for total coliforms is no organisms detectable per 100 mL. Because coliforms are not uniformly distributed in water, and are subject to considerable variation in enumeration, drinking water that fulfils the following conditions is considered to be in compliance with the total coliform MAC:

- 1) No sample should contain more than 10 total coliform organisms per 100 mL, none of which should be fecal coliforms; and
- 2) No consecutive samples from the same site should show the presence of coliform organisms; and
- 3) For community drinking water supplies:
  - a) not more than 10 percent of the samples based on a minimum of 10 samples should show the presence of coliform organisms; and
  - b) not more than one sample from a set of samples taken from the community on a given day should show the presence of coliform organisms.

\* A modification to the previous guideline is proposed. If, after one year, no evidence is presented which questions the suitability of this proposal, it will be adopted as the guideline.

If any of the above criteria are exceeded, corrective action should be taken immediately, in consultation with the local control agency. The most common immediate actions include increasing chlorine dosage, flushing water mains, using an alternative source of water, and advising consumers to boil drinking water.

If up to 10 total coliform organisms per 100 mL are detected from a single sample, or if the simple contains more than either 200 background colonies on a total coliform membrane filter per 100 ml- or more than 500 HPC colonies per millilitre, the cite should be resampled. If the presence of coliforms is reconfirmed (see 2, above), the cause should be determined and corrective action taken as appropriate. If there is a recurrence of unacceptable background or heterotrophic plate counts, an inspection of the system should be undertaken to determine the cause. If remedial action is deemed necessary, special sampling should continue until consecutive samples comply with the guidelines.

### **Viruses and Protozoa**

Standards for viruses and protozoa are not proposed at chis time. It is desirable, however, that no virus or protozoa (e.g. Giardia) be detected. The available information suggests that a well-managed water treatment system providing effective filtration and disinfection and maintaining an adequate free chlorine residual should produce water of an acceptable virological and protozoological quality.

## Sampling

The frequency of sampling should depend on the quality of the source-water, the number of water sources, the past frequency of unsatisfactory samples, the adequacy of treatment and capacity of the treatment plant, the size and complexity of the distribution system, the practice of disinfection, and the size of the population served. The following is offered as a guide:

Population Served	Min. No. Samples Per Month
up to 5000	4
5000 to 100 000	1 per 1000 of population
more than 100 000	90 + 1 per 10 000 population

## Disinfection

Disinfection is the one step in water treatment specifically designed to destroy pathogenic organisms and thereby prevent waterborne diseases. Alone, disinfection is not always sufficient to produce a supply of adequately treated water from every source. Other treatments may be necessary both to make disinfection effective and to satisfy other criteria for the quality of drinking water. The disinfecting agents commonly used in water treatment today are chlorine and its compounds, and ozone.

## Turbidity

The maximum acceptable concentration for turbidity is 1 nephelometric turbidity unit (NTU) for water entering a distribution system. A maximum of 5 NTU may be permitted if it can be demonstrated that disinfection is not compromised by the use of this less stringent value. An aesthetic objective (AO) of 5 NTU has been set for the point of consumption.

The presence of turbidity can have significant effects both on the microbiological quality of drinking water and on the detection of bacteria and viruses. Waterborne bacteria and viruses can be embedded in, or adhered to, particles in the raw water. In addition, these organisms can be entrapped within floc particles formed during water treatment. Thus, turbidity in finished water can contain undesirable micro-organisms, which may not be detectable, or may be grossly underestimated by current detection methods. More important, however, is the capacity of turbidity-causing material to interfere with the disinfection process. Depending upon the composition of the turbidity, interference with chlorination can range from negligible to severe. It must also be noted that any sudden increase in the turbidity of the finished water indicates deteriorating quality of the raw water or loss of control in the water treatment processes. (See also Table 1 under Chemical and Physical Characteristics section.)

## Chemical and Physical Characteristics

The guidelines for chemical and physical parameters are outlined in Table 1. All values are expressed in units of milligrams per litre, unless otherwise stated. The column entitled "Status" indicates whether the guidelines are proposed or under review. If, after one year, no evidence is presented which questions the suitability of the proposed values, they will be adopted as the guidelines. Parameters deleted from the 1987 version of the guidelines are methy1 parathion and total pesticides. Table 2 lists the new parameters which are currently under review.

Table 1

Parameter	MAC	IMAC	AO	Status
Aldicarb	0.009			
Aldrin +.Dieldrin	0.0007			Under Review
Ammonia <sup>(1)</sup>				Proposed
Arsenic	0.05			Under Review
Asbestos <sup>(1)</sup>				
Atrazine		0.06		
Azinphos-methyl	0.02			
Barium		1.0		Proposed
Bendiocarb	0.04			
Benzene	0.005			
Benzo(a)pyrene	0.00001			
Boron	5.0			Under Review
Bromoxynil		0.005		
Cadmium	0.005			
Calcium <sup>(1)</sup>				Proposed
Carbaryl	0.09			
Carbofuran	0.09			
Carbon tetrachloride	0.005			
Chlordane	0.007			Under Review
Chloride			≤ 250	Proposed
Chlorpyrifos	0.09			
Chromium	0.05			
Colour			≤ 15 TCU	

## CUADRO 8

Parameter	MAC	IMAC	AO	Status
Cyanazine		0.01		
Cyanide	0.2			Under Review
Diazinon	0.02			
Dicamba	0.12			
Dichlorobenzene, 1,2-	0.2		≤ 0.003	
Dichlorobenzene, 1,4-	0.005		≤ 0.001	
Dichlorodiphenyltrichloroethane (DDT) + metabolites	0.03			Under Review
Dichloroethane, 1,2-		0.005		Proposed
Dichloromethane	0.05			
Dichlorophenol, 2,4 -	0.9		≤ 0.0003	
Dichlorophenoxyacetic acid, 2,4- (2,4-D)	0.1			Under Review
Diclofop-methyl	0.009			
Dimethoate		0.02		
Diquat	0.07			
Diuron	0.15			
Ethylbenzene			≤ 0.0024	
Fluoride <sup>(2)</sup>	1.5			Under Review
Gasoline <sup>(1)</sup>				
Glyphosate		0.28		
Hardness <sup>(3)</sup>				
Heptachlor + heptachlor epoxide	0.003			Under Review
Iron			≤ 0.3	Proposed
Lead <sup>(4)</sup>	0.01			Proposed



## CUADRO 8

<b>Parameter</b>	<b>MAC</b>	<b>IMAC</b>	<b>AO</b>	<b>Status</b>
Lindane	0.004			Under Review
Magnesium <sup>(1)</sup>				Proposed
Malathion	0.19			
Manganese			≤ 0.05	Proposed
Mercury	0.001			
Methoxychlor	0.9			
Metolachlor		0.05		
Metribuzin	0.08			
Monochlorobenzene		0.08	≤ 0.03	Proposed
Nitrate <sup>(5)</sup>	45.0			Proposed
Nitrilotriacetic acid (NTA)	0.05			Under Review
Odour		Inoffensive		
Paraquat		0.01		
Parathion	0.05			
Pentachlorophenol	0.06		≤ 0.03	
pH <sup>(6)</sup>		6.5-8.5		
Phorate		0.002		
Picloram		0.19		Proposed
Selenium	0.01			
Simazine		0.01		
Sodium <sup>(7)</sup>			≤ 200	Proposed
Sulphate <sup>(8)</sup>			≤ 500	Proposed
Sulphide (as H <sub>2</sub> S)			≤ 0.05	Proposed
Taste		Inoffensive		
Temephos		0.28		

## CUADRO 8

Parameter	MAC	IMAC	AO	Status
Temperature			≤ 15° C	
Terbufos		0.001		
Tetrachlorophenol, 2,3,4,6-	0.1		≤ 0.001	
Toluene			≤ 0.024	
Total Dissolved Solids			≤ 500	Under Review
Triallate	0.23			
Trichloroethylene	0.05			Proposed
Trichlorophenol, 2,4,6	0.005		≤ 0.002	
Trichlorophenoxyacetic acid, 2,4,5- (2,4,5-T)	0.28		≤ 0.02	
Trifluralin		0.045		Proposed
Trihalomethanes	0.35			Under Review
Turbidity <sup>(9,10)</sup>	1 NTU		≤ 5 NTU	
Uranium	0.1			
Xylenes			≤ 0.3	
Zinc			≤ 5.0	Proposed

Dutch indicative values for contaminated sites\*

Indicative values: A - Reference value\*\* (background value)  
 B - Indicative value for further investigation  
 C - Indicative value for cleaning-up

Presence In: Substance	Soil (mg/kg dry weight)			Groundwater (ug/l)		
	A	B	C	A	B	C
V Chlorinated organic compounds						
Aliphatic chlor. comp. (Indiv.)	0.1	5	50			
Aliphatic chlor. comp. (total)	0.1	7	70			
Chlorobenzenes (Indiv.)	0.05	1	10			
Chlorobenzenes (total)	0.05	2	20			
Chlorophenols (Indiv.)	0.01	0.5	5			
Chlorophenols (total)	0.01	1	10			
Chlorinated PCA (total)	0.05	1	10			
PCB (total)	0.05	1	10			
EOCI (total)	0.1	5	80			
VI Pesticides						
Organic chlorinated - (Indiv.)	0.1	0.5	5			
Org. chlorin. - (total)	0.1	1	10			
Pesticides (total)	0.1	2	20			
VII Other pollutants						
Tetrahydrofuran	0.1	4	40			
Pyridine	0.1	2	20			
Tetrahydrothiophene	0.1	5	50			
Cyclohexanone	0.1	6	60			
Styrene	0.1	5	50			
Gasoline	20	100	800			
Mineral oil	100	1000	5000			

Sources: Soil Clean-up Guideline, 1983

\* to be used only in relation with the local situation and the use and function of the soil  
 \*\* in the context of cleaning-up conditions

Presence In: Substance	Soil (mg/kg dry weight)			Groundwater (ug/l)		
	A	B	C	A	B	C
I Metals						
Cr	100	250	800	20	50	200
Co	20	50	300	20	50	200
Ni	50	100	500	20	50	200
Cu	50	100	500	20	50	200
Zn	200	500	3000	50	200	800
As	20	30	50	10	30	100
Mn	10	40	200	5	20	100
Cd	1	5	20	1	2.5	10
Sn	20	50	300	10	30	150
Ba	200	400	2000	50	100	500
Hg	0.5	2	10	0.2	0.5	2
Pb	50	150	600	20	50	200
II Inorganic pollutants						
NH4 (as N)	-	-	-	200	1000	3000
F (total)	200	400	2000	300	1200	4000
CN (total free)	1	10	100	5	30	100
CN (total complex)	5	50	500	10	50	200
S (total)	2	20	200	10	100	300
Br (total)	20	50	300	100	500	2000
PO4 (as P)	-	-	-	50	200	700
III Aromatic compounds						
Benzene	0.01	0.5	5	0.2	1	5
Ethylbenzene	0.05	5	50	0.5	20	60
Toluene	0.05	3	30	0.5	15	50
Xylene	0.05	5	50	0.5	20	60
Phenols	0.02	1	10	0.5	15	50
Aromatics (total)	0.1	7	70	1	30	100
IV Polycyclic aromatic compounds (PCA's)						
Naphthalene	0.1	5	50	0.2	7	30
Anthracene	0.1	10	100	0.1	2	10
Fluoranthene	0.1	10	100	0.1	2	10
Pyrene	0.1	10	100	0.02	1	5
Benzo(a)pyrene	0.1	10	100	0.02	1	5
Total PCA's	0.05	1	10	0.01	0.2	1
	1	20	200	0.2	10	40

E. PARÁMETROS MICROBIOLÓGICOS

	Parámetros	Resultados volumen de la muestra (en ml)	Nivel guía	Concentración máxima admisible	
				Método de membranas filtrantes	Método de los tubos múltiples (NMP)
57	Coliformes totales (1)	100	—	0	NMP 1
58	Coliformes fecales	100	—	0	NMP 1
59	Estreptococos fecales	100	—	0	NMP 1
60	Clostridium sulfitorreductores	20	—	—	NMP 1

Las aguas destinadas al consumo humano no deberán contener organismos patógenos.

A fin de completar, dado que es necesario, el examen microbiológico de las aguas destinadas al consumo humano, conviene buscar, además de los gérmenes que figuran en el cuadro E, los gérmenes patógenos, en particular:

- las salmonelas,
- los estafilococos patógenos,
- los bacteriófagos fecales,
- los enterovirus.

Por otro lado, las aguas no deberán contener:

- ni organismos parásitos,
- ni algas,
- ni otros elementos figurados (animálculos).

(1) Siempre que sea examinado un número suficiente de muestras (95% de resultados conformes).

	Parámetros		Resultados volumen de la muestra (en ml)	Nivel guía	Concentración máxima admisible	Observaciones
61	Recuento de los gérmenes totales en las aguas destinadas al consumo	37 °C	1	10 (1) (?)	—	
		22 °C	1	100 (1) (?)	—	
62	Recuento de los gérmenes totales para las aguas acondicionadas	37 °C	1	5	20	Los Estados miembros podrán, bajo su responsabilidad, cuando se respeten los parámetros 57, 58, 59 y 60, y en ausencia de gérmenes patógenos, acondicionar, para su uso interno, aguas cuyo recuento de gérmenes totales sea superior a los valores de concentración máxima admisible prescritos para el parámetro 62.  Los valores de concentración máxima admisible habrán de medirse dentro de las 12 horas siguientes al acondicionamiento, manteniendo el agua de las muestras a una temperatura constante durante este período de 12 horas
		22 °C	1	20	100	

(1) Para las aguas desinfectadas, los valores correspondientes habrán de ser netamente inferiores a la salida de la estación de tratamiento.

(2) Toda extralimitación de estos valores que persista durante sucesivas extracciones de muestras, habrá de estar sujeta a comprobación.

**1.4.3.1. LIMITES PERMISIBLES EN UN AGUA POTABLE**

El cuadro siguiente permite formar criterio sobre la clasificación de las aguas para bebida, según las normas adoptadas por O.S.N.

La aplicación de este criterio de potabilidad requiere cierta flexibilidad, puesto que no todos los componentes de un agua tienen la misma importancia higiénica y, por otra parte, resulta a veces imposible conseguir, en una determinada región, aguas que cumplan por completo las normas.

D A T O S	Máximo	Mínimo
<b>QUIMICOS</b>		
Color .....	12	—
Olor (Valor umbral en caliente) .....	10	—
Turbiedad .....	2	—
Residuo a 105°C ..... mg/l.	2000	—
Dureza total (en CO <sub>3</sub> Ca) .....	200	40
Alcalinidad (en CO <sub>3</sub> Ca) .....	—	30
Cloro libre (Cl) .....	0,2	—
Cobre (Cu <sup>++</sup> ) .....	0,2	—
Plomo (Pb <sup>++</sup> ) .....	0,05	—
Hierro (Fe <sup>+++</sup> ) .....	0,3	—
Manganeso (Mn <sup>++</sup> ) .....	0,2	—
Cloruros (Cl <sup>-</sup> ) .....	700	—
Sulfatos (SO <sub>4</sub> <sup>=</sup> ) .....	300	—
Flúor (F <sup>-</sup> ) .....	2	—
Vanadio (V) .....	0,5	—
Arsénico (As) .....	0,12	—
<b>BACTERIOLOGICOS</b>		
Bacterias aerobias (Agar a 37°C - 24 horas) .....	100 por ml.	
Bacterias coliformes:		
Aguas de pozos semisurgentes .....	<2 por 100 ml.	
Aguas superficiales purificadas .....	2,2 " " "	
Ps. pyocyanea .....	No debe contener	

Las características del agua representadas por las cifras máximas de color, olor y turbiedad, son las que pueden apreciar el común de los observadores.

Subsecretaría de Recursos Hídricos  
**EMPRESA**  
**OBRAS SANITARIAS DE LA NACION**  
**DEPARTAMENTO LABORATORIOS**

**1.4.3.1. LIMITES PERMISIBLES EN UN AGUA POTABLE**

El cuadro siguiente permite formar criterio sobre la clasificación de las aguas para la bebida, según las normas aceptadas por O.S.N.

La aplicación de este criterio de potabilidad requiere cierta flexibilidad, puesto que no todos los componentes de un agua tienen la misma importancia higiénica y, por otra parte, resulta a veces imposible conseguir, en una determinada región, aguas que cumplan por completo las normas.

<b>D A T O S</b>	<b>Máximo</b>	<b>Mínimo</b>
<b>QUIMICOS</b>		
Color .....	12	—
Olor (Valor umbral en caliente).....	10	—
Turbiedad.....	2	—
Residuo a 105°C..... mg/l	2000	—
Dureza total (en CO <sub>3</sub> Ca)..... "	200	40
Alcalinidad (en CO <sub>3</sub> Ca)..... "	—	30
Cloro libre (Cl)..... "	0,2	—
Cobre (Cu ++ )..... "	0,2	—
Plomo (Pb ++ )..... "	0,05	—
Hierro (Fe +++ )..... "	0,3	—
Manganeso (Mn ++ )..... "	0,2	—
Cloruros (Cl - )..... "	700	—
Sulfatos (So <sub>4</sub> =)..... "	300	—
Flúor (F-)..... "	2	—
Vanadio (V)..... "	0,5	—
Arsénico (As)..... "	0,12	—
<b>BACTERIOLOGICOS</b>		
Bacterias acrobias (Agar a 37°C - 24 horas).....	100 por ml	
Bacterias coliformes		
Aguas de pozos semisurgentes.....	< 2 por 100 ml	
Aguas superficiales purificadas.....	2,2 " " "	
Ps. pyocyanea .....	No debe contener	

Las características del agua representadas por las cifras máximas de color, olor y turbiedad, son las que pueden apreciar el común de los observadores.

**CUADRO 12****NORMAS DE POTABILIDAD  
CODIGO ALIMENTARIO ARGENTINO****CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS**

pH		6,0 – 8,5
pH sat. - pH	mg/l max.	± 0,2
Sólidos disueltos totales	mg/l max.	1.000
Alcalinidad total (Ca Co <sub>3</sub> )	mg/l max.	400
Dureza total (Ca Co <sub>3</sub> )	mg/l max.	200
Cloruro (Cl <sup>-</sup> )	mg/l max.	250
Sulfato (SO <sub>4</sub> <sup>-</sup> )	mg/l max.	200
Hierro total (Fe)	mg/l max.	0,10
Manganeso (Mn)	mg/l max.	0,05
Amoníaco (NH <sub>4</sub> <sup>-</sup> )	mg/l max.	0,20
Nitrito (NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> )	mg/l max.	0,10
Nitrato (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	mg/l max.	45
Fluoruro (F <sup>-</sup> )	mg/l	0,7 – 1,2
Arsénico (As)	mg/l max.	0,5
Plomo (Pb)	mg/l	0,5
Plata (Ag)	mg/l	0,5
Cobre (Cu)	mg/l max.	0,2
Zinc (Zn)	mg/l max.	5,0
Cloro activo residual	mg/l max.	0,05

**Ley 24.051 – Desechos Peligrosos  
Decreto Reg. 831/93**

Niveles guía de calidad de agua para fuentes de agua de bebida humana con tratamiento convencional

Constituyente peligroso	Nivel guía (ug/l)
Ácido nitrilo-triacético	50
Acroleina	542
Aldicarb	3
Aldrín	0.03
Aluminio (total)	200
Amonio (ug/l NH4)	50
Antimonio (total)	10
Arsénico (total)	50
Atrazina	3
Bario (total)	1000
Benceno	10
Bencidina	0.0015
Bendiocarb	40
Benzo(a) pireno	0.01
Berilio (total)	0.039





Constituyente peligroso	Nivel guía (ug/l)	Constituyente peligroso	Nivel guía (ug/l)
BHC alfa	0.131	Diclorofenol (2.4 -)	0.3
BHC-beta	0.232	Diclorometano	50
DHC-gama (lindano)	3	Dicloropropano ( 1.2-1	5
Bis (2-cloroetil) éter	3.85	Dicloropropileno (1.2-)	87
Bis (clorometil) éter	0.000038	Dieldrín	0.03
Bis (2-cloroisopropil) éter	5	Dimetilfenol (2.4-)	400
Bis (etil-hexil) ftalato	21400	Dimetoato	20
Boro (total)	1000	Dinitrofenol (2,4-)	70
Bromometano	2	Dinitrotolueno (2.4-)	1.1
Bromoximil	5	Diquat	70
Cadmio (total)	5	Diuron	150
Carbaril	90	Endosulfan	138
Carbofurano	40	Endrín	0.2
Cianazina	10	Estireno	100
Cianuro (total)	100	Etilbenceno	700
Cinc (total)	5000	Fenol	2
Clordano	0,3	Fluoranteno	190
Clorobenceno	100	Fluoruro (total)	1500
Clorofenol (2-)	0.1	Forato	2
Cloroformo	30	Glifosato	280
Clorometano	1.9	Heptacloro	0.1
Clorpirifos	90	Heptacloro epóxido	0.1
Cloruro de vinilo	20	Hexaclorobenceno	0.01
Cobre (total)	1000	Hexaclorobutadieno	4,5
Cromo (total)	50	Hexaclorociclopentadieno	1
Cromo (+ 6)	50	Hexacloroetano	24
D (2,4 -)	100	Hidrocarb. arom. polinucleares	0.03
DDT	1	Hierro (total)	300
Diazinon	20	Isoforone	5
Dibromocloropropano (DBCP)	0,2	Malation	190
Dibromoetileno	0.05	Manganeso (total)	1-00
Dicamba	120	Mercurio (total)	1
Diclofop-metil	9	Metil paration	7
Diclorobenceno (1.2 -)	200	Metil-azinfos (gution)	20
Diclorobenceno (1 .4 -)	5	Metolaclor	50
Dicloroetano (1.2 -)	10	Metoxicloro	30
Dicloroetileno (1.1 -)	0.3	Metribuzina	80
Dicloroetileno (1 .2-sis)	70	Níquel (total)	25
Dicloroetileno (1,2-trans)	100	Nitrato	10000

Constituyente peligroso	Nivel guía (ug/l)
Nitrito	1000
Nitrobenceno	30
Organoclorados totales	10
Organoclorados (no plag.)	1
Paraquat	10
Paration	50
PCB (total)	0.00079
PCB-1016 (arochlor 1016)	2
PCB-1221 (arochlor 1221)	2
PCB-1232 (arochlor 1232)	2
PCB-1242 (arochlor 1242)	2
PCB-1248 (arochlor 1248)	2
PCB-1254 (arochlor 1254)	2
PCB-1260 (arochlor 1260)	2
Pentaclorobenceno	572
Pentaclorofenol	10
Plaguicidas totales	100
Plata (total)	50
Plomo (total)	50
Selenio (total)	10
Simazln	10
T (2,4,5-)	280
Talio (total)	18
Temefos	280
Terbufos	1
Tetracloroetano (1,1,2,2-)	1.7
Tetracloroetileno	10
Tetraclorofenol (2,3,4,6-)	1
Tetracloruro de carbono	3
Tolueno	1000
Toxafeno	5
TP (2,4,5-)	10
Triallato	230
Tribromometano	2
Tricloroetano (1.1.1-)	200
Tricloroetano (1,1,2-)	6
Tricloroetileno	30
Triclorofenol (2,3,4-)	10
Triclorofenol (2,4,6-)	10

DDT

0.001

Constituyente peligroso	Nivel guía (ug/l)
Triclorofluorometano	2
Trihalometanos	100
Uranio (total)	100
Xilenos (totales)	10000

Tabla 2  
Niveles guía de calidad de agua para protección  
de vida acuática. Agua dulce superficial

Constituyente peligroso	nivel guía (ug /l)
Acenaftileno	2
Acilonitrilo	26
Acroleina	0.2
Aldrin	0.004
Aluminio (total)	5
Amonio (total)	1370
Antimonio (total)	16
Arsénico (total)	50
Benceno	300
Bencidina	2.5
Berilio (total)	0.05
BHC-alfa	0,01
BHC-delta	0.01
BHC-gama (Lindano)	0.01
Boro (total)	750
Cadmio (total)	0.2
Carbaril	0.02
Cianuro (total)	5
Cinc (total)	30
Clordano	0.006
Clorofenol (2-)	7
Cobre (total)	2
Cromo (total)	2

Constituyente peligroso	Nivel guía (ug/l)	Constituyente peligroso	Nivel guía (ug/l)
Diclorobenceno (1.2-)	2.5	Nitrofenoles	0.2
Diclorobenceno (1.3-)	2.5	Paration	0.04
Diclorobenceno (1.4-)	4	PCB (total)	0.001
Dicloroetano (1.2-)	200	Pentaclorobenceno	0.03
Dicloroetilenos	12	Pentacloroetano	4
Diclorofenol (2.4-)	4	Pentaclorofenoles	0.5
Dicloropropanos	57	Plata (total)	0,1
Dicloropropenos	2	Plomo (total)	1
Dieldrín	0.004	P-clorometacresol	0.03
Difenil hidrazina (1,2)	0.3	Selenio (total)	1
Dimetilfenol (2.4-)	2	T (2.4.5-)	2
Dinitrotolueno	2	Talio (total)	0.4
Endosulfan-alfa	0.02	TDE	0,006
Endosulfan-beta	0.02	Tetraclorobenceno (1.2.3.4-)	0.1
Endrin	0,0023	Tetraclorobenceno (1.2,3.5-)	0,1
Ésteres ftálicos (DBP)	4	Tetraclorobenceno (1.2.4,5-)	0,15
Ésteres ftálicos (DEHP)	0,6	Tetracloroetano (1,1.2,2-)	24
Ésteres ftálicos (otros)	0.2	Tetracloroetileno	260
Etilbenceno	700	Tetraclorofenoles	1
Fenoles totales	1	Tetracloruro de carbono	35
Fenoxiherbicidas (2,4-D)	4	Tolueno	300
Fluoranteno	4	Toxafeno	0,008
Heptacloro epóxido + heptacloro	0,01	TP (2.4.5-)	10
Heptacloro + heptacloro epóxido .	0.01	Trialato	10
Hexaclorobenceno	0.0065	Tribromometano	11
Hexaclorobutadieno	0.1	Triclorobenceno (1.2.3-)	0.9
Hexaclorociclohexano (isómeros)	0.01	Triclorobenceno (1.2.4-)	0.5
Hexaclorociclopentadieno	0.05	Triclorobenceno (1.3.5-)	0.65
Hexacloroetano	5	Tricloroetano (1.1.1-)	18
Isoforone	117	Tricloroetano (1.1.2-)	94
Malation	0.1	Tricloroetileno	45
Manganeso (total)	100	Triclorofenoles	18
Mercurio (total)	0,1	Uranio (total)	20
Metil-azinfos (gution)	0.005	Vanadio (total)	100
Metoxicloro	0,03		
Naftaleno	6		
Níquel (total)	25		
Nitrito	60		
Nitrobenceno	27		

Tabla 3  
Niveles guía de calidad de agua para protección de vida acuática.  
Aguas saladas superficiales

Constituyente peligroso	Nivel guía (ug /l)	Constituyente peligroso	nivel guía (ug/l)
Acenaftileno	7	Fluoruro (total)	1400
Acroleina	0.05	Halometanos	64
Aldrín	0,003	Heptacloro	0.0036
Aluminio (total)	1500	Hexaclorobutadieno	0,03
Amonio no ionizable	400	Hexaclorociclopentadieno	0.007
Arsénico (total)	0.5	Hexacloroetano	0.9
Bario (total).	1000	Hidrocarb. arom. polinucleares	0.3
Benceno	7	Malation	0,1
Bencenos clorados	1	Mercurio (total)	0.1
Berilio (total)	1500	Metil-azinfos (gution)	0.01
BHC-gama (lindano)	0.004	Metoxicloro	0.03
Boro (total)	500	Naftaleno	2
Cadmio (total)	5	Naftalenos clorados	0.007
Cianuro (total)	5	Níquel (total)	7.1
Cinc (total)	0.2	Nitrito	1000
Clordano	0.004	Nitrobenceno	7
Clorofenol (4-)	30	Nitrofenoles	5
Cobre (total)	4	PCB (total)	0.03
Cromo (+ 6)	18	Pentacloroetano	3
Demeton	0.1	Pentaclorofenol	0.3
Diclorobenceno	2	Plata (total)	5
Dicloroetano (1,2-)	113	Plomo (total)	10
Dicloroetileno	224	Selenio (total)	10
Dicloropropanos	31	Sulfitos	2
Dicloropropenos	0.8	T (2,4.5-)	10
Dieldrín	0,003	Talio (total)	2
Dinitrotolueno	0.6	Tetracloroetano (1.1,2.2.-)	9
Endosulfan	0.0087	Tetracloroetileno	5
Endrin	0.004	Tetraclorofenol (2.3.5.6-)	0.5
Ésteres ftálicos	3	Tetracloruro de carbono	50
Ésteres ftálicos (DBP)	0,001	Tolueno	50
Etilbenceno	0.4	Toxafeno	0.005
Fenol	1	TP (2.4.5-)	10
Fenoxiácidos (2.4-D)	10	Tricloroetano.(1.1.1.-)	31
Fluoranteno	0.16	Tricloroetileno	2
		Uranio (total)	500

Tabla 4  
Niveles guía de calidad de agua para protección de vida acuática.  
Aguas salobres superficiales

Constituyente peligroso	Nivel guía (ug/l)
Aldrín	0.003
Amonio no ionizable	400
Arsénico (total)	50
BHC-gama (lindano)	0.004
Cadmio (total)	5
Cianuro (total)	5
Cinc (total)	170
Clordano	0.004
Cobre (total)	50
Cromo (+ 6)	50
D (2.4-)	10
DDT	0.001
Demeton	0.1
Dieldrín	0.003
Dodecacloro + nonacloro	0.001
Endosulfan	0.034
Endrin	0,004
Fenoles	1
Fluoruro (total)	1400
Heptacloro	0.001
Heptacloro epóxido	0.001
Malation	0,1
Mercurio (total)	0,1
Metil azinfos (gution)	0,01
Metoxicloro	0.03
Níquel (total)	100
O. fosf. y carbamatos tot.	10
Paration	0,04
Plomo (total)	10
T (2.4.5-)	10
Toxafeno	0.005
TP (2,4,5-)	10

Tabla 5  
Niveles guía de calidad de agua para irrigación  
Constituyente peligroso

Constituyente peligroso	Nivel guía (ug/l)
Aluminio (total)	5000
Arsénico (total)	100
Berilio (total)	100
Boro (total)	500
Cadmio (total)	10
Cinc (total)	2000
Cobalto (total)	50
Cobre (total)	200
Cromo (total)	100
Flúor	1000
Hierro (total)	5000
Litio (total)	2500
Manganeso (total)	200
Molibdeno	10
Níquel (total)	200
Paladio (total)	5000
Plomo (total)	200
Selenio (total)	20
Uranio (total)	10
Vanadio	100

Tabla 6  
Niveles guía de calidad de agua para bebida de ganado  
Constituyente peligroso

Constituyente peligroso	Nivel guía (ug/l)
Aluminio	5000
Arsénico (total)	500
Berilio	100
Boro	5000
Cadmio	20
Cinc	50
Cobalto	1000
Cobre (total)	1000
Cromo (total)	1b00

Constituyente peligroso	Nivel guía (ug / l)	Constituyente peligroso	Uso agrícola	Uso residenc.	Uso Industr.
Fluor	1000	Arsénico (total)	20	30	50
Mercurio	3	Bario (total)	750	500	2000
Molibdeno	500	Benceno	0.05	0.5	5
Níquel	1000	Benzo (A) antraceno	0.1	1	10
Plomo	100	Benzo (A) pireno	0.1	1	10
Selenio	50	Benzo (b) fluoranteno	0.1	1	10
Uranio	200	Benzo (K) fluorantano	0.1	1	10
Vanadio	100	Berilio (total)	4	4	8

Tabla 7  
Niveles guía de calidad de agua para recreación

Constituyente peligroso	Nivel guía (ug/l)
Fenoles totales	5
Hidrocarburos totales	300

Tabla 8  
Niveles guía de calidad de agua para pesca Industrial

Constituyente peligroso	Nivel guía (ug/l)
Amonio (N-NH3)	4
Cobre (total)	40
Nitrito (N-N02)	9

Tabla 9  
Niveles guía de calidad de suelos  
(ug/g peso seco)

Constituyente peligrosa	Uso agrícola	Uso residenc.	Uso Industr.
Ácido ftálico. ésteres	30		
Alifáticos clorados	0.1	5	50
Alifáticos no clorados	0.3		
Antimonio (total)	20	20	40

Boro	2		
Cadmio (total)	3	5	20
Cianuro (libre)	0.5	10	100
Cianuro (total)	5	50	500
Cinc (total)	600	500	1500
Clorobenceno	0.1	1	
Clorobencenos	0.05	2	10
Clorofenoles	0.05	0.5	5
Cobalto	40	50	300
Cobre (total)	150	100	500
Comp. fen. no clorados	0.1	1	10
Cromo (total)	750	250	800
Cromo (+ 6)	8	8	
Dibenzo (A.H) antraceno	0.1	1	10
Diclorobenceno (1.2-)	0.1	1	10
Diclorobenceno (1.3-)	0.1	1	10
Diclorobenceno (1.4-)	0.1	1	10
Estaño	5	50	300
Estireno	0.1	5	50
Etilbenceno	0.1	5	50
Fenantreno	0.1	5	50
Fluoruro (total)	200	400	2000
Hexaclorobenceno	0.05	2	10
Hexaclorociclohexano	0.01		
Indeno (1.2.3-CD) pireno	0.1	1	10
Mercurio (total)	0.8	2	20
Molibdeno	5	10	40
Naftaleno	0.1	5	50
Níquel (total)	150	100	500

Constituyente peligroso	Uso agrícola	Uso residenc.	Uso Industr.
PCB's	0.5	5	50
PCDDs y PCDFs	0.00001	0.001	
Pireno	0.1	10	100
Plata (total)	20	20	40
Plomo (total)	375	500	1000
Quinoleina	0,1		
Selenio (total)	2	3	10
Sulfuro (elemental)	500		
Talio (total)	1		
Tiofeno	0.1		
Tolueno	0.1	3	30
Vanadio	200	200	
Xilenos (totales)-	0.1	5	50

Tabla 10  
Niveles guía de calidad del aire ambiental

Constituyente peligroso	Concentración (mg/m3)	Período de promedio (minutos)
Acetaldehído	0.01	30
Acetato de vinilo	0.15	30
Amoniaco	1.5	30
Anilina	0.05	30
Arsénico	0,01	20
Benceno	0.2	20
Cadmio	0,01	30
Cianuro de hidrógeno	0.015	30
Ciclohexano	1,4	30
Cloro	0,01	20
Clorobenceno	0.1	30
Cloruro de hidrógeno	0,05	30
Cresoles	0.6	30
Cromo	0,0015	30
Dicloroetano (1.2-)	3	30
Di-isocianato de tolueno	0.05	30

Constituyente peligroso	Concentración (mg/m3)	Período de promedio (minutos)
Estireno	0.01	30
Fenol	0.01	20
Fluoruros	0.02	30
Formaldehido	0.035	30
Hidrocarb. ar. polinucleares	5	30
Manganeso	0.03	30
Metil paration	0.008	30
Naftaleno	0.003	30
Niebla ácida (H2S04)	0.006	30
Óxidos de nitrógeno	0.9	60
Ozono-oxidantes fotoquímicos	0.3	60
Plomo	0.002	30
Sulfuro de carbono	0.03	30
Sulfuro de hidrógeno	0.008	30
Tetracloruro de carbono	4	30
Tolueno	0.6	30
Tricloroetileno	0.2	30
Xilenos	0.2	30

Tabla 11  
Estándares de emisiones gaseosas

Constituyente peligroso	Desde superficie (mg/s)	Altura chimenea: 30 m (mg /s)
Acetaldehído	3.50 E00	1.20 E03
Acetato de vinilo	5.20 E01	1.85 E04
Amoniaco	5.20 E02	1.65 E05
Anilina	1,80 E01	6.10 E03
Arsénico	3.20 E00	1.10 E03
Benceno	6,40 E01	2.20 E04
Cadmio	3.50 E00	1.20 E03
Cianuro de hidrógeno	5.20 E00	1.65 E03
Ciclohexano	4.90 E02	1.70 E05



Constituyente peligroso	Desde superficie (mg/s)	Altura chimenea 30 m (mg/s)
Cloro	3.20 E00	1.10 E03
Clorobenceno	3.50 E01	1.20 E04
Cloruro de hidrógeno	1.80 E01	6.10 E03
Cresoles	2.10 E02	7.40 E04
Cromo	0.50 E00	1.80 E02
Dicloroetano (1.2-)	1.00 E03	3.70 E05
Di-isocianato de tolueno	1.80 E01	6.10 E03
Estireno	3.50 E00	1.20 E03
Fenol	3.20 E00	1.10 E03
Fluoruros	7.00 E00	2.40 E03
Formaldehido	1.20 E01	4.30 S03
Hidrocarb. ar. polinucleares	1.70 E03	6.10 E05
Manganeso	1.00 E01	3.70 E03
Metil paration	3.00 E00	9.80 E02
Naftaleno	1.00 E00	3.70 E02
Niebla ácida (H2S04)	2.00 E00	7.40 E02
Óxidos de nitrógeno	4.40 E02	1.20 E05
Ozono-oxidantes fotoquímicos	1.40 E02	4.20 E04
Plomo	0.70 E00	2.40 E02
Sulfuro de carbono	1.00 E01	3.70 E03
Sulfuro de hidrógeno	3.00 E00	9.80 E02
Tetracloruro de carbono	1.40 E03	4.90 E05
Tolueno	2.10 E02	7.40 E04
Tricloroetileno	7.00 E01	2.40 E04
Xilenos	7.00 E01	2.40 E04.

Tabla 2: Observaciones

1. - (Amonio total)

2.20 mg/l	pH 6.5:	temp.10°C
1.37 mg/l	pH 8.0:	temp.10°C

2. - (Aluminio)				
5.00 ug/l	pH < 6.5:	(Ca2 + )	< 4.0 mg/l:	COD < 2.0 mg/l
100.00 ug/l	pH_ 6.5:	(Ca2 + )	_ 4,0 mg/l:	COD _ 2.0 mg/l

3. - Criterio tentativo. (Benceno-Cinc-Clorobenceno-Etilbenceno- Etilenos clora dos)

4. -(Cadmio)

0.2 ug/l	Dureza	0 - 60 mg/l	(CaC03)
0.8 ug/l	Dureza	60 - 120 mg/l	(CaC03)
1,3 ug/l	Dureza	120 - 180 mg/l	(CaC03)
1,8 ug/l	Dureza	> 180 mg/l	(CaC03)

5. - (Cianuro) Como cianuro libre.

6. - (Cobre)

2.0 ug/l	Dureza	0 - 60 mg/l	(CaC03)
2.0 ug/l	Dureza	60 - 120 mg/l	(CaC03)
3.0 ug/l	Dureza	120 - 180 mg/l	(CaC03)
4.0 ug/l	Dureza	> 180 mg/l	(CaC03)

7. - (Cromo)

20.0 ug/l Para protección de peces.

2.0 ug/l Para protección de vida acuática incluyendo fito y zooplancton.

8. - (Níquel)

25.0 ug/l	Dureza	0 - 60 mg/l	(CaC03)
65.0 ug/l	Dureza	60 - 120 mg/l	(CaC03)
110.0 ug/l	Dureza	120 - 180 mg/l	(CaC03)
150.0 ug/l	Dureza	> 180 mg/l	(CaC03)

9. - (Plomo)

1.0 ug/l	Dureza	0 - 60 mg/l	(CaC03)
2.0 ug/l	Dureza	60 - 120 mg/l	(CaC03)
4.0 ug/l	Dureza	120 - 180 mg/l	(CaC03)
7.0 ug/l	Dureza	> 180 mg/l	(CaC03)

# **HIDROGEOLOGÍA AMBIENTAL**

## **II**

**Dr. Miguel Auge**

**Profesor Titular de Hidrogeología**

UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES

FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES

DEPARTAMENTO CIENCIAS GEOLÓGICAS

[auge@gl.fcen.uba.ar](mailto:auge@gl.fcen.uba.ar)

**BUENOS AIRES 2004**

## **ÍNDICE**

<b>13. EJEMPLOS</b>	<b>85</b>
<b>13.1. Análisis ambiental en relación al estado del suelo y del agua subterránea en una refinería de petróleo. Buenos Aires</b>	<b>85</b>
<b>13.2. Contaminación con hidrocarburos en el agua subterránea de una destilería de petróleo del Conurbano de Buenos Aires</b>	<b>97</b>
<b>13.3. Estudio ambiental de suelo y agua subterránea en Dársena Sud. Capital Federal</b>	<b>100</b>

## **13.1. ANÁLISIS AMBIENTAL EN RELACIÓN AL ESTADO DEL SUELO Y DEL AGUA SUBTERRÁNEA EN UNA REFINERÍA DE PETRÓLEO BUENOS AIRES**

### **RESUMEN**

La ejecución de 19 pozos a profundidades variables entre 7 y 50 m y la toma y posterior análisis de 105 testigos y 19 muestras de agua, permitieron establecer el estado del suelo y del agua subterránea frente a la contaminación con hidrocarburos (HC) y algunos de sus derivados.

Al respecto, en el suelo y hasta 2,5 m de profundidad, sólo se encontró una muestra con un contenido en HC total que supera al límite máximo establecido por la norma holandesa, mientras que el Pb y el Cd, en todos los casos se ubican muy por debajo de los máximos normados.

La situación es bastante más desfavorable, si se considera al agua subterránea. En efecto, el acuífero freático contenido en sedimentos del Querandino presenta un severo grado de contaminación con hidrocarburos, con valores que superan entre 10 y 52.000 veces al máximo admitido.

El Acuífero Pampeano, subyacente al anterior, también observa contaminación con HC pero mucho más atenuada, con extremos que se ubican: por debajo de la norma en 1 pozo y que la supera 13 veces en otro. La contaminación del Pampeano se produce por filtración vertical descendente del agua freática, debido a que el Querandino tiene mayor potencial hidráulico.

El Puelche, que es el acuífero más profundo utilizado para abastecimiento humano, manifiesta signos de contaminación, pero las 3 muestras obtenidas tienen concentraciones menores al máximo permitido.

En condiciones de flujo natural, el agua freática atraviesa los límites de la planta en todas las direcciones. Por lo tanto, para evitar que continúe la contaminación con HC en terrenos exteriores, es necesario deprimir la superficie freática alrededor de 2,5 m en el centro de la planta. Con ello se logrará invertir las direcciones de flujo lateral y vertical y con esto último preservar la aptitud de los acuíferos Pampeano y Puelche. La depresión citada puede lograrse con una batería de 20 sondeos, dispuestos en forma circular y una capacidad de extracción conjunta de 24 m<sup>3</sup>/h.

### **INTRODUCCIÓN**

La finalidad del trabajo fue establecer las condiciones ambientales, en relación al estado del suelo y del agua subterránea frente a la probable contaminación por hidrocarburos (HC) y/o sus derivados, en una planta que procesa derivados de petróleo, ubicada al Sur de la Capital Federal (figura 1).

Para ello, se tomaron 105 testigos de suelo y 19 muestras de agua en sondeos que se construyeron especialmente para ello.

### **MÉTODOS Y TÉCNICAS**

Dado la facilidad con que puede generarse contaminación al perforar; no solamente entre unidades contaminadas y otras que no lo estén, sino también en

aquellas que no presentan contaminación, se puso especial cuidado en mantener libre de grasa o aceite la herramienta y las barras de perforación, particularmente en sus ensambles, que es donde normalmente se usa lubricante. También, en controlar el circuito de inyección, á efectos de que él agua no pudiera tomar contacto con los hidrocarburos que impregnan los pisos de la planta.

Para ello, en la boca de cada pozo se colocó un caño sobresaliente unos 0,5 m por encima del suelo, provisto de un orificio con una boquilla, por la que descargaba el retorno de la inyección durante las tareas de perforación. El agua se vertía directamente en un recipiente y simultáneamente era aspirada por una bomba centrífuga y reinyectada a través de las barras. De esta forma se evitó el contacto de la inyección, que se preparó con agua potable, con los pisos o el suelo de la refinería.

Finalmente, se prestó especial atención en el aseo del personal y en la limpieza de su indumentaria, con el objeto de disminuir al mínimo posible el ingreso artificial de HC al pozo. Esto reviste suma importancia porque la concentración de hidrocarburo total que hace inapta a un agua en relación a su potabilidad, es del orden de centésimos de mg/l.

De cualquier manera, no se puede evitar totalmente la contaminación, toda vez que existe un contenido de HC en el aire (background), derivado de la actividad industrial específica.

Precauciones similares, se tomaron con las muestras de suelo y de agua, que se mantuvieron enfriadas en refrigeradores portátiles hasta su remisión al laboratorio. Las de suelo en las vainas sacatestigo, cerradas en ambos extremos y las de agua, en frascos de vidrio, color caramelo, para evitar probables alteraciones de los HC por la acción de la luz.

Durante el muestreo de agua, se trasladó un "blanco" de agua destilada en frasco abierto, en cada recorrido y otro se mantuvo cerrado en un sector de oficinas. Un tercero, se trasvasó de un frasco a otro empleando el mismo equipo que el utilizado para muestrear (Garrett, 1989).

El objetivo de los "blancos" fue establecer la probable contaminación por acción aérea y por el equipo de muestreo.

## **GEOLOGIA Y COMPORTAMIENTO HIDROGEOLOGICO**

Se citan a continuación las características litológicas y las propiedades hidrogeológicas de las unidades estratigráficas emplazadas en el subsuelo de la planta, iniciando la descripción por la más moderna.

Querandino Pertenece al Holoceno, es de origen marino y su edad se estima entre 10.000 y 3.500 años. Su deposición coincidió con el ascenso del nivel del mar producido con posterioridad a la última glaciación. También se lo conoce como Formación Querandí y en el sitio estudiado esta integrado por 2 secciones.

La superior, desde la superficie hasta 7 m de profundidad, es una arena muy fina a limosa., de tonalidad gris oscura. La inferior, una arcilla plástica gris verdosa de 5 m de espesor, se apoya directamente sobre el Pampeano.

La sección superior arenosa, actúa hidráulicamente como un acuífero de baja productividad, contiene a la capa freática y es la más expuesta a la contaminación por ser la más superficial.

La sección inferior arcillosa, apunta hacia un comportamiento acuicludo, pero la presencia de hidrocarburos en los acuíferos más profundos (Pampeano y Puelche) indica comunicación hidráulica en sentido vertical.

Pampeano. De edad Pleistocena, está integrado por limo arenoso y arcilloso con intercalaciones calcáreas en forma de tosca. De origen eólico, presenta caracteres texturales y mineralógicos que lo asemejan a un loess y se caracteriza por una extendida continuidad areal, dado que ocupa la mayor parte de la gran llanura Chaco-Pampeana.

En el perfil se extiende entre 12 y 25 m de profundidad, comportándose hidráulicamente como un acuífero de mediana productividad, del que se abastece la mayor parte de la población que no cuenta con servicio de agua potable, mediante el empleo de electrobombeadores.

La base del Pampeano, entre 21 y 25 m de profundidad, es una capa arcillosa gris clara que lo separa de las Arenas Puelches infrayacentes.

Arenas Puelches Conforman una unidad integrada por arenas cuarzosas, medianas y finas, de edad Plio-pleistocena, que contienen al acuífero más explotado del país (Puelche), pues de él se abastecen los servicios públicos que emplean agua subterránea, gran parte de la industria, muchos usuarios individuales y también se lo utiliza para riego en las zonas rurales periféricas al Conurbano de Buenos Aires.

Se extiende en forma continua ocupando 83.000 Km<sup>2</sup> en el subsuelo del NE de la Provincia de Buenos Aires (Auge et al, 1983) y en el terreno estudiado, se ubica entre 25 y 50 m de profundidad. En la figura 1, se reproduce el perfil descripto.

Las citadas, especialmente el Pampeano y el Puelche, son las unidades hidrogeológicas más utilizadas. Al Querandino sólo se lo emplea ocasionalmente debido a que normalmente contiene agua salada ya que está muy expuesto a la contaminación de diferentes tipos y orígenes.

El perfil, se completa con la Formación Paraná, de origen marino y edad Miocena superior, contiene agua salada y pese a que no fue alcanzada por ningún pozo en el terreno estudiado, la información de otros cercanos indica que se ubicaría entre 50 y 90 m de profundidad. Está integrada por dos secciones, la superior arcillosa de unos 20 m de potencia y la inferior, arenosa y espesor similar.

Finalmente, y por encima del Basamento Cristalino, que actúa como sustrato impermeable del sistema hidrológico subterráneo, se emplaza la Formación Olivos, entre 90 y 330 m de profundidad. Esta última, de edad Miocena inferior y origen continental es portadora de agua con elevada salinidad (20 g/l).

## **MORFOLOGIA**

El terreno objeto se ubica en la llanura inundable del Río Matanza, en un ambiente conocido como terraza baja (Frenguelli, 1950), que se caracteriza por una escasa pendiente topográfica (0,5 a 0,8 m/Km) y un desarrollo entre la cota 5 m y la

ribera del Río de la Plata. Este ámbito se caracteriza, por su baja energía morfogenética lo que deriva en una escasa capacidad para la disipación del agua que frecuentemente se acumula como producto de la lluvia o de las crecidas del Río de la Plata.

La morfología también ejerce control sobre la dinámica del agua subterránea, dado que la superficie freática, considerada regionalmente, tiene menor gradiente aún que la topográfica. Ello, junto con la permeabilidad relativamente baja del Querandino, dificultan el flujo subterráneo lateral por lo que la dinámica principal se desarrolla en sentido vertical.

## **HIDRODINÁMICA SUBTERRÁNEA**

Seguidamente se cita el comportamiento dinámico del agua subterránea y su estado en relación a la contaminación, de las 3 unidades hidrogeológicas que forman la sección superior del perfil (Querandino, Pampeano y Puelche), que además de presentar caracteres hidráulicos y químicos diferentes, están separadas por capas arcillosas de baja permeabilidad.

En la figura 2, se representa la red de flujo de la sección arenosa del Querandino, integrante de un acuífero que se comporta como libre. La superficie freática tiene forma de ovoidal elongada en dirección NE-SO, con la culminación en el centro de la planta a cota 4,7 m sobre cero del IGM. A partir de allí, el flujo es divergente hacia el exterior del predio cuyos límites atraviesa en todas las direcciones. El alto hidráulico se debe a la mayor capacidad de infiltración que tiene el sector central, carente de edificaciones y pavimentos.

El mayor gradiente hidráulico es hacia el NO, entre las equipotenciales de 4,5 y 3,0 m, con un valor de 1,9%, mientras que hacia el SE, disminuye a 1,1% en el sentido de la elongación, el gradiente oscila en 0,9%. Todos estos valores superan ampliamente al gradiente hidráulico regional medio, cuyo orden de magnitud es  $5 \cdot 10^{-4}$ . Esta situación puede derivar de un exceso de infiltración, generado artificialmente, por el riego del ámbito parquizado.

La dinámica del Acuífero Pampeano se reproduce en la figura 3, de la que se desprende un flujo dominante hacia el NO con un gradiente hidráulico que varía entre 0,3 y 0,4%. La diferente forma de la superficie piezométrica y la disminución en el gradiente hidráulico respecto al que presenta la superficie freática, en gran parte se deben a la menor incidencia que tienen las prácticas artificiales (riego) y la recarga natural en el Acuífero Pampeano.

Otra relación de suma trascendencia dado que rige la dinámica vertical del agua subterránea, es la diferencia de potencial hidráulico en el perfil. En el caso estudiado, la comparación de las figuras 2 y 3 muestra un mayor potencial hidráulico en el Acuífero Querandino, con diferencias extremas de 0,2 y 2,1 m respecto del Pampeano.

Esto indica la existencia de flujo vertical descendente, pese a que la arcilla basal del Querandino de 5 m de espesor, debe ofrecer una resistencia apreciable al mismo. De cualquier manera, la tendencia descendente es una condición poco favorable respecto de la contaminación de los acuíferos profundos a partir del freático, que es el más expuesto.

Al Acuífero Puelche sólo se lo alcanzó con 3 pozos, uno ubicado en el esquinero Norte, otro en el centro y el tercero en el esquinero Sur de la Planta, con potenciales hidráulicos de 2,1, 2,2 y 3,1 m (figura 3), que también indican disminución respecto al Pampeano.

La profundidad del agua es otro factor de significativa trascendencia, dado que la zona de aireación o subsaturada es el mejor filtro frente a la migración de los contaminantes desde la superficie. En este caso, el agua freática del Querandino, se ubica entre 0,6 y 2,1 m, mientras que los niveles medidos en el Pampeano, varían entre 2 y 2,5 m de profundidad.

La conformación arenosa de la sección superior del Acuífero Querandino y la escasa potencia de la zona subsaturada, lo hacen muy vulnerable frente a la contaminación, mientras que el Pampeano está mucho más protegido debido a su profundidad y a la intercalación del estrato arcilloso de 5 m de espesor, correspondiente al Querandino basal.

## **ESTADO DEL SUELO**

Con el objeto de establecer el estado del suelo frente a la contaminación por HC, Pb y Cd, se extrajeron 105 testigos a profundidades entre 0,3 y 2,5 m. Para ello, se empleó un sacatestigos tipo Terzaghi con el que se tomaron las mismas precauciones que las citadas en Métodos y Técnicas, para minimizar la introducción de contaminantes durante el muestreo. En la figura 4, se indican las concentraciones máximas en mg/kg de hidrocarburo total, plomo y cadmio, detectadas en cada sondeo.

De la misma se desprende que las concentraciones extremas de hidrocarburo total son 200 y 21.000 mg/kg, esta última en la cercanía de una tubería enterrada donde las fugas son significativas.

Si se comparan estos valores con los límites establecidos en la norma holandesa (tabla 1), surge que sólo una muestra obtenida en el pozo del lindero NO del predio con 21.000 mg/kg, sobrepasa el umbral de 5.000 mg/kg, a partir del cual es necesario limpiar. Del resto, otras dos con 2.900 y 3.500 mg/kg superan el límite para investigaciones adicionales (1.000 mg/kg). En relación al plomo, la norma fija como límite máximo 600 mg/kg, valor éste que sólo es superado por una muestra del pozo vecino al lindero SE de la planta (700 mg/kg). Otras 3, presentan concentraciones mayores al umbral para investigaciones adicionales (150 mg/kg). Estas, coinciden con los pozos que también registraron altos tenores en hidrocarburo total.

El cadmio presenta poca variación con extremos de 2 y 4,6 mg/Kg, concentraciones muy inferiores al límite máximo (20 mg/kg) y menores aún al intermedio (5 mg/kg).

## **ESTADO DEL AGUA**

Para conocer el estado del agua subterránea frente a la contaminación, se muestrearon los acuíferos Querandino, Pampeano y Puelche, determinándose hidrocarburo total en los mismos.

En las figuras 2 y 3, se indican las concentraciones de HC, a fin de compararlas con el sentido del flujo subterráneo.



Respecto al Querandino (figura 2), se aprecia una buena correspondencia entre los altos y los bajos de HC en el suelo y en el agua subterránea. Así, los 2 pozos del lindero NO que registraron 21.000 y 3.500 mg/kg en el suelo, también presentaron los máximos en el agua (31.000 y 1.500 mg/l) y los que tuvieron tenores bajos en el suelo (esquinero N y E, con 350 y 200 mg/kg), brindaron 5,8 y 12,9 mg/l de HC en el agua.

De la comparación con las equipotenciales, pareciera producirse un incremento en el sentido del flujo hacia el NO, pero ya se mencionó el carácter puntual del valor de 21.000 mg/kg, originado por fugas en una tubería. La falta de correspondencia hacia el SO, con valores decrecientes de 1.300 a 153 mg/l, es indicativa de la baja movilidad de los HC en el sistema freático.

La norma holandesa (tabla 1) fija 0,6 mg/l como el umbral a partir del cual debe procederse a limpiar, de lo que se desprende que todas las muestras superan ampliamente dicho valor.

La limpieza de hidrocarburos en el suelo y en el agua no es tarea sencilla, fundamentalmente por la "adherencia" de las moléculas orgánicas a los clastos que forman la parte sólida de los acuíferos intergranulares y a la inmiscibilidad que presentan frente al agua. Otro factor que controla la movilidad del HC es su concentración en las zonas subsaturada (agua-aceite-aire) y saturada (agua-aceite), pues si su concentración en el agua desciende por debajo de lo que se denomina punto de saturación irreductible o límite de saturación crítica, el movimiento cesa (Custodio, 1976).

Para la limpieza se han empleado diferentes técnicas, algunas con resultados adecuados pero la mayor parte con elevados costos, en relación al mejoramiento ambiental obtenido. Entre las más utilizadas se puede citar a: el uso de disolventes, la inyección de aire o de agua calientes, el empleo de dispersantes y sustancias tensoactivas, etc. El objetivo es disminuir la viscosidad para aumentar la movilidad y facilitar la extracción por bombeo. Sin embargo, ninguna práctica será eficiente, si previamente no se interrumpe el ingreso del contaminante al sistema subterráneo. Esto es, evitar las pérdidas, en tuberías, tanques, piletas y los derrames sobre el suelo desnudo o en pavimentos o veredas, que normalmente no actúan como barreras eficientes para la contaminación, porque carecen de sellantes en las juntas, o presentan grietas y fisuras a través de las cuales el HC es arrastrado por el agua de lluvia o la utilizada para limpieza, parte de la cual se infiltra alcanzando la superficie freática.

En relación al Pampeano, los contenidos en hidrocarburos totales son significativamente más bajos que en el Querandino, tal como se aprecia en la figura 3, donde se representan junto con la red de flujo.

Los extremos son 0,5 y 8 mg/l, con valores más altos en el lindero NO de la planta (5 y 8 mg/l). Salvo uno, el resto de los valores sobrepasan al límite superior de la norma holandesa (0,6 mg/l) y existe buena correspondencia entre los máximos contenidos de HC en el Acuífero Querandino y los altos registrados en el Pampeano.

Dada la profundidad de yacencia del Pampeano (12 m), el hidrocarburo no puede acceder en forma directa, por lo que su transferencia desde la capa freática, debe haberse producido por filtración vertical descendente. Por lo tanto, el estrato de arcilla de 5 m que los separa no impide el flujo vertical y actúa como acuitardo. El

mayor potencial hidráulico que presenta el Querandino respecto al Pampeano, con diferencias extremas de 0,2 y 2,1 m, es el factor generador del flujo vertical descendente y por ello, para evitar dicho sentido de circulación, es necesario invertir el gradiente, deprimiendo el Querandino.

Respecto al Acuífero Puelche, emplazado entre 25 y 50 m de profundidad, las concentraciones registradas en los 3 pozos que lo alcanzan (figura 3) son 0,2, 0,3 y 0,5 mg/l, todas inferiores al límite máximo (0,6 mg/l).

En el "blanco" de agua destilada que se trasladó abierto durante el muestreo, se registró una concentración de 0,1 mg/l, posteriormente al recorrido. Este valor de base o background, debe deducirse de los contenidos detectados en las muestras, porque representa el aporte de la contaminación aérea, producida por la actividad industrial de la planta.

## **CONTROL DE LA CONTAMINACION**

Ya se mencionó que de los 3 acuíferos estudiados, los más empleados para consumo humano son el Pampeano y el Puelche.

El primero en captaciones domiciliarias, mediante el uso de bombeadores, que extraen caudales exigüos (1,5 a 3 m<sup>3</sup>/h), pero que constituye la única fuente de abastecimiento en aquellos sitios carentes del servicio de agua potable. El Puelche se capta principalmente por los entes que tienen a su cargo la provisión de agua potable, también por la industria y en menor proporción para el abastecimiento domiciliario. Los caudales del Puelche, varían de acuerdo a la capacidad del equipo de bombeo empleado, pero si éste es adecuado, puede producir entre 40 y 100 m<sup>3</sup>/h.

El Querandino prácticamente no se utiliza, porque contiene agua de elevada salinidad y además está muy contaminado por la actividad industrial y por las aguas residuales domésticas.

El esquema más favorable para controlar la contaminación, tanto técnica como económicamente, consiste en evitar la salida del agua contaminada fuera de los límites de la planta y en invertir el gradiente hidráulico vertical, para que el flujo sea ascendente. Para ello, es necesario deprimir la superficie freática del Acuífero Querandino.

Para establecer la transmisividad y el almacenamiento del Querandino, a fin de predecir los caudales y las depresiones obtenibles, se realizaron 2 ensayos de bombeo con pozo de observación. El comportamiento hidráulico es el de un acuífero libre con drenaje vertical diferido, por lo que se utilizó para el cálculo el método desarrollado por Boulton (1963), con el que se obtuvieron transmisividades de 0,7 y 1,4 m<sup>2</sup>/día y porosidades efectivas de 0,03 y 0,09. Por lo tanto, para el cálculo de la batería de los pozos para el drenaje, se utilizó una transmisividad media ( $T=1$  m<sup>2</sup>/d) y una porosidad efectiva media ( $P_e=0,05$ ).

Dado la baja permeabilidad de la sección arenosa del Querandino y su escaso espesor (7 m), que se reduce aún más si se considera la potencia saturada (4,9 a 6,4 m), resulta más apropiado construir muchos sondeos de pequeño diámetro que pocos pozos de mayor diámetro y capacidad. Por ello, se eligió un sistema de well points para deprimir la superficie freática.

Con cada pozo puntual, se puede lograr un caudal de 1,2 m<sup>3</sup>/h por lo que con 20, se llegará a 24 m<sup>3</sup>/h. Disponiéndolo en forma circular y separados por 2 m de distancia entre sí, ocuparán un perímetro de 40 m (figura 3) con un radio de 6,4 m.

Para invertir el sentido del flujo lateral, es necesario deprimir el nivel hidráulico por lo menos 2,5 m en el sector central de la planta. De esta forma la equipotencial de 4,5 m, pasará a tener 2 m, lo que también hará cambiar el sentido del flujo vertical, pues el Acuífero Pampeano tiene allí un potencial hidráulico de 2,6 m.

Considerando al sistema de 20 pozos puntuales como uno único de 6,4 m de radio, con un caudal de 576 m<sup>3</sup>/día, empleando las ecuaciones de Theis y la tabla de Wenzel, resulta que el tiempo necesario para lograr la depresión prevista (2,5 m) es 1 día.

Si se toma la máxima distancia existente entre la batería de well points y la equipotencial de 3 m en el esquinero Oeste de la planta, (145 m) y se adopta para ese sitio una depresión de 0,5 m, a fin de asegurar la inversión en la dirección del flujo, el tiempo necesario para lograrla se amplía a 59 días.

Dado que el agua bombeada tendrá un elevado tenor en HC total, antes de su disposición final, deberá ser tratada para disminuir dicha concentración a valores compatibles con lo establecido en las normas vigentes.

## **CONCLUSIONES**

El suelo, hasta 2,5 m de profundidad, no presenta deterioro debido al contenido de hidrocarburos, Pb y Cd.

El agua subterránea sí presenta un grado de deterioro severo respecto a los hidrocarburos totales, especialmente en el Acuífero Querandino. En el Pampeano, la contaminación es menor, pero aún supera al máximo normado, mientras que el Puelche, si bien observa signos de contaminación, la concentración de HC total está por debajo del máximo admitido.

La distribución vertical de hidrocarburos indica comunicación hidráulica entre la capa freática (Querandino) y el Pampeano debido al mayor potencial hidráulico que tiene el primero.

Para evitar que el agua contaminada siga transponiendo los límites del predio estudiado, es necesario construir una batería de 20 pozos puntuales separados 2 m entre sí, en condiciones de producir 24 m<sup>3</sup>/h conjuntamente, dispuestos en forma circular en el centro de la planta. Con ello se logrará invertir los gradientes hidráulicos y las direcciones de flujo lateral y vertical.

El agua extraída deberá ser tratada previamente a su vertido, para disminuir el tenor de HC y evitar daños ambientales.

Debe ponerse especial cuidado para impedir que continúe el ingreso del contaminante al suelo y al agua. Para ello tendrán que repararse las fugas en tuberías y tanques y controlar severamente los derrames en el suelo desnudo o sobre veredas o pavimentos.

## BIBLIOGRAFIA

AUGE, M.P. 1983. Características geohidrológicas de un acuífero semiconfinado (Puelche) en la Llanura Bonaerense. Su implicancia en el ciclo hidrológico de llanuras dilatadas. Coloquio de Hidrología de Grandes Llanuras. Actas, vol.II: 1019-1042. UNESCO. Buenos Aires - París.

BOULTON, N.S. 1963. Analysis of data from non - equilibrium pumping tests allowing for delayed yield from storage. Inst. Civ. Eng. Proc, vol.26: 469-482.

CUSTODIO, E Y LLAMAS M.R. 1976. Hidrología Subterránea. T 11: 1915-1916, Ed. Omega., Barcelona.

FRENGUELLI, J. 1950. Rasgos generales de la morfología y la geología de la Provincia de Buenos Aires. LEMIT Rev. Ser.1I, Nó 33: 1-72. La Plata.

GARRETT, P. 1989. Groundwater sampling manual for underground storage tank sites. Dep.of Env. Protec.:1-79. Maine.

Fig. 1

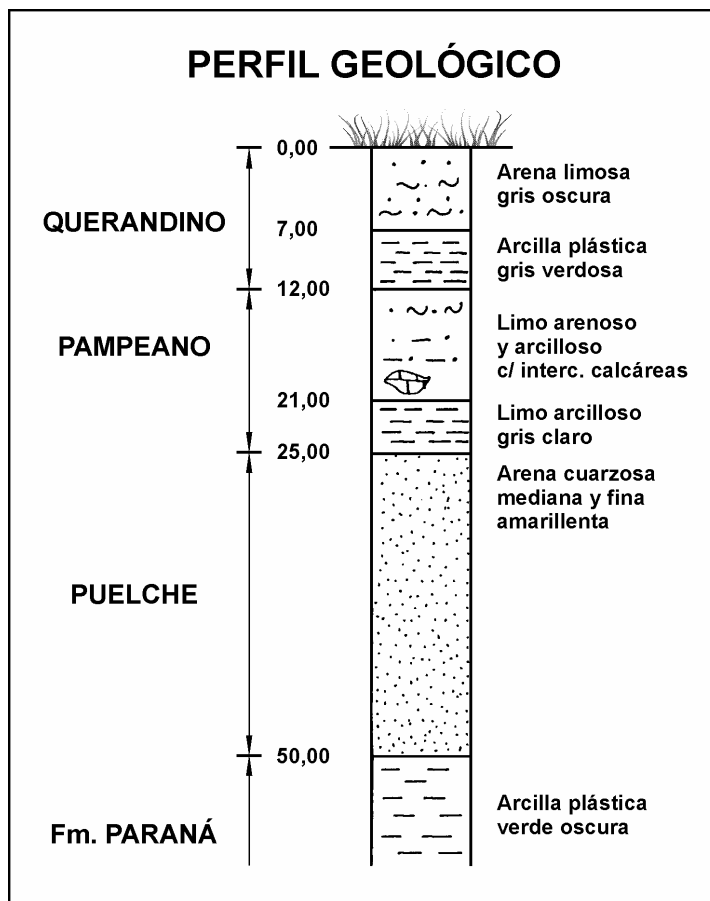
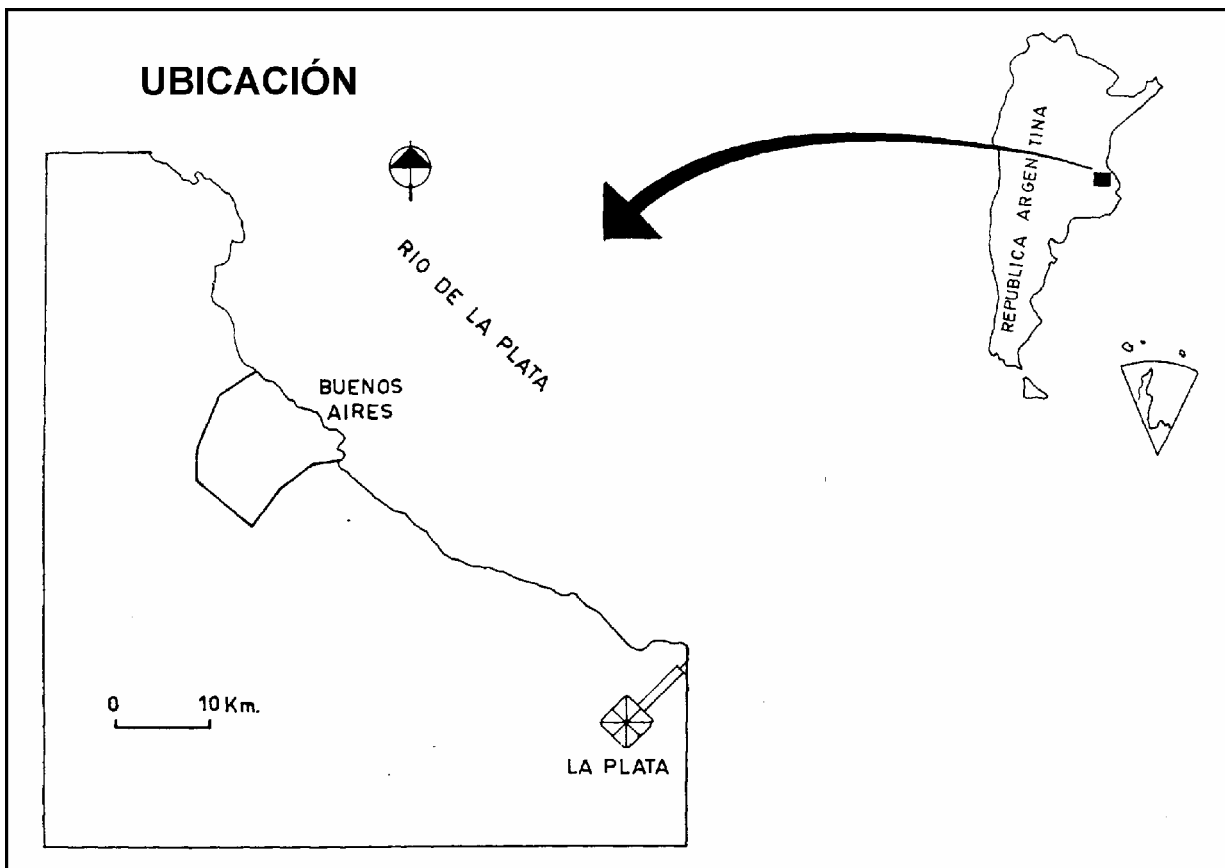


Fig. 2

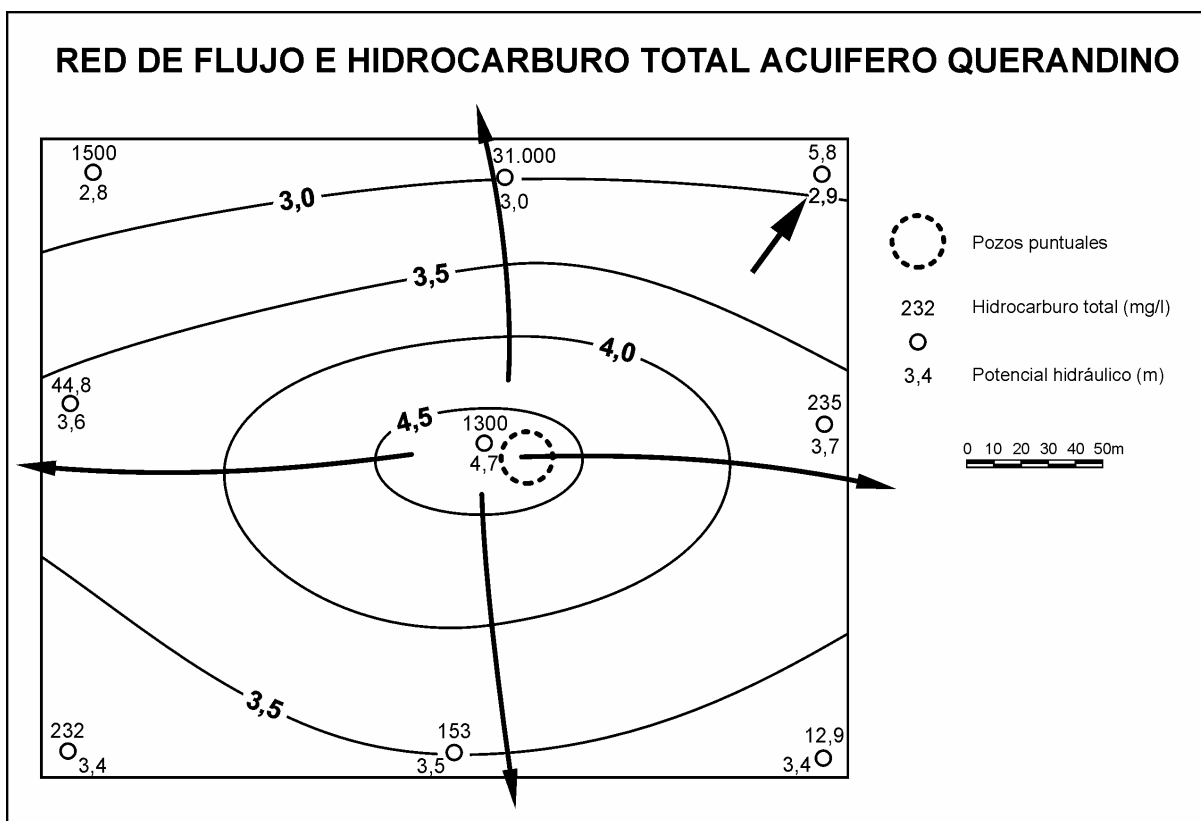


Fig. 3

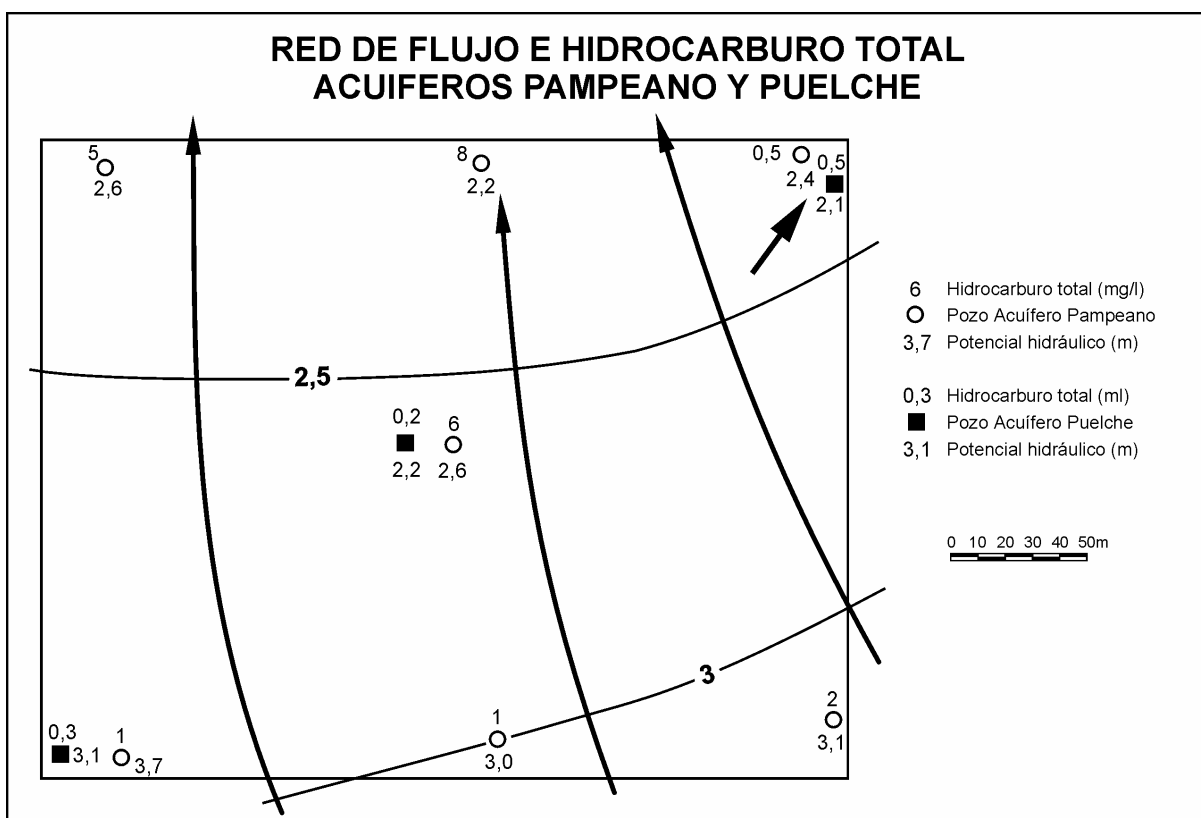


Fig. 4

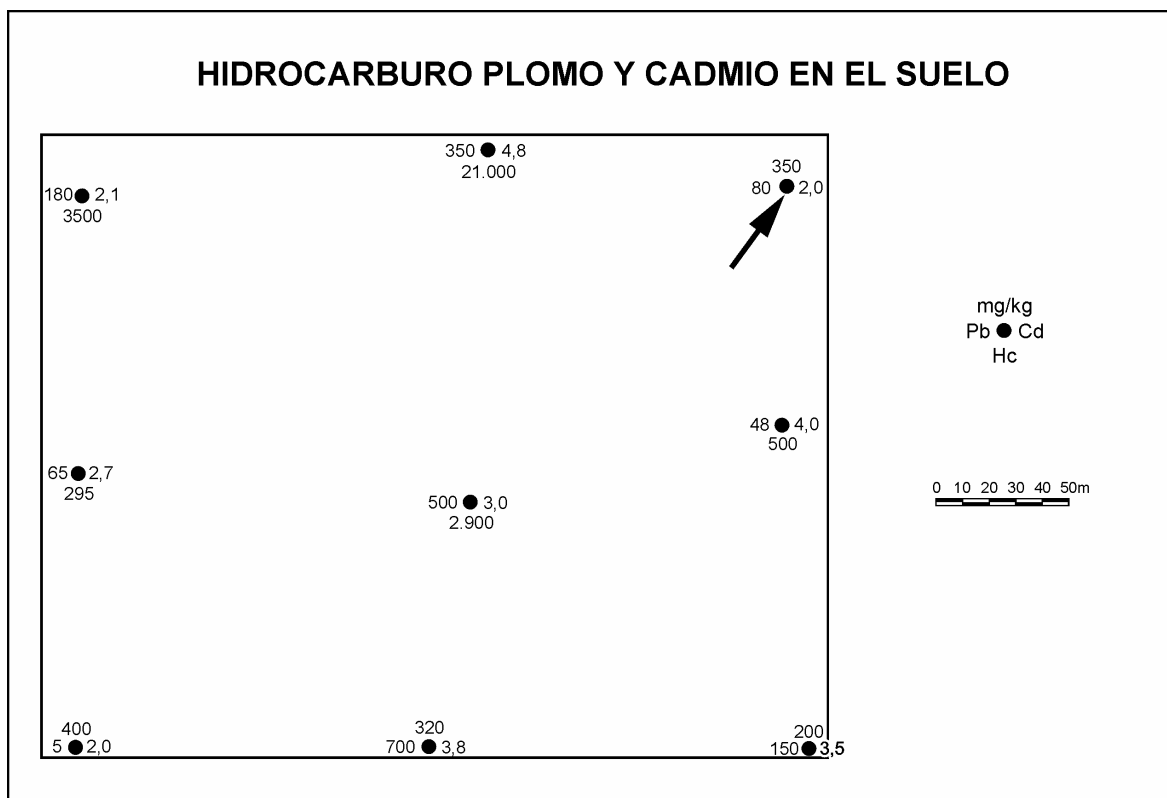


Tabla 1

#### Dutch indicative values for contaminated sites

Indicative values: A - Reference value\*\* (background value)  
B - Indicative value for further investigation  
C - Indicative value for cleaning-up

Presence in: Substance	Soil (mg/kg dry weight)			Groundwater (ug/l)		
	A	B	C	A	B	C
<b>I Metals</b>						
Cr	100	250	800	20	50	200
Co	20	50	300	20	50	200
Ni	50	100	500	20	50	200
Cu	50	100	600	20	50	200
Zn	200	500	3000	50	200	800
As	20	30	60	10	30	100
Mo	10	40	200	5	20	100
Cd	1	5	20	1	2,5	10
Sn	20	50	300	10	30	150
Bo	200	400	2000	50	100	500
Hg	0,5	2	10	0,2	0,5	2
Pb	50	150	600	20	50	200
<b>II Inorganics pollutants</b>						
NH4 (as N)	-	-	-	200	1000	3000
F (total)	200	400	2000	300	1200	4000
CH (total free)	1	10	100	5	30	100
CH (total complex)	5	50	500	10	50	200
S (total)	2	20	200	10	100	300
Br (total)	20	50	300	100	500	2000
PO4 (as P)	-	-	-	50	200	700
<b>III Aromatic compounds</b>						
Benzene	0,01	0,5	5	0,2	1	5
Ethylbenzene	0,05	5	50	0,5	20	60
Toluene	0,05	3	30	0,5	15	50
Xylene	0,06	5	50	0,5	20	60
Phenols	0,02	1	10	0,5	15	50
Aromatics (total)	0,1	7	70	1	30	100
<b>IV Polycyclic aromatic compounds (PCA's)</b>						
Naphtalene	0,1	5	50	0,2	7	30
Anthracene	0,1	10	100	0,1	2	10
Phenanthrene	0,1	10	100	0,1	2	10
Fluoranthene	0,1	10	100	0,02	1	5
Pyrene	0,1	10	100	0,02	1	5
Benzo(a)pyrene	0,05	1	10	0,01	0,2	1
Total PCA's	1	20	200	0,2	10	40
<b>V Chlorinated organics compounds</b>						
Aliphatic chlor. comp. (Indiv.)	0,1	5	50	1	10	50
Aliphatic chlor. comp. (total)	0,1	7	70	1	15	70
Chlorobenzenes (Indiv.)	0,05	1	10	0,02	0,5	2
Chlorobenzenes (total)	0,05	2	20	0,02	1	5
Chlorophenols (Indiv.)	0,01	0,5	5	0,01	0,3	1,5
Chlorophenols (total)	0,01	1	10	0,01	0,5	2
Chlorinated PCA (total)	0,05	1	10	0,01	0,2	1
PCB (total)	0,05	1	10	0,01	0,2	1
ECCI (total)	0,1	8	80	1	15	70
<b>VI Pesticides</b>						
Organic chlorinated - (indiv.)	0,1	0,5	5	0,05	0,2	1
Org. chlorin. - (total)	0,1	1	10	0,1	0,5	2
Pesticides (total)	0,1	2	20	0,1	1	5
<b>VII Other pollutants</b>						
Tetrahydrofuran	0,1	4	40	0,5	20	60
Pyridine	0,1	2	20	0,5	10	30
Tetrahydrothiophene	0,1	5	50	0,5	20	60
Cyclohexanone	0,1	6	60	0,5	15	50
Styrene	0,1	5	50	0,5	20	50
Gasoline	20	100	800	10	40	150
All Mineral oil	100	1000	5000	20	200	600

Source: Soil Clean-up Guideline, 1983

Notes  
\* to used only in relation with the local situation and the use and function of the soil  
\*\* In the context of cleaning-up conditions

## **13.2. CONTAMINACIÓN CON HIDROCARBUROS EN EL AGUA SUBTERRÁNEA DE UNA DESTILERÍA DE PETRÓLEO DEL CONURBANO DE BUENOS AIRES**

En junio/94, se realizó un estudio sobre el estado del suelo y del agua subterránea respecto a la contaminación con hidrocarburos en un sector de la refinería de 820 m de largo, mediante la ejecución de 45 sondeos de 3" y 4 m de profundidad cada uno, 5 perforaciones de 6" y 9 m de profundidad c/u y 5 calicatas de 1 m de lado y 2 m de profundidad, cuyas ubicaciones se indican en la figura 1.

Los sondeos, que se situaron a unos 20 m de distancia entre sí, tuvieron por objetivo establecer la probable existencia de contaminación con HC en el suelo y el agua y definir las direcciones de flujo subterráneo. Las perforaciones se realizaron para determinar la permeabilidad mediante ensayos de bombeo y las calicatas, para apreciar en forma directa las características del subsuelo.

El análisis e interpretación de las muestras de suelo y de agua, permitió identificar 3 manchas; dos con hidrocarburos livianos (I y III) y la tercera (II) con HC viscoso. En la figura 1 se representa la extensión de la mancha I.

Mediante la realización de 5 ensayos hidráulicos, bombeando en las perforaciones PPR y midiendo la variación del nivel de agua en sondeos cercanos (BR), se obtuvieron valores de permeabilidad del orden de 1 m/día, lo que deriva en las siguientes velocidades efectivas de flujo subterráneo: máxima (0,4 m/d), mínima (0,1m/d) y media (0,2m/d).

La mancha más importante es la I, que ocupa 1.930 m<sup>2</sup> y afecta a un volumen de suelo de 2.230 m<sup>3</sup>, dado que el espesor medio contaminado es de 1,15 m. Considerando una porosidad del 20%, el volumen de agua afectado es de unos 445 m<sup>3</sup>.

Dado la baja productividad de la sección contaminada, de la que sólo se pudo extraer 77 litros/hora por bombeo, se descartó la limpieza mediante pozos puntuales, programándose una captación basada en drenes subterráneos.

Con el objeto de cubrir una superficie considerable de la mancha, se construyeron 5 drenes a profundidades entre 1,75 y 2,0 m, formados por cañería reforzada de PVC de 4" y ranurada, para permitir el ingreso de agua y de HC (figura 2). Los drenes, que totalizan 164 m de longitud, descargan en un pozo colector de 2,75 m de profundidad y de 1,25 x 0,95 m de planta (figura 3).

Para operar el sistema, se instaló una bomba eléctrica que funciona debajo del agua, con un interruptor automático que permite mantener el nivel a 2 m de profundidad. El extremo del caño, chupador se ubica a 2,5 m de profundidad, por lo que la bomba extrae agua con muy bajo tenor en HC, debido a que por su menor densidad, flota.

En la tabla se indican los volúmenes de HC recuperados, operación que se realiza mensualmente con un camión de vacío. Previamente se mide el espesor del sobrenadante y se calcula, a partir de la superficie del colector, la cantidad acumulada.



El sistema comenzó a funcionar en abril/95 y en ese año se recuperaron 1.990 litros de HC liviano. En 1996, la bomba estuvo en reparación durante julio y agosto y hasta noviembre pasado, se extrajeron 1.460 litros, con lo que se totalizó 3.450.

El sistema está funcionado correctamente y ha demostrado su eficiencia pese a la baja permeabilidad que caracteriza al suelo.

### HIDROCARBURO RECUPERADO

1995	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	TOT
litros				200	235	295	260	205	215	195	200	185	1990
1996													
litros	190	185	195	150	140	160			170	160	110		1460

Fig. 1

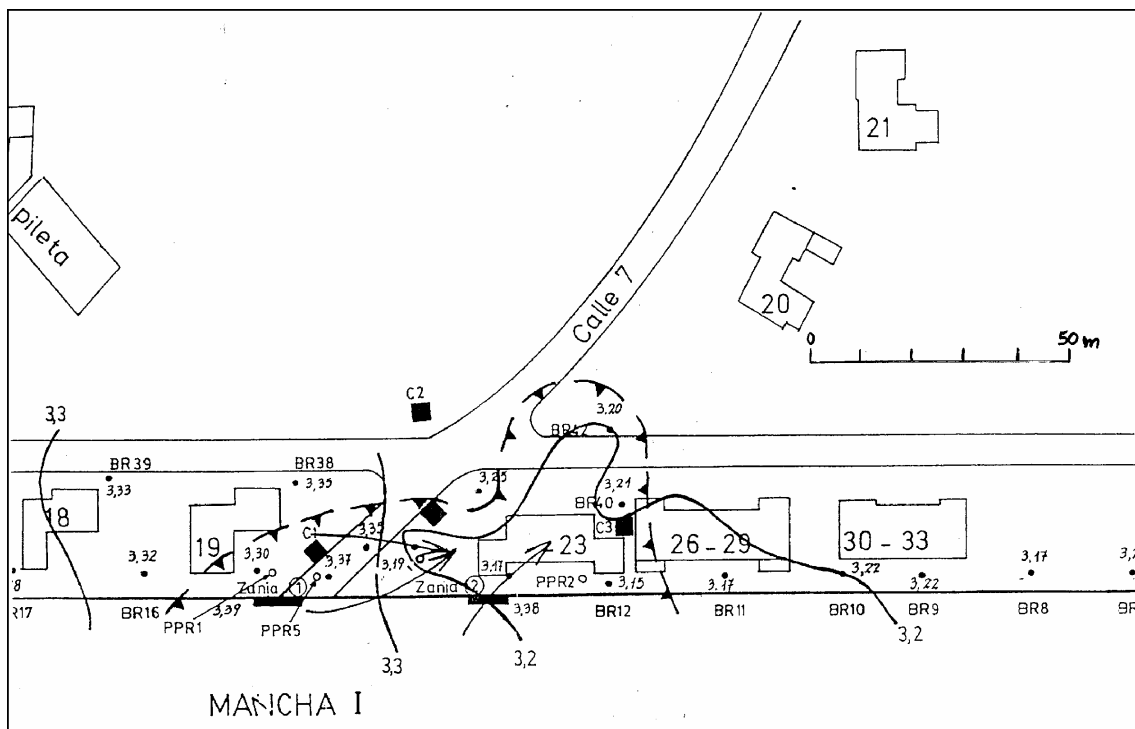


Fig. 2

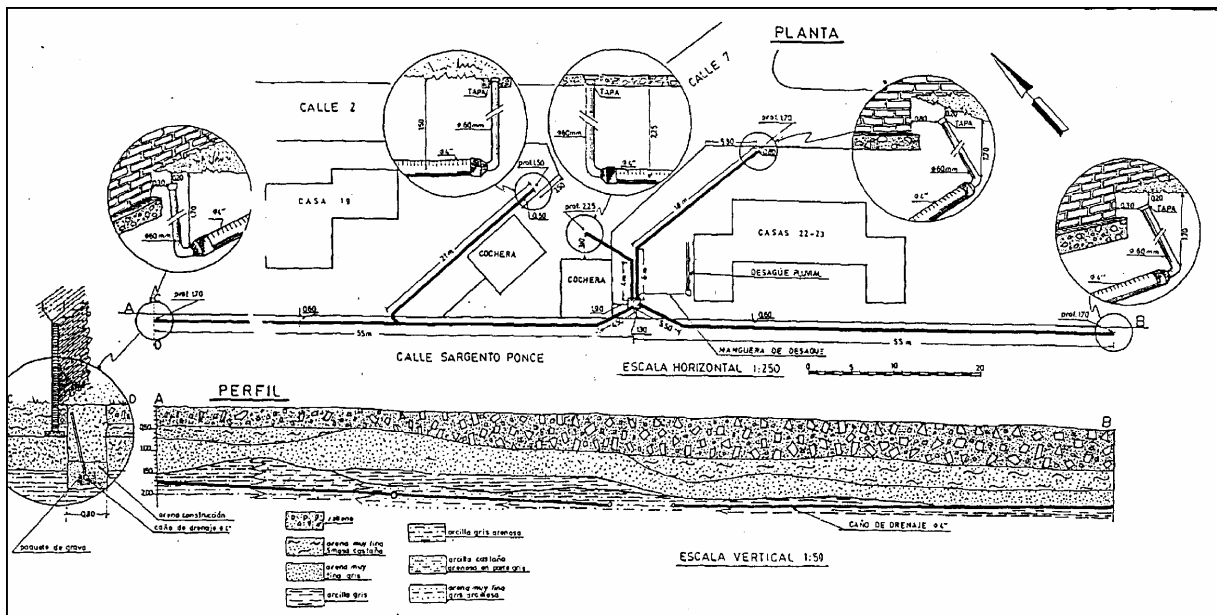
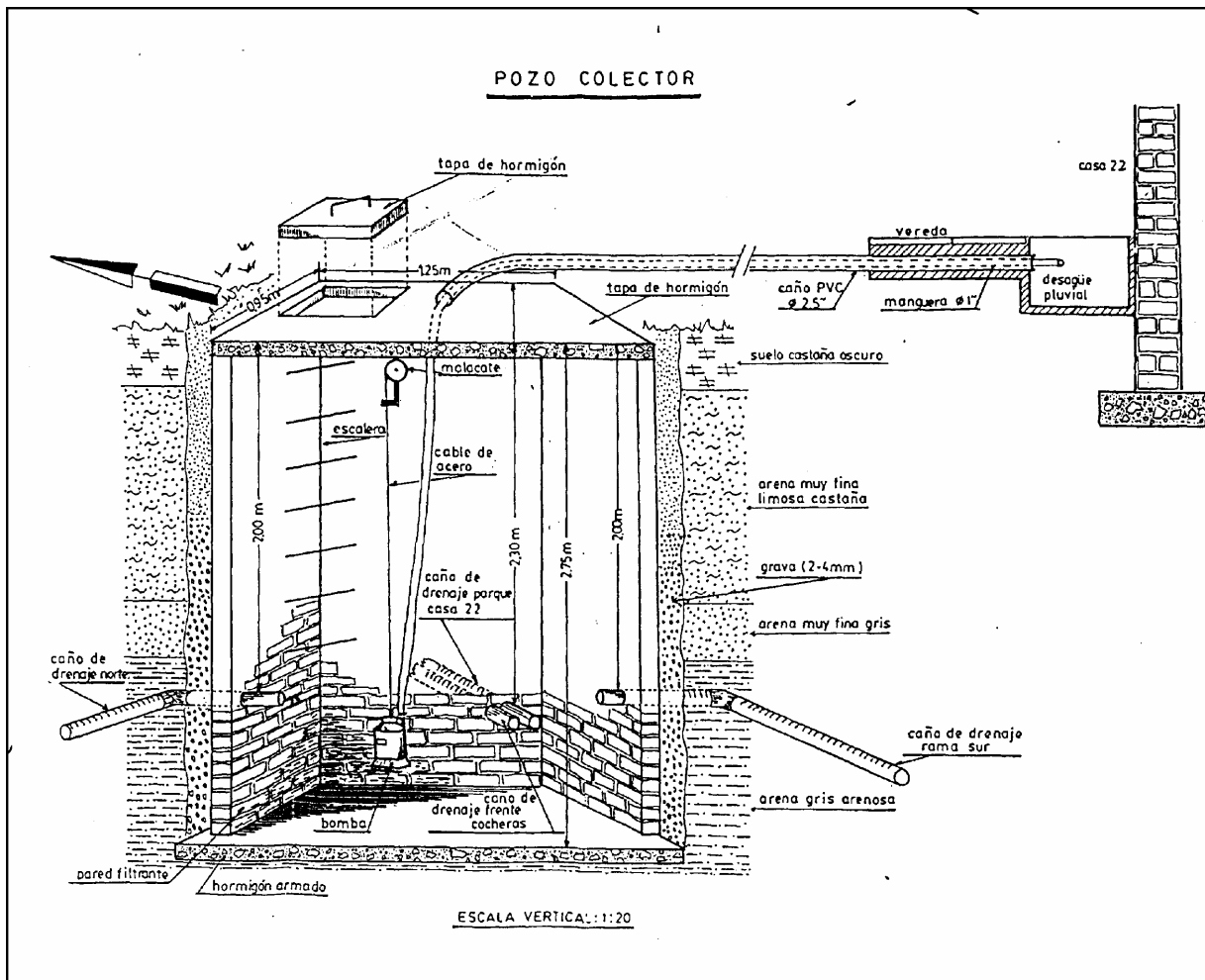


Fig. 3



### **13.3. ESTUDIO AMBIENTAL DEL SUELO Y EL AGUA SUBTERRÁNEA EN DÁRSENA SUD CAPITAL FEDERAL**

#### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

\* La ejecución de 20 sondeos exploratorios hasta 4 m de profundidad, la descripción y el análisis de las muestras de suelo y agua obtenidas de ellos, permitió establecer el estado del suelo y del agua frente a la contaminación con hidrocarburos y uno de sus principales derivados, el plomo. Los sondeos quedaron entubados para permitir las operaciones de seguimiento de las variables hidrodinámicas e hidroquímicas.

\* En laboratorio se analizaron 40 muestras de suelo (2 por cada sondeo) que se eligieron en base a la descripción macroscópica en boca de pozo y otras 20 de agua (1 por cada sondeo).

\* El grado de contaminación del suelo es intermedio a bajo. Se identificaron seis sectores o manchas en los que los contenidos de HC superan o se aproximan al máximo de 5 g/kg, admitido en la Norma Holandesa (Tabla 1). Se utilizó la norma citada, en razón que la Ley 24.051 de Argentina (Residuos Peligrosos), reglamentada mediante el Decreto 831/93, no contiene regulaciones referidas a los HC totales en suelo ni en agua.

\* En cuatro de las seis manchas se justifica ambiental, técnica y económicamente, la aplicación de métodos correctivos, respecto a los HC totales.

\* Las cuatro manchas susceptibles de remediación ocupan aproximadamente 6.000 m<sup>2</sup> y afectan unos 7.500 m<sup>3</sup> de suelo lo que implica que la contaminación alcanzó una profundidad media de 1,25 m.

\* Las dos manchas restantes se ubican por debajo de 1,2 y 3,3 m de profundidad, con contenidos de 2,2 y 3,4 g/kg respectivamente. La remediación no aparece como imprescindible, desde el punto de vista ambiental y resulta técnicamente complicada por la profundidad.

\* La técnica de remediación propuesta se basa en la estabilización, solidificación y encapsulamiento, con la finalidad de lograr un residuo apto (suficientemente seguro y estable) para ser dispuesto en el mismo lugar de donde fue extraído. Los productos más utilizados en este proceso son la cal y el cemento, que deben ser íntimamente mezclados con el suelo contaminado, para lograr un buen aglutinamiento.

\* El grado de la contaminación del suelo frente al plomo es aceptable. Solamente dos muestras superan el límite establecido por la Ley 24.051, para la concentración en suelos destinados al uso industrial (1 g/kg).

\* El agua presenta un mayor grado de contaminación que el suelo, tanto en lo referente a su contenido en HC total como en plomo.

\* Sólo una muestra de agua presenta contenido en HC total inferior al establecido en la Norma Holandesa (0,6 mg/l).

\* La gran mayoría (18) de los sondeos muestreados arrojaron valores de Pb superiores al límite para agua potable, establecido por la Ley 24.051 (0,05mg/l).

\* La red de flujo de la capa freática indica que el movimiento principal del agua es hacia el N del predio.

\* Es necesario interceptar el flujo de agua contaminada antes que abandone el predio y proceder a su tratamiento, para evitar que continúe el deterioro del recurso fuera de los límites de la Planta. Para ello, se propone la construcción de un sistema combinado de zanja de intercepción, dren de captación y pozo colector con el que se prevé extraer 1,3 m<sup>3</sup>/día de agua contaminada que será tratada con los productos habituales para disminuir el contenido en Pb (polímeros hidrocarbonados).

\* A los hidrocarburos se los dejará acumular en el pozo colector, para extraerlos cuando conformen un volumen adecuado (200 litros).

Se recomienda

\* Efectuar un seguimiento detallado de las obras y tareas de remediación del suelo y del agua.

\* Verificar la evolución de los contaminantes en el tiempo y en el espacio. Para ello será necesario realizar, con frecuencia bimensual, un monitoreo de los niveles del agua subterránea, toma de muestras y determinaciones en laboratorio de los contenidos en HC y plomo.

## **OBJETIVOS**

La finalidad del Estudio fue establecer el estado del suelo y del agua subterránea frente a la contaminación, derivada de los productos utilizados y la actividad desarrollada en la Terminal Dársena Sud y en función de ello, proponer los métodos y las técnicas destinadas a mejorar la situación ambiental y de los recursos. El predio objeto del Estudio se ubica en el extremo sudeste de la Ciudad de Buenos Aires, entre la Dársena Sud y el Río de la Plata (figura 1).

Dado que en la Terminal se realizaron tareas de, almacenamiento, envasado y despacho de: nafta, diesel oil, gasoil, kerosene y aceite, las determinaciones apuntaron a detectar y cuantificar hidrocarburos totales y plomo en 40 muestras de suelo y 20 de agua, tomadas en 20 sondeos de 4 m de profundidad, que quedaron entubados para permitir el futuro monitoreo del agua subterránea.

Con el objeto de captar el agua subterránea para su tratamiento, en caso que su grado de contaminación lo hiciera necesario, se realizaron siete ensayos hidráulicos, con los que se determinó la transmisividad y permeabilidad del acuífero freático.

## **GEOLOGIA Y COMPORTAMIENTO HIDROGEOLÓGICO**

La descripción de las unidades geológicas se inicia por la más moderna, debido a que es la que tiene un contacto más directo con las fases atmosférica y superficial del ciclo hidrológico y con los procesos de contaminación.

## Postpampeano

A esta unidad también se la conoce como Sedimentos Postpampeanos y está integrada por depósitos de diferente origen, en los que predominan notoriamente la granometría fina (arcilla, limo y arena muy fina) sobre la mediana (arena mediana) y la gruesa (grava).

Los 20 sondeos efectuados hasta 4 m de profundidad, para establecer el estado del suelo y del agua respecto a la contaminación, están terminados en esta unidad, que además conforma el sustrato geológico sobre el que se asienta la Planta de Despacho.

Por debajo del relleno artificial, cuyo espesor oscila entre unos 60 cm (S1, S3, S4, S7 etc.) y 2,3 m (S8), se desarrolla una secuencia predominantemente arcillosa y limosa (pelítica), hasta profundidades variables entre 2 m (S7) y 2,9 m (S4), subyacida por otra arenosa fina, hasta el fondo de los pozos (4 m).

Algunos sondeos no presentan la tendencia granométrica señalada, dominando en todo el perfil, el tamaño fino, (S17 y S20) y en otros se destaca la intercalación de una capa francamente arcillosa, en una sucesión donde prevalecen las arenas muy finas (S1 y S4).

La tonalidad dominante es la gris, seguida por la castaña y en forma muy subordinada, la verdosa.

Se identificaron fósiles del tipo bivalvos, en los sondeos S3 de 1,2 a 2,4 m y S6 de 1,4 a 2,7 m.

En la figura 2 se reproduce el perfil litológico y de entubamiento del pozo 1, que resulta demostrativo de los 19 restantes.

En perforaciones más profundas se citan desde la superficie y hasta los 29 m de profundidad, arenas finas, arcillosas, grisáceas oscuras y con fósiles marinos, que se apoyan sobre otra secuencia de arenas, pero de granometría mediana y gruesa y tonalidad amarillenta.

Las arenas arcillosas superiores, de baja permeabilidad, pertenecen al Postpampeano, al que se le asigna una edad entre los 10.000 años y el presente, mientras que las inferiores, de alta permeabilidad son la Arenas Puelches.

En lo referente al comportamiento hidrogeológico, el conjunto de los Sedimentos Postpampeanos presenta baja permeabilidad. En las secciones arenosas debido a su granometría fina y a la presencia de matrix arcillosa y en las fracciones pelíticas por el reducido tamaño poral.

En virtud de ello, predomina un comportamiento del tipo acuitardo (admite agua y la transmite con mucha dificultad) a acuífero de baja productividad, éste último en las secciones en que domina la fracción arena.

En cinco de los siete ensayos hidráulicos realizados, se obtuvieron valores representativos de permeabilidad, con extremos de 0,08 m/día (S7) y 0,38 m/d (S16) y una media de 0,22 m/d. Esta última magnitud es considerada representativa de "acuíferos pobres con mala capacidad de drenaje", integrados por arena fina, arena arcillosa, mezcla de arena, limo y arcilla y arcillas estratiformes (Benítez, 1972).

Respecto a la salinidad, mediciones efectuadas en los sondeos S5, S7 y S13, arrojaron valores de 620, 750 y 590 N S/cm, respectivamente, equivalentes a unos 400/550 mg/l. Estos valores están por debajo del límite adoptado por OSN para el residuo salino total (2.000 mg/l). Sin embargo las muestras provienen del extremo superior de la capa freática, donde es común la existencia de delgados espesores de agua dulce, flotando, por su menor densidad, en el agua salada. El agua dulce proviene de la infiltración de la superficial y del aporte del Río de la Plata.

En el sitio estudiado, ubicado en la Terraza baja, o Llanura inundable del Río Matanza, la mayor parte del agua subterránea presenta elevada mineralización, con un incremento de salinidad en profundidad. Así en la perforación Dársena Sud N° 2 (ex Dirección Gral. de Minas y Geología), se indica para la primer capa acuífera (de 1,8 a 4,5 m de profundidad), una salinidad de 1,4 g/l. Para la segunda (de 6,3 a 16,5 m), también en el Postpampeano 3,3 g/l y para la tercera (de 29,0 a 50,4 m) en las Arenas Puelches 27,2 g/l.

Por lo tanto, excluyendo el pequeño volumen de agua dulce sobreyacente, el resto resulta inapta para el consumo humano y demás usos corrientes, por su elevada salinidad.

### **Arenas Puelches**

Constituyen una secuencia de arenas cuarzosas sueltas, medianas y finas, blanquecinas y amarillentas, de origen fluvial, que ocupan unos 83.000 km<sup>2</sup>, en el subsuelo del NE de la Provincia de Buenos Aires y se extiende también a la de Entre Ríos, Santa Fe y Córdoba (Auge, 1986).

Contienen al acuífero más explotado del país (Puelche), pues de él se abastece en gran medida el Conurbano de Buenos Aires (10 millones de habitantes).

En la perforación Dársena Sud N° 2, las Arenas Puelches se desarrollan entre 29 y 50,4 m bajo boca de pozo (b.b.p.).

De acuerdo a la descripción predominan: arenas de grano mediano y grueso, grava y ripio, que apuntan hacia permeabilidades medias a altas.

Las Arenas Puelches, para cuyo desarrollo estratigráfico se estima un lapso de 5,5 a 3,5 millones de años, antes del presente (ap) (Yrigoyen, 1993), son netamente acuíferas (admiten y transmiten el agua con facilidad) y pese a que no se dispone de ensayos hidráulicos realizados en el sitio estudiado o en sus vecindades, se les asigna una permeabilidad K - 40 m/día, a partir de pruebas hidráulicas realizadas en ámbitos morfológicos y geológicos similares, cuyos resultados obran en EASNE, 1972.

Ya se mencionó la elevada salinidad que presenta el agua subterránea en la Planicie costera y en la Llanura inundable del Río Matanza, debido a la incidencia de los sedimentos del Postpampeano y de las ingresiones marinas acaecidas durante el Cuaternario. En la perforación exploratoria Dársena Sud N° 2, se detectó una salinidad de 27,2 g/l, con abundante  $\text{SO}_4^-$ , lo que hace al Acuífero Puelche, inapto para los usos corrientes en esta ubicación.

Fuera de los ámbitos topográficamente deprimidos ya mencionados (Planicie costera y Llanura inundable), este acuífero contiene agua de excelente calidad química,

apta para la mayoría de los usos, con salinidades totales menores a 1 g/l y del tipo bicarbonatada sódica.

Resulta interesante señalar la ausencia, en el sitio estudiado, de una importante unidad geológica como lo es el Pampeano o Sedimentos Pampeanos (Fidalgo et al, 1975). El Pampeano caracteriza con sus afloramientos a la mayor parte de la gran Llanura Chacopampeana, disponiéndose en el NE de la Provincia de Buenos Aires, entre los Sedimentos Postpampeanos y las Arenas Puelches.

La erosión provocada por el antiguo Río de la Plata y sus afluentes, entre ellos el Río Matanza, durante la última glaciación (hace unos 8.000 años), debido al marcado descenso del nivel del mar, determinó la eliminación del Pampeano en un sector de posición próxima a la costa. Hacia el Oeste, el Escalón y la Terraza alta están labrados en los Sedimentos Pampeanos (Parque Lezama).

### **Formación Paraná o el Verde**

Se emplaza por debajo de las Arenas Puelches y está formado por dos secciones de acuerdo a la descripción de la perforación Riachuelo N° 4, ejecutada en las proximidades del Puente Pueyrredón, en la margen izquierda del Riachuelo.

La sección mas somera, de 44,8 a 71,9 m b.b.p., es una arcilla plástica, verde azulada a gris verdosa, con fósiles marinos (*Ostrea amussium*), subyacida por otra arenosa, gris y amarillenta, desde 71,9 a 86,3 m de profundidad. Esta última se comporta como acuífera y es profusamente explotada por la industria en la cuenca baja del Río Matanza, por los altos rendimientos y baja salinidad (3 a 4 g/l), respecto a la que presenta el Puelche (20 a 30 g/l) o la Fm Olivos subyacente (15 a 20 g/l).

De cualquier forma los contenidos salinos y en  $Cl^-$ , superan a las normas de potabilidad por lo que no se utiliza agua de la Fm Paraná para consumo humano.

Los sedimentos de la Fm Paraná son de origen marino y deben su presencia a una transgresión ocurrida entre unos 20 y 10 millones de años a.p.

### **Formación Olivos o el Rojo**

Subyace a la Fm Paraná y está integrada por tres secciones: la más somera es netamente arcillosa, la intermedia arcillo arenosa y la mas profunda francamente arenosa.

Del perfil de la perforación Riachuelo N° 4 se desprende que entre 86,3 y 172,7 m de profundidad, se desarrolla una sucesión de arcillas pardo rojizas compactas, con concreciones calcáreas en el tramo superior y yesíferas en el inferior. Esta unidad actúa como un acuicludo (contiene agua pero no la transmite), separando efectivamente a los acuíferos contenidos en las Fm Paraná y Olivos.

Por debajo de la anterior, entre 172,7 y 224,1 m b.b.p., se presenta una secuencia integrada por areniscas y arcillas rojizas calcáreas y yesíferas.

Finalmente entre 224,1 y 325,6 m b.b.p., dominan ampliamente las areniscas rosadas y rojizas, calcáreas y yesíferas.

Los tres acuíferos alumbrados en la Fm Olivos resultaron surgentes, con niveles entre 6,5 y 8,6 m por encima del terreno, cuya cota se fijó en 4,65 m sobre el cero del Riachuelo.

Las salinidades de estas capas variaron entre 16 y 19 g/l, destacándose los altos tenores en  $\text{SO}_4$  (de 5,0 a 5,8 g/l) y en  $\text{Cl}^-$  (de 4,1 a 5,1 g/l), que las hacen inapropiadas para la mayoría de los usos corrientes.

Los sedimentos de la Fm Olivos son predominantemente continentales y para ellos se propugna un origen desde aluvial hasta eólico, con un lapso de sedimentación que abarcó desde unos 35 a 25 millones de años a.p.

### **Basamento Cristalino**

A 325,6 m de profundidad, la perforación dio con una pegmatita alterada que seguramente compone el techo del sustrato cristalino, dado que también fue identificado a profundidades parecidas en otros sondeos cercanos.

Rocas similares afloran en las Sierras de Tandil, en la Isla Martín García y en la costa Uruguaya y precisamente en dicha Isla, se dató para las mismas una edad de 2.085 millones de años.

Las rocas del basamento cristalino tienen un comportamiento acuífugo (no admiten ni transmiten agua), por carecer de porosidad primaria. Solamente si están alteradas por meteorización o presentan fisuras (porosidad secundaria), pueden contener o conducir agua subterránea.

Por ello a las rocas cristalinas no alteradas ni fisuradas, se las considera el basamento hidrogeológico efectivo para todas unidades del subsuelo.

### **GEOMORFOLOGÍA**

Las geoformas que caracterizan al ámbito en que se ubica el predio estudiado, derivan de las acciones erosivas y de acumulación, producidas fundamentalmente por las aguas superficiales y el viento.

La posición del mar, por su parte, también resultó trascendente en la evolución geomorfológica, particularmente en los últimos 30.000 años. En efecto la diferencia entre los niveles marinos bajos (períodos glaciales) y los altos (períodos interglaciales) alcanzó hasta 100 m. Esto dio lugar a cambios importantes en el nivel de base y por ende en la energía morfocinética.

Durante la última glaciación (unos 8.000 años a.p.) la línea de costa se ubicaba a unos 100 km mar adentro de la desembocadura actual del Río de la Plata, aproximadamente en coincidencia con la isobata de 100 m.

Los ríos, entre ellos los antecesores del Matanza y del Río de la Plata, resultaron favorecidos en su capacidad erosiva, hecho al que coadyuvó un aumento en la pluviosidad que derivó en la conformación de profundos valles, labrados en los Sedimentos Pampeanos.

En algunos casos, la acción erosiva fue tan intensa que eliminó totalmente al Pampeano, llegando hasta las Arenas Puelches (caso del sector estudiado y de otros ubicados en la cuenca inferior del Río Matanza).



El predecesor del Río de la Plata ejerció una acción similar, hecho que se verifica por la ausencia de Sedimentos Pampeanos en Boca Cerrada, Punta Lara y Los Talas.

En los interfluvios se desarrolló una geoforma conocida como Terraza alta (Frenguelli, 1950), cuyos representantes más conspicuos son los altos del Parque Lezama, por encima de cota 10 m.

Al finalizar la glaciación Würm = Atuel, el nivel del mar fue ascendiendo hasta estabilizarse en una posición similar a la actual, hace unos 2.000 años a.p.

Durante los últimos 6.000 años, los profundos valles labrados en el período glacial, fueron colmatados por sedimentos fluviales y aún marinos (Querandino), debido a la marcada disminución de la capacidad de transporte por ascenso del nivel de base.

Ello dio lugar a la formación de la Terraza baja (Frenguelli, 1950), ámbito donde se ubica el predio estudiado, representada por las formas ubicadas por debajo de la cota de 5 m (Llanura inundable del Río Matanza y Planicie costera del Río de la Plata).

El ensamble entre las terrazas alta y baja, se denomina Escalón, representado por las barrancas del Parque Lezama.

La estabilidad tectónica que caracteriza a la Llanura Bonaerense a partir del Terciario superior (10 millones de años a.p.) se traduce en una posición estratigráfica subhorizontal y en desniveles topográficos poco acentuados.

Así, la Terraza alta presenta una pendiente topográfica media de 2,5 m/km, desde la mayor cota que tiene Buenos Aires, en la Estación Villa Devoto (27,27 m), hacia el NE, hasta el borde del Escalón en Palermo.

La Terraza baja, a lo largo del Riachuelo, registra una pendiente media de 0,2 m/km, mientras que el Escalón, en el Parque Lezama, llega hasta 10 %.

La escasa pendiente topográfica y su posición deprimida en el relieve, hace que las aguas derivadas de la lluvia, escurran desde los altos hacia la Terraza baja, donde suelen acumularse en superficie formando anegamientos. Esto favorece la infiltración, particularmente en los sitios libres de edificación y pavimentaciones.

Esta circunstancia se magnifica en el sitio estudiado, especialmente en los recintos que contienen a los tanques, piletas de bombeo y API, dado que están limitados por terraplenes.

El proceso de infiltración facilita la incorporación de contaminantes superficiales al subsuelo y al agua subterránea.

El sector más bajo es el recinto que contiene a los tanques de DO, GO, mezcla y K, en el extremo N del predio, con cotas menores a 2,75 m. Otro sector bajo es el que contiene a las piletas recuperadoras y de agua potable y a la casa de bombas, con menos de 3 m.

En una posición intermedia se encuentra el extremo E del predio, correspondiente a los recintos que contienen a los tanques 10,11, 12 y 13, con cotas del orden de los 4 m.

Los recintos de los tanques 4, 5 y 6 tienen sus pisos a cotas entre 5 y 5,5 m, por lo que su posición topográfica es bastante parecida a la del sector central.

Dejando de lado las alteraciones antrópicas (excavaciones, rellenos, terraplenes, etc.), el relieve insinúa una suave pendiente topográfica hacia el N, a partir de la isohipsa de 6,0 m, en el sector de cargadero, calderas y portería.

Los rasgos topográficos apuntados, en su mayoría artificiales, ejercen un notorio control en la dinámica del agua subterránea. Así en la figura 28 se observa claramente la incidencia que ejerce en el sentido del flujo, la excavación en la que se ubican los tanques 8, 9, 14, 16, 17, 18, 19 y 20 que da lugar a la descarga de agua freática.

Como contracuerdo, el alteo donde se emplazan los tanques 4, 5 y 6, actúa como zona de recarga.

## **AGUA SUBTERRÁNEA**

### **Dinámica**

En el punto Geología se hizo mención al comportamiento hidrogeológico, particularmente en lo referente a las características hidráulicas y químicas de las unidades reconocidas en el subsuelo.

Aquí se tratará en forma específica sobre la dinámica del agua freática, que controla el movimiento de los contaminantes en la sección superior de la zona saturada.

En la figura 3 se reproduce la red de flujo del acuífero freático, elaborada a partir de los potenciales hidráulicos medidos en 19 de los 20 sondeos realizados. Lamentablemente un equipo afectado a las tareas de desguace de la Planta de Despacho, destruyó el sondeo S10 y esta circunstancia determinó la imposibilidad de obtener el nivel en dicho sondeo.

Para obtener los potenciales hidráulicos, se resta la profundidad del agua, medida en cada sondeo, de la cota de boca de pozo.

En la figura 3 se destaca la existencia de dos ámbitos con comportamientos hidrodinámicos opuestos.

Uno actúa como zona de recarga y por ende es emisor del flujo subterráneo. Coincide con el sitio que ocupaban los tanques 4, 5 y 6 y se desarrolla entre las equipotenciales de 4 y 5 m. El flujo es radial divergente, con una marcada tendencia a concentrarse hacia el NE, por el control que ejerce la depresión topográfica donde se situaban los tanques de DO, GO, mezcla y K, la pileta API, la de agua potable y la casa de bombas. Precisamente esta depresión topográfica actúa como principal ámbito de descarga, concentrando el flujo y orientándolo decididamente hacia el Norte.

Otro sector de descarga, pero de menor relieve hidráulico, es el limitado por la equipotencial de 3,5 m, que contiene a los sondeos S14 y S15.

El mayor gradiente hidráulico se produce entre los sondeos S19 y S3 con 0,15 y el menor, a lo largo del eje de descarga (entre S8 y S2) con 0,012.

Considerando los valores de permeabilidad obtenidos en los ensayos hidráulicos y su ámbito de influencia respecto al flujo y aplicando la ecuación de Darcy, se tienen las siguientes velocidades para el agua subterránea:

$$V_{\text{máx}} (S19 - S3) = \frac{0,19 \cdot 0,15}{0,05} = 0,57 \text{ m/d}$$

$$V_{\text{mín}} (S8 - S2) = \frac{0,18 \cdot 0,012}{0,05} = 0,04 \text{ m/d}$$

Para el cálculo de la velocidad máxima se adoptó la permeabilidad obtenida en el ensayo del sondeo S1 (0,19 m/d), dado que el resultado del ensayo en S3 fue anómalo y para la velocidad mínima, se promediaron los valores de permeabilidad de S7 (0,08 m/d), S4 (0,27 m/d) y S1 (0,19 m/d) obteniéndose una K de 0,18 m/d.

A la porosidad efectiva se le asignó un valor del 5 %, a partir de resultados logrados en ubicaciones cercanas y ambientes similares al estudiado.

De las ecuaciones surge que la velocidad máxima del flujo subterráneo es del orden de 60 cm/d y la mínima de 4 cm/d, esta última en coincidencia con el filete principal de descarga. También es en el ámbito de descarga preferencial, donde se presentan los mayores contenidos de HC en agua (S16, S7 y S4). Algo similar ocurre con el plomo que registra máximos en los sondeos S16 y S7.

Del análisis de la red de flujo se desprende que la mayor salida de agua subterránea se produce por el esquinero Norte del predio y en dicha dirección. Secundariamente se verifica una salida hacia el Sur, a la altura del cargadero de camiones.

### **Profundidad**

La profundidad de la superficie freática es importante tanto para la extracción por bombeo como para la construcción de fundaciones y también en relación a los procesos de contaminación del agua subterránea.

El suelo comprendido entre las superficies topográfica y freática, compone la zona subsaturada o de aireación, donde coexisten los tres estados de la materia (sólido, líquido y gaseoso). Esta zona subsaturada es un efectivo filtro natural en relación a la migración descendente de los contaminantes. Por ello el que un contaminante alcance o no al agua subterránea, depende entre otras cosas, de las características físicas (porosidad, permeabilidad, anisotropía, heterogeneidad) y del espesor de la zona de aireación que varía en función del movimiento vertical de la superficie freática.

Cuanto mayor es el espesor de la zona subsaturada y menor la permeabilidad vertical, más reducidas son las posibilidades de un contaminante para llegar al agua subterránea.

En la figura 4 se representa la profundidad del agua mediante isolíneas con 0,5 m de equidistancia, apreciándose que los sectores de menor profundidad (< 0,5 m) coinciden con los recintos de los tanques 4, 5 y 6 y 10, 11 12 y 13. Como contrapartida la mayor profundidad se registra en el sector central de la Planta con 3,20 m (S16). Este sondeo es indicador de una situación anómala debido a que presenta una fase líquida de HC sobrenadante de 90 cm de espesor, cuyo acceso no se vislumbra a través de la zona subsaturada por vertidos en superficie, sino que parece provenir de fugas en cañerías subterráneas o de vertidos en excavaciones o fosas profundas.

## **CONTAMINACIÓN**

### **Suelo**

#### **- Hidrocarburo total**

Para establecer el estado del suelo frente a la contaminación con HC, se realizó una detallada verificación macroscópica en boca de pozo sobre 240 muestras, a fin de obtener un panorama preliminar y seleccionar aquellas en las que se efectuaron las determinaciones analíticas en laboratorio.

En la apreciación macroscópica, además del aspecto litológico, se prestó especial atención al grado de impregnación, olor e iridiscencia.

Para la selección de las muestras, se empleó el criterio de elegir a la más contaminada y la inmediata subyacente fuera de la sección contaminada, con el objeto de delimitar verticalmente a la mancha.

Dado que la Ley 24.051 no contempla a los HC totales como limitantes en la aptitud de un suelo para uso industrial, se recurrió a la Norma Holandesa (tabla 1), de uso corriente en los países europeos. Dicha normativa fija un límite de 5 g/kg de HC total en suelo seco, por encima del cual recomienda su limpieza.

Del análisis de los resultados de las determinaciones de laboratorio, surge que cuatro muestras superan el límite de 5 g/kg (S1 M1, S6 M1, S7 M1 y S13 M1) y otras siete presentan contenidos muy cercanos a dicho límite (S3 M1, S5 M1, S6 M2, S8 M1, S13 M2, S14 M2 y S17 M1), lo que indica la conveniencia de remediar los suelos asociados, interpretados en 4 manchas.

Sintéticamente se puede señalar que el espesor medio afectado por la mancha I es de 1 m; por la mancha II, 1,5 m; por la mancha III, 1,8 y por la mancha IV, 2 m. Las manchas V y VI se desarrollan a partir de 3,3 y 1,2 m de profundidad respectivamente.

#### **- Plomo**

La Ley 24.051 fija un límite máximo de 1 g/kg de plomo en suelo seco para uso industrial. En el predio estudiado (figura 32), sólo dos muestras superan dicho valor: S20 M1 (1992 mg/kg) y S6 M1 (1407 mg/kg), por lo que el estado del suelo frente a este contaminante, es aceptable:

### **Agua**

#### **- Hidrocarburo total**

Tampoco es contemplado por la ley 24.051. La Norma Holandesa le asigna un límite máximo de 600 ug/l, a partir del cual recomienda el tratamiento del agua.

De las determinaciones analíticas, surge que una sola muestra (S20) está por debajo del umbral normado para HC total(0,6 mg/l).

Los sondeos que arrojaron resultados mas comprometidos son S4 con 690 mg/l, S7 con 4.510 mg/l y S16 con mas del 60 %, por lo que la muestra tiene mayor contenido de HC que de agua.

Tal como ocurre con el suelo, el sector de los tanques 4, 5 y 6 es el que presenta menor deterioro en el agua subterránea.

En términos generales no se aprecia coincidencia entre los contenidos elevados de HC en el suelo y en el agua (S1, S3, S6, S8 y S13), situación que parece derivar de la posición relativa del HC en el suelo respecto de la superficie freática.

En efecto en los sondeos S1, S3 y S6 las manchas son superficiales (de 0,0 a 0,3 m) y se ubican por encima del agua freática, lo que indica la baja movilidad del HC en la zona subsaturada. En el S13, la mancha (de 0,3 m a 0,6 m) coincide con el tramo superior de la capa freática, mientras que en el S8, pese a ubicarse de 1,3 a 1,6 m de profundidad, está por arriba del nivel freático medido (1,965 m b.b.p.).

El único sondeo que presenta coincidencia de altos contenidos de HC en el agua y en el suelo, es el S7.

#### **- Plomo**

La Ley 24.051 establece un límite de potabilidad, en relación al Pb, de 0,05 mg/l (cuadro 13), valor que es superado en 18 de los sondeos muestreados. Sólo S17 y S20 con menos de. 0,04 mg/l, se ubican por debajo del límite de potabilidad. Entre los valores altos se destacan S7 con 3,1 mg/l y S16 con 6,27 mg/l.

Se reitera con el Pb la falta de correspondencia entre los contenidos elevados del suelo, con los del agua. Los máximos detectados en el suelo (S6 M1 y S20 M1) no tienen su correlato en agua, además el S20 es uno de los sondeos que registró menor tenor de Pb en el agua.

En la figura 33 se representan las concentraciones de Pb detectadas en el agua freática.

### **REMEDIACIÓN**

Del análisis efectuado en el punto anterior, surge que el recurso más afectado por la contaminación con HC y Pb es el agua subterránea; el suelo por su parte, aparece deteriorado por altos tenores de HC, pero sólo en algunos sectores de la Planta y prácticamente no está afectado por Pb.

#### **Suelo**

De las seis manchas de HC identificadas en el suelo de la Planta, la de mayor extensión es la II, emplazada en el ámbito deprimido que contiene a la pileta API, a la de agua potable, a los 4 tanques aéreos, a la casa de bombas y al manifold. La posición de la mancha II se definió con los sondeos S5, S6 y S7, cuyas muestras presentaron contenidos en HC de 2.591, 15.200 y 5.782 mg/kg de suelo seco, respectivamente.

Arealmente la mancha ocupa 2.400 m<sup>2</sup> y verticalmente se extiende hasta 1,5 m de profundidad, lo que implica un volumen de suelo contaminado de 3.600 m<sup>3</sup>.

Le sigue en importancia la mancha I, en la depresión situada inmediatamente al NO de la anterior, con 2.200 m<sup>2</sup> y 1 m de espesor.

En la tabla 1 se indica la superficie, el espesor y el volumen de suelo afectado por cada mancha.

Las manchas V y VI, que se desarrollan de 3,3 a 4 m y de 1,2 a 3 m respectivamente, resultan de muy difícil remediación.

<b>mancha</b>	<b>superficie (m<sup>2</sup>)</b>	<b>espesor (m)</b>	<b>volumen (m<sup>3</sup>)</b>
I	2.200	1	2.200
II	2.400	1,5	3.600
III	330	2	660
IV	510	2	1.020
V	500	0,7	350
VI	680	1,8	1.225
TOTAL	6.720		8.995

El volumen total de suelo afectado por la contaminación con HC, es de unos 9.000 m<sup>3</sup>, de los cuales se consideran técnica y económica factibles de mejoramiento, aproximadamente 7.500 m<sup>3</sup> (manchas I, II, III y IV).

Para la remediación se recomienda la técnica de la estabilización, solidificación y encapsulamiento, cuya finalidad es llegar, a través de un adecuado tratamiento, a un residuo suficientemente estable y seguro para ser dispuesto en el mismo lugar de donde fue extraído.

Los productos más utilizados en este proceso son la cal (óxido de calcio) y el cemento, que deben ser íntima y apropiadamente mezclados con el suelo contaminado, para lograr un correcto aglutinamiento.

Según las metodologías que se apliquen, se aconsejan aditivos como arcilla y silicatos solubles de sodio y de potasio.

En el presente caso el volumen de suelo a tratar es de unos 7.500 m<sup>3</sup>.

### **Agua**

Para interceptar al agua subterránea contaminada con HC y Pb, cuya salida ocurre principalmente por el extremo norte de la Planta, se recomienda la construcción de un dren cuyo perfil se muestra en la figura 5.

El dren, que tendrá las funciones de captación y conducción del agua freática, estará integrado por un caño de PVC de  $\phi$  10 cm y 50 m de largo, ranurado en toda su extensión y una zanja de 1 m de ancho y 1,5 a 1,8 m de profundidad, rellena con grava seleccionada de 1 mm de diámetro medio, en cuyo fondo se ubicará el caño.

El extremo oriental del dren, descargará en un pozo colector, de aproximadamente 1 m de lado y 3 m de profundidad, que almacenará en forma temporaria el agua contaminada (figura 6).

El caudal que podrá extraerse del sistema de captación se estima en 1,3 m<sup>3</sup>/día, a partir de la siguiente ecuación (Benítez 1972):

$$Q = \frac{2\pi K (H^2 - h^2)}{\ln R/r} \quad \text{donde:}$$

Q: Caudal (m<sup>3</sup>/día)

K: permeabilidad (0,3 m/día)

H: carga hidráulica sobre el dren fuera del pozo (2,5 m)

h: carga hidráulica sobre el dren dentro del pozo ( 0,5 m)

R: radio de influencia ( $3.000 \sqrt{K}$ )

s: H - h (2 m)

r: radio del pozo equivalente ( $\frac{2}{3} L$ )

L: longitud del dren (50 m)

En la figura 7 se representa en forma esquemática el funcionamiento de la captación propuesta y se indican los términos que integran la ecuación.

El tratamiento de eliminación de Pb, puede realizarse mediante la utilización de productos integrados por carbono de alta pureza (99,9 %), con características hidrófilas, que permiten la fijación de los metales y de una extensa gama de hidrocarburos por adsorción, condensación capilar y absorción capilar. Para realizar la operación es conveniente trasvasar el agua almacenada en el pozo colector, mediante una electrobomba de 1 HP de potencia y accionamiento automático, a un recipiente de unos 3 m<sup>3</sup> de capacidad.

El dispositivo automático de la bomba debe ser regulado de manera que extraiga el agua del fondo del pozo e interrumpa su funcionamiento en una profundidad mínima de 50 cm. De esta forma el HC se acumulará como sobrenadante y podrá ser extraído directamente del pozo colector, cuando alcance un volumen adecuado (200 litros o 20 cm de sobrenadante) con el consecuente ahorro en el tratamiento.

El agua bombeada al recipiente de tratamiento contendrá metales pesados y algún remanente de HC, que podrá ser tratado en conjunto, para satisfacer las normas de la Ley 24.051 y de la Holandesa, mediante el empleo de los productos de uso corriente como los mencionados mas arriba.

Se deberá prestar especial cuidado en la disposición final de los residuos sólidos o semilíquidos con alto contenido en Pb y los líquidos de HC.

# UBICACIÓN

Estudio de suelos en Dársena Sur

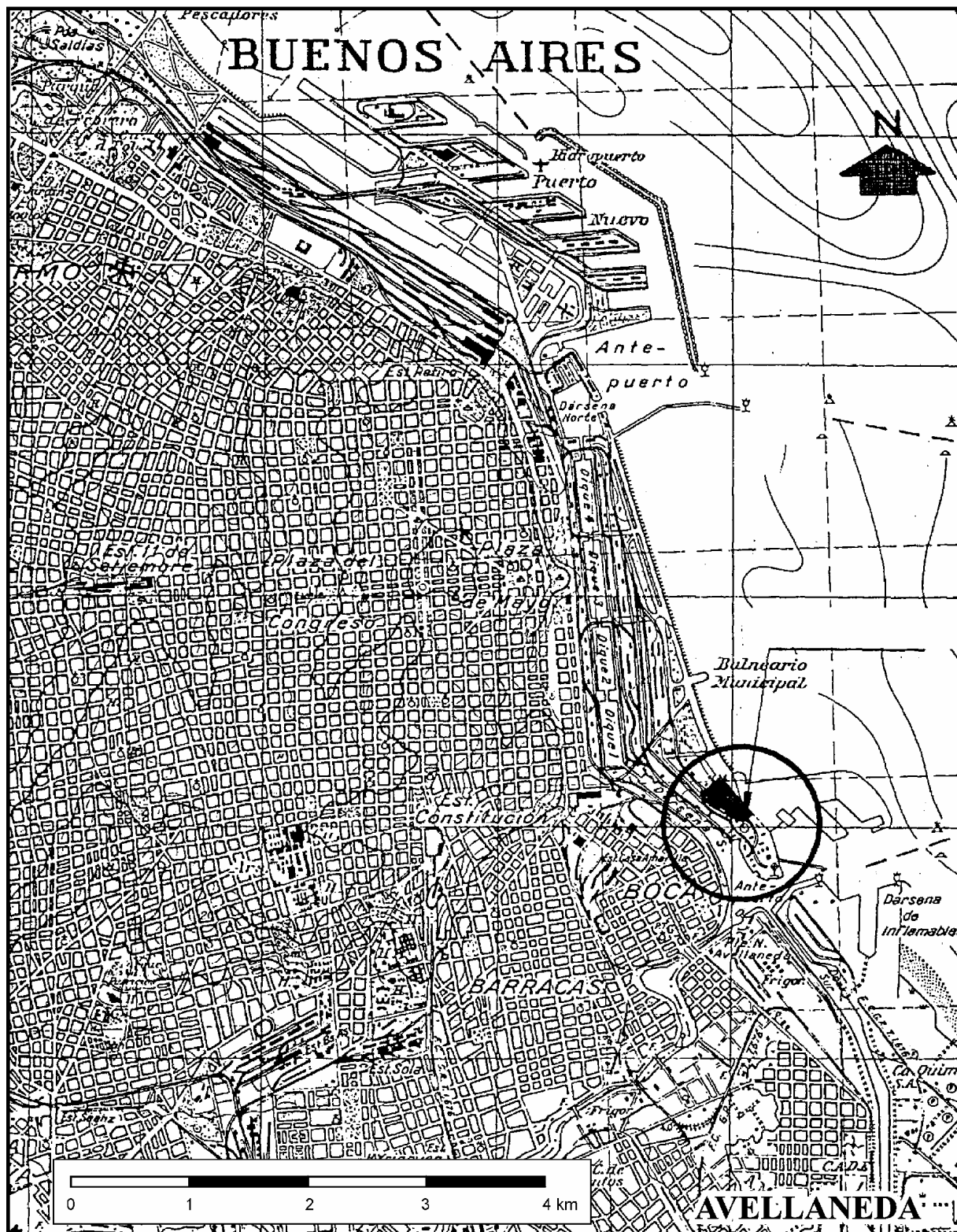




Fig. 2

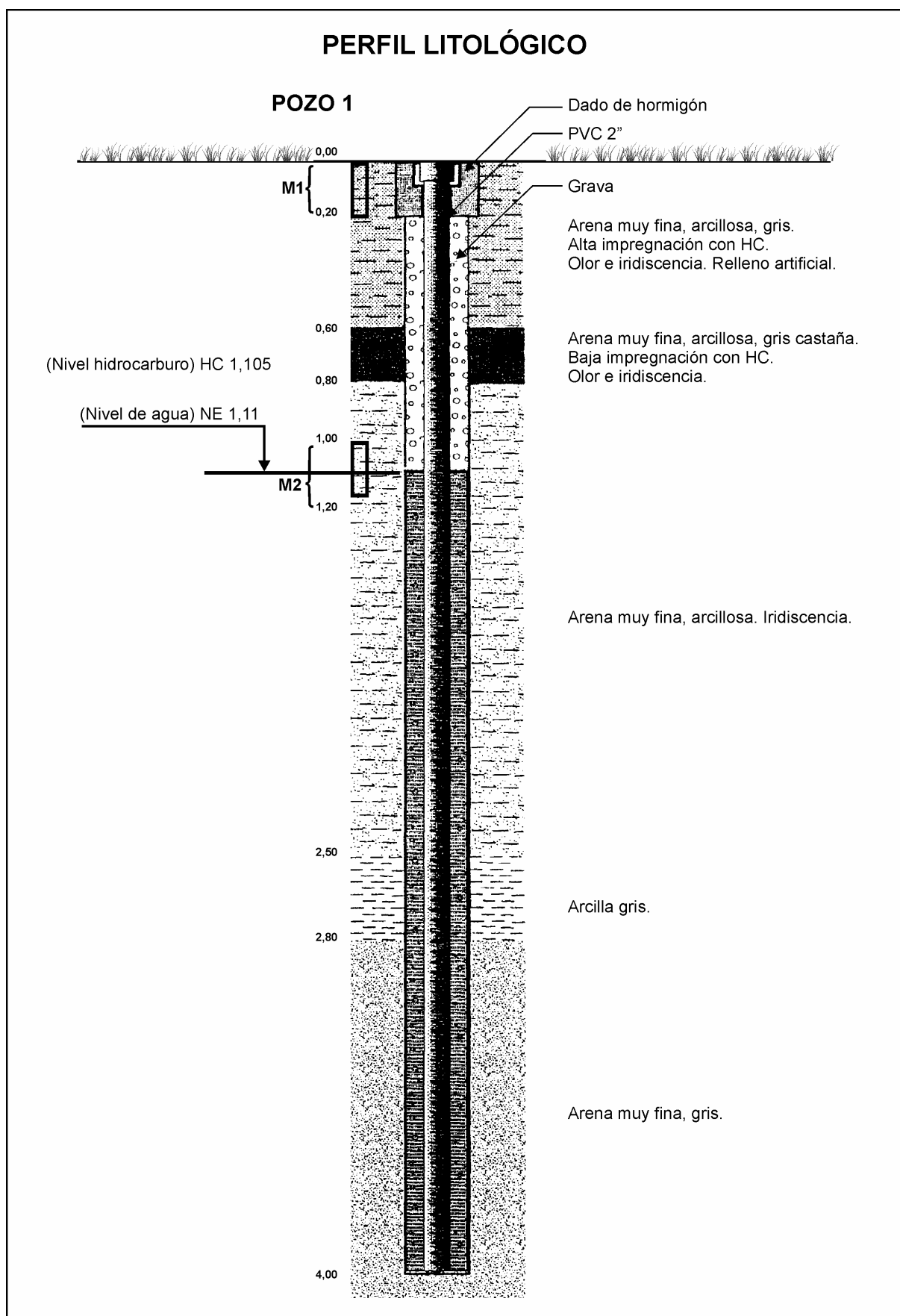


Fig. 3

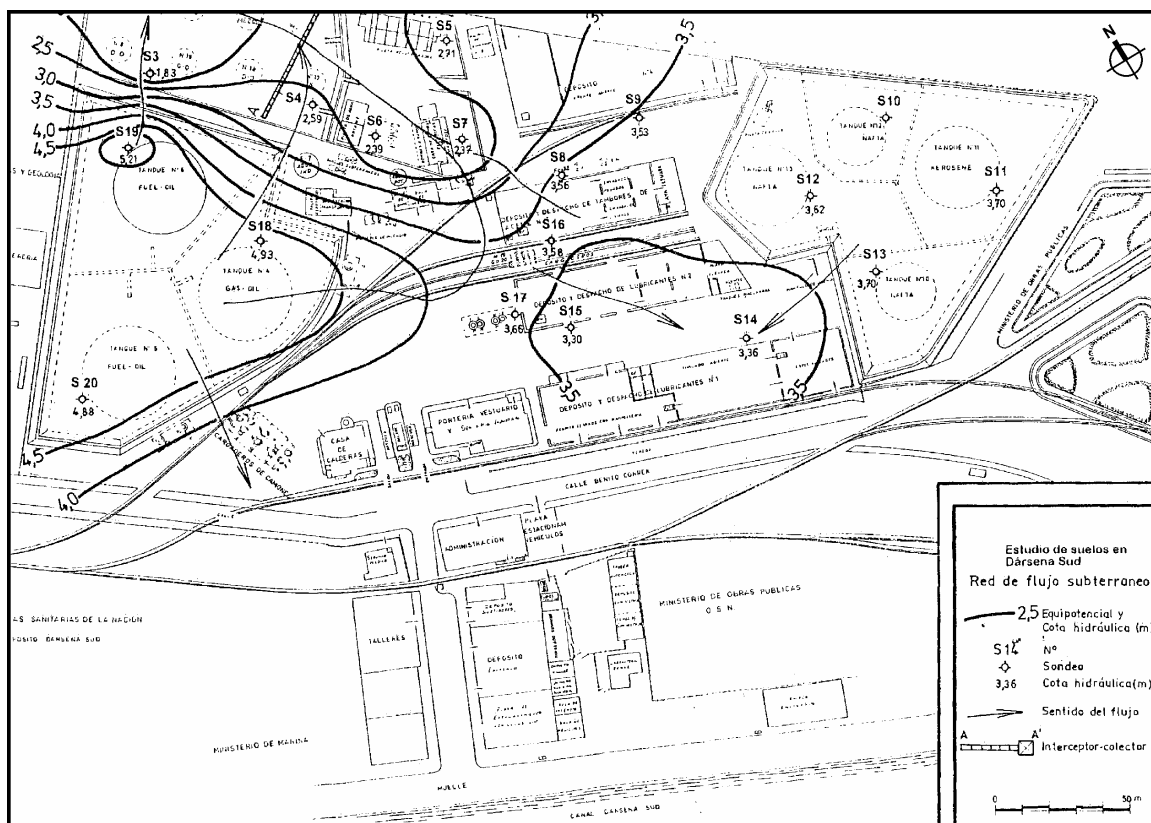


Fig. 4

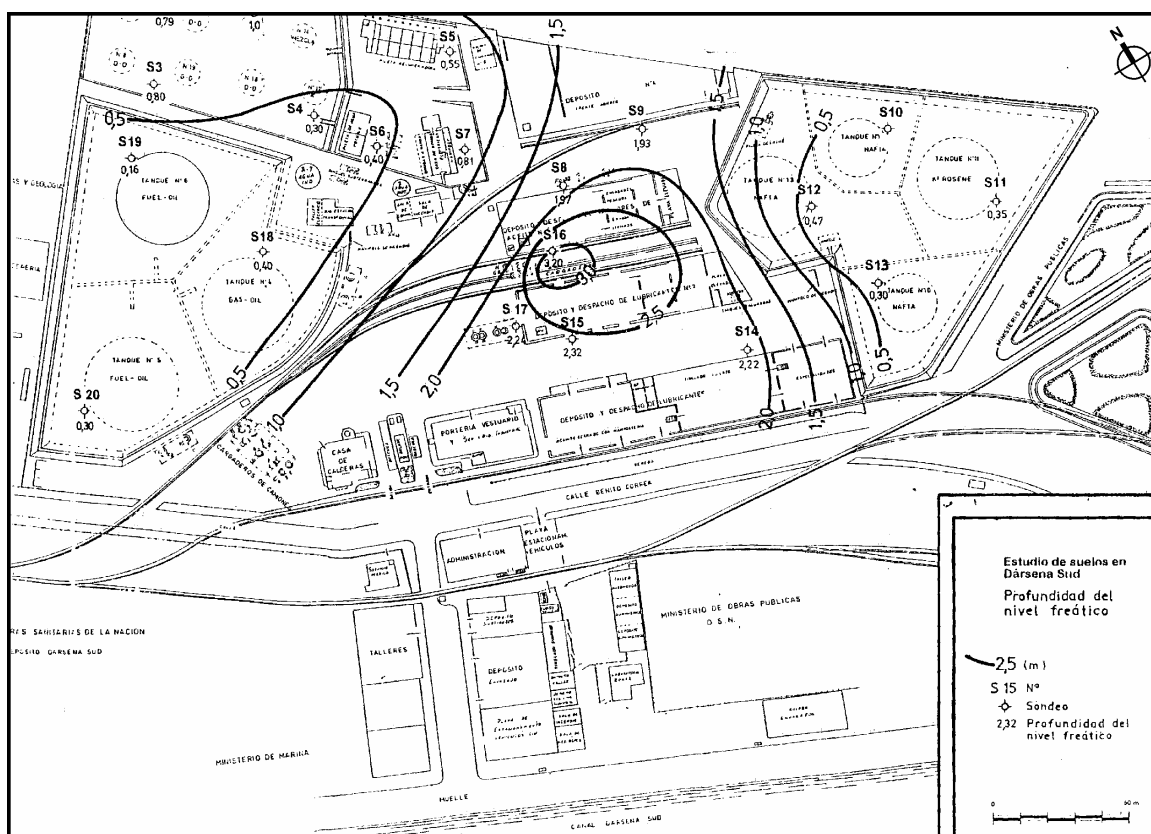


Fig. 5

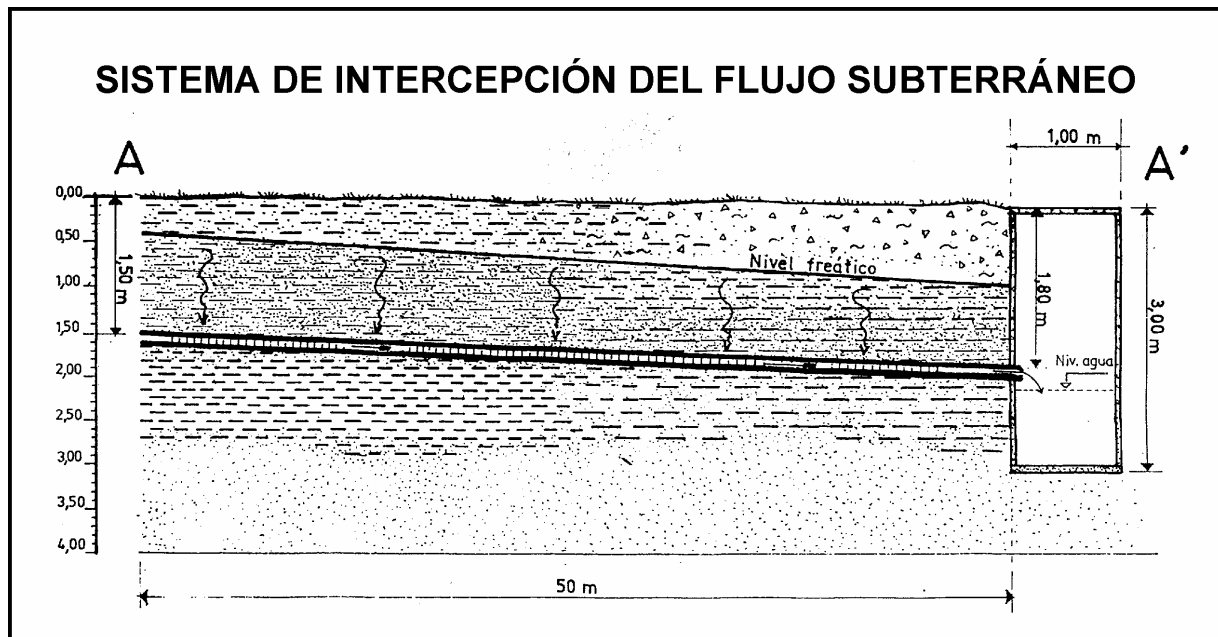


Fig. 6

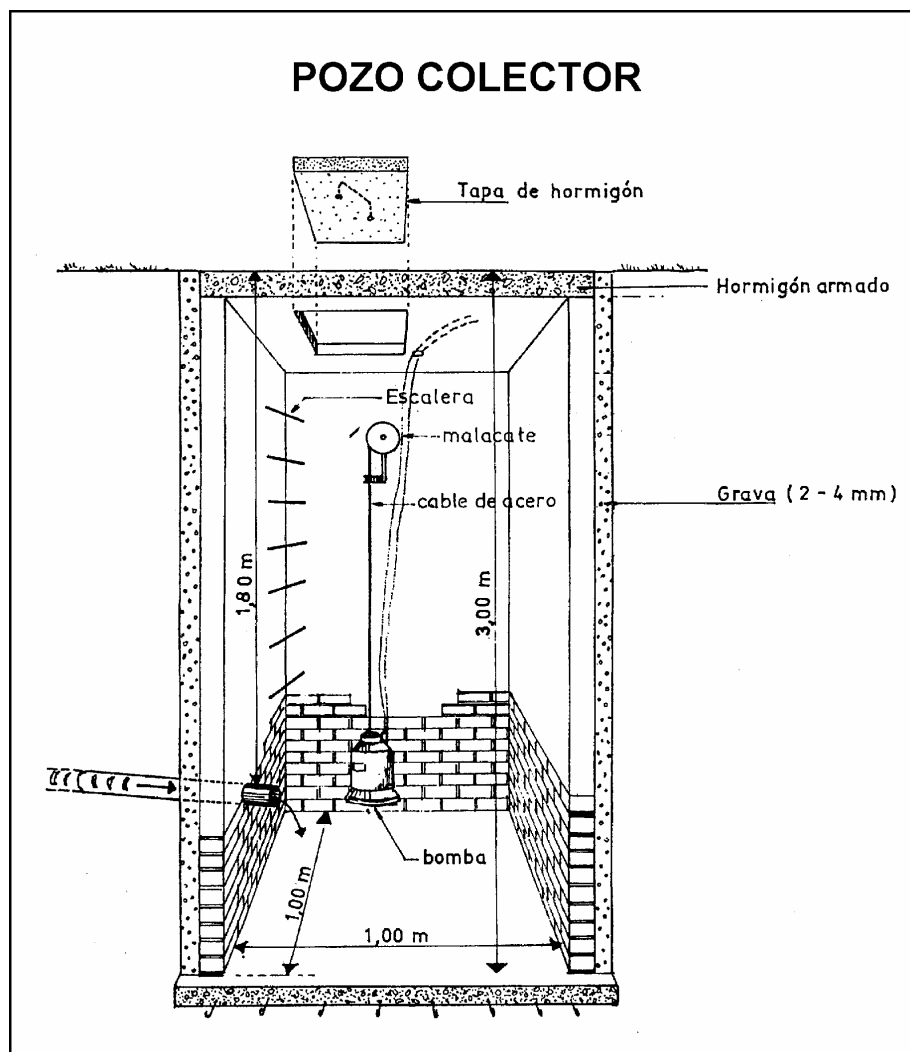


Fig. 7

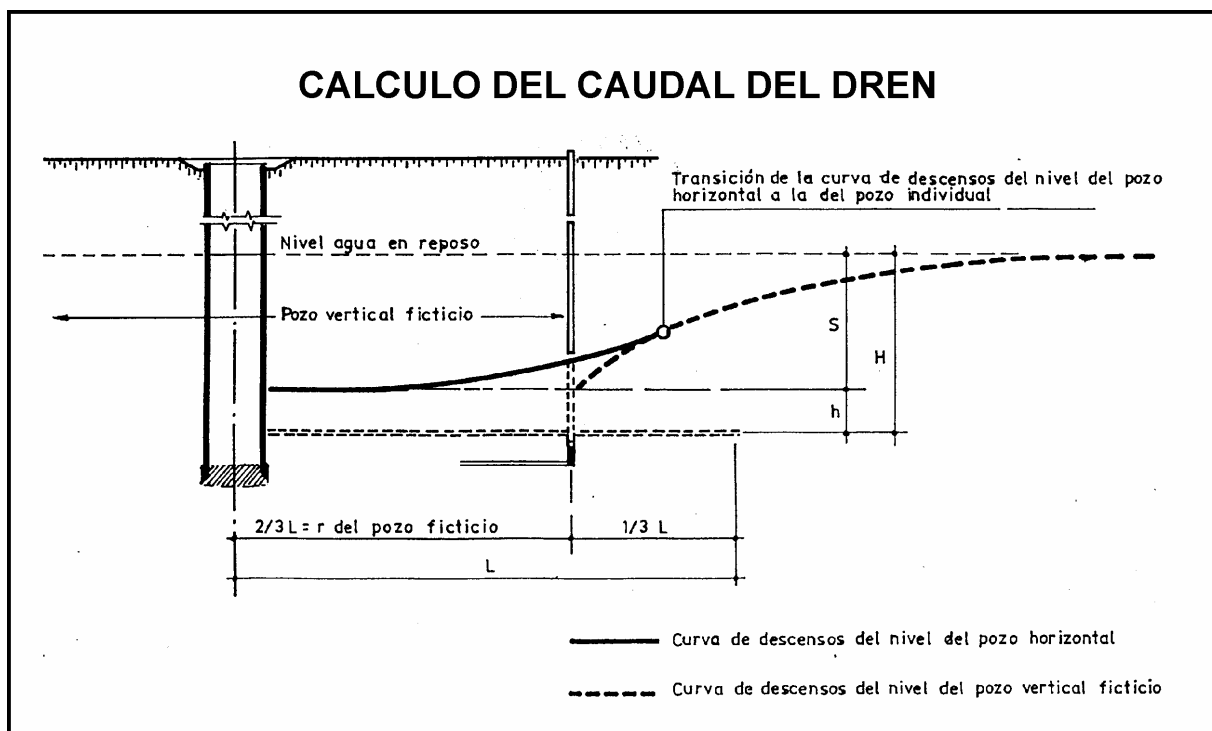


Tabla 1

**Dutch indicative values for contaminated sites**

Indicative values: A - Reference value\*\* (background value)  
 B - Indicative value for further investigation  
 C - Indicative value for cleaning-up

Presence in:	Soil (mg/kg dry weight)			Groundwater (ug/l)		
	A	B	C	A	B	C
<b>I Metals</b>						
Cr	100	250	800	20	50	200
Co	20	50	300	20	50	200
Ni	50	100	500	20	50	200
Cu	50	100	600	20	50	200
Zn	200	500	3000	50	200	800
As	20	30	60	10	30	100
Mo	10	40	200	5	20	100
Cd	1	5	20	1	2,5	10
Sn	20	50	300	10	30	150
Bo	200	400	2000	50	100	500
Hg	0,5	2	10	0,2	0,5	2
Pb	50	150	600	20	50	200
<b>II Inorganics pollutants</b>						
NH4 (as N)	-	-	-	200	1000	3000
F (total)	200	400	2000	300	1200	4000
CH (total free)	1	10	100	5	30	100
CH (total complex)	5	50	500	10	50	200
S (total)	2	20	200	10	100	300
Br (total)	20	50	300	100	500	2000
PO4 (as P)	-	-	-	50	200	700
<b>III Aromatic compounds</b>						
Benzene	0,01	0,5	5	0,2	1	5
Ethylbenzene	0,05	5	50	0,5	20	60
Toluene	0,05	3	30	0,5	15	50
Xylene	0,06	5	50	0,5	20	60
Phenols	0,02	1	10	0,5	15	50
Aromatics (total)	0,1	7	70	1	30	100
<b>IV Polycyclic aromatic compounds (PCA's)</b>						
Naphtalene	0,1	5	50	0,2	7	30
Anthracene	0,1	10	100	0,1	2	10
Phenanthrene	0,1	10	100	0,1	2	10
Fluorentrene	0,1	10	100	0,02	1	5
Pyrene	0,1	10	100	0,02	1	5
Benzo(a)pyrene	0,05	1	10	0,01	0,2	1
Total PCA's	1	20	200	0,2	10	40
<b>V Chlorinated organics compounds</b>						
Aliphatic chlor. comp. (Indiv.)	0,1	5	50	1	10	50
Aliphatic chlor. comp. (total)	0,1	7	70	1	15	70
Chlorobenzenes (Indiv.)	0,05	1	10	0,02	0,5	2
Chlorobenzenes (total)	0,05	2	20	0,02	1	5
Chlorophenols (Indiv.)	0,01	0,5	5	0,01	0,3	1,5
Chlorophenols (total)	0,01	1	10	0,01	0,5	2
Chlorinated PCA (total)	0,05	1	10	0,01	0,2	1
PCB (total)	0,05	1	10	0,01	0,2	1
ECCI (total)	0,1	8	80	1	15	70
<b>VI Pesticides</b>						
Organic chlorinated - (indiv.)	0,1	0,5	5	0,05	0,2	1
Org. chlorin. - (total)	0,1	1	10	0,1	0,5	2
Pesticides (total)	0,1	2	20	0,1	1	5
<b>VII Other pollutants</b>						
Tetrahydrofuran	0,1	4	40	0,5	20	60
Pyridine	0,1	2	20	0,5	10	30
Tetrahydrothiophene	0,1	5	50	0,5	20	60
Cyclohexanone	0,1	6	60	0,5	15	50
Styrene	0,1	5	50	0,5	20	50
Gasoline	20	100	800	10	40	150
All Mineral oil	100	1000	5000	20	200	600

Source: Soil Clean-up Guideline, 1983

Notes  
 \* to used only in relation with the local situation and the use and function of the soil  
 \*\* In the context of cleaning-up conditions

## BIBLIOGRAFIA

ARTAZA E. 1943

Saneamiento Urbano de la República Argentina. Provisión de agua y desagües urbanos. Univ. Nac. de La Plata (UNLP). C.6: 383. La Plata.

AUGE M. P., J. H. CECI, M. F. FILI y M. A. HERNANDEZ 1975

Transmisividades regionales del subacuífero Puelche en la Provincia de Buenos Aires. VI Congr. Nac. del Agua. T I: 469 - 485. Santiago del Estero.

AUGE M. P. Y M. A. HERNANDEZ 1983

Características geohidrológicas de un acuífero semiconfinado (Puelche) en la Llanura Bonaerense. Coloquio Internacional de Hidrología de Grandes Llanuras. Unesco. V III: 1019-1043. Buenos Aires- París.

AUGE M. P. 1986

Hydrodynamic behavior of the Puelche Aquifer in Matanza River Basin. Groundwater. V 25, N°5: 636 - 642. Dublin, Ohio.

AUGE M. P. 1990

Aptitud del agua subterránea en La Plata, Argentina. Seminario Latinoamericano sobre Medio Ambiente y Desarrollo. Buenos Aires.

BENITEZ, A. 1972

Captación de Aguas Subterráneas. Ed. Dossat : 454-456. Madrid

CAPPANNINI D. A. Y V. R. MAURIÑO 1966

Suelos de la zona litoral estuárica comprendida entre las ciudades de Buenos Aires al norte y La Plata al sur. INTA: 45. Buenos Aires.

CUSTODIO E. Y M. R. LLAMAS 1976

Hidrología subterránea. Ed. Omega. Barcelona.

DNGM 1949

Diez años de perforaciones, 1926-1935. Publ. 139. Buenos Aires.

DNGM 1958

Perfiles de perforaciones. Periodo 1904-1915. Pubj. 146. Buenos Aires.

DNGM 1965

Perfiles de perforaciones. Periodo 1916-1925. Publ. 152. Buenos Aires.

EASNE 1972

Contribución al estudio geohidrológico del noreste de la Provincia de Buenos Aires. CFI, Serie Técnica n°24. Buenos Aires.

EPA 1989

Groundwater sampling manual for underground storage tank sites. Dep. Env. Protec. Bureau of Oil and Hazardous Materials Control: 70. Maine.

FIDALGO F., O. DE FRANCESCO Y R. PASCUAL 1975  
Geología superficial de la Llanura Bonaerense. VI Congr. Geol. Arg. Relatorio: 103-138.  
Buenos Aires.

FRENGUELLI J. 1950  
Rasgos generales de la morfología y la geología de la Provincia de Buenos Aires.  
LEMIT. Ser.II, N° 33: 72. La Plata.

FRENGUELLI J. 1955  
Loess y limos pampeanos. UNLP Ser.Téc. y Did. N° 7: 88. La Plata.

HERNANDEZ M. A., M. F. FILI, M. P. AUGE Y J. H. CECI 1979  
Geohidrología de los acuíferos profundos de la Provincia de Buenos Aires. VI Congr.  
Geól. Arg. T II: 479-500 Buenos Aires.

INSTITUTO GEOGRAFICO MILITAR  
Carta topográfica de la República Argentina.  
Hoja 3557-7-3 Ciudad de Buenos Aires Escala 1: 50.000

LEMIT 1973 Mapa geológico de la Provincia de Buenos Aires. CR: 61. Buenos Aires.

LOGAN W. S. 1993  
Origin of the saline groundwater of the coastal plain of the Río de la Plata, La Plata,  
Argentina. Tesis doctoral. Univ. of Waterloo: 210. Waterloo, Canadá.

SALA J. M. Y M. P. AUGE 1973  
Presencia de capas filtrantes en el noreste de la Provincia de Buenos Aires. Su  
determinación. V Congr. Geol. Arg. Actas. T.V: 185 - 194. Buenos Aires.

SALA J. M. 1975  
Geología de la Provincia de Buenos Aires. Recursos hídricos. VI Congr. Geol. Arg.  
Relatorio: 169-193. Buenos Aires.

SERVICIO METEOROLOGICO NACIONAL 1985 Estadísticas climatológicas 1961 -  
1970. Estad N° 35 Buenos Aires.

SERVICIO METEOROLOGICO NACIONAL 1986 Estadísticas climatológicas 1971 -  
1980. Estad. N° 36 Buenos Aires.

SERVICIO METEOROLOGICO NACIONAL 1992 Estadísticas climatológicas 1981 -  
1990. Serie B N° 37 Buenos Aires.

STAPPENBECK R. 1926 Geologie und grundwasserkunde der Pampa. G.m.b.H: 409.  
Stuttgart.

TAPIA A. 1937 Datos geológicos de la Provincia de Buenos Aires. En Aguas Minerales.  
Com. Nac. Climat. y Aguas Min. T 11:23-90. Buenos Aires.

THEIS C. V. 1935  
The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration  
of discharge of a well using ground water storage. Trans. Am. Geophys. Union. 16:516-  
524.

THORNTHWAITE C. W. 1948 An approach toward a rational classification of climate. Rep. Geograph.Rev. V XXXVIII. N° 1: 55-94.

THORNTHWAITE C.W. Y J.R. MATHER 1957  
Instructions and tables for computing the potential evapotranspiration and the water balance. Climate Drexel Inst.of Techn. N° 10: 185-311.

YRIGOYEN M.R. 1975  
Geología de la Provincia de Buenos Aires. Geología del subsuelo y plataforma continental. VI Congreso Geológico. Argentino. Relatorio. Buenos Aires.

YRIGOYEN M. R. 1983  
Morfología y geología de la Ciudad de Buenos Aires. Evaluación e incidencia geotécnica. Asoc. Arg. Geol. Apl. Ing. VII: 7 -38. Buenos Aires.

ZAMBRANO J. J. 1974  
Cuencas sedimentarias en el subsuelo de la Provincia de Buenos Aires y Zonas adyacentes. RAGA. T XXIX, N° 4: 443-469. Buenos Aires.