

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

BUENOS AIRES 2004

ÍNDICE

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

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 m³/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 acuícludo, 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 Km² 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 m³/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 m³/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 m²/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 ($T=1$ m²/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 m³/h por lo que con 20, se llegará a 24 m³/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 m³/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 m³/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, N° 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

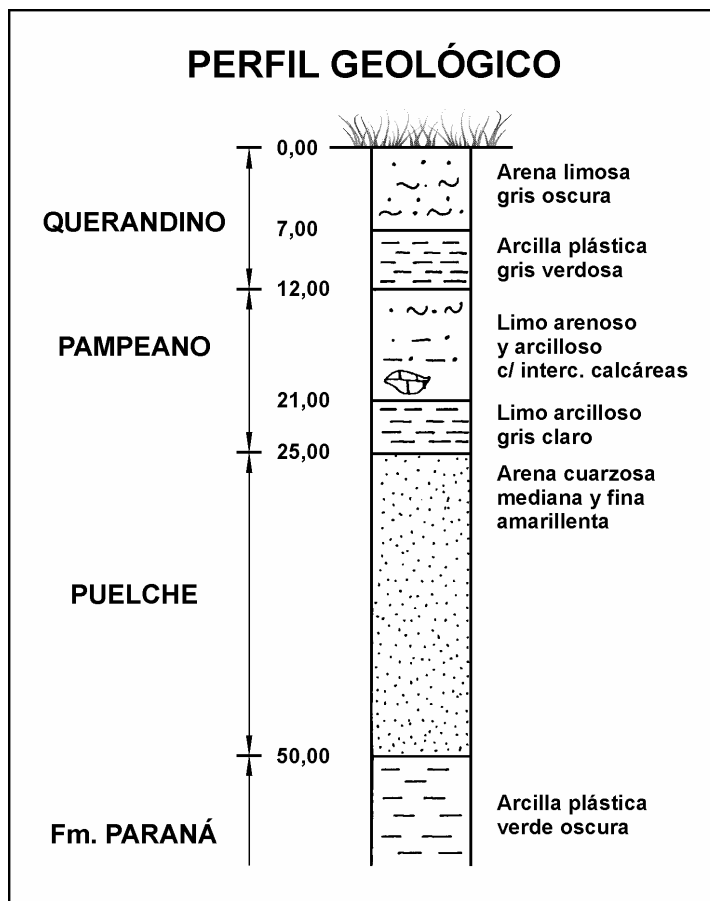
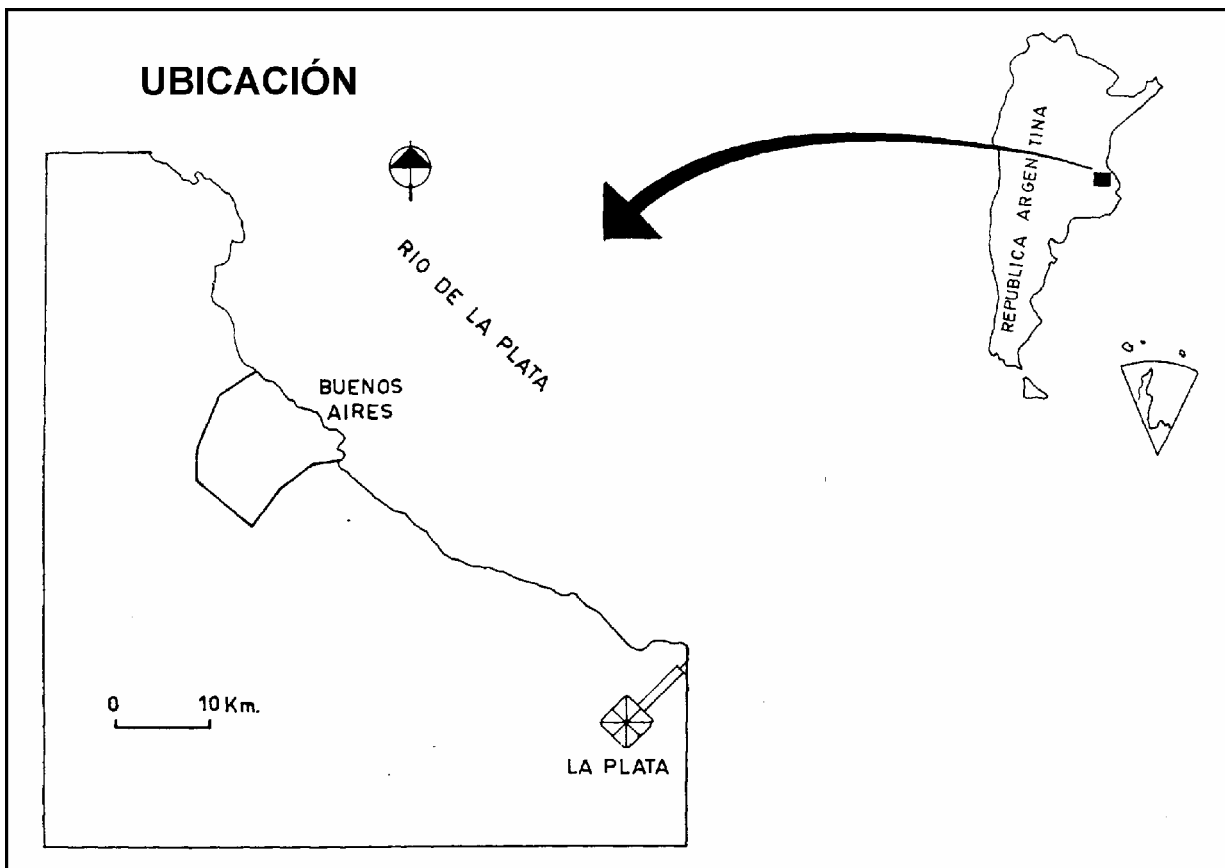


Fig. 2

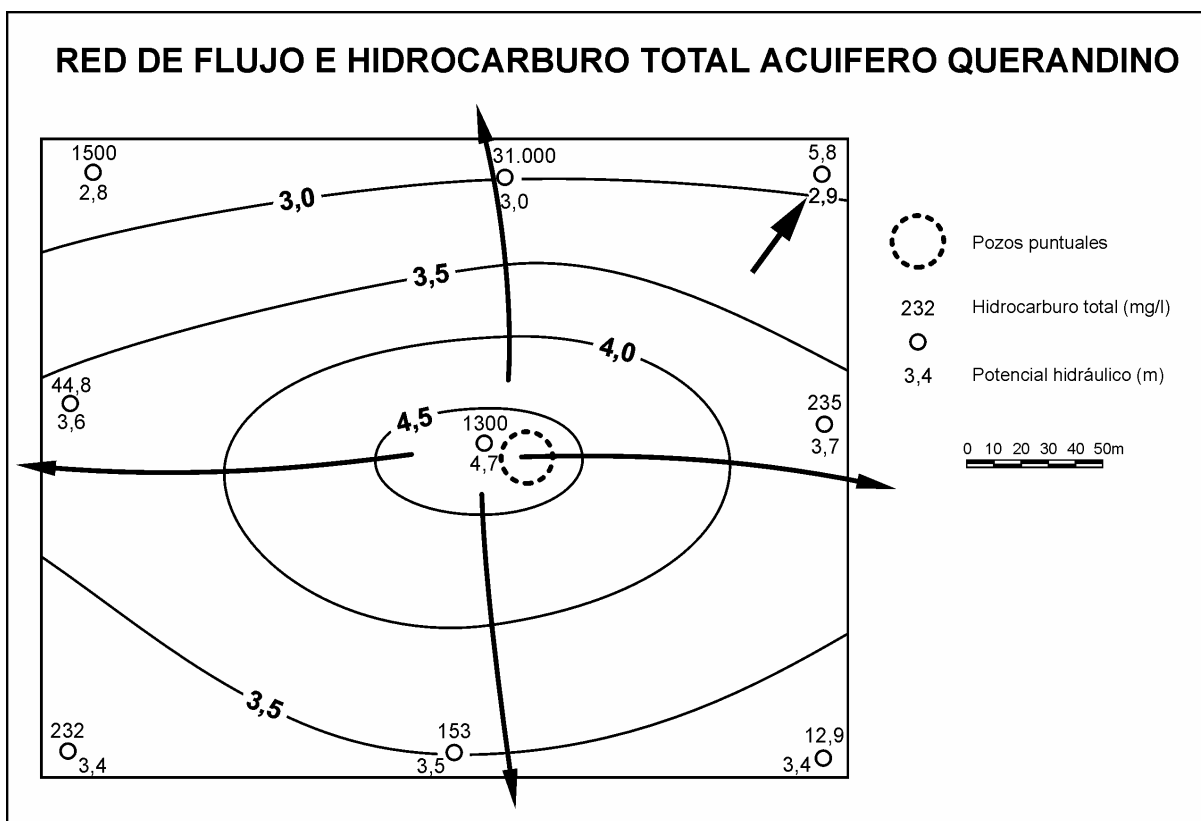


Fig. 3

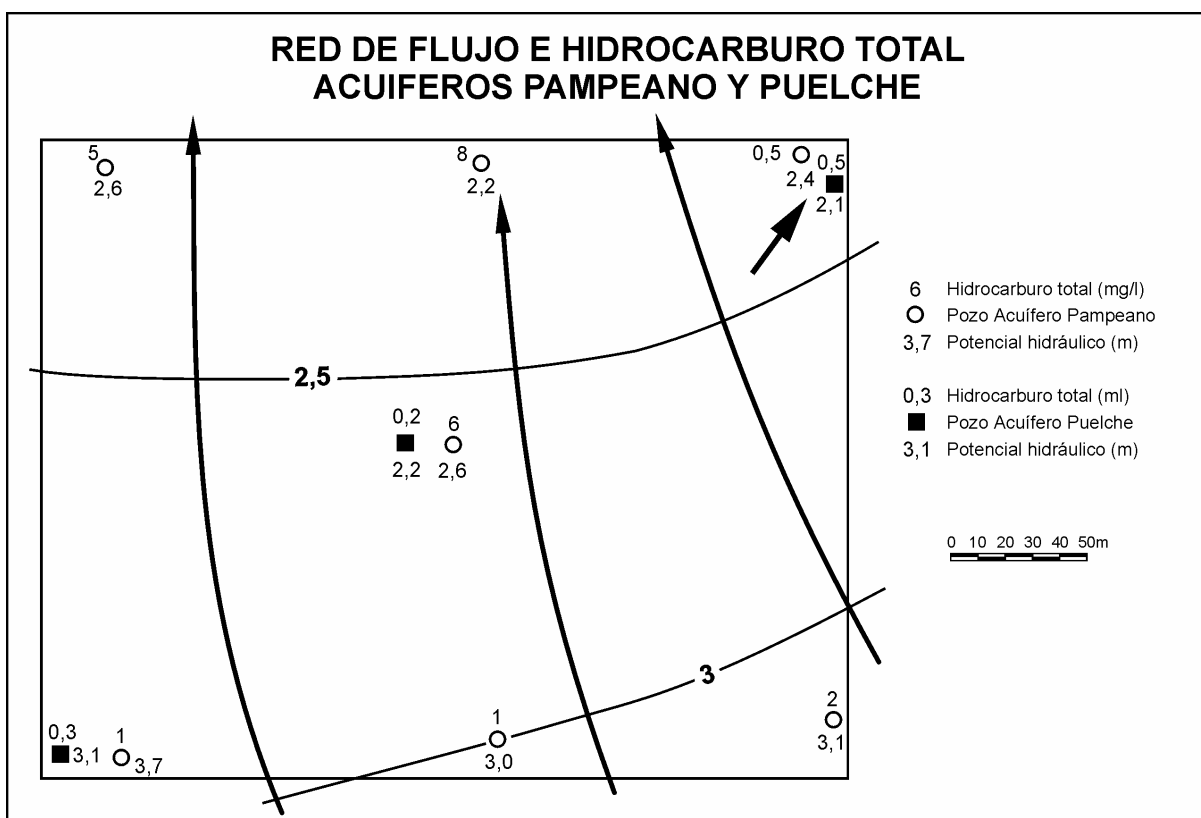


Fig. 4

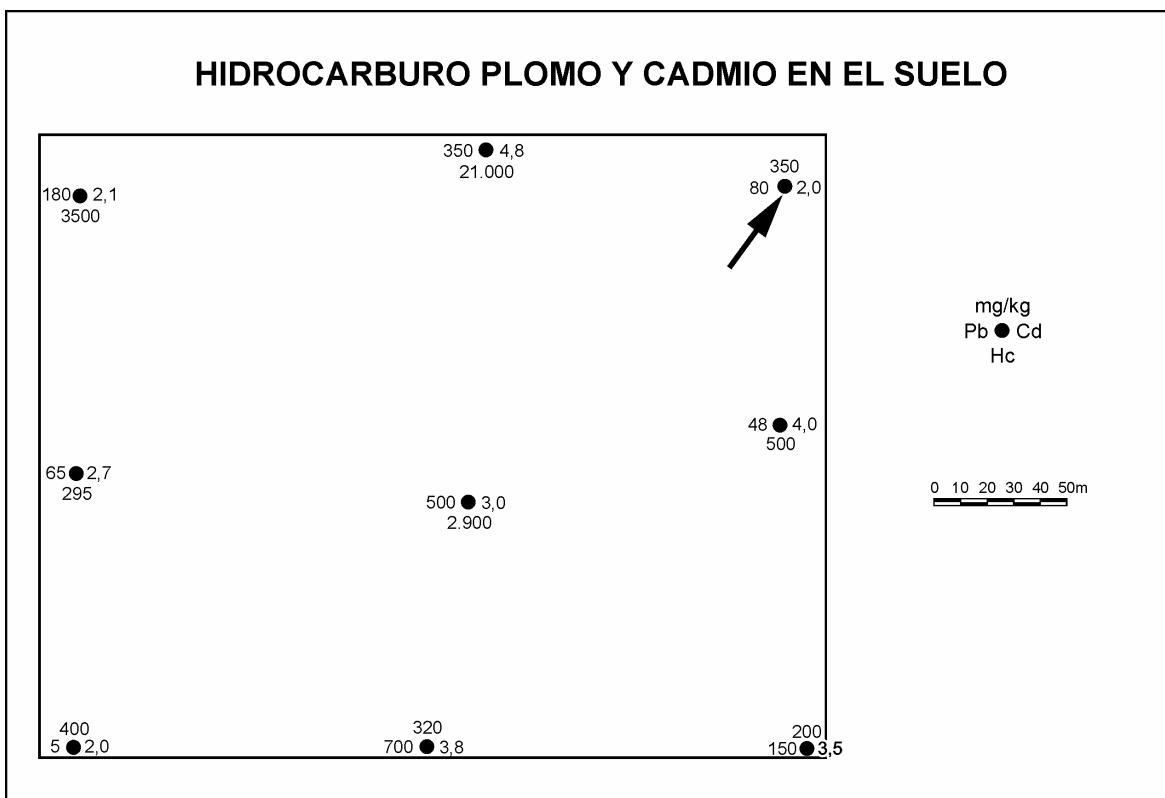


Tabla 1

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
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	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
II Inorganics pollutants						
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
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	0,06	5	50	0,5	20	60
Phenols	0,02	1	10	0,5	15	50
Aromatics (total)	0,1	7	70	1	30	100
IV Polycyclic aromatic compounds (PCA's)						
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
V Chlorinated organics compounds						
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
VI Pesticides						
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
VII Other pollutants						
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 m² y afecta a un volumen de suelo de 2.230 m³, 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 m³.

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

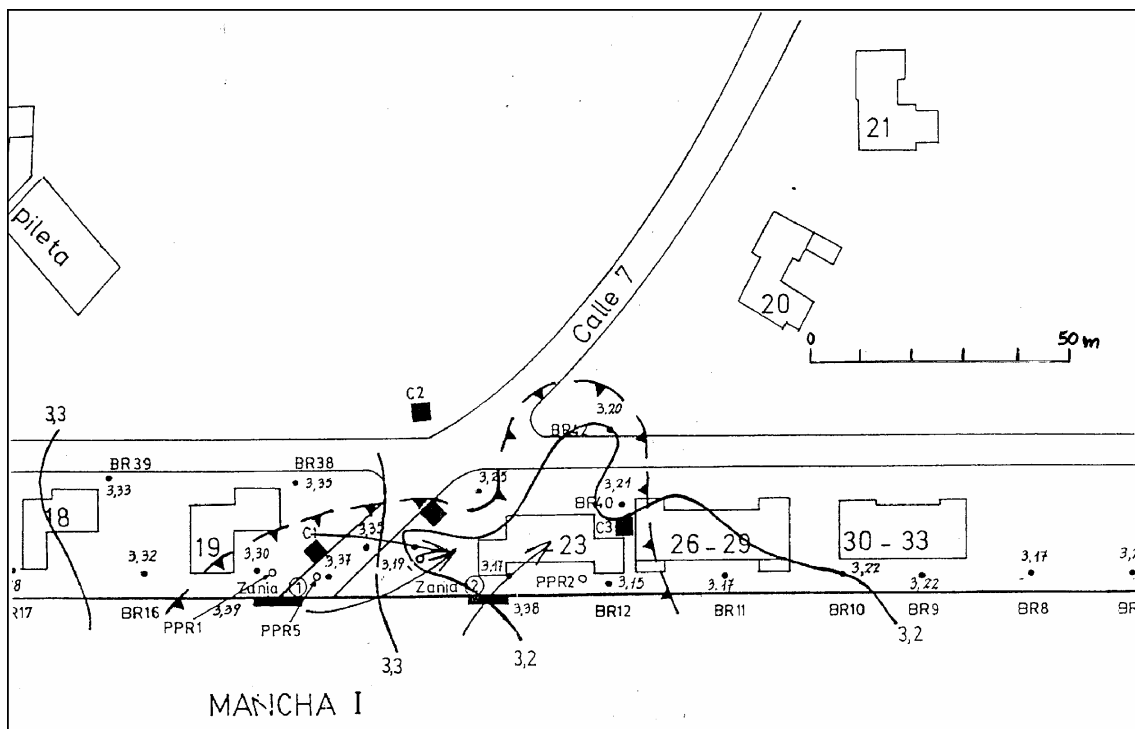


Fig. 2

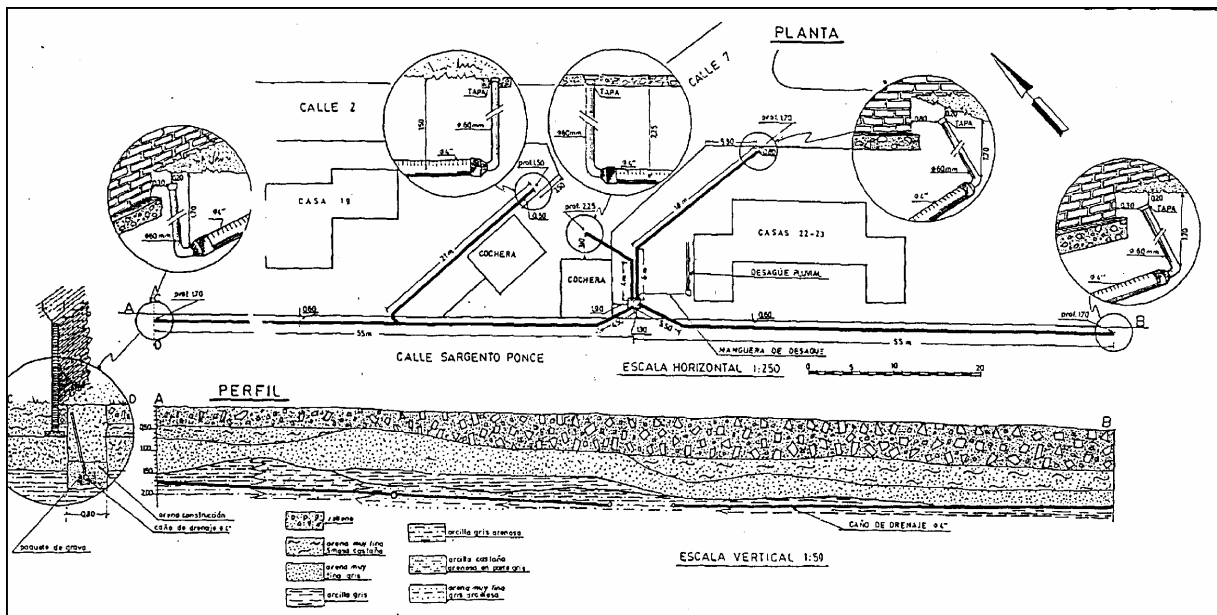
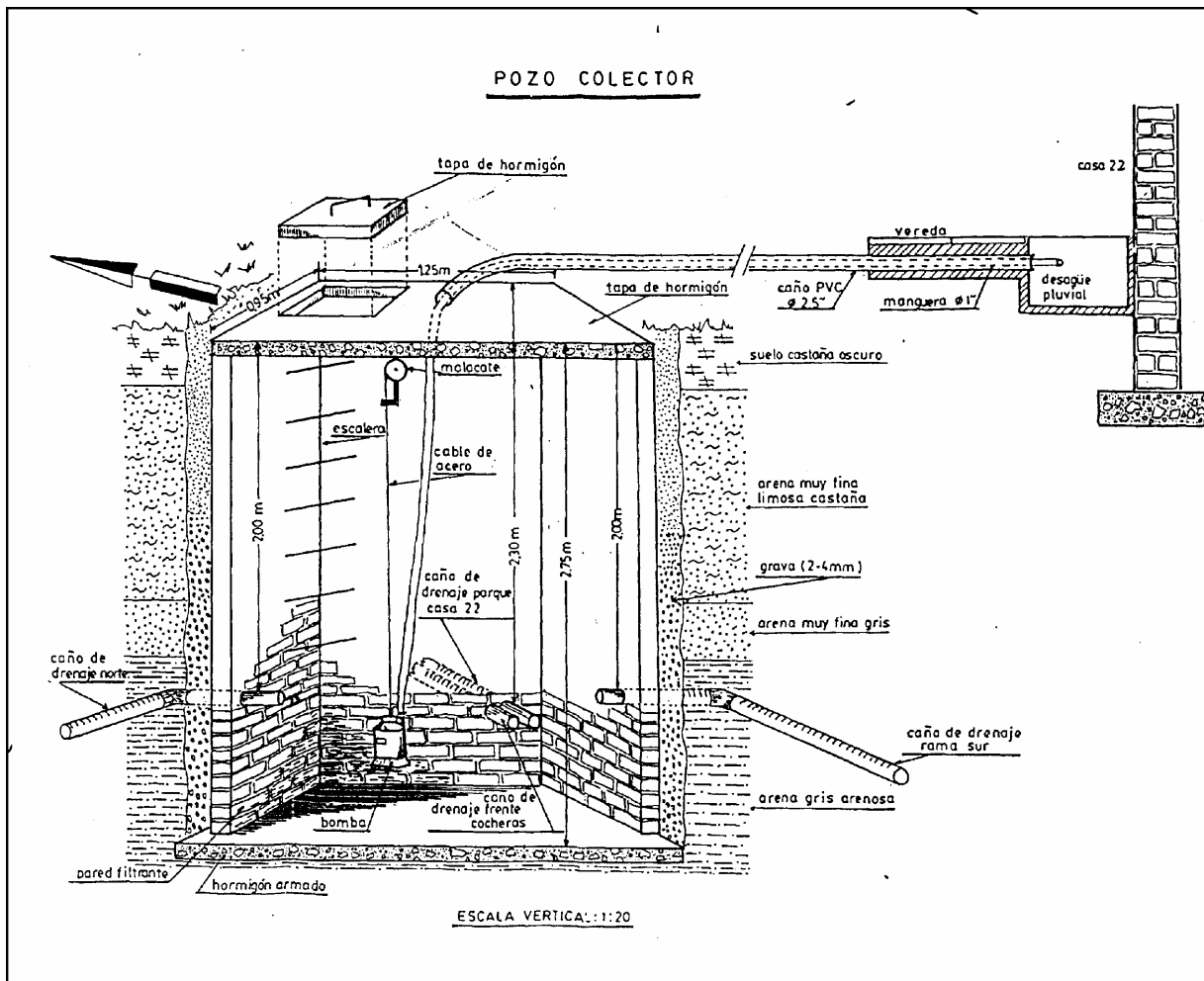


Fig. 3



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 m² y afectan unos 7.500 m³ 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 mas 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 m³/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 km², 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 SO₄⁻, 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 SO_4 (de 5,0 a 5,8 g/l) y en 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 m² y verticalmente se extiende hasta 1,5 m de profundidad, lo que implica un volumen de suelo contaminado de 3.600 m³.

Le sigue en importancia la mancha I, en la depresión situada inmediatamente al NO de la anterior, con 2.200 m² 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.

mancha	superficie (m²)	espesor (m)	volumen (m³)
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 m³, de los cuales se consideran técnica y económica factibles de mejoramiento, aproximadamente 7.500 m³ (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 m³.

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 ϕ 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 m³/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 (m³/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 m³ 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

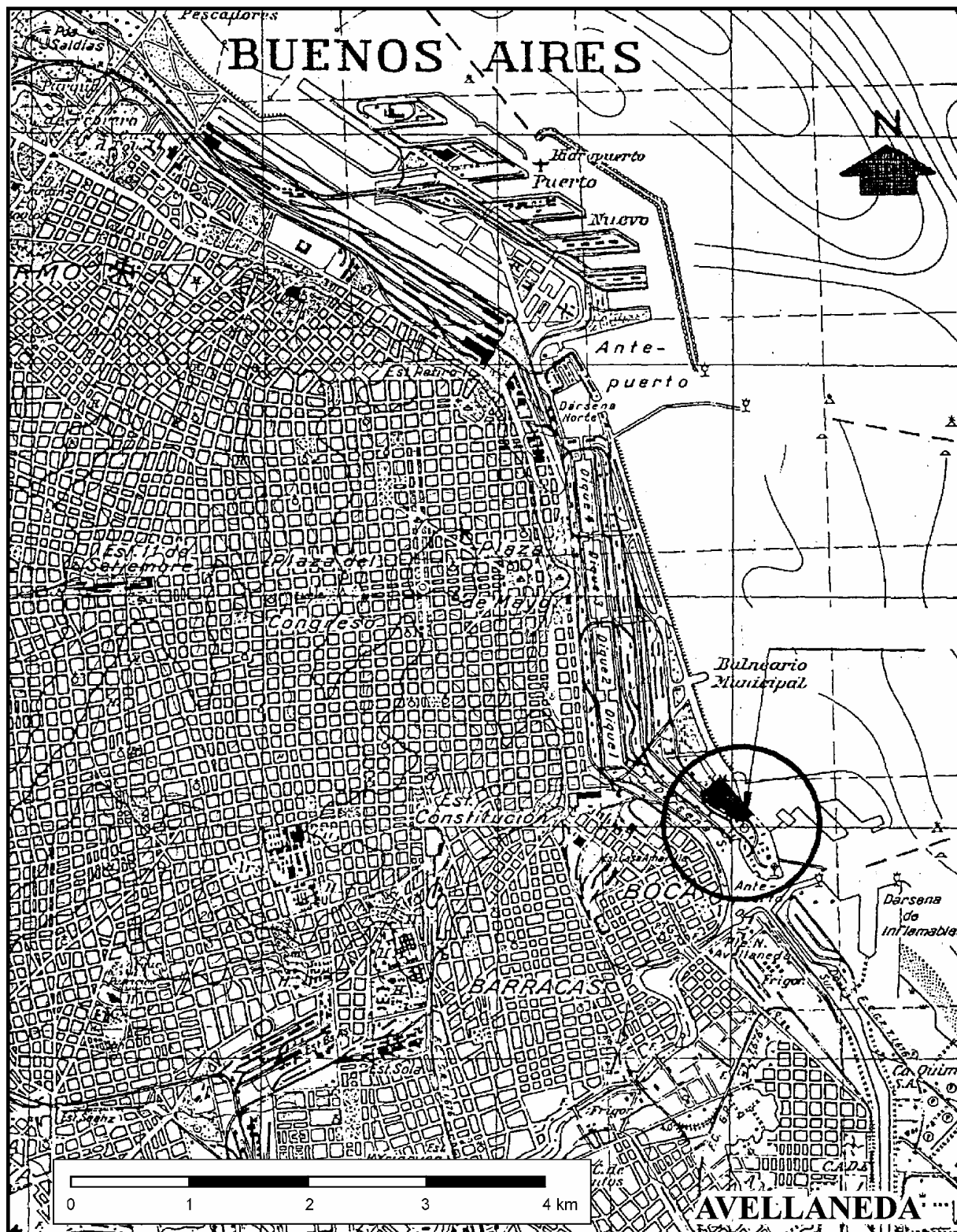


Fig. 2

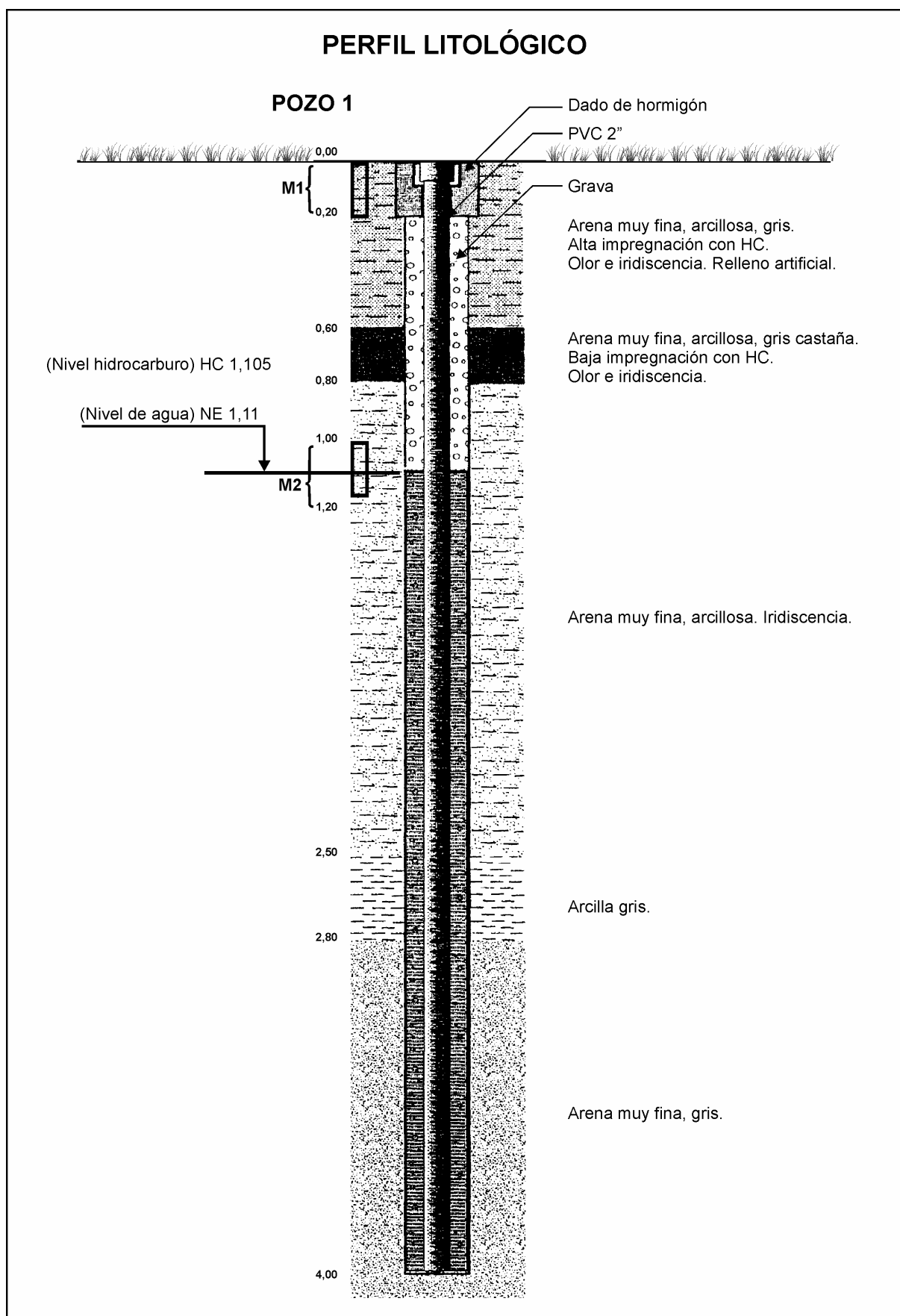


Fig. 3

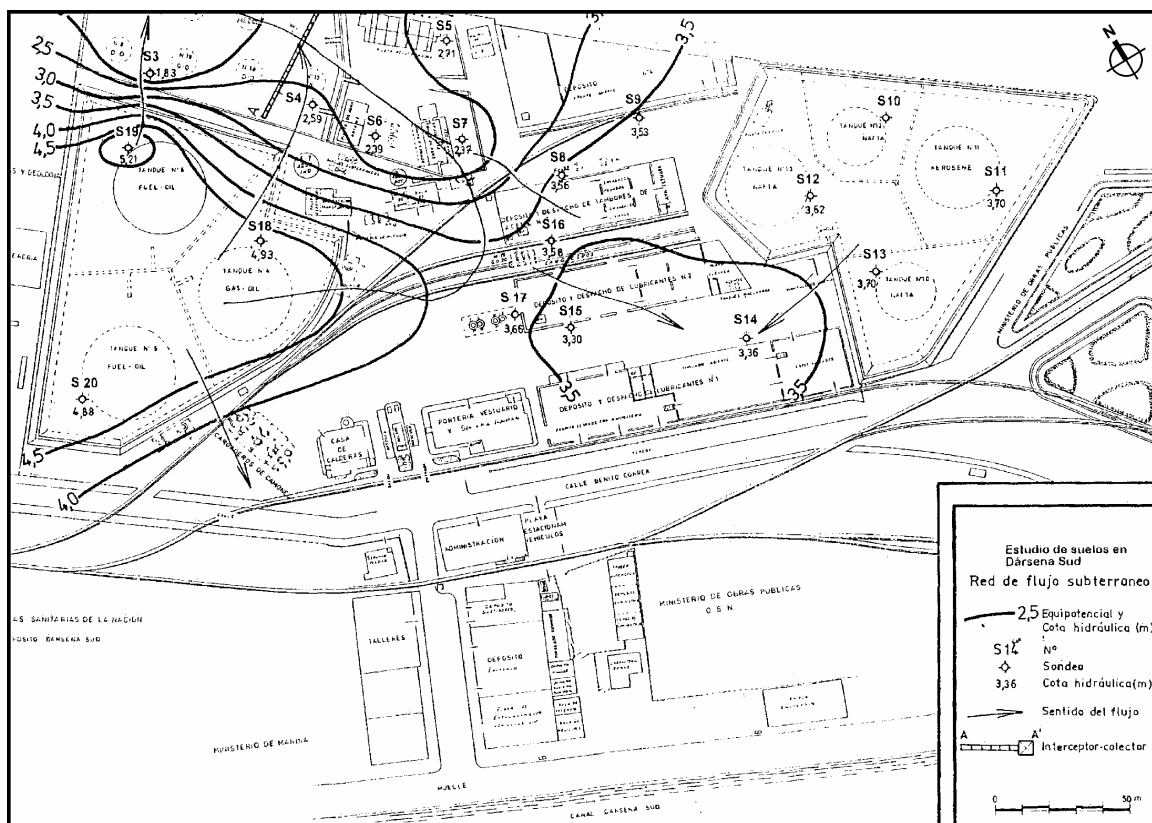


Fig. 4

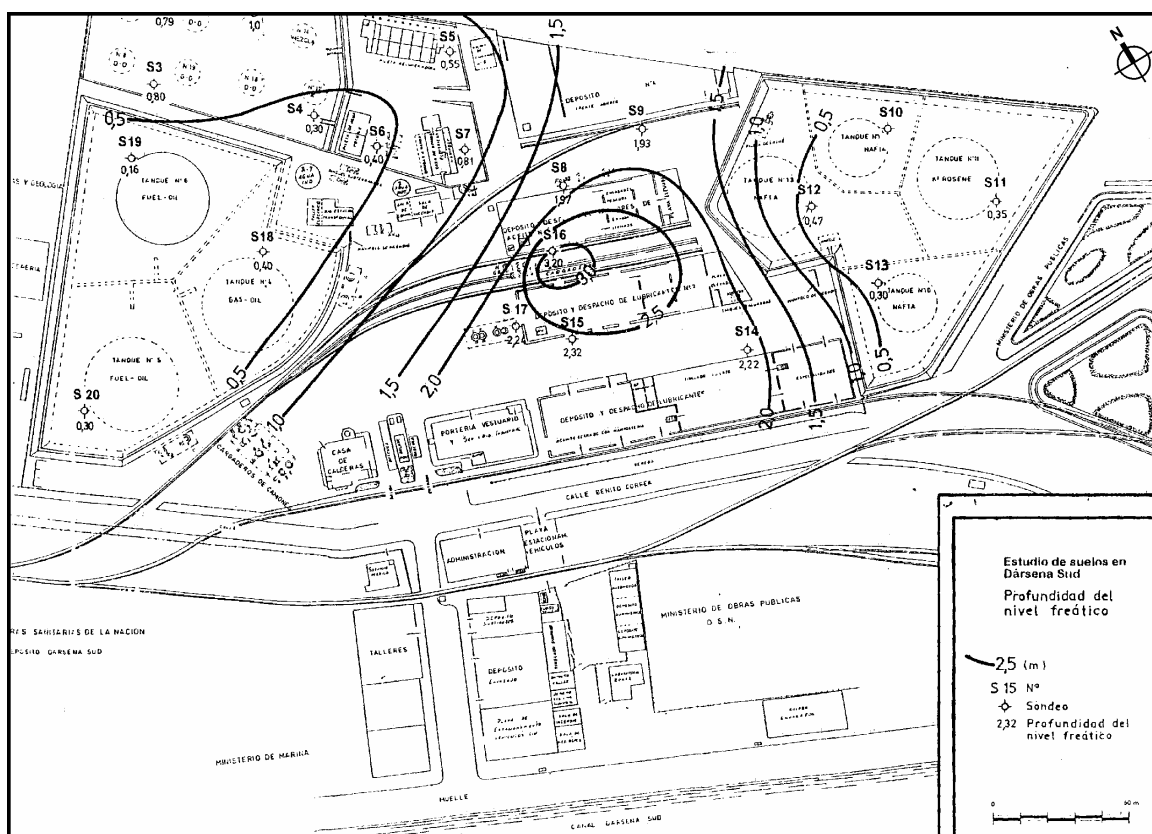


Fig. 5

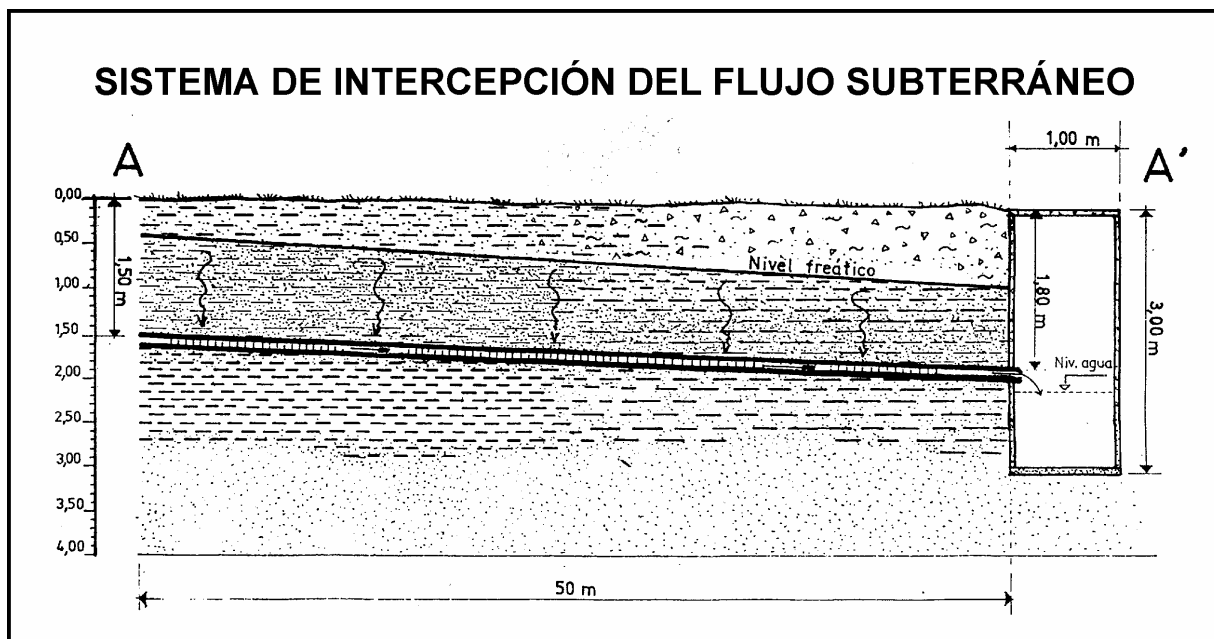


Fig. 6

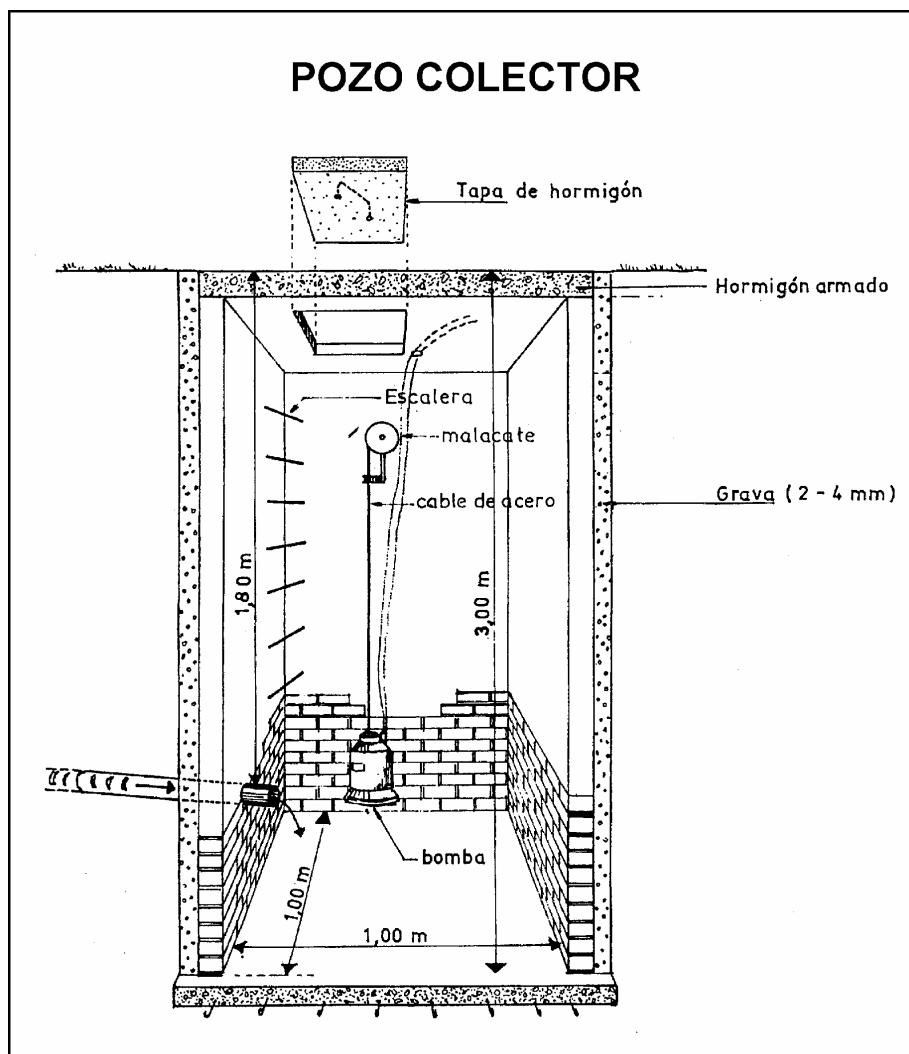


Fig. 7

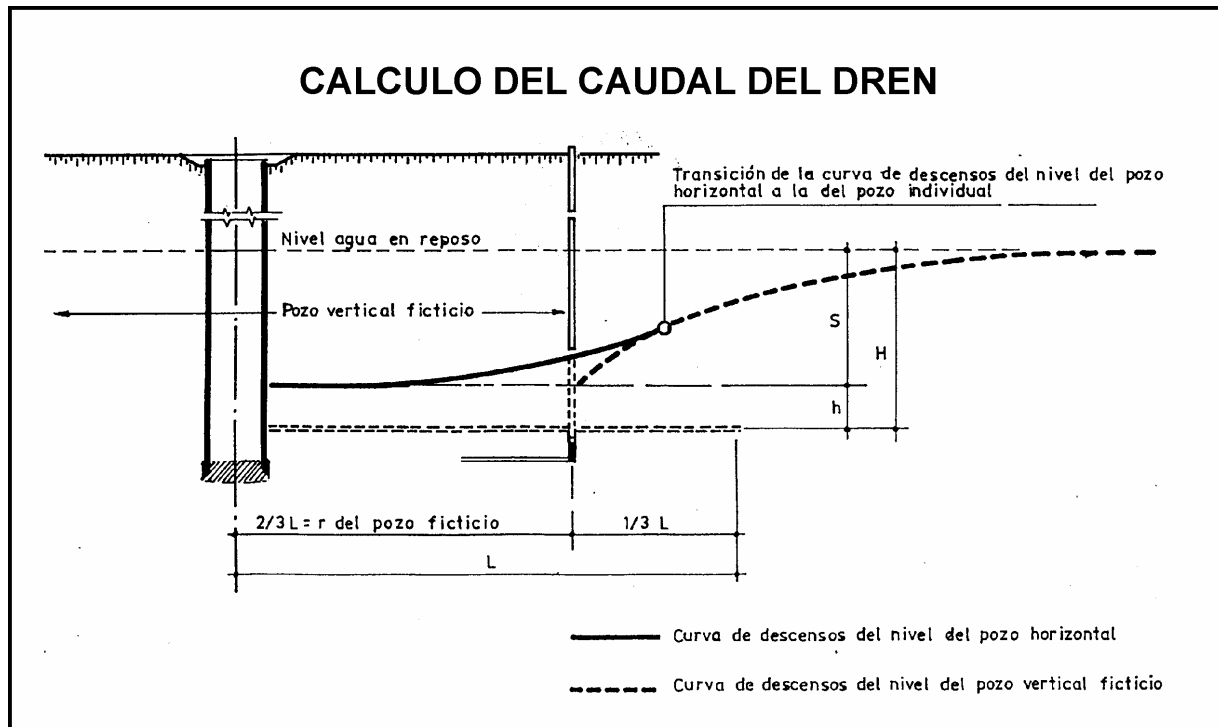


Tabla 1

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
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	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
II Inorganics pollutants						
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
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	0,06	5	50	0,5	20	60
Phenols	0,02	1	10	0,5	15	50
Aromatics (total)	0,1	7	70	1	30	100
IV Polycyclic aromatic compounds (PCA's)						
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
V Chlorinated organics compounds						
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
VI Pesticides						
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
VII Other pollutants						
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.