*Ecología Austral 15:31-47. Junio 2005*
*Asociación Argentina de Ecología*

# Distribución de elementos traza en las aguas subterráneas del Partido de Escobar, Buenos Aires, Argentina

ADRIÁN SILVA BUSSO✉ & JORGE SANTA CRUZ

*Instituto Nacional del Agua, Ezeiza*

**RESUMEN.** Se estudió la afectación ambiental de aguas subterráneas, incluyendo factores de origen humano, en las cuencas inferiores de los ríos Luján, Escobar y Garín en el partido de Escobar, Provincia de Buenos Aires, Argentina. Se determinó la hidroquímica mediante un inventario de perforaciones, muestreo de pozos y cursos superficiales, relevamientos de fuentes de contaminación potencial y selección de indicadores de contaminación. Se elaboró un SIG con mapas base, georeferenciamiento y base de datos asociada y se confeccionó la cartografía temática para analizar relaciones. Se llevó a cabo un relevamiento del uso de la tierra y se realizó un análisis multivariado para establecer las asociaciones y los orígenes de los elementos traza presentes en el agua subterránea. En la Sección Epiparaneana se detectaron las siguientes concentraciones en el agua: Cr 0.6 a 50 µg/L, Cd 18 µg/L, Cu entre 4 y 160 µg/L, Fe entre 0.11 y 177 mg/L, Mn entre 0.03 y 1.44 mg/L, As entre 0.002 y 0.041 mg/L, F entre 0.1 y 1.5 mg/L. El Zn presentó valores de entre 200 y 800 µg/L en el acuífero Pampeano y de 20 a 160 µg/L en el acuífero Puelches. Los valores de los isótopos D y $^{18}O$ fueron similares en ambos acuíferos, tanto en perfiles verticales como geográficos, permitiendo establecer una relación hidrodinámica entre ambos, así como definir su vínculo con el ciclo hidrológico actual. Los valores de tritio presentaron una clara disminución en profundidad. La asociación natural del F y del As se relacionó con la litología de los sedimentos Pampeanos; el contenido en nitratos de las aguas subterráneas y los valores de coliformes totales presentaron una elevada correlación (r = 0.85), ambos relacionados con la presencia de sectores urbanos sin servicios de saneamiento. El registro de valores relevantes de ciertos microelementos (Fe, Mn, Cu y Zn) se relacionó con el uso agrícola intensivo, mientras que la de otros (Pb, Co, Ni y Cr) mostró una estrecha vinculación con el uso industrial del suelo. La comparación entre los mapas temáticos mostró una superposición de las áreas de diferente asociación y usos del suelo.

[Palabras clave: hidrogeología, hidrogeoquímica, uso de la tierra, contaminación, riesgo]

**ABSTRACT. Distribution of trace elements in the groundwater of the Escobar County, Buenos Aires, Argentina**: In the lower basins of the Luján, Escobar and Garín rivers, Escobar County, Province of Buenos Aires, Argentina, a regional pollution study was carried out in order to determinate the chemical and biological groundwater affectations, including natural and human factors. Hydrochemistry included well data, well samples, surface water samples, pollution sources and pollution indicators. A GIS was developed including a base map, georeferenced data and associated databases. The preparation and use of thematic cartography was used to analyse relationships. We analysed and detected groundwater contamination in areas with different land use. Water and soil samples were analyzed by multivariate methods so as to evaluate the relationship between trace elements and land use. In the Epiparaneana section we found the following concentrations: Cr between 0.6 and 50 µg/L, Cd between 3 and 18 µg/L, Cu between 4 and 160 µg/L, Fe between 0.11 and 177 µg/L, Mn between 0.03 and 1.44 mg/L, As between 0.002 and 0.041 mg/L, and F between 0.1 and 1.5 mg/L. Zn concentration was between 200 and 800 µg/L in the Pampeano aquifer, and between 20 and 160 µg/L in the Puelches aquifer. D and

✉ Instituto Nacional del Agua, Ruta Ezeiza Cañuelas Km 1,620 Ezeiza.
pntsas@ina.gov.ar

*Recibido: 29 de mayo de 2003; Fin de arbitraje: 11 de agosto de 2003; Revisión recibida: 2 de septiembre de 2003; Segunda revisión recibida: 17 de mayo de 2004; Tercera revisión recibida: 28 de mayo de 2004; Aceptado: 11 de agosto de 2004*

$^{18}O$ isotopes were similar in vertical and horizontal distribution, establishing a hydrodynamic relationship between Epipuelches-Puelches section. The values showed a vertical decrease with depth. The natural association between F and As was related to the Pampeano silts. We found a significant correlation between nitrates and total coliformes (r = 0.85) related to urban use without sanitation services. Fe, Mn, Cu, Zn were related to intensive agricultural use, while Pb, Co, Ni and Cr showed a strong relation to industrial land use. Thematic maps showed a clear overlapping within areas of different association trace and land uses.

[Keywords: Hydrogeology, hydrogeochemistry, pollution, risk, land use]

## INTRODUCCIÓN

La región estudiada abarca las cuencas inferiores de los ríos Luján, Escobar y Garín y está ubicada a orillas del Delta del río Paraná, a 50 km al NO de la ciudad de Buenos Aires, Argentina. Abarca 317 km$^2$ y tiene una población de 150000 habitantes (Fig. 1).

La región presenta un clima húmedo con una precipitación media de 1020 mm/año, una temperatura media anual de 16ºC y una evapotranspiración potencial de 795 mm/año. Se estima un exceso hídrico de 225 mm/año, distribuido de abril a noviembre y repartido entre escurrimiento superficial e infiltración. Corresponde a la unidad fisiográfica denominada 'Pampa Ondulada' (Frenguelli 1950), que incluye la cuenca inferior del Río Luján y subcuencas afluentes del mismo. Los arroyos más importantes son el Burgueño y el Pinazo que, en su confluencia, dan origen al arroyo Escobar y al arroyo Garín, ambos afluentes del río Luján en su margen derecha. El Partido de Escobar presenta un uso de la tierra muy diverso, siendo fundamentalmente industrial, comercial, agropecuario y urbano. La denominada subregión hidrogeológica Río Paraná (Santa Cruz & Silva Busso 1999) se extiende desde la Cuenca del Río Salado al sur y sudoeste, hacia el norte hasta al menos el meridiano 33°30' o lo bajos submeridionales, al este hasta el Río Paraná y al oeste hasta aproximadamente el paralelo 62°30'. Los principales acuíferos de esta región se caracterizan por la estratigrafía e hidroestratigrafía detallada en la tabla 1.

Hidrogeológicamente se diferencian en el área tres grandes unidades: Epiparaneano, Paraneano e Hipoparaneano, según la definición del EASNE (1972) y redefinido en sucesivos trabajos (Sala et al. 1983; Santa Cruz & Silva Busso 1999). La secuencia estratigráfica de la región puede resumirse en una serie de paquetes de sedimentos de origen eólico (González Bonorino 1965) y fluvial (Santa Cruz 1972), considerados como la primera Sección Epiparaneana que contiene los acuíferos Pampeano y Puelches (Sala et al. 1983). La denominación Sección Epipuelches, ampliamente utilizada en la bibliografía, contendría los acuífero Pampeano, el acuífero libre y eventualmente aquellos acuíferos o acuitardos relacionados con los sedimentos Post-Pampeanos.

**Tabla 1**: Estratigrafía e hidroestratigrafía de los acuíferos más importantes de la subregión Hidrogeológica I del Río Paraná.

**Table 1**: Stratigraphy and hydrostratigraphy of the most important aquifers included in the hydrogeological subregion I of the Paraná River.

| Estratigrafía | Hidroestratigrafía | Acuíferos Principales |
|---|---|---|
| Sedimentos Pampeanos | Epiparaneano | Acuífero Pampeano |
| Formación Puelches | Epiparaneano | Acuífero Puelches |
| Formación Paraná | Paraneano | Acuífero Paraná |
| Formaciones Olivos y/o Mariano Boedo | Hipoparaneano | Acuitardo |
| Basamento Cristalino | Basamento Hidrogeológico | Acuífugo |

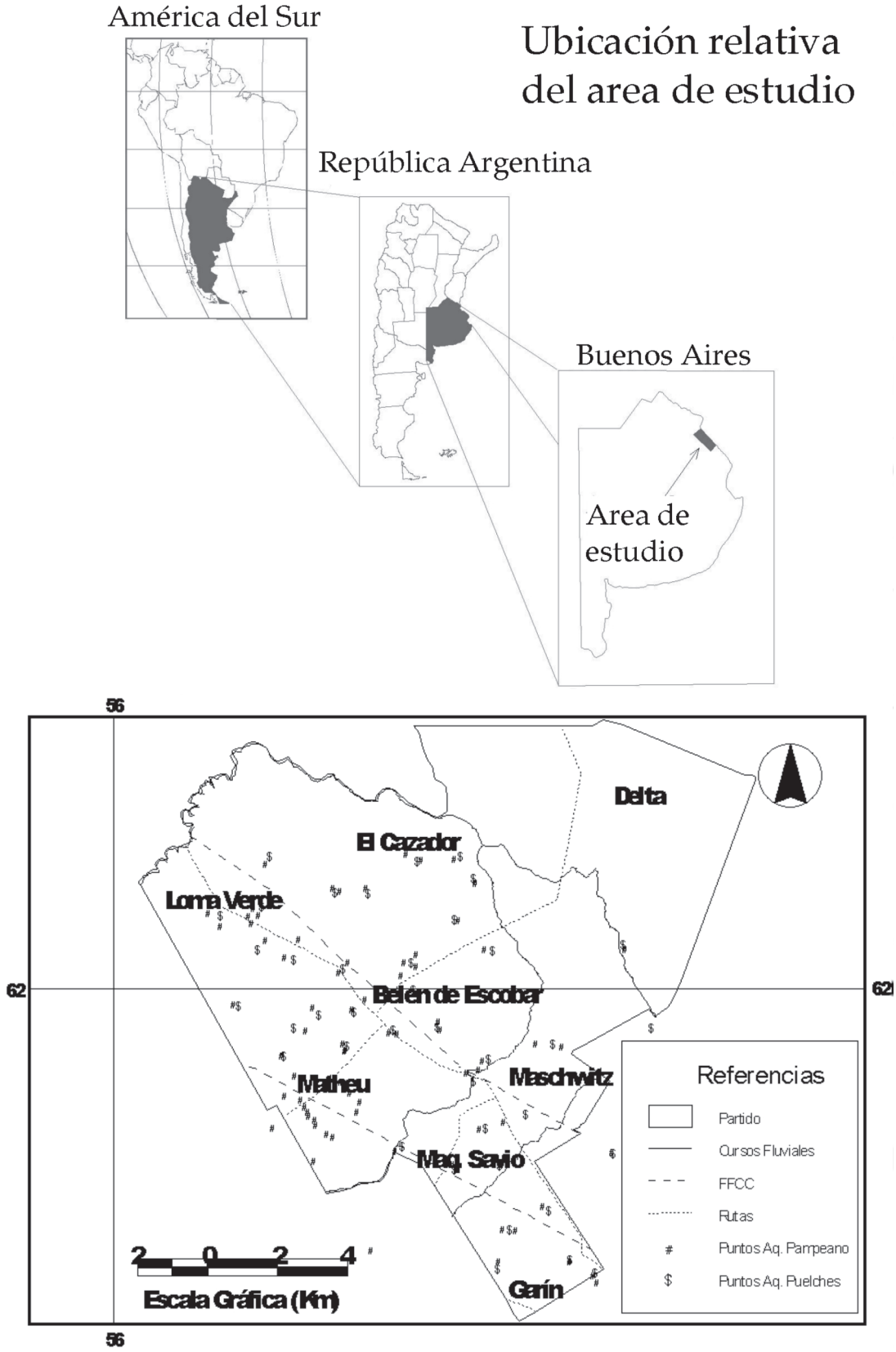


**Figura 1**. Mapa de ubicación del área de estudio y puntos de muestreo

**Figure 1**. Location map and sampling points in the study area

La sección Epipuelches corresponde a los acuíferos representados por los sedimentos Pampeanos, cuya litología es de limos arcillosos de origen eólico (loess) y los Post-Pampeanos, fundamentalmente arenas y arcillas marinas, deltaicas y fluviales. Es la sección Puelches la que corresponde a los acuíferos de la Formación Puelches (Santa Cruz 1972), arenas medias a finas de origen fluvial, situados a profundidades que varían entre 35 y 56 m.b.b.p. (metros bajo boca de pozo).

En la Sección Epiparaneana se distinguen hidráulicamente dos acuíferos: el superior denominado Pampeano, semilibre, con valores de transmisividad entre 150 y 200 $m^2$/día y coeficiente de almacenamiento del orden de $10^{-2}$ (adimensional) (según Santa Cruz & Silva Busso 1999); y el inferior denominado acuífero Puelches, semiconfinado y con conexión hidráulica vertical con el acuífero Pampeano que permite la recarga del acuífero Puelches y eventual paso de contaminantes. Los valores de transmisividad varían entre 300 y 400 $m^2$/día y el coeficiente de almacenamiento es del orden de $10^{-3}$ (Santa Cruz & Silva Busso 1999). Los valores freatimétricos oscilan entre 10 a 5 m.s.n.m. y las cotas topográficas varían entre 2.5 y 25 m.s.n.m., coincidiendo principalmente las áreas de recarga con los sectores topográficamente más elevados, y las zonas de descarga con los cauces de los ríos y arroyos (Fig. 2).

En general, el medio urbano puede definirse como un dominio geoquímico abierto, donde los elementos traza se comportan de igual forma que lo harían en el medio natural, es decir, siguiendo ciclos hidroquímicos (De Miguel et al. 2002). Muchos de los trabajos relacionados con ciclos geoquímicos se relacionan con el material particulado sedimentado, suelos y polvo urbano, habiendo, en muchos casos, intentado cuantificar y determinar las potenciales fuentes de contaminación (Wilken et al. 1995).

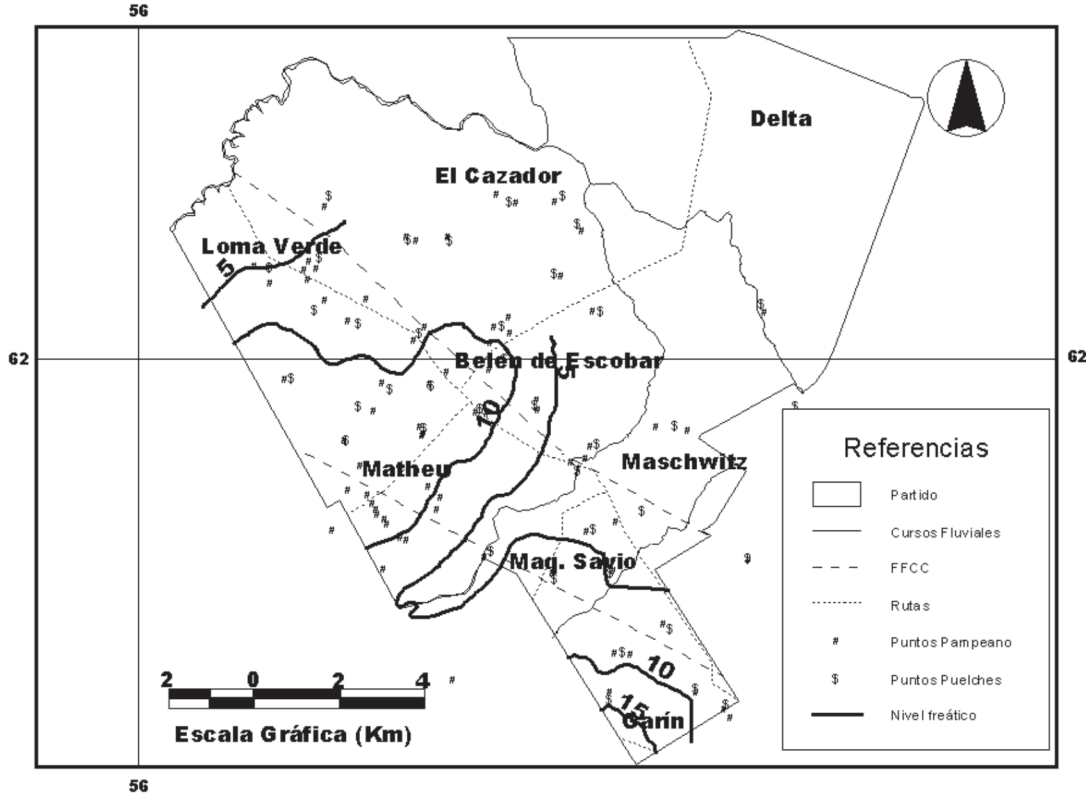


**Figura 2**. Mapa Piezométrico Acuífero Pampeano (Santa Cruz et.al., 1999)

**Figure 2**. Piezometric map Pampeano Aquifer in the study area

Las asociaciones hidrogeoquímicas en aguas subterráneas de ambientes naturales han sido estudiadas en Argentina por diversos autores. Nicolli et al. (1985) relacionaron las asociaciones naturales de As, F y Vd con la presencia de vidrio volcánico en los sedimentos Pampeanos; Merino (1995) estableció la relación entre el Se presente en litología y los recursos hídricos en el Valle de Calamuchita; Fresina (2002) apuntó las asociaciones entre parámetros físicos hidrodinámicos e hidroquímicos a nivel de cuenca. Sin embargo, es escasa la bibliografía en casos de asociaciones hidrogeoquímicas en áreas urbanas por poseer los mismos inconvenientes que los relacionados con el material particulado.

El objetivo de este trabajo es determinar las agrupaciones y asociaciones hidrogeoquímicas naturales y antrópicas en el agua subterránea de la Sección Epiparaneana, relacionar dichas asociaciones con el uso de la tierra en la zona de estudio y establecer criterios para los estudios de riesgo de contaminación.

También se pretende establecer una relación entre el uso de la tierra y presencia de determinados elementos traza en el suelo, teniendo en cuenta que la recarga vertical es el principal mecanismo de recarga de los acuíferos regionales de la región Pampeana (Sala & Auge 1970; EASNE 1972).

## MATERIALES Y MÉTODOS

Se utilizó la metodología propuesta por Santa Cruz et al. (2000) basada fundamentalmente en la determinación de las características hidrológicas relacionadas con la hidroestratigrafía local, determinación de velocidades, y dirección del flujo, funciones hidráulicas del acuífero y análisis isotópico. Los aspectos hidroquímicos fueron estudiados a partir de tareas de inventario de perforaciones, muestreo de pozos y cursos superficiales, relevamientos de fuentes de contaminación potencial y selección de indicadores de contaminación. En todos los casos, las bases de datos incluyeron códigos y coordenadas, completando los tres requisitos para organizar un SIG: mapas base, georeferenciamiento y base de datos asociada. En el campo se utilizó el GPS (geoposicionador satelital) para asignar coordenadas geográficas. A partir de estas técnicas se confeccionó la cartografía temática siendo esta la herramienta utilizada para producir documentos cartográficos que tienen por finalidad orientar, planificar y apoyar la investigación del recurso agua subterránea.

### *Muestreo de agua*

Se tomaron muestras de la Sección Epiparaneana (acuíferos Puelches y Pampeano) de perforaciones preexistentes (ASTM 1981). La densidad de muestreo fue de 1 muestra de agua por cada 3 $km^2$, resultando en 90 muestras finales (Fig. 1). Si bien se muestreó en perforaciones preexistentes de ambos acuíferos independientemente, la información de elementos traza se analizó en conjunto para la Sección Epiparaneana, ya que Silva Busso & Santa Cruz (2003), en base a un análisis estadístico de la información hidroquímica, determinaron que ambos acuíferos se encuentran relacionados. Esto permitió definir características hidrogeoquímicas en común para cada acuífero.

La región del conurbano bonaerense casi no posee zonas naturales relativamente prístinas para tomas muestras representativas del medio natural, por lo que se consideró que las trazas analizadas no son de origen natural.

Las muestras de agua se tomaron con una celda de aislamiento de flujo continuo a fin de evitar el flujo turbulento con la consecuente disolución o escape de gases. Dicha celda, es adecuada para obtener las mediciones de temperatura, conductividad eléctrica y pH lo más cerca posible a los valores prevalecientes dentro de sus reservorios naturales, ya que dentro de la celda es mínima la interacción del agua con la atmósfera y por lo tanto la oportunidad de escape e intercambio de gases. Durante el muestreo se utilizaron procedimientos como el agregado de $HNO_3$ (1 ml/L a 0.1 N), el uso de envases esterilizados para las muestras destinadas a bacteriología y la conservación de las muestras a 4°C.

Los análisis químicos realizados incluyeron pH, conductividad eléctrica (CE), los cationes Ca, Mg, Na y K, los aniones cloruros ($Cl^-$), sulfatos ($SO_4^{2-}$), carbonatos ($CO_3^-$), y bicarbonatos ($HCO_3^-$), nitratos ($NO_3^-$), y los elementos

traza Cu, Zn, Fe, Mn, As, F, Cr, Cd, Co, y Pb. También se llevaron a cabo análisis bacteriológicos y de isótopos: $^{18}O$, D y T, según la metodología establecida por EPA (1986).

El principio general de la datación a partir de isótopos, cualquiera sean los mismos, parte del principio de que el agua contiene una concentración, denominada $\mathbf{c}_o$, de un isótopo considerado durante su infiltración, y una concentración del mismo isótopo, denominada $\mathbf{c}_t$, en el momento de su extracción, a partir de la cual se establece la siguiente expresión general (Custodio & Llamas 1983) donde $t = T/0{,}0.693 \ln (c_o/c_t)$, siendo t la edad de agua. Solo se analizaron cinco muestras de cada acuífero como una primera aproximación en función del acceso a la captación.

*Usos de la tierra*

Para la discriminación del uso actual de suelo se sintetizaron datos de las fotos aéreas de la Dirección de Geodesia de la Provincia de Buenos Aires en escala 1/20000, la cartografía IGM escala 1/50000 y trabajo de campo.

El 'uso urbano' se identificó de acuerdo al concepto de aglomeración, definido como aquellas áreas con calles, manzanas y construcciones de cualquier tipo. Se consideró 'uso agropecuario con insumos' cuando existe una práctica agrícola frecuente en parcelas menores de 3 ha, donde se utilizan maquinaria, sistemas de riego, agroquímicos y pesticidas, las parcelas se presentan ordenadas y puede haber cultivos alternados. Se incluyó dentro de 'uso de suelo relacionado a la agricultura extensiva sin insumos', a parcelas de más de 3 ha en las que se realizan monocultivo sin técnicas avanzadas ni uso de fertilizantes y agroquímicos. Las 'zonas de actividad industrial' se definieron a partir de la categorización industrial y observación del terreno, estableciéndose dos variantes: industrias individuales y parques industriales. Se incluyó también como actividad industrial a grandes galpones para el procesamiento de materias primas, plantas automotrices y fábricas proveedoras de materiales de construcción. Debe considerarse un notable déficit de equipamiento para el tratamiento de efluentes urbanos e industrial. Posteriormente, se ubicaron las industrias por categoría de riesgo ambiental en localidades del partido de Escobar de acuerdo a la reglamentación provincial vigente.

*Análisis estadístico*

A fin de establecer asociaciones y orígenes de elementos traza, se realizó un análisis multivariado factorial y de agrupamiento. El análisis de agrupamiento de variables fue realizado sobre el total de las muestras de la Sección Epiparaneana, empleándose el método de unión de Ward y de correlación de Pearson (Davies & Wixson 1987; Sánchez Gómez & Ramos 1987).

## RESULTADOS

*Caracterización hidrogeológica*

Las aguas de los acuíferos Pampeano y Puelches presentaron facies hidroquímicas bicarbonatadas sódicas en casi toda la región estudiada, evolucionando a cloruradas sódicas hacia las áreas de descarga que corresponden a las planicies de inundación de los cursos fluviales. El pH del agua subterránea osciló entre 7.04 y 8.03, y los valores de la conductividad eléctrica fueron de entre 800 y 5000 µS/cm.

Si bien los resultados fueron similares en ambos acuíferos, tanto en perfiles verticales como geográficos, los valores para $^{18}O$ en el acuífero Pampeano tuvo valores de entre –5.6 y –5.4% (D.E ± 0.1‰), mientras que en el acuífero Puelches los mismos oscilaron entre –5.1 y –5.0‰ (D.E. ± 0.1‰). Los valores del D en el acuífero Pampeano variaron entre –33 y -31 ‰ y en el acuífero Puelches entre –28 y -29‰ (D.E. ± 1.0‰).

Los valores de T presentaron una clara disminución con la profundidad, pasando de 5.7 - 6.6 UT (unidades tritio) en el acuífero Pampeano, a 2.1 - 4.0 UT en el acuífero Puelches. Los valores actuales de T de la recarga actual son de entre 6 y 9 UT. Debe considerarse que la media anual de precipitaciones para la región de estudio sería de aproximadamente 1169 mm (promedio de cuatro estaciones meteorológicas cercanas: Ezeiza, Buenos Aires, Castelar y Aeroparque).

*Relaciones y asociaciones hidrogeoquímicas*

Las concentraciones de nitratos en las aguas subterráneas reflejaron una amplia dispersión: de entre 5 y 125 mg/L en el acuífero Pampeano, y de entre 10 y 120 mg/L en el acuífero Puelches. La presencia de bacterias, en términos del porcentaje de muestras positivas, fue del 80% y 10% de *Escherichia coli* y del 40% y 20% de *Pseudomonas sp.* en los acuíferos Pampeano y Puelches respectivamente.

Los metales pesados que en la Sección Epiparaneana presentaron mayor concentración y persistencia en el área estudiada fueron el Cr (entre 0.6 a 50 mg/L) y el Cd (entre 3 a 18 mg/L). La concentración de Zn en dicha Sección fue de entre 200 y 800 µg/L en el acuífero Pampeano, y de entre 20 y 160 mg/L en el acuífero Puelches. El Cu presentó un rango de concentración de entre 4 y 160 µg/L en toda la Sección Epiparaneana. Las concentraciones de Fe y Mn en esta Sección, presentaron valores de entre 0.11 y 177 mg/L y 0.03 y 1.44 mg/L, respectivamente. El As presentó valores de entre 0.002 y 0.41 mg/L, y el F de entre 0.1 y 1.5 mg/L.

En cuanto a la asociación natural de As y F, los valores, si bien no muy elevados para la región pampeana, fueron la única relación natural.

En las Figuras 3 y 4 se presenta el agrupamiento de componentes principales para las variables analizadas, aunque se han identificado otras tres asociaciones en la Sección Epiparaneana, representadas en las mismas figuras. La Asociación I, es la que vincula As y F; la Asociación II es la que vincula nitratos y coliformes totales; la Asociación III agrupa Fe, Mn, Cu y Zn; y la Asociación IV agrupa Pb, Co, Ni, Cr, siendo probable que en esta última se incluya al Cd, aunque creemos que debido a que el muestreo no fue lo suficientemente representativo la correlación no era significativa si se lo incluía en el análisis. Se ha optado por analizar separadamente la Asociación II y III en el análisis debido a que la Asociación II ha sido identificada por diversos autores como relacionada al uso urbano (op.cit.).

Los mapas de isoconcentraciones de contaminantes individuales se han combinado, en función de las asociaciones definidas a partir del análisis de agrupamiento, determinando zonas de distribución geográfica de concentración baja, media, alta, o muy alta en algunos casos, con el objeto de relacionar la distribución regional de los contaminantes con el tipo de usos del suelo (Tabla 2 y Figuras 6, 8, 10 y 12).

*Usos de la tierra*

En el conurbano Bonaerense el uso de suelos posee una diversidad que responde a dos factores diferentes: la distribución actual de actividades humanas y la evolución histórica de las mismas.

En la Figura 5 se presenta la distribución geográfica de las asociaciones hidrogeoquímicas propuestas junto con los usos de suelo. Este mapa se vincula al de la Figura 7 que muestra las áreas de afloramiento de los sedimentos Pampeanos que si bien no es un mapa de usos de suelo, el 90% de las actividades antrópicas se concentran en dichos sedimentos, lo mismo que la relación entre la Asociación I (As, F de origen natural) y el vidrio volcánico contenido en los mismos (Nicolli et al. 1985).

## DISCUSIÓN

Los ambientes urbanos son ambientes complejos, donde la asociación de uno o varios elementos traza con una determinada actividad antrópica es difícil de determinar. Se suele recurrir entonces al empleo de un conjunto de elementos traza para caracterizar las asociaciones y determinar sus posibles orígenes (Wilken et al. 1995; De Miguel et al. 2002).

Se han determinado asociaciones de Zn, Cu, Pb y Ba para material particulado de suelos de Madrid, España, como consecuencia del tránsito vehicular, combustibles, lubricantes y desgaste de neumáticos (De Miguel et al. 2002). La corrosión de estructuras metálicas galvanizadas puede también relacionarse con asociaciones de Fe, Zn y Cd, y eventualmente con el Pb (De Miguel et al. 2002). Sin embargo, estas asociaciones no son siempre las mismas; el Pb en Oslo, Noruega, por ejemplo, se asocia con la remodelación edilicia y no con el tránsito vehicular, en tanto que en Madrid, se cita el

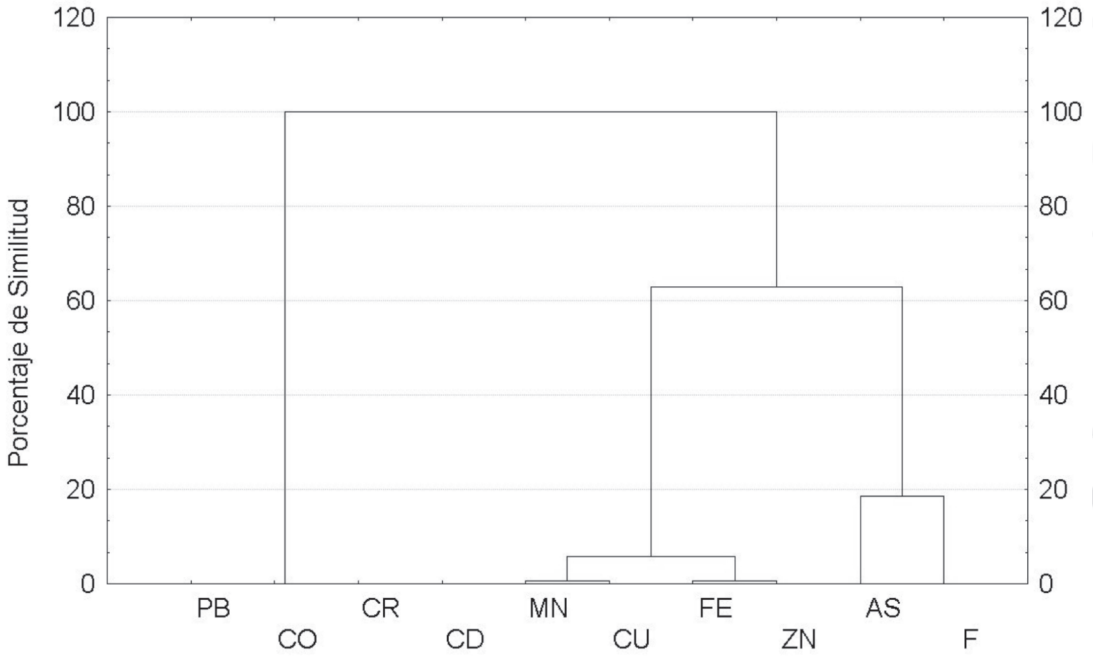


**Figura 3**. Análisis de Agrupamiento de Variables, Sección Epiparaneana, Escobar, Bs. As.
**Figure 3**. Cluster analysis of variables, Epiparaneana Section, Escobar, Bs. As.

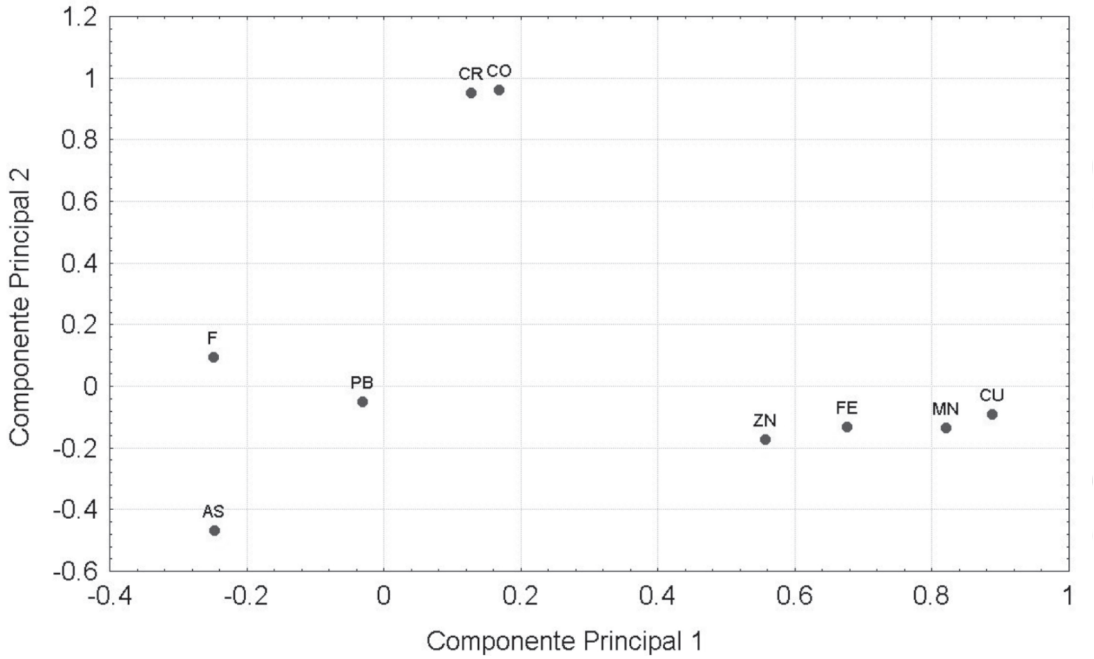


**Figura 4**. Análisis de Componentes Principales, Sección Epiparaneana, Escobar, Bs As.
**Figure 4**. Principal Components Analysis, Epiparaneana Section, Escobar, Bs As.

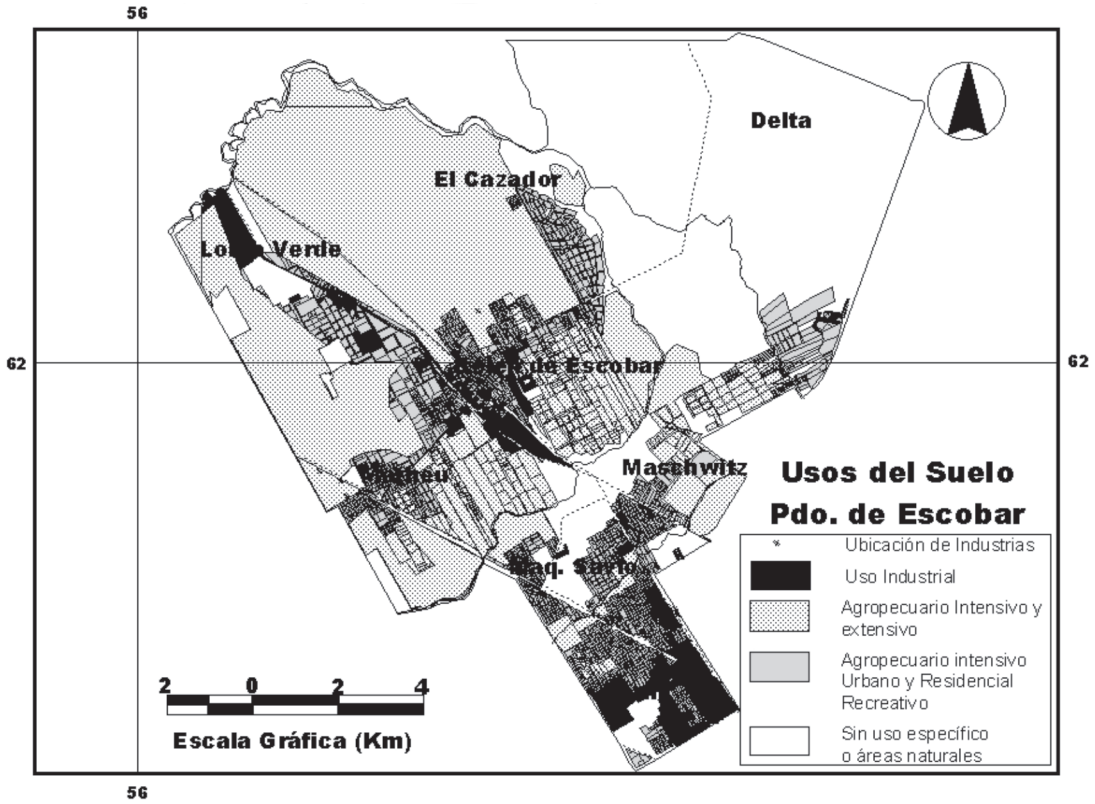


**Figura 5**. Usos de la tierra en el Partido de Escobar (Santa Cruz et.al., 1999)
**Figure 5**. Land use types in Escobar Country

**Tabla 2**: Tipos de Asociaciones Hidroquímicas en función de los valores o rangos de concentración (en mg/L) de trazas de la Sección Epiparaneana y su respectiva tipificación. En el caso de la Asociación II, se incluye también la presencia (+) o ausencia (-) de *E. coli*. Estos datos son significativos en su relación con los centros urbanos y concentraciones de $NO_3$.

**Table 2:** Types of Hydrochemical Associations in relation to the values or concentration ranges (in mg/L) of traces in the Epiparaneana Section and its typification. For the Association II, the presence (+) or absence (-) of E.coli is included. Data is significant in relation to the urban centres and $NO_3$ concentration.

| Asociación | Elementos y sus concentraciones | Tipificación de las concentraciones |
|---|---|---|
| Asociación I | As < 0.06 y F < 0.5 | Baja |
| (Figura 6) | As: 0.06 - 0.1 y F: 0.5 - 1 | Media |
| | As: 0.1 - 0.4 y F: 1 - 1.5 | Alta |
| | As > 0.4 y F > 1.5 | Muy Alta |
| Asociación II | $NO_3$ < 10 y E. coli (-) | Baja |
| (Figura 8) | $NO_3$ > 10, $NO_3$ < 45 y E. coli (-) | Media |
| | $NO_3$ > 10, $NO_3$ < 45 y E. coli (+) | Alta |
| | $NO_3$ > 45 y E. coli (+) | Muy Alta |
| Asociación III | Zn < 0.2, Cu < 0.01, Fe < 0.3 y Mn < 0.05 | Baja |
| (Figura 10) | Zn: 0.2 - 0.5, C: 0.01 - 0.1, Fe: 0.3 - 50 y Mn: 0.05 - 1 | Media |
| | Zn > 0.5, Cu > 0.1, Fe > 50 y Mn > 1 | Alta |
| Asociación IV | Pb < 0.05, Co < 0.01, Ni < 0.01 y Cr < 0.05 | Baja |
| (Figura 12) | Pb: 0.05 - 0.1 Co: 0.01 - 0.05 Ni: 0.01 -0.05 y Cr: 0.05 - 0.1 | Media |
| | Pb > 0.1, Co > 0.05, Ni > 0.05 y Cr > 0.1 | Alta |

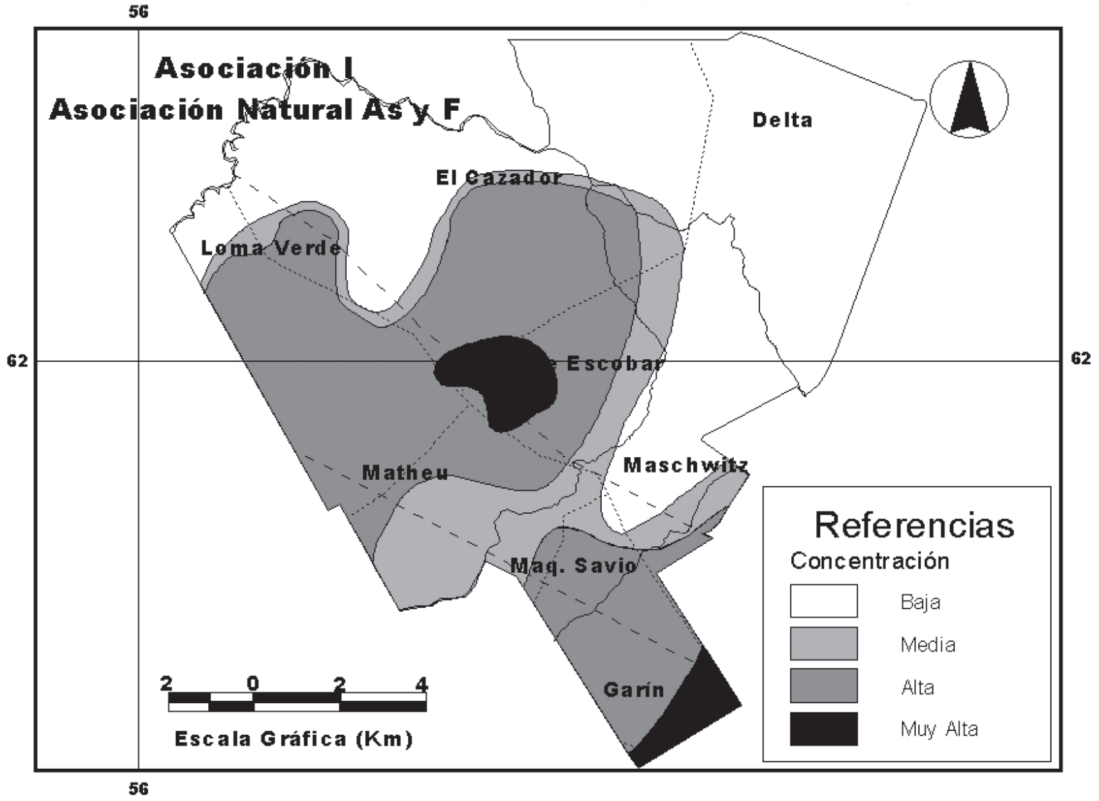


**Figura 6**. Distribución de la Asociación I en el Pdo. de Escobar
**Figure 6**. Association I distribution in Escobar County

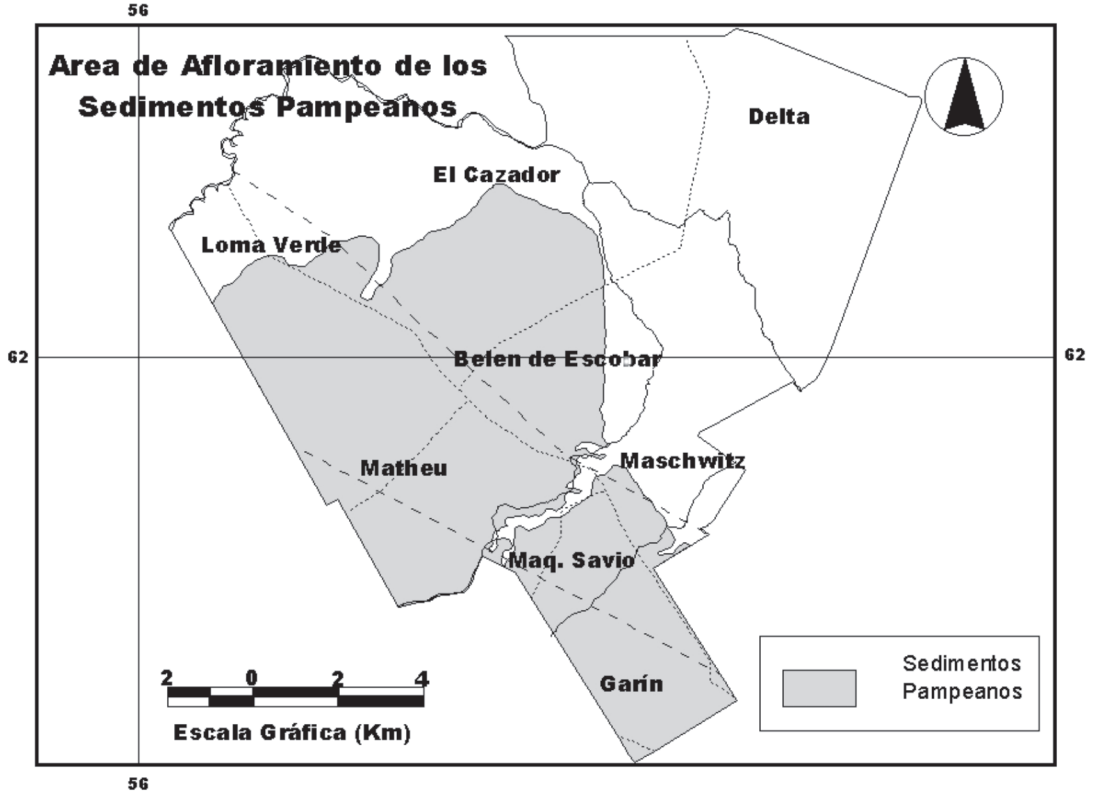


**Figura 7**. Afloramientos de Sedimentos Pampeanos en el Pdo. de Escobar
**Figure 7**. Sedimentos Pampeanos outcrop area in Escobar County

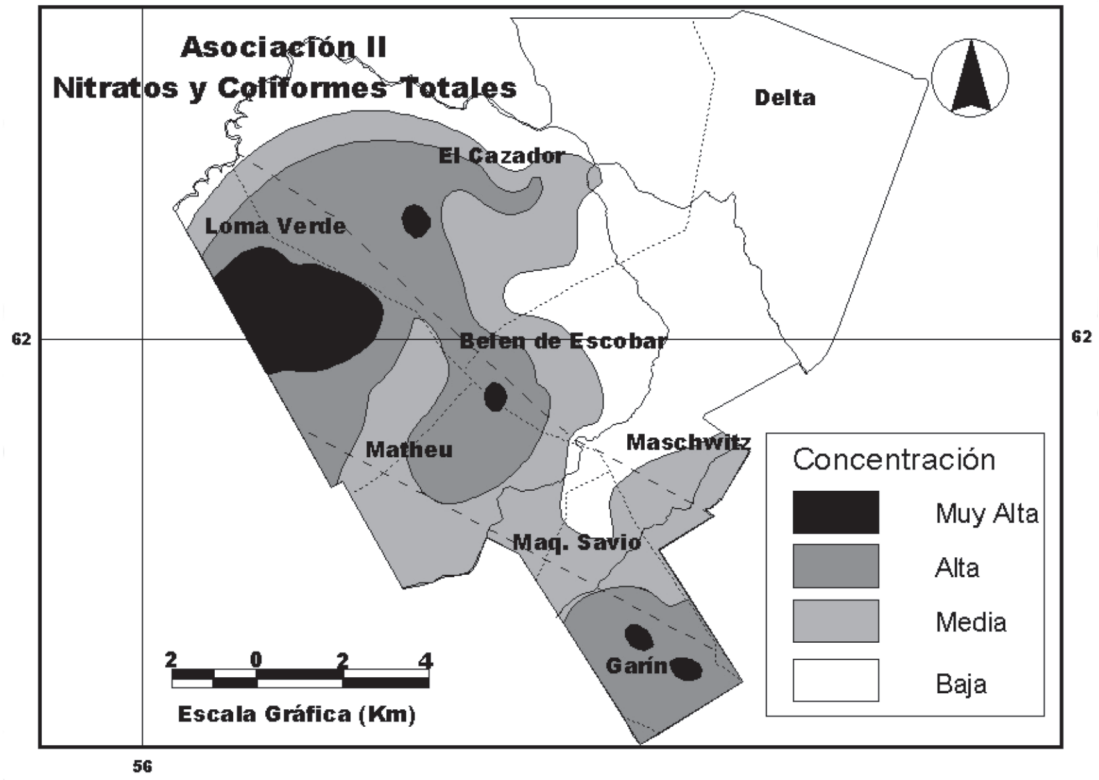


**Figura 8**. Distribución de la Asociación II en el Pdo. de Escobar
**Figure 8**. Association II distribution in Escobar County

enmascaramiento de la concentración de Zn atribuible al tránsito vehicular por efecto de una fuente mayor de contaminación industrial. Existen además asociaciones naturales que también se identifican sobre el material particulado (De Miguel et al. 2002).

En el caso de las aguas subterráneas, se han empleado técnicas estadísticas para correlacionar o relacionar usos de suelo y contenido en sales totales (Silva Busso & Olivares 1998; Silva Busso et al. 1999), especies iónicas mayoritarias disueltas en agua y geomorfología de la cuenca (Santa Cruz et al. 1998), variables físicas de cuencas e hidroquímica (Fresina 2002), y asociaciones naturales entre litología y contenidos de ciertos elementos traza (As, F y Vd) (Nicolli et al. 1985; Merino 1995). En el área de estudio, se ha mencionado la posibilidad de asociación de las variaciones de salinidad total o características naturales del acuífero (Santa Cruz et al. 2000; Silva Busso & Santa Cruz 2003). Su presencia indica aguas relacionadas hidrogeológicamente con el acuífero Pampeano, ya que el acuífero Puelches originalmente no presenta esta asociación (Nicolli et al. 1985). El caso particular del Zn, debido a la mayor cantidad de identificación en el muestreo, fue posible diferenciarlo entre ambos acuíferos probablemente por su mayor movilidad.

Los resultados de los análisis isotópicos han permitido corroborar la relación hidrodinámica entre las diferentes unidades acuíferas, discriminando las muestras de agua subterráneas provenientes de las Secciones Acuíferas Epipuelches y Puelches. Estos resultados establecen una relación hidrodinámica entre la Sección Epipuelches-Puelches y su conexión con el ciclo hidrológico actual. Los valores de tritio de las aguas indican la existencia de recarga vertical del acuífero Puelches desde el acuífero Pampeano, con el correspondiente retardo a causa de la diferencia de permeabilidad entre ambos.

Las asociaciones de elementos traza que pueden encontrarse en el agua subterránea, excepto las naturales relacionadas con la litología, suelen ser consecuencia de la migra-

ción vertical a través del suelo y la zona no saturada, o bien por contaminación en captaciones, inyección de contaminantes al acuífero libre o conexión hidráulica con recursos hídricos superficiales.

Esto ha permitido la inclusión en este análisis de especies iónicas que, si bien no son elementos traza, son citadas en la bibliografía como típicas de los ambientes urbanos, como es el caso de los nitratos (Petcheneshsky 1988; Auge 1990; Heredia & Pascale 2000), el fósforo disuelto y la presencia de ciertas bacterias patógenas (Heredia et al. 2000).

A partir del análisis de los usos de la tierra se concluyó que la afectación sobre el sistema acuífero puede deberse a un uso específico del suelo, o más frecuentemente, a la combinación de varios usos relacionados (Silva Busso et al. 1995; Silva Busso & Olivares 1998).

Estas asociaciones hidrogeoquímicas demuestran ser específicas de cada región. Las asociaciones propuestas para Madrid, Ostrava u Oslo sobre material particulado, no poseen los mismos componentes en cada ciudad, sino que están determinadas en función del uso de suelo y tipo de afectación humana (De Miguel et al. 2002). Es decir que las asociaciones no son extrapolables a todas las áreas urbanas y, aún menos, al agua subterránea.

Debe considerarse además, que el uso de los suelos en el área de estudio, si bien es muy diverso, no ha tenido variaciones significativas a lo largo del tiempo. En áreas que han tenido cambios importantes en el uso del suelo durante al menos los últimos 100 años, es muy probable que estas asociaciones sean más difíciles de interpretar de la forma propuesta en este trabajo.

*Asociaciones hidrogeoquímicas y usos de la tierra*

La relación entre las asociaciones hidrogeoquímicas definidas y el uso de la tierra queda determinada por la comparación de la distribución areal de las concentraciones de las diferentes asociaciones y la discriminación de uno o más usos del suelo. La superposición de las áreas de diferente asociación y usos del suelo, es claramente visible si se comparan entre si los pares de mapas de las figuras 6 y 7, 8 y 9, 10 y 11 y 12 y 13.

Si bien la distribución de las concentraciones medias y altas de la Asociación I coinciden espacialmente con la distribución de las áreas de afloramiento de sedimentos Pampeanos (Figuras 6 y 7), las zonas topográficamente más bajas poseen valores muy pequeños, lo que puede deberse a los cambios litológicos relacionados con variaciones laterales de arenas a arcillas en los sedimentos Postpampeanos y a la hidrodinámica regional. Esta relación puede considerarse como natural si se restringe al acuífero Pampeano.

Las concentraciones medias y altas de la Asociación II (nitratos y coliformes totales; Figuras 8 y 9) coinciden espacialmente con los sectores de zonas urbanizadas, en su mayoría sin red de saneamiento y con inadecuada eliminación de aguas residuales.

Los valores bajos de concentración de esta asociación poseen una gran dispersión, lo que probablemente se deba a que el uso de la tierra con los que se relaciona es el más antiguo del área de estudio por ser las áreas de contaminación puntuales, en principio, y en la medida en que se extiende un uso del suelo se convierten en fuentes difusas. Además, debe considerarse el tiempo de transito vertical hasta los acuíferos, lo que coincide con el descrito por otros autores para el acuífero Pampeano (Auge 1990; Heredia & Pascale 2000), y a la migración vertical y horizontal del mismo en función de las perturbaciones hidrodinámicas de los acuíferos, particularmente en el acuífero Puelches.

Debe considerase también, que los nitratos poseen cierta correlación positiva no solo con los coliformes totales, sino también con el F y el As (r = 0.7), característica asociada a loa sedimentos Pampeanos. Esto es consecuencia de la existencia de sumideros de excretas sin aislamiento ('pozos ciegos') en contacto con dicho acuífero.

La distribución de las concentraciones medias y altas de la Asociación III (Fe, Mn, Cu y Zn; Figuras 10 y 11) coinciden espacialmente con los sectores en los que predomina la agricultura intensiva y extensiva.

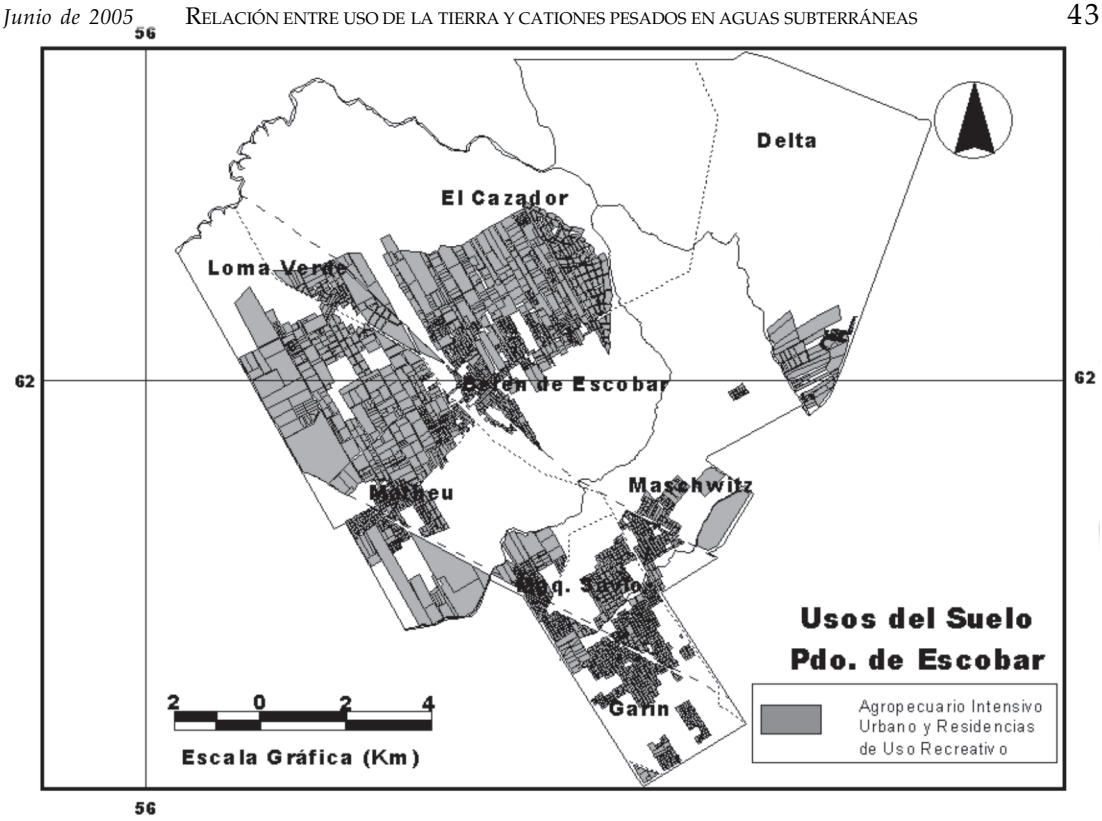


**Figura 9**. Usos de suelo relacionados con la Asociación II

**Figure 9**. Relationship between Land use types and Association II

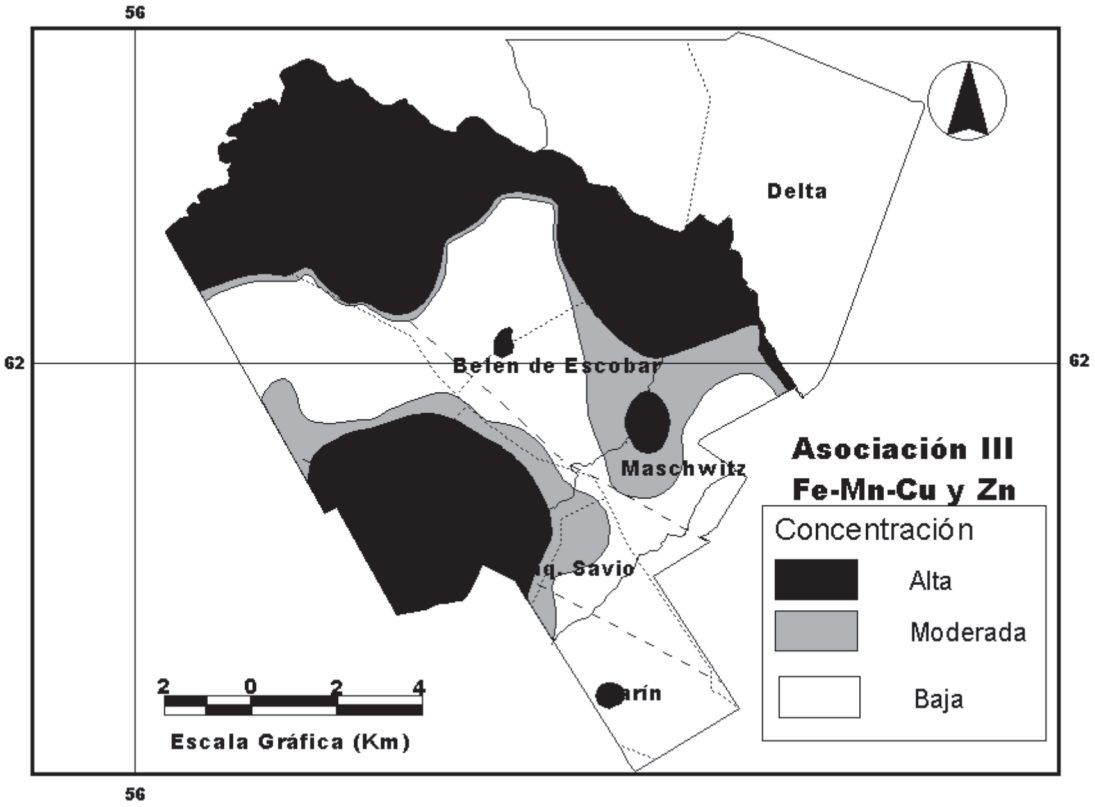


**Figura 10**. Distribución de la Asociación III en el Pdo. de Escobar

**Figure 10**. Association III distribution in Escobar County

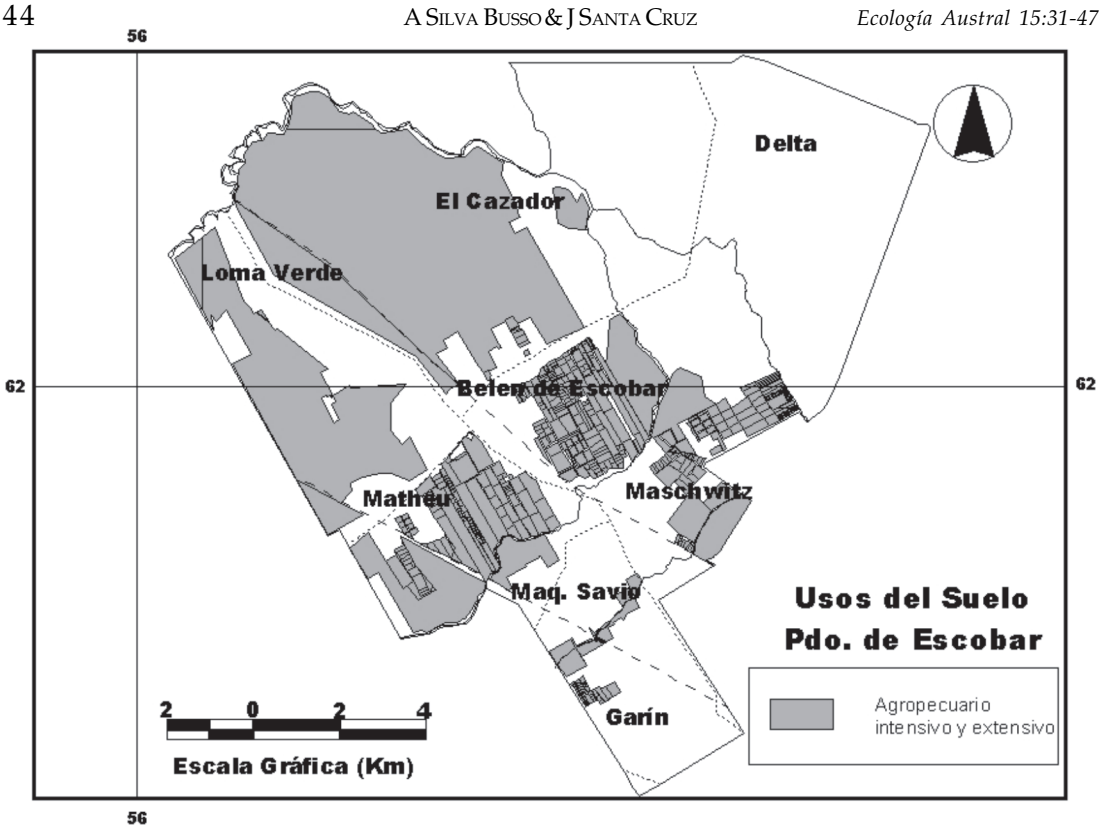


**Figura 11**. Usos de suelo relacionados con la Asociación III

**Figure 11**. Relationship between Land use types and Association III

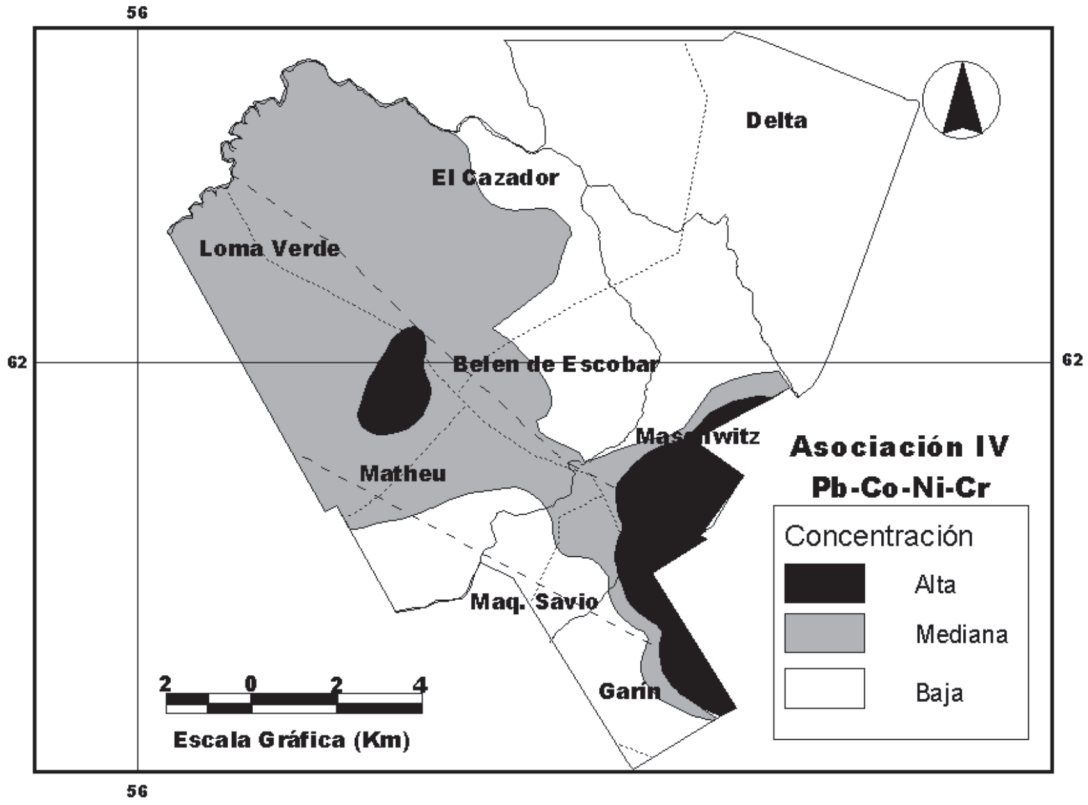


**Figura 12**. Distribución de la Asociación IV en el Pdo. de Escobar

**Figure 12**. Association IV distribution in Escobar County

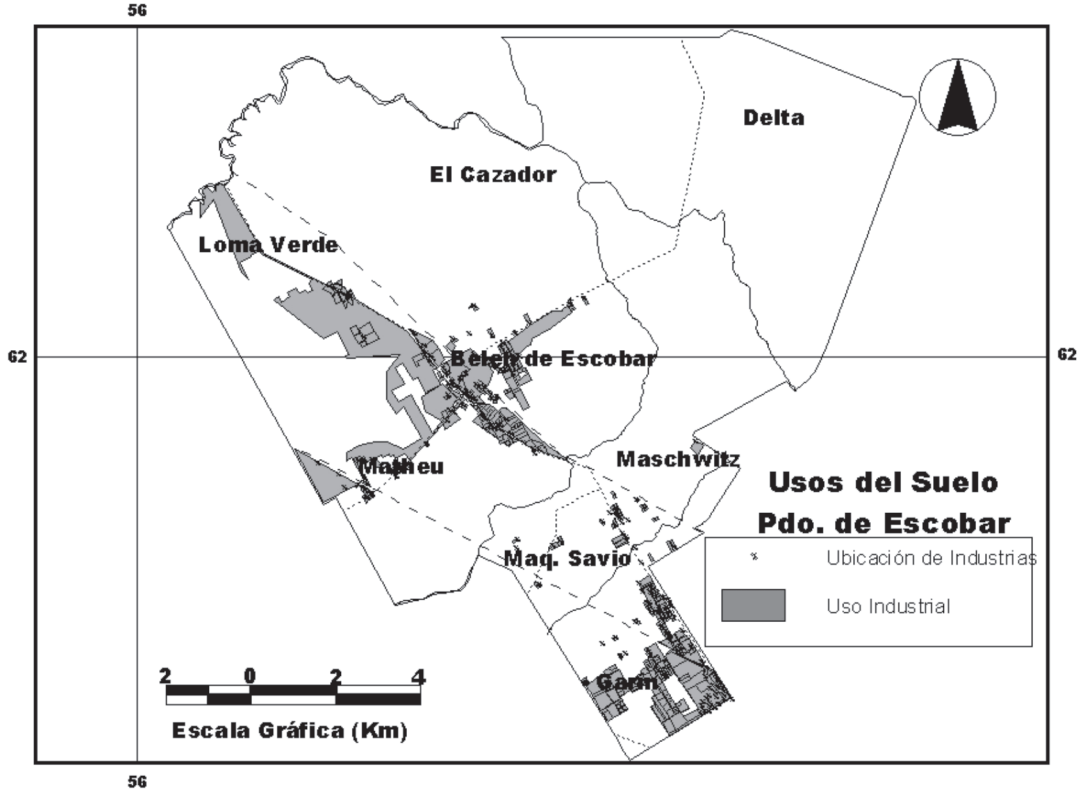


**Figura 13**. Usos de suelo relacionados con la Asociación IV
**Figure 13**. Relationship between Land use types and Association IV

Durante la determinación de los usos de la tierra reales, se encuestó y verificó, para cada área, el uso permanente de productos funguicidas con elevados contenidos de Cu y Zn, y de productos fertilizantes en la floricultura con contenidos de Fe y Mn, por lo que consideramos esta como la fuente más probable de contaminación del acuífero. Sin embargo, la explotación agrícola intensiva se encuentra en general combinada muchas veces con usos urbanos e incluso industriales, lo que podría generar anomalías en el análisis.

Es importante también, no descartar otros efectos vinculados con la corrosión de estructuras metálicas, como ser estructuras de hierro, muy frecuentemente empleadas en la agricultura intensiva. Esta asociación con la corrosión en perforaciones de diversos usos (urbano y/o agrícola) ha sido mencionada por otros autores para estudios sobre material particulado (Wilken et al. 1995; De Miguel et al. 2002). Cabe destacarse que en este último caso, los autores han sugerido la relación de concentraciones de Zn con el tránsito vehicular, por lo que es factible suponer una relación similar para el Zn, no excluyendo la posibilidad de migración a partir de la infiltración vertical del Zn hacia el acuífero. Tendencias semejantes relacionadas con la presencia de Zn, han sido encontradas en suelos urbanos de La Plata (Villegas, com. pers.), aunque en este caso estaría relacionado con el uso agropecuario.

La distribución de las concentraciones medias y altas de la Asociación IV (Pb, Co, Ni y Cr; Figuras 12 y 13) coincide espacialmente con los sectores predominantemente industriales, aunque algunas son completamente industriales y otras de uso mixto urbano-industrial, generando posibles anomalías en el análisis. Según De Miguel et al. (2002), la diversidad de procesos industriales hace muy difícil determinar los ciclos hidrogeoquímicos urbanos que interactúan con el agua subterránea a esta escala de estudio. Aún así,

se observa que las zonas de Garín, Maschwitz y Belén de Escobar presentan las concentraciones mayores de esta asociación y una fuerte presencia de actividad industrial.

## CONCLUSIONES

La zona de estudio presenta un intenso, aunque desordenado, desarrollo urbanístico, industrial y agropecuario, con la consecuente aparición de sectores donde las aguas subterráneas utilizables ven afectadas su calidad natural. La metodología empleada en este trabajo, comúnmente utilizada en el estudio de material particulado, ha demostrado que puede ser aplicada en estudios de contaminación de agua subterránea con buenos resultados, permitiendo complementar las ya propuestas para caracterizaciones hidrogeoquímicas de medios urbanos.

Este estudio constituye un avance frente a estudios previos (Santa Cruz et al. 2000; Silva Busso & Santa Cruz 2003). En este sentido, deberá tenerse en cuenta en futuros estudios la realización de análisis de las aguas superficiales y de sedimentos fluviales de cauces actuales, los cuales pueden presentar asociaciones similares a las obtenidas en este estudio.

Este estudio ha permitido vincular áreas contaminadas del recurso agua subterránea con los diferentes usos de la tierra. Por lo tanto, puede considerarse que en regiones donde se realicen estudios de vulnerabilidad y usos de suelo sería posible definir mapas de riesgo potencial de contaminación concordante con las asociaciones aquí propuestas, siempre que la región tenga similitudes geológicas y poca variación de usos del suelo a lo largo del tiempo. Es así, que el riesgo potencial definido se referiría no a un elemento traza sino a una asociación hidrogeoquímica de elementos traza.

## BIBLIOGRAFÍA


ASTM. 1981. *Standard Guide for Sampling Ground Water Monitoring Wells*. Document D4448-85ª. International Standards Worldwide. USA. 14 pp.

AUGE, MP. 1990. Aptitud del Agua Subterránea en La Plata, Argentina. Pp. 191-201 en: *Seminario Latinoamericano sobre Medio Ambiente y Desarrollo. Actas, Tomo I*. Bariloche, Argentina.

CUSTODIO, E & MR LLAMAS. 1983. *Hidrología Subterránea.* Editorial Omega. Segunda edn. Barcelona, España.

DAVIES, BE & BG WIXSON. 1987. Uses to factor analysis to differentiate pollutans from other trace metals in surface soils of the mineralized area of Madison Country, Missouri, USA. *Water, Air and Soil Pollution* **33**:339-348.

DE MIGUEL, E; JF LLAMAS; E CHACÓN; C FERNÁNDEZ ARROJO; A ORDÓÑEZ ET AL. 2002. Caracterización geoquímica de los ciclos de elementos traza en ambientes urbanos. *Boletín Geológico y Minero* (Madrid) **133**(1):35-43.

EASNE. 1972. *Estudio de Aguas Subterráneas del Noreste de la Provincia de Buenos Aires.* Consejo Federal de Inversiones (CFI). Buenos Aires, Argentina.

EPA. 1986. *Quality Criteria for Water*. Office of Water Regulations and Standards. Criteria and Standards Division, Environmental Protection Agency (EPA). Washington D.C., USA.

FRENGUELLI, J. 1950. *Rasgos generales de la Morfología y Geología de la Provincia de Buenos Aires*. Ministerio de Obras Públicas. LEMIT (Laboratorio de Ensayo de Materiales e Investigaciones Tecnológicas). Serie 62. La Plata, Argentina.

FRESINA, M. 2002. *Comportamiento Hidrogeológico - Hidroquímica del Acuífero Pampeano de la Cuenca Inferior del Río Carcarañá, Provincias de Córdoba y Santa Fe*. Tesis Doctoral, Universidad de Buenos Aires. Argentina.

GONZÁLEZ BONORINO, F. 1965. Mineralogía de las fracciones Arcilla y Limo del Pampeano en el Área de la Ciudad de Buenos Aires y su Significado Estratigráfico y Sedimentológico. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* **XX**:67-148.

HEREDIA, O; M FRESINA; JN SANTA CRUZ & A SILVA BUSSO. 2000. Nitratos y Fósforo de un area antropofizada de la Región Pampeana. Buenos Aires. Argentina. Abstracts: 315 en: *1st Joint World Congress on Groundwater*. Fortaleza, Brazil.

HEREDIA, OS & C PASCALE. 2000. Calidad de aguas de bebida en algunas localidades urbanas de Buenos Aires. *Rev. de la Facultad de Agronomía (Universidad de Buenos Aires)* **20**(2):193-199.

MERINO, M. 1995. *Geoquímica del Selenio en las Aguas Subterráneas de la Cuenca del Río Calamuchita, Provincia de Córdoba, Argentina*. Tesis Doctoral, Universidad de Buenos Aires. Argentina.

NICOLLI, HB; T O´CONNOR; J SURUNO; ML KOUKHARSKY; MA GOMEZ PERAL ET AL. 1985. *Geoquímica del Arsénico y otros Oligoelementos en Aguas Subterráneas de la Llanura sudoriental de la Provincia de Córdoba.* Academia Nacional de Ciencias. Miscelánea 71. Córdoba, Argentina.

PETCHENESHSKY, T. 1988. *Evaluación del Nivel de Nitratos en Agua de Bebida en los partidos del Gran Buenos Aires*. Dirección Nacional de Calidad Ambiental, Ministerio de Salud y Acción Social. Buenos Aires.

SALA, JM & MP AUGE. 1970. Algunas Características Geohidrológicas del Noreste de la Prov. de Bs. As. Pp. 321-336 en: *Actas IV Jornadas Geológicas Argentinas.* Buenos Aires.

SALA, JM; N GONZÁLEZ & E KRUSE. 1983. *Generalización Hidrológica de la Provincia de Bs. As*. Coloquio Internacional sobre Hidrología de Grandes Llanuras. Comité Nacional para el Programa Hidrológico Internacional. Olavarría, Argentina.

SÁNCHEZ GÓMEZ, ML & MC RAMOS MARTÍN. 1987. Application of cluster analysis to identify sources of airborne particles. *Atmospheric Environments* **21**:1521-1527.

SANTA CRUZ, J. 1972. Estudio sedimentológico de la Formación Puelches en la provincia de Buenos Aires. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* **27**(1):5-62.

SANTA CRUZ, J & A SILVA BUSSO. 1999. Escenario Hidrogeológico General de los Principales Acuíferos de la Llanura Pampeana y Mesopotamia Septentrional, Argentina. Pp. 461-471 en: *II Congreso Argentino de Hidrogeología y IV Seminario Hispano Argentino sobre Temas Actuales en Hidrología Subterránea*. San Miguel de Tucumán, Tucumán.

SANTA CRUZ, J; A SILVA BUSSO & EI ÁLVAREZ DÍAZ. 1998. Particularidades hidrogeoquímicas de los acuíferos de la formación pampeano en el área de Castex Montes Nievas. Pp. 348-355 en: *Actas X Congreso Latinoamericano de Geología y VI Congreso Nacional de Geología Económica*. *Vol. III*. La Pampa. Argentina.

SANTA CRUZ, J; M FRESINA; A SILVA BUSSO & O OLIVARES. 2000. *Metodología Ajustada del Diagnóstico de Afectación Ambiental de las Aguas Subterráneas Partido de Escobar, Provincia de Buenos Aires*. Asociación de Geología Aplicada a la Ingeniería y el Ambiente ASAGAI. Nº 14. Buenos Aires, Argentina.

SILVA BUSSO, A; S AMATO; MM GUARINO; O OLIVARES & D VILLEGAS. 1995. Vinculación entre el uso del suelo y las perturbaciones del acuífero libre. Pp. 111-126 en*: Primera reunión sobre uso de Suelos y organización de territorio.* Universidad Nacional de Río Cuarto, Córdoba, Argentina.

SILVA BUSSO, A & O OLIVARES. 1998. Implicancias Ambientales del Uso del Suelo sobre el acuífero Freático de la Cuenca del Arroyo Conchitas, Provincia de Buenos Aires, Argentina. *Actas de la Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente* **12**:141-154.

SILVA BUSSO, A; O OLIVARES & M FRESINA. 1999. Afectación del Acuífero Freático por Uso del Suelo en un Area del Conurbano Bonaerense, Prov. Buenos Aires, Argentina. *Revista Académica de la Facultad de Ingeniería (Universidad Autónoma de Yucatán, México)* **3**(1):32-45.

SILVA BUSSO, A & JN SANTA CRUZ. 2003. Hidroquímica, Contaminación y Vulnerabilidad de las Aguas Subterráneas en el Partido de Escobar, Buenos Aires, Argentina. Pp. 353-362 en: *III Congreso Argentino de Hidrogeología y I Seminario Hispano-Latinoamericano sobre temas Actuales de la Hidrología Subterránea*. *Actas, Tomo 2*. Rosario, Santa Fe, Argentina.

WILKEN, RD; U FÖRSTNER & A KNÖCHEL. 1995. *Heavy metals in the environmental*. CEP Consultands Ltd. Hammburg, Germany.