



Universidad Nacional  
de Córdoba



Facultad de Ciencias  
Exactas, Física y  
Naturales



Doctorado en  
Ciencias  
Geológicas



# **NUEVAS METODOLOGÍAS EN LA EXPLORACIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA EN BASE A LA INVESTIGACIÓN DEL ORIGEN Y LA MOVILIDAD DEL ARSÉNICO EN EL ACUÍFERO PAMPEANO**

**Tesista: LEONARDO SIERRA**  
Director: PABLO ARIEL WEINZETTEL  
Codirector: SERGIO ANDRÉS BEA

2019

# **NUEVAS METODOLOGÍAS EN LA EXPLORACIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA EN BASE A LA INVESTIGACIÓN DEL ORIGEN Y LA MOVILIDAD DEL ARSÉNICO EN EL ACUÍFERO PAMPEANO**

por

Lic. Leonardo Sierra

Dr. Pablo A. Weinzettel

Director

Dr. Sergio A. Bea

Codirector

## **JURADO**

**Dr. Guillermo A. Baudino**

(Facultad de Ciencias Naturales – UNSA / INTI)

**Dra. Verena A. Campodónico**

(Centro de Investigaciones en Ciencias de la Tierra – UNC / CONICET).

**Dr. Daniel E. Martínez**

(Instituto de Geología de Costas y del Cuaternario – UNMdP / CONICET)

**NUEVAS METODOLOGÍAS EN LA EXPLORACIÓN DEL  
AGUA SUBTERRÁNEA EN BASE A LA INVESTIGACIÓN  
DEL ORIGEN Y LA MOVILIDAD DEL ARSÉNICO EN EL  
ACUÍFERO PAMPEANO**

Aprobado por:

Dr.

Dra.

Dr.

Fecha de aprobación:

A mi familia y  
a mis viejitas...

## AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer a mi director Dr. Pablo Weinzettel por su apoyo y colaboración en numerosas charlas y en las tareas de campo. Asimismo, a mi codirector Dr. Sergio Bea y codirector de beca Dr. Eduardo Kruse por su asistencia y aliento.

A los jurados que evaluaron este trabajo, Dra. Verena Campodonico, Dr. Guillermo Baudino por su buena predisposición y celeridad en las correcciones.

A la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (ANPCyT) y a el Consejo Hídrico Federal (COHIFE) por financiar parte de esta tesis con el proyecto PID075/2011. Asimismo, al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) que mediante la beca doctoral financió mi disponibilidad de tiempo completo. Así como a la UNLP, en su rol de Universidad Pública y Gratuita.

Al Dr. Sebastián Dietrich y Lic. Lucia Cacciabue por el trabajo conjunto mutuo. Al primero por su colaboración en todas las tareas ocupando el rol de director no reconocido.

Al Dr. Luis Vives por el apoyo y consejo permanente a la familia del IHLLA que supo formar.

A todos los colegas y amigos del IHLLA por su colaboración y buenos momentos juntos. A l@s técnic@s de campo y laboratorio que con su ayuda y paciencia hicieron esta tesis humanamente posible. En especial a los becarios por su amistad y compañerismo, y a nuestra sala de becarios por las charlas y mates de aliento mutuo.

Al Dr. Numa Sosa por su acompañamiento y ayuda en innumerables aspectos de esta tesis. Así como por facilitar los cortes delgados y el uso de los microscopios del CIG (CONICET-UNLP). Al Dr. Daniel Poiré por facilitar los análisis difracción de Rayos X.

Al Dr. Marcelo Zárate por su enseñanza y valoración del paisaje de la llanura Interserrana. Además, a la Dra. Adriana Mehl por la descripción de los sedimentos.

Al Dr. Mauro Gómez Samus por su amistad y colaboración. Así como por gestionar los análisis de susceptibilidad magnética en el Instituto de Física Arroyo Seco (IFAS).

A los vecinos de Tres Arroyos que nos abrieron sus puertas. En especial a la Comisión del Tiro Federal, a Tomás Aldaya y a José Luis Di Vincenzo por su colaboración.

A mi familia y amigos por su cariño y comprensión durante esta etapa. Especialmente a mis sobrinas Valen, Ampí y Reni quienes son las que más lo padecieron.

Por último, pero en primer lugar a Nadia por su paciencia y apoyo incondicional en esta etapa que ambos nos supimos dar a 1300 km de distancia.

Leonardo Sierra, Azul, 14 de febrero de 2019

## RESUMEN

El objetivo principal de esta tesis consiste en analizar del contenido de arsénico (As) del acuífero Pampeano que subyace el área periurbana de la ciudad de Tres Arroyos con el fin de evaluar herramientas de exploración para identificar sectores con bajo As. Se propone obtener un modelo hidrogeológico conceptual basado en el contenido de As de los sedimentos loésicos y aguas subterráneas basado en un detallado marco geológico-geomorfológico con múltiples escalas de análisis. Este modelo conceptual se integra con una caracterización geofísica del subsuelo basada en métodos de superficie y de perfilaje de pozo con herramientas clásicas e innovadoras.

El mapeo fotogeomorfológico detallado complementado con estudios de campo identificaron las unidades geomorfológicas, litológicas y de suelos, que fueron correlacionados con los factores hidrogeoquímicos involucrados en la liberación y movilidad del As y F al agua subterránea. Se reconoce un paisaje heterogéneo con lomadas loésicas de edad mio-plioceno cubiertas por una costra calcárea espesa (unidad litológica 2, UL2) erosionadas por grandes valles. La UL2 posee bajo contenido de trizas de vidrio volcánico y calcita de grano fino abundante. Por lo tanto, el potencial de liberación de la UL2 en zonas de recarga local es bajo para el As y alto para el F. Los valles aluviales están rellenos de depósitos fluviales pleistocenos (UL3) y de loess (UL4) con trizas de vidrio volcánico formando las planicies de inundación actuales. Este perfil coincide con áreas de descarga de aguas subterráneas con nivel somero y flujo lento que favorecen la concentración de solutos en aguas salobres y alcalinas. La liberación y movilización de As se favorece de las trizas de vidrio volcánico poco meteorizadas y por la desorción alcalina de los oxi-hidróxidos de Fe. Por lo tanto, las características del suelo y de la zona no saturada controlan el contenido de As y F en las aguas subterráneas someras: suelos hapludoles petrocálcicos (lomadas de UL2) son fuente de F, argiudoles típicos (lomadas de UL4) son fuente de As y los suelos hidrohalmórficos poseen As y F movilizados y concentrados. Los detritos y testigos de una perforación nueva (TA6-1), se examinaron y analizaron para granulometría, petrografía, geoquímica, mineralogía total y de arcillas. La UL2 tiene continuidad regional hasta los 25 m profundidad con predominio de arenas limosas illíticas ricas en carbonatos pulverulentos. Por debajo y sin aflorar, la unidad litológica 1 (UL1) está compuesta por limos arcillosos esmectíticos con oxi-hidróxidos de Fe y calcretas aisladas hasta los 70 m de profundidad.

La dirección de flujo del agua subterránea es de norte a sur, con líneas de flujo convergentes en las zonas de descarga de las planicies de inundación. El perfilaje de flujo (TA6-1) del acuífero Pampeano se determinó mediante un ensayo de trazador salino. Además, la presencia de gradientes hidráulicos verticales en los piezómetros de filtro corto (6, 16 y 65 m de profundidad) y el perfilaje del medidor de flujo (TA6-1), indican flujos ascendentes en la UL1 en posiciones intermedias del paisaje cercanas a la llanura de

inundación. Esta condición se asocia a capas semiconfinadas con aguas salobres de contenidos de As y F bajos. La reinterpretación de la hidroquímica del área periurbana de Tres Arroyos basada en la geología y geomorfología, indica las posibles fuentes de solutos y los contenidos de As y F. De esta forma, predominan condiciones oxidantes ( $As^V$ ) y alcalinas en las aguas subterráneas, con una correlación positiva del As y F con el  $HCO_3$  y pH, respectivamente. El pH presenta un control local, mientras el  $HCO_3$  (y As) aumentan en la dirección del flujo hacia las planicies de inundación donde se midieron las concentraciones máximas. En estas predominan la meteorización de los sedimentos loésicos de la UL4 y la evapotranspiración reconocidas por un exceso de Na (Na/Ca) y condiciones locales subóxicas a reductoras ( $As^{III}$ ). Este modelo conceptual hidrogeológico se validó con un censo detallado en el área de estudio y la parcela experimental. Las aguas subterráneas someras de zonas de recarga local, presentan un mayor contenido de As con la abundancia de la UL4 con alto contenido de vidrio volcánico. En cambio, el F presenta contenidos mayores en las perforaciones ubicadas en las lomadas donde aflora la UL2 con elevado contenido de carbonato de calcio en la matriz. Además, los contenidos de As y F aumentan en la dirección de flujo. Perforaciones someras y profundas aisladas presentan contenidos anómalos de As ( $>100 \mu g/L$ ) y F ( $>10 mg/L$ ) asociados a elevada alcalinidad (975 mg/L), pH (8.8) y un exceso de Na (Na/Ca) vinculados a espacialmente a bosques de eucaliptos y planicies de inundación. Esta última presenta altos contenidos de iones movilizados (fosfato, vanadato e indicios de materia orgánica disuelta) que favorecen la desorción de los sedimentos. Asimismo, presenta condiciones locales subóxicas a reductoras con hasta 47% de  $As^{III}$  con respecto al As total.

El estudio geofísico obtuvo la distribución en subsuelo y registros detallados de perforaciones de propiedades físicas, como la resistividad eléctrica y la radiación gamma natural, aplicables a la exploración de aguas subterráneas y la construcción de perforaciones. En particular, las tomografías de resistividad eléctrica (TRE) permitieron determinar la continuidad subsuperficial de las unidades litológicas y geomorfológicas. La continuidad del subsuelo se ajustó con datos litológicos y registros eléctricos (TA1, TA2 y TA6-1) y gamma natural (TA1 a TA5 y TA6-1). En particular, los registros de potasio (K) y torio (Th) del perfilaje de espectroscopia gamma natural coinciden con los análisis de laboratorio que permiten diferenciar las UL. Sin embargo, los registros de uranio (U) presentan una resolución baja consistente con un bajo contenido de los sedimentos. Una contribución principal de los registros de K y Th se reconocen en la unidad de loess poco meteorizada (UL4) y en los horizontes arcillosos con oxi-hidróxidos de Fe interpretados como horizontes de paleosuelos (UL1). Estas capas presentan alto contenido de As movilizable y son de fácil reconocimiento en los perfilajes geofísicos. Su diferenciación requiere estudios detallados, pero corresponderían a la presencia de oxihidróxidos de Fe/Mn y magnetita secundaria indicada por la susceptibilidad magnética, siendo muy frecuentes en los horizontes de paleosuelos.

## ABSTRACT

The main goal of this thesis consists of the analysis of arsenic (As) content in the Pampean aquifer underlying peri-urban area of Tres Arroyos city in order to assess exploration tools for identification low-As groundwater sectors. It is proposed to obtain a conceptual hydrogeological model based on As content of loessic sediments and groundwaters in a detailed geological-geomorphological framework on multiple scales analysis. This conceptual model is integrated to a classic and innovative subsurface geophysical characterization based on surface and well logging methods.

Detailed photo-geomorphic mapping supplemented by field studies allowed identification of geomorphological, lithological and soil units, which were correlated with hydrogeochemical factors involved in As and fluoride (F) release and mobility in the groundwaters. A heterogeneous landscape is composed by loessic hills of mio-pliocene age and covered by a thick calcareous crust (Lithological Unit 2, LU2) which are eroded by large valleys. The LU2 is depleted in volcanic glass shards and enriched with fine-grained calcite. Therefore, release potential of LU2 in local recharge areas is low for As and high for F. The alluvial valleys are filled by late-pleistocene fluvial sediments (LU3) and loess deposits (LU4) enriched with volcanic glass shards that make up the present-day floodplains. This low-lying profile coincide with shallow and slow groundwater discharge areas which favors solute concentration in brackish and alkaline groundwater. As release and mobilization is favored by volcanic glass shards weathering and alkaline desorption from Fe oxy-hydroxides. Therefore, soil and unsaturated zone characteristics control local As and F content in the shallow groundwater: petrocalcic hapludol (LU2 hills) and typic argiudol (LU4 hills) soils are source of F and As, respectively. Meanwhile shallow groundwater below hydrohalomorphic soils (floodplain) have high As and F mobilised and concentrated. Sediment and cored samples obtained from a newly borehole (TA6-1) were examined and analyzed for particle size distribution, geochemistry, total and clay mineralogy. The LU2 has subsurface regional continuity up to 25 m depth and is mainly composed by illitic silty sands with fine grained calcite. The subsurface UL1 unit is composed by smectitic clayey silts with Fe oxy-hydroxides in paleosols horizons, intercalated by sparse calcretes up to 70 m depth.

Groundwater flow direction is from north to south with local flow lines converging in the discharge zones at the floodplains as determined by piezometric surveys. Borehole flow profile (TA6-1) of the Pampeano aquifer was determined by a saline tracer test. Besides, vertical hydraulic gradients were recognized at short-screen piezometers (6, 16 and 65 m in depth) and flowmeter geophysical log (TA6-1) indicating upward flows in LU1 at intermediate landscape positions close to floodplains. This condition is associated



to semi-confining layers with brackish water with relatively low contents of As and F. Groundwater hydrochemistry reinterpretation of Tres Arroyos peri-urban area based on geology and geomorphology, indicates the possible solutes sources and their relationship with As and F contents. Oxidizing ( $As^V$ ) and alkaline conditions predominate in groundwaters with As and F positively correlation with  $HCO_3$  and pH, respectively. The pH presents a local control, whereas  $HCO_3$  (and As) tends to increase in groundwater flow direction towards local discharge areas in the floodplains where maximum concentration were measured. Weathering of loessic sediments of UL4 and evapotranspiration predominates in floodplains recognized by an excess of Na (Na/Ca) and local suboxic to reducing conditions ( $As^{III}$ ). This hydrogeological conceptual model was validated with a detailed borehole surveys conducted in the study area and the experimental plot. Shallow groundwaters in local recharge areas, present an increase of As depending on the abundance of loessic sediments of the UL4 with high volcanic glass shards content. On the other hand, F content is higher in shallow borehole located in hills with UL2 with high content of calcium carbonate. In addition, As and F contents increase in the direction of local groundwater flows. Particular shallow and deep borehole have high anomalous As ( $>100 \mu\text{g/L}$ ) and F ( $>10 \text{ mg/L}$ ) content associated to high alkalinity (975 mg/L), pH (8.8), and an excess of Na (Na/Ca) linked to eucalyptus forested and floodplain areas. The floodplain present oxidizing conditions and high contents of mobilizing ions (phosphate, vanadate and indications of dissolved organic matter) that favor the As desorption of the sediments. In addition, the floodplain possesses local suboxic to reducing conditions with up to 47% of  $As^{III}$  respect total As.

The geophysical survey obtained a subsurface distribution and detailed borehole logs of physical properties such as electrical resistivity and natural gamma radiation applicables to groundwater exploration and borehole construction. Particularly, the electrical resistivity tomography (TRE) allowed the determination of subsurface continuity of lithological and geomorphological units. The subsurface continuity was adjusted with lithologic data and electrical logs (TA1, TA2 and TA6-1) and natural gamma log (TA1 to TA5 and TA6-1). In particular, K and Th logs of natural gamma spectroscopy log are in agreement with laboratory analysis allowing LU differentiation. However, U logs present low resolution consistent with low content in the sediments. The main contribution to K and Th logs is associated to poorly weathered loess unit (LU4) and clayey silts horizons with Fe/Mn oxy-hydroxides interpreted as paleosols horizons (LU1). This recognizable beds with geophysical logging present higher As-mobilizable content. Their differentiation requires detailed studies, but they would correspond to Fe / Mn oxy-hydroxides as well as secondary magnetite, indicated by magnetic susceptibility, both very frequent in paleosols horizons.

## **ESTRUCTURA DE LA TESIS**

En el Capítulo 1 se presentan la motivación, objetivos e hipótesis de esta tesis doctoral, así como la ubicación del área de estudio y las tres escalas de trabajo: zona periurbana, zona de estudio y parcela experimental.

En el Capítulo 2 se presenta el estado del arte del estudio del As como contaminante en acuíferos a nivel mundial y en la región.

En el Capítulo 3 se describen el marco regional hidrogeológico de la cuenca del arroyo Claromecó donde se incluye el área de estudio.

En el Capítulo 4 se describen los métodos de estudio utilizados.

En el Capítulo 5 se presenta la caracterización realizada del medio físico del área de estudio y la caracterización detallada de los sedimentos de la perforación de estudio TA6-1 indicando las posibles fuentes de As y F.

En el Capítulo 6 se incluye un relevamiento geofísico de la zona de estudio con tomografía de resistividad y perfilaje geofísico de perforaciones de estudio. Así como los análisis de susceptibilidad magnética ( $\chi$ ) de la perforación TA6-1.

En el Capítulo 7 se presenta un análisis de las características hidrodinámicas e hidrogeoquímicas de la zona periurbana, como modelo conceptual inicial del comportamiento del As y F en el acuífero Pampeano del área de estudio.

En el Capítulo 8 se realiza un estudio hidrodinámico e hidrogeoquímico de la zona de estudio y la parcela experimental. Este relevamiento se lo integra con los estudios físicos, hidrodinámicos e hidrogeoquímicos de los capítulos anteriores.

En el Capítulo 9 se presenta el modelo hidrogeológico conceptual de la zona de estudio y parcela experimental.

Finalmente, en el Capítulo 10 se presentan las principales conclusiones a las que se ha arribado y las líneas futuras de investigación que se proponen.

# INDICE

<b>CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
1.1.- MOTIVACIÓN .....	1
1.2.- OBJETIVOS E HIPÓTESIS .....	1
1.2.1.- Objetivo general .....	1
1.2.2.- Objetivos Específicos .....	1
1.2.3.- Hipótesis.....	2
1.3.- UBICACIÓN DEL AREA DE ESTUDIO .....	2
<b>CAPÍTULO 2. ARSÉNICO: TOXICIDAD, PROPIEDADES Y DISTRIBUCIÓN EN EL AMBIENTE</b> .....	<b>5</b>
2.1.- EPIDEMIOLOGÍA, TOXICIDAD Y LÍMITE RECOMENDADO .....	5
2.1.1.- Aspectos regulatorios nacionales del agua de bebida .....	8
2.2.- ARSÉNICO: PROPIEDADES Y FUENTES NATURALES.....	10
2.2.1.- Minerales portadores de arsénico y flúor .....	11
2.2.2.- Rocas ígneas y metamórficas .....	13
2.2.3.- Rocas sedimentarias y sedimentos.....	15
2.2.4.- Suelos.....	16
2.3.- HIDROGEOQUÍMICA DEL ARSÉNICO EN AGUAS NATURALES .....	18
2.3.1.- Especiación del arsénico.....	18
2.3.2.- Procesos de liberación de arsénico y flúor.....	20
2.3.2.1.- Disolución de silicatos.....	21
2.3.2.2.- Disolución reductiva de oxi-hidróxidos.....	24
2.3.3.- Procesos movilizadores de arsénico .....	25
2.3.3.1.- Procesos de adsorción-desorción.....	25
2.3.3.2.- Efectos de la competencia iónica en las propiedades de sorción ...	29
2.4.- CONDICIONES CLIMÁTICAS E HIDROLÓGICAS FAVORABLES PARA SU MOVILIDAD.....	32
2.5.- ACUÍFEROS CONTAMINADOS CON ARSÉNICO .....	36
2.5.1.- Distribución mundial .....	36
2.5.2.- Acuíferos reductores .....	41
2.5.3.- Acuíferos oxidantes .....	42
2.6.- ESTADO DEL CONOCIMIENTO EN LOS ACUÍFEROS DE LA LLANURA CHACO-PAMPEANA.....	43
2.6.1.- Zonas áridas y semiáridas.....	45
2.6.2.- Zonas húmedas y semihúmedas.....	50
2.7.- PROBLEMÁTICA DE LA PROSPECCIÓN HIDROGEOLOGICA.....	58
<b>CAPÍTULO 3. MARCO REGIONAL</b> .....	<b>62</b>
3.1.- GEOLOGÍA .....	62
3.2.- GEOMORFOLOGÍA.....	66
3.3.- HIDROLOGÍA SUPERFICIAL.....	69
3.4.- HIDROGEOLOGÍA.....	71
3.5.- CLIMA .....	74
3.6.- SUELOS .....	76

<b>CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA.....</b>	<b>78</b>
4.1.- ESCALAS DE ANÁLISIS DEL AREA DE ESTUDIO.....	78
4.2.- TOPOGRAFÍA .....	79
4.3.- HIDROGRAFÍA .....	81
4.4.- GEOLOGÍA .....	82
4.5.- GEOMORFOLOGÍA.....	83
4.6.- SUELOS .....	83
4.7.- PROSPECCIÓN DIRECTA.....	85
4.7.1.- Recopilación de censos antecedentes .....	85
4.7.2.- Perforaciones de estudio.....	85
4.7.2.1.- Perforación por percusión (conceptualización) .....	86
4.7.2.2.- Perforaciones por rotación (piezómetros).....	90
4.7.3.- Censo de perforaciones .....	92
4.7.4.- Hidrodinámica.....	93
4.7.4.1.- Piezometría y gradientes hidráulicos horizontales.....	93
4.7.4.2.- Gradientes hidráulicos verticales .....	94
4.7.4.3.- Ensayo de trazador salino .....	94
4.7.5.- Hidroquímica .....	96
4.7.5.1.- Selección de datos según su calidad y tratamiento en gabinete .....	97
4.7.5.2.- Muestreo de agua subterránea y superficial .....	97
4.7.5.3.- Análisis de laboratorio.....	100
4.7.6.- Fase sólida .....	102
4.7.6.1.- Descripción de detritos y testigos de sedimentos.....	102
4.7.6.2.- Descripción y conteo mineral de secciones delgadas .....	103
4.7.6.3.- Análisis de laboratorio.....	104
4.8.- PROSPECCIÓN GEOFÍSICA .....	108
4.8.1.- Principio del método eléctrico.....	108
4.8.2.- Geofísica de superficie .....	112
4.8.2.1.- Tomografía de resistividad eléctrica (TRE).....	112
4.8.3.- Perfilaje geofísico .....	117
4.8.3.1.- Diseño de campaña de perfilaje .....	118
4.8.3.2.- Perfilaje eléctrico.....	120
4.8.3.3.- Perfilaje de Espectroscopia Gamma Natural (NGS).....	125
4.8.3.4.- Perfilaje de flujo por molinete.....	126
4.8.3.5.- Perfilaje Conductividad Eléctrica y Temperatura .....	130
4.9.- TRATAMIENTO ESTADÍSTICO .....	131
4.9.1.- Análisis de correlación.....	131
<b>CAPÍTULO 5. ANÁLISIS DEL MEDIO FÍSICO .....</b>	<b>132</b>
5.1.- TOPOGRAFÍA E HIDROGRAFÍA .....	132
5.2.- GEOLOGÍA .....	134
5.2.1.- Unidades litológicas de la zona de estudio .....	134
• Unidad litológica 1 (UL1): .....	135
• Unidad litológica 2 (UL2): .....	136

• Unidad litológica 3 (UL3): .....	138
• Unidad litológica 4 (UL4): .....	139
• Unidad litológica 5 (UL5): .....	140
5.2.2.- Distribución en superficie de las unidades litológicas .....	140
5.2.3.- Relaciones estratigráficas de las unidades litológicas reconocidas ..	142
5.3.- GEOMORFOLOGÍA.....	147
5.3.1.- Lomadas disectadas con costra calcárea (LDC) .....	149
5.3.2.- Lomadas disectadas con cubierta eólica escasa (LDEE) y dominante (LDED) .....	149
5.3.3.- Planicie de inundación (PI) .....	150
5.3.4.- Lagunas Permanentes (LP) e intermitentes (LI).....	151
5.4.- SUELOS .....	152
5.4.1.- Suelos de lomada.....	154
5.4.2.- Suelos de vías de escurrimiento y pendientes .....	157
5.4.3.- Suelos de valle .....	159
5.5.- MODELO CONCEPTUAL DE LA PARCELA EXPERIMENTAL Y ALREDEDORES.....	162
5.6.- ANALISIS DETALLADO DE LAS UNIDADES LITOLÓGICAS .....	164
5.6.1.- Descripción de los testigos de TA6-1 .....	165
5.6.2.- Granulometría.....	167
5.6.3.- Mineralogía de arenas.....	169
5.6.4.- Mineralogía por difracción de rayos X.....	175
• Análisis semicuantitativo de la fracción total de sedimento .....	177
• Análisis semicuantitativo de la fracción arcilla.....	180
5.6.5.- Caracterización geoquímica .....	183
5.6.6.- Caracterización de susceptibilidad magnética ( $\chi$ ) .....	195
<b>CAPÍTULO 6. CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA APLICADA A LA EXPLORACIÓN DE ACUÍFEROS CON ARSÉNICO .....</b>	<b>198</b>
6.1.- TOMOGRAFÍAS DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA .....	199
6.1.1.- Parcela experimental.....	202
6.1.2.- Zona de estudio.....	207
6.2.- PERFILAJE GEOFÍSICO.....	212
6.2.1.- Perfilaje de espectroscopia gamma natural .....	213
6.2.2.- Ensayos de flujos verticales con sondas de micromolinetete (HRFM). 220	
<b>CAPÍTULO 7. HIDROGEOLOGÍA DE LA ZONA PERIURBANA .....</b>	<b>225</b>
7.1.- PIEZOMETRÍA.....	225
7.2.- HIDROQUÍMICA .....	227
7.2.1.- Rangos de variación y evolución espacial de la composición química .....	228
7.2.2.- Hidroquímica de perforaciones someras.....	238
7.2.3.- Hidroquímica de perforaciones profundas.....	244
7.2.4.- Análisis de correlación del As y F con la hidroquímica mayoritaria... 246	
7.2.5.- Análisis espacial de As.....	256

7.2.5.1.-	Análisis del As en función de la geomorfología .....	256
7.2.5.2.-	Variación sobre las líneas de flujo .....	260
7.2.6.-	Análisis espacial del F .....	263
7.2.6.1.-	Análisis del F en función de la geomorfología .....	263
7.2.6.2.-	Variación sobre las líneas de flujo .....	265
<b>CAPÍTULO 8.</b>	<b>HIDROGEOLOGÍA DE LA ZONA DE ESTUDIO .....</b>	<b>267</b>
8.1.-	HIDRODINÁMICA .....	267
8.1.1.-	Piezometría de la zona de estudio .....	267
8.1.2.-	Caracterización del flujo en la parcela experimental .....	272
8.1.2.1.-	Gradientes hidráulicos horizontales .....	273
8.1.2.2.-	Gradientes hidráulicos verticales .....	274
8.1.3.-	Ensayo de trazador salino .....	275
8.2.-	HIDROQUÍMICA .....	278
8.2.1.-	Hidroquímica de las aguas superficiales .....	279
8.2.2.-	Hidroquímica de perforaciones someras .....	281
8.2.3.-	Hidroquímica de perforaciones profundas .....	287
8.2.4.-	Hidroquímica de la parcela experimental .....	295
8.2.5.-	Análisis de relaciones entre el As y F con la hidroquímica mayoritaria .....	300
<b>CAPÍTULO 9.</b>	<b>MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL PARA LA EXPLORACIÓN DEL ARSÉNICO EN UN ACUÍFERO DE LLANURA .....</b>	<b>317</b>
9.1.-	MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL .....	317
9.2.-	CRITERIOS PARA LA EXPLORACIÓN EN EL AREA DE ESTUDIO Y EN LA LLANURA CHACO-PAMPEANA .....	323
<b>CAPÍTULO 10.</b>	<b>CONCLUSIONES Y LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN FUTURAS ...</b>	<b>326</b>
10.1.-	CONCLUSIONES .....	326
10.2.-	LÍNEAS DE INVESTIGACION FUTURA .....	332
<b>CAPÍTULO 11.</b>	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>333</b>
11.1.-	ARTÍCULOS CITADOS EN EL TEXTO .....	333
11.2.-	DIFUSIÓN DE LOS RESULTADOS .....	366

**ANEXO A: Geomorfología y suelos**

**ANEXO B: Caracterización de la fase sólida de las perforaciones de estudio (TA1, TA2 y TA6-1)**

**ANEXO C: Censos de perforaciones y análisis químicos**

**ANEXO D: Relevamiento geofísico: tomografías de resistividad y perfilaje de pozo**