

## NUEVAS ORIENTACIONES DEL MANEJO DE LOS RECURSOS HÍDRICOS EN EUROPA – EL APOORTE DEL ANÁLISIS SOCIO-ECONÓMICO

PENNEQUIN Didier, GOURCY Laurence - BRGM, EAU, BP 36009, 45060 Orléans Cedex 2, Francia,  
d.pennequin@brgm.fr

**Resumen:** La necesidad de tener una visión común para el manejo del recurso hídrico en la Unión Europea llevó a la elaboración de la directiva 2000/60/CE del Parlamento y del Consejo de la UE, también llamada Directiva Marco en el sector del Agua de octubre 2000 (DMA). La DMA fija objetivos claros y un calendario de ejecución estricto. Para las masas de agua contaminada es preciso determinar medidas correctivas pertinentes: estimar los costes relacionados, implementar las acciones o pedir una derogación para que se prorroguen los plazos. Por eso es necesario buscar soluciones técnicas que permitan lograr el buen estado y efectuar un análisis económico con meta a determinar soluciones efectivas en términos de costo. Este modo de gestión de los recursos de agua se aplicó al estudio piloto del acuífero del Rin (Alsacia, Francia), afectado por una contaminación de salinización. Las nuevas orientaciones dadas al manejo de los recursos de agua en Europa permiten extender la visión que tenemos de los recursos completando el análisis general que incluye no solamente los parámetros del medio ambiente, sino también los intereses del conjunto de los actores socio-económicos. Se inscribe así en el concepto del desarrollo sostenible.

**Palabras-claves:** Directiva Marco sobre el Agua, manejo de los recursos de aguas subterráneas, Análisis socioeconómico

**Abstract:** The complexity of the situation with respect to water resources in Europe, led to the Water Framework Directive (WFD) in October 2000. This Directive sets up a common framework for water resources management in all European countries, and fixes up a step by step approach with deadlines, to reach the objective of “good water status” for all natural continental waters by the year 2015. It stems from some of the best available practices already set in place in several European countries, but goes beyond to introduce new orientations for water resources management to make it compatible with the concept of sustainable development. As such, managing water resources in Europe first requires to enhance their protection, and then to extend the classical approach, to not only include the technical or environmental aspects, but also the socio-economic parameters. This provides another dimension to water resources management, and may yield quite unexpected results, as it did in Alsace in eastern France.

**Keywords:** Groundwater Framework Directive, sustainable groundwater management, Socio-economical analyses, Rhine Valley

### INTRODUCCIÓN

La Unión Europea (UE) se compone de 25 países de superficie moderada que comparten varios recursos de agua transfronterizos, constituidos de aguas superficiales y/o de aguas subterráneas. Las presiones de las actividades humanas llevan a problemas de contaminación que pasan las fronteras, y que a menudo no pueden resolverse de manera eficaz, debido a la falta de una visión común sobre el manejo del recurso hídrico de una legislación global y armonizada entre los países de la UE, aunque ya existían más de 30 directivas europeas que trataban de aspectos específicos relacionados a los recursos de agua. Esta situación llevó a la elaboración de la directiva 2000/60/CE del Parlamento y del Consejo de la Unión Europea (UE), también llamada Directiva Marco en el sector del Agua (DMA) de octubre del 2000 (UE, 2000).

Este artículo pretende en su primera parte introducir brevemente la DMA, algunas de sus ideas fuertes y su calendario de acciones. En la segunda parte, propone una descripción de la implementación de la primera etapa de la DMA en Francia y sigue con una aplicación del análisis socio-económico del acuífero del valle del Rin en Alsacia. El texto presenta las diferentes etapas de la directiva marco indica la importancia del análisis socio-económico en esta directiva. Las referencias indicadas permitirán completar esta información.

### LA DIRECTIVA MARCO EUROPEA SOBRE EL AGUA (DMA) DE OCTUBRE 2000

El objeto mayor de la DMA es establecer un marco común para la protección de todas las aguas superficiales continentales, las aguas de transición (masas de agua superficiales próximas a las desembocaduras de los ríos), las aguas costeras y las aguas subterráneas. Es un texto que también tiene como meta integrar y federar todas las legislaciones sobre el agua que ya existían en la UE antes del año 2000.

La DMA fija objetivos claros: exige que cada masa de agua vuelva al “buen estado” en 2015 (“buen estado químico” para las aguas subterráneas y “buen estado ecológico” para las aguas superficiales), o que se hayan tomado las medidas necesarias para lograr aquel objetivo más tarde, cuando no parece realizable debido por ejemplo a la complejidad del contexto, al estado de contaminación importante del recurso o a la inercia del sistema.

La DMA se basa en una serie de ideas principales que forman un conjunto coherente que permitirá lograr los objetivos medioambientales definidos por el “buen estado”. La DMA considera que el agua no es un “bien comercial como los demás, sino un patrimonio que hay que proteger, defender y tratar como tal”. Es decir que se deben tomar las medidas necesarias para entregar o transmitir a futuras generaciones un recurso hídrico de buena calidad.

La DMA promueve el uso sostenible de las aguas superficiales, de transición, subterráneas y costeras. El manejo del agua debe tomar en cuenta no solamente los aspectos medio ambientales, sino también los intereses de la población autóctona que vive del recurso o junto a él, y los parámetros económicos correspondientes. Los estudios técnicos (hidrológicos, hidrogeológicos, entre otros) no bastan para establecer planes de gestión o de protección eficaces de los recursos de agua, se necesita además llevar a cabo estudios complementarios de tipo socio-económico para que se concilien los intereses de todos los partidos interesados.

La DMA introduce varios conceptos nuevos como por ejemplo las “masas de agua” que representan entidades de manejo de los recursos, o el “buen estado químico” para el agua subterránea, indicando una preocupación de calidad medioambiental. Confirma en la legislación de manera oficial para todos los países europeos el concepto de manejo de los recursos hídricos a la escala de la cuenca (aunque ya se ponía en práctica este procedimiento en varios países como en Francia

desde 1964), tomando en cuenta todas las aguas, tanto superficiales como subterráneas, y sus interacciones. Además preconiza (1) el planteamiento combinado para tratar el problema de las fuentes de contaminación puntuales y difusas, (2) la toma en cuenta de las zonas de transferencia (es decir no solamente los puntos de abstracción y de vertidos, sino la globalidad del recurso), (3) el análisis económico del uso del agua, (4) el principio de la recuperación, de manera equitativa, de los costos de los servicios relacionados con el agua, y (5) la información y la participación del público en las tomas de decisión.

Tabla 1: Directiva Marco Europea sobre el Agua (DMA) - Calendario esquemático de las acciones que deben implementarse para llegar al buen estado en 2015 en las masas de agua de la UE. Los años representan el término último del cumplimiento de las acciones. Water Framework Directive – Milestone of actions for reaching the good status in 2015.

Fecha / Años	Acciones
2002 - 2003	Inventario de los recursos de agua y delimitación de las masas de agua, integración dentro de las demarcaciones hidrográficas, caracterización inicial de las masas de agua.
2003	Transposición de la DMA dentro de la legislación nacional de cada estado miembro e identificación de las autoridades competentes adecuadas.
2004	Análisis detallado de las características de las masas de agua y de las demarcaciones hidrográficas, identificación de las presiones con relación a la actividad humana, delimitación de las zonas protegidas, análisis económico del uso del agua.
2006	Establecimiento e implementación de programas de seguimiento del estado de los recursos de agua y de las zonas protegidas.
2009	Elaboración de (1) planes hidrólogos de cuenca y (2) programas de medidas básicas y complementarias para cada demarcación hidrográfica, con fin de alcanzar los objetivos medioambientales de la DMA - buen estado de los recursos de agua.
2010	Instauración de políticas que proporcionen incentivos para un uso eficiente y equitativo de los recursos de agua (incluyendo la aplicación del principio del contaminador - pagador).
2012	Implementación de los programas de medidas y de los planes hidrológicos de cuenca
2015	Alcance del buen estado del agua en las masas de agua no sometidas a derogación, primera re-evaluación de los programas de medidas y de los planes hidrológicos de cuenca.
2027	Fecha límite para alcanzar los objetivos medioambientales – buen estado de las aguas naturales que están dentro del campo de la DMA, y por las cuales la UE permitió derogaciones en la etapa 2.

Para lograr el objetivo de “buen estado” la DMA establece un marco común de trabajo para los países de la UE, con meta de prevenir “todo deterioro adicional” de los recursos hídricos, de los ecosistemas acuáticos asociados y preconiza mejorarlos cuando lo necesite. Se debe aplicar en cada país las medidas necesarias para reducir, de manera progresiva, los vertidos y entradas de sustancias tóxicas en las aguas naturales. Además, con relación a las aguas subterráneas, la DMA impone que se cambie “toda tendencia significativa y sostenida al aumento de la concentración de cualquier contaminante” imputable a la actividad antrópica.

La ejecución de la DMA sigue un calendario ambicioso: cada acción debe cumplirse dentro de un plazo bien establecido (ver Tabla 1). Tres etapas mayores se pueden destacar hasta 2015. La primera, consiste en la colecta, en cada cuenca hidrográfica, de datos e informaciones sobre los recursos hídricos y el contexto socio-económico relacionado. Esta etapa puede asimilarse a un inventario y diagnóstico de los recursos, que consiste en (1) la caracterización de sus propiedades físicas (delimitación geográfica de masas de agua, descripción de su funcionamiento, de las relaciones con las aguas superficiales vecinas, entre otros.) y químicas (calidad del agua, contaminación), (2) el análisis económico del uso del agua. Se completó este trabajo en la mayoría de los países a finales de 2004. Algunos países, como los de la antigua Europa del Este que se unieron recientemente a la UE, tienen derogaciones temporales para finalizar la primera etapa más tarde.

La segunda etapa, que está comenzando, ambiciona establecer (1) planes hidrológicos de cuenca que darán las grandes orientaciones y acciones con respecto a los objetivos de la DMA y que tendrán que aplicarse en todas las cuencas hidrográficas y (2) programas de medidas preventivas y correctivas para que cada “masa de agua” logre o mantenga el “buen estado” en 2015 (o más tarde en caso de derogación temporal). Estas medidas deben tomar en cuenta los resultados de los análisis que se llevaron a cabo durante la primera etapa. Así, cada programa debe incluir dos clases de medidas, las “medidas básicas” y las “medidas complementarias”. Las primeras representan los requisitos mínimos que se deberán cumplir para que se pueda aplicar la normativa comunitaria sobre la protección de las aguas, tanto como los objetivos específicos de la DMA que deben concurrir para alcanzar el buen estado de las aguas naturales en 2015, incluyendo entre otras cosas:

1. el uso eficiente y sostenible del agua (incluyendo la minimización de los gastos de agua)
2. la reducción a mediano plazo del grado de tratamiento de las aguas naturales,
3. el dominio de la explotación del agua y de la recarga artificial de los recursos
4. el control de los vertidos de fuentes de contaminación puntuales y difusas,
5. la recuperación de los costos relacionados a los servicios del agua.

Las medidas complementarias son aquellas concebidas y aplicadas con carácter adicional a las medidas básicas, que tienen como propósito reforzarlas a fin de lograr los objetivos de la DMA cuando sea necesario. Estas medidas pueden incluir entre otras cosas:

1. decisiones políticas al nivel nacional,
2. instrumentos (leyes, decretos, cánones) de todas categorías tal como legislativos, administrativos, normativos, económicos o fiscales,
3. acuerdos negociados en materia de medio

- ambiente,
- 4. códigos de buena práctica,
- 5. medidas de gestión de la demanda en agua,
- 6. controles físicos de emisión o de vertidos,
- 7. soluciones técnicas específicas
- 8. otras medidas complementarias encaminadas a la consecución de una protección adicional.

Esta etapa debe cumplirse a más tardar en 2009. Durante esta etapa, se pueden pedir derogaciones temporales para las masas de agua que no podrán alcanzar el “buen estado” en 2015. Las solicitudes para derogaciones tienen que dirigirse a la UE y deben acompañarse de argumentos técnico-económicos que (1) justifican las razones por las cuales ciertas masas de agua no podrán llegar al “buen estado” y (2) proponen un programa de acciones y un registro de vencimientos que permitirán lograr los objetivos de la DMA más tarde. En esta etapa es posible pedir derogaciones más permanentes donde no se podrán lograr los objetivos medioambientales en algunos casos específicos, por ejemplo para masas de agua “fuertemente modificadas”,

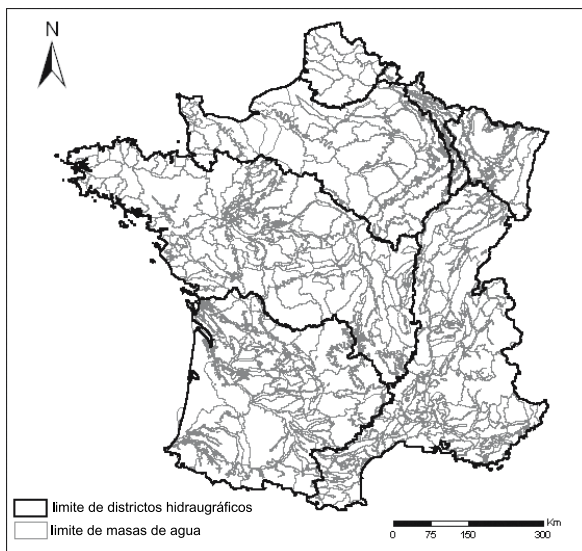


Fig 1: Delimitación de las masas de agua de nivel 1 en Francia – Delineation of groundwater bodies of the first level in France

para las cuales lograr el “buen estado” significaría esfuerzos económicos y/o sociales desmesurados. En estos casos también es preciso argumentarlo.

La tercera etapa consiste en la implementación de los planes hidrológicos de cuenca y de los programas de medidas a fin de lograr el objetivo de la DMA, a saber, el “buen estado” de las aguas naturales en 2015, o más tarde en caso de derogación.

Pero no se acabará la implementación de la DMA en 2015, ni aún en 2027. Es un proceso de mejoramiento continuo del manejo de los recursos de agua, con ciclos de seis años. A finales de cada ciclo se hace una revisión de los programas de medidas y de los planes hidrológicos con respecto a la demanda y a la evolución de la tecnología. Esto requiere una

información y una consulta periódica de las contrapartes interesadas con respecto al calendario, al programa de trabajo relacionado al plan hidrológico de cuenca y su contenido y a los temas importantes que se plantean en la cuenca.

### APLICACIÓN DE LA DMA CON RESPECTO A LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN FRANCIA

En Francia, el Ministerio del Medio Ambiente (Ministère de l'Écologie, du Développement et de l'Aménagement Durable) está encargado de la implementación de la DMA. El trabajo de aplicación al campo se hace por medio de sus servicios regionales, con el apoyo técnico de algunos institutos públicos competentes, como el BRGM en cuanto a los recursos de agua, y en particular a las aguas subterráneas.

En la primera etapa, Francia, que ya tiene una experiencia de más de 40 años con relación al manejo de los recursos hídricos a la escala de la cuenca (empezó con la puesta en función de las Agencias de Cuenca en 1964), procedió esencialmente a un trabajo de reorganización de los recursos y de los datos asociados para que puedan cumplir con las nuevas exigencias de la DMA. Con relación a las aguas subterráneas se focalizaron los esfuerzos sobre:

1. la delimitación de las masas de agua (Fig. 1). Este trabajo se hizo a partir del referencial hidrogeológico 2D/3D del país, y resultó en la definición de más de 550 entidades de gestión que toman sus bases en realidades físicas concretas piezométricas, contactos geológicos (MARDHEL et al. 2005),
2. la racionalización de las redes de monitoreo de los acuíferos y de las masas de agua con respecto a los aspectos cuantitativos y cualitativos del agua (BLUM et al., 2006). Así, se crearon dos categorías de redes, la primera a escala nacional para seguir la evolución de los recursos del país, tanto del punto de vista cuantitativo como cualitativo, y la segunda, a nivel regional o local con el propósito del manejo de los recursos. A final del 2006, la red nacional estaba constituida por unos 1500 piezómetros y 1500 “cualitómetros” (pozo o fuentes dedicados al seguimiento de la calidad del agua subterránea al nivel nacional),
3. la organización de los datos hidrogeológicos, hidrogeoquímicos y socio-económicos de cada cuenca. Estos datos se introdujeron en sistemas informáticos compuestos de bases de datos y de sistemas de información geográficas,
4. el desarrollo de la interoperabilidad y de normas – SANDRE (2006) - para facilitar y asegurar los intercambios de informaciones entre bases de datos,
5. la elaboración de una base de datos nacional para las aguas subterráneas – ADES que se accede por medio de Internet. Su arquitectura consiste en un federador virtual que explota las bases de datos que ya existían en diferentes partes del país, y que también sirve de interfase entre los usuarios y la información relacionada a los recursos de agua

- subterránea (Fig. 2) (CHERY; CATTAN, 2003),
6. la caracterización de las masas de agua incluyendo la descripción de su geología, de su funcionamiento hidráulico, de los intercambios con otras masas de agua superficial o subterránea, de la calidad de su agua, de las presiones debidas a la actividad antrópica. Una guía metodológica se elaboró para coordinar la gestión (NORMAND ; CHADOURNE, 2003),
  7. la elaboración de una metodología para establecer el fondo geoquímico natural de las aguas subterráneas. Ese trabajo tenía como propósito determinar la calidad natural del agua, sin influencia de la actividad humana, para definir la situación de referencia a partir de la cual se puede evaluar el nivel eventual de contaminación de una masa de agua. La metodología se basa en la interacción entre aguas y rocas, y uso de métodos estadísticos (CHERY, 2006),
  8. la implementación del análisis de las presiones que la actividad humana ejerce sobre los acuíferos o masas de agua, y una primera estimación del nivel de contaminación de las masas de agua a la escala de la cuenca,
  9. la realización de un análisis económico del uso del agua en cada demarcación hidrográfica.

También se aprovechó este trabajo de inventario, de reorganización y de caracterización para empadronar los métodos, modelos y herramientas de ayuda a la decisión que parecían pertinentes para el manejo sostenible y la protección de los recursos de agua que ya comprobaron su eficacia por medio de una aplicación en un (o varios) sitio(s) piloto(s). Es el caso, entre otros del modelo de optimización/minimización del costo de explotación-preservación del sistema

acuífero de Croissy (PENNEQUIN et al., 1991), el modelo de protección del recurso en el valle del Ródano (PENNEQUIN et al., 2003), el modelo socio-económico del sistema acuífero del valle del Hérault (LANINI et al., 2004) y también la herramienta de ayuda a la decisión en el proceso de consultación del público (PEREIRA et al., 2003).

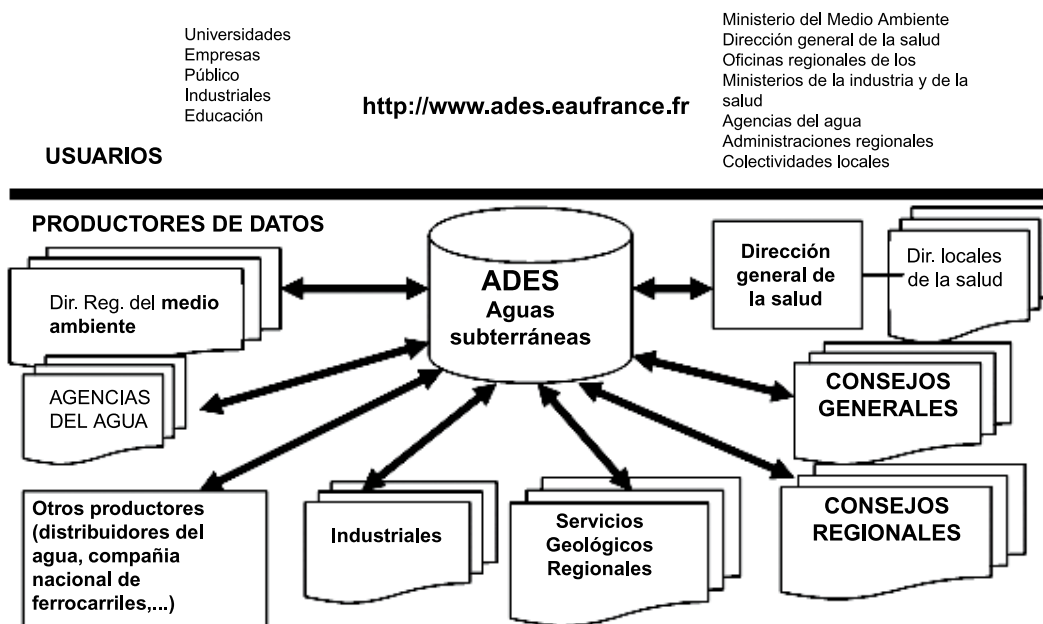
Esta primera etapa desembocó en un diagnóstico global de la situación de los recursos de agua que prevalecía en Francia hasta hace dos años, y en la organización y la racionalización del nivel de conocimiento que prevalecía en 2004. También permitió poner en evidencia las masas de agua que no parecían en situación de lograr en las condiciones actuales, el buen estado en 2015.

### MASAS DE AGUA SUBTERRÁNEA CON RIESGO DE NO LOGRAR EL BUEN ESTADO EN 2015

En la primera etapa, se desarrollaron metodologías para tratar el problema de las masas de agua que no podrán cumplir con los objetivos de la DMA si no se hace nada. Estas metodologías incluyen una parte técnica y una parte socioeconómica.

Así para éstas masas de agua, primero se determinan medidas correctivas pertinentes para limpiarlas o, por lo menos, para garantizar su compatibilidad con los objetivos medioambientales de la DMA. De manera concreta se necesita llevar a cabo estudios técnicos a fin de buscar soluciones adecuadas conformes con el calendario de acciones de la directiva. Generalmente incluyen estudios hidrogeológicos e hidrogeoquímicos y elaboración de modelos matemáticos.

Se necesita después estimar los costos relacionados a cada solución técnica y se efectúa un análisis “costo-eficacia” con meta a determinar



Modificado a partir de [www.ades.eaufrance.fr](http://www.ades.eaufrance.fr)

Fig.2: Esquema de la arquitectura del funcionamiento de ADES – Base de Datos Nacional para las aguas subterráneas en Francia – Structure of ADES working system – the groundwater database in France

la solución más costo-efectiva. Si el costo de esta solución parece desproporcionado con respecto a lo que está en juego, el proceso sigue con un análisis “costo-beneficio” en el cual, no sólo se toman en cuenta los costos directos de las medidas correctivas sino también los costos directos e indirectos de los daños que podrían ser evitados si se aplicaban las medidas correctivas.

Los resultados del análisis costo-beneficio sirven para tomar la decisión de implementar las medidas correctivas más costo-efectivas o al contrario buscar otras soluciones más económicas y/o pedir una derogación para que se prorroguen los plazos fijados por la DMA.

Los resultados de este proceso tienen que someterse a la consulta pública y a la decisión política. Es decir que los usuarios y el público en general no solo están informados sino que pueden participar de manera concreta y activa en el manejo de los recursos hídricos.

Este modo de gestión de los recursos de aguas superficiales o subterráneas se pone en marcha progresivamente con la realización de estudios pilotos, como el que se realizó en el este de Francia, en Alsacia, con relación al acuífero libre del valle superior del Rin, afectado por varias contaminaciones incluyendo salmueras, nitratos y plaguicidas.

El resto de este artículo resume el caso piloto desarrollado en el valle del Rin y que considera las series de medidas correctivas que se tomaron con el propósito de reducir la contaminación del acuífero para cumplir con los objetivos de la DMA. La descripción se focaliza en el análisis socioeconómico que es la parte más original del estudio.

### APLICACIÓN DEL ANÁLISIS SOCIOECONÓMICO AL CASO DEL ACUÍFERO DEL VALLE DEL RIN EN ALSACIA - FRANCIA

El acuífero del valle superior del Rin se extiende sobre más de 4200 km<sup>2</sup> entre Alemania y Francia (Fig. 3). Con una reserva de agua que supera 45 Bm<sup>3</sup>, representa una masa de agua importante que alimenta a una población de 3 millones de habitantes en Alsacia (Francia), en Baden (Alemania) y en la región de Basilea (Suiza).

Unos 300 Mm<sup>3</sup> de agua se explotan cada año para satisfacer 75% de la demanda en agua potable de la región, 45% de los cuales concierne a Francia, 35% Alemania y 20% Suiza. Este acuífero también provee 50% de las necesidades en agua industrial.

Desde la década del 70, el crecimiento de la agricultura extensiva generó una contaminación difusa por los nitratos y plaguicidas. Concentraciones que exceden 50 mg.l<sup>-1</sup> de nitratos ocurren en varios lugares y en muchos casos los plaguicidas superan 0,5 µg.l<sup>-1</sup> (normas europeas para el agua potable, Directiva 2006/118/CE).

También, esta masa de agua está afectada por algunas contaminaciones puntuales de origen industrial, como las salmueras que resultan de la actividad minera relacionada a la extracción de potasas de la compañía “Mines de Potasas d’Alsace” (MDPA) cerca de Mulhouse. Esta contaminación aparece en la figura 3 bajo la forma

de dos plumas negras en las cuales los contaminantes se mueven del Sur hacia el Norte según la dirección de los flujos subterráneos. Proviene de la infiltración de agua de lluvia que al atravesar los desechos mineros se carga de cloruros en concentraciones que exceden 200 g.l<sup>-1</sup>. Las concentraciones en el agua subterránea pueden alcanzar todavía hoy 50 g.l<sup>-1</sup> en algunos lugares cercanos de los desechos mineros.

La explotación de las potasas empezó en 1910, pero la contaminación no se detectó antes de los años 1970. Desde aquella época, varios dispositivos de descontaminación se han puesto en ejecución, incluyendo pozos para recoger los cloruros flujo abajo (Fig.4). En 1989, los desechos mineros que se caracterizaban por una concentración baja en sal fueron recubiertos con geotextiles o vegetales para demorar su movilización hacia el recurso de agua.

Aquellos dispositivos de descontaminación siguen funcionando desde entonces, mejorando progresivamente la calidad del agua subterránea. Con la instauración de la DMA en 2000, era necesario determinar si las medidas bastaban para que se pudiese respetar los plazos de la directiva y el objetivo de buen estado en 2015. Si el objetivo se podía lograr, no se necesitaban otras medidas. Si no, se debían tomar medidas correctivas complementarias, o justificar un costo desproporcionado para pedir una derogación a la UE.

Responder a esta preocupación necesitó desarrollar una metodología cuyas etapas principales están resumidas en el párrafo siguiente (RINAUDO; LOUBIER, 2005).

La primera etapa consistió en recuperar los datos disponibles relacionados al sistema acuífero y a la calidad de su agua. Con estos datos se elaboró un modelo matemático con el propósito de simular la evolución espacio-temporal de la calidad del agua con las medidas correctivas existentes ya utilizadas. La

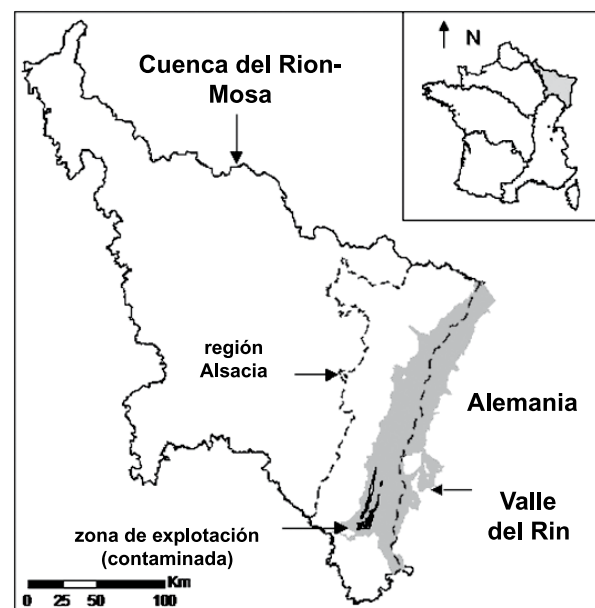
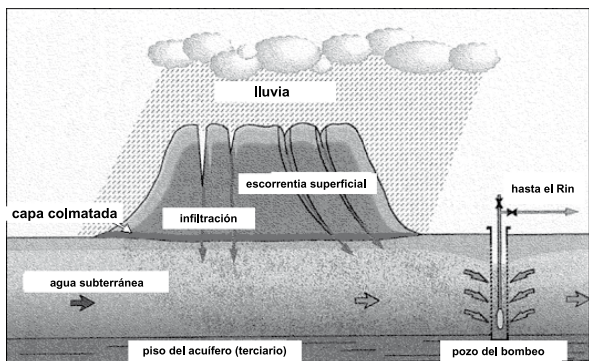


Fig. 3: Acuífero del Valle superior del Rin – Aquifer of the Upper Rhine Valley.

simulación demostró que no se podía lograr el buen estado en 2015 con las medidas existentes.

Se buscaron varias soluciones técnicas para que la masa de agua pudiera cumplir con el objetivo de la DMA. Esto incluyó (1) quitar los desechos y echarlos en vertederos controlados, (2) aumentar el bombeo de descontaminación por medio de pozos adicionales y/o aumentando los caudales de los pozos existentes, (3) intensificar la disolución artificial de los desechos o (4) poner en ejecución una combinación de estas medidas. Cada una de estas soluciones se simuló con un modelo matemático para poder dimensionar de manera apropiada a fin de que la masa de agua recobre el buen estado en 2015, es decir una concentración en cloruros inferior a 250 mg.l<sup>-1</sup>. Después se determinaron los costos de cada solución, y un análisis permitió destacar la solución más costo-eficaz, es decir la solución más barata que permitiría lograr los objetivos de la DMA.

Los resultados aparecen en la figura 6. Con el dispositivo de descontaminación actual, no se podría alcanzar el buen estado hasta 2027 (escenario inicial). Pero una solución complementaria mixta además del dispositivo existente e incluyendo un esquema de disolución acelerada de los desechos y un aumento de los bombeos de descontaminación (con sistemas



Fuente: MDPA

Fig.4: Dispositivo de descontaminación incluyendo pozos y trampas para los contaminantes – Decontamination system including wells and traps for pollutants.



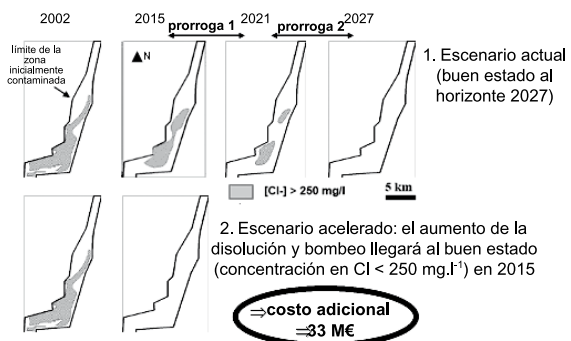
Foto: im@gé, BRGM (B. Feuga)

Fig.5 Disolución artificial de los desechos mineros – Artificial dissolution of mine waste.

de drenaje adaptados) permitiría cumplir con los objetivos de la DMA, es decir alcanzar el buen estado en todas partes de la masa de agua en 2015 (escenario acelerado).

El costo adicional total en el escenario acelerado se estimó a cerca de 33 M€, representando una inversión inicial relacionada a la puesta en función de los nuevos equipos de descontaminación y el costo de su mantenimiento hasta 2015. Este cálculo se hizo considerando que el dispositivo de descontaminación existente ya fue aceptado por la comunidad, que su costo fue ratificado al nivel del presupuesto y por esta razón no debía tomarse en cuenta. Para saber después si el escenario de descontaminación acelerada era viable en el plan económico había que hacer un análisis costos-beneficios.

El análisis costos-beneficios tenía como



Fuente: Modificado a partir de RINAUDO; LOUBIER (2005)

Fig.6: resultados del modelo matemático (RINAUDO; LOUBIER, 2005) – simulación del impacto de las medidas correctivas actuales y de las medidas correctivas aceleradas (disolución acelerada de los desechos y bombeo adicional) – Simulation of corrective actions and accelerated corrected actions impacts

Tabla 2: Resultados del análisis costos-beneficios para la masa de agua del valle superior del Rin: los beneficios están calculados sobre la base de los costos evitados por una rehabilitación más rápida (2015 en lugar de 2027) de la calidad del recurso en cuanto a la contaminación de salmueras (RINAUDO; LOUBIER, 2005). Results of the cost-benefit analyses for the groundwater body of the Upper Rhine Valley: Benefit are calculated based on cost avoided due to a master rehabilitation (2015 instead of 2027) in term of water quality.

	Hipótesis 1	Hipótesis 2
	M€	M€
<b>Agua potable – 2 plantas</b>		
Planta 1	1,80	1,80
Planta 2	2,80	2,80
Familias	1,20	2,30
<b>AGRICULTURA</b>		
Corrosión evitada	0,30	0,30
Aumento de la renta de explotación	0,60	0,60
Valor de non-uso	17,60	35,20
Industria	N.D	N.D
<b>Total</b>	<b>24,30</b>	<b>43,00</b>
<b>COSTES</b>		
Inversión	30,20	30,20
Operación y mantenimiento	3,10	3,10
<b>Total</b>	<b>33,30</b>	<b>33,30</b>
<b>BENEFICIO NETO</b>	<b>-9,00</b>	<b>+9,70</b>

propósito demostrar de manera cuantitativa si el costo adicional de descontaminación parecía aceptable para la comunidad, o al contrario, desproporcionado con respecto a los beneficios.

En general, los beneficios relacionados a una acción específica pueden determinarse en términos de los costos que esta acción permite evitar. Este paso considera los costos presentes y futuros sufragados por la sociedad y relacionados al deterioro del agua que se podrían evitar en caso de restauración más temprana de la calidad del agua, en este caso si se implementaba el escenario acelerado en vez del escenario inicial. Aquellos costos evitados son los beneficios que se podrían sacar de una restauración más rápida de la calidad del agua.

Cuatro clases de costos se consideran en este tipo de análisis:

- los costos sufragados por los agentes económicos que usan el agua como un entrante en su proceso de producción. Se analiza en este caso la reducción de las ganancias acarreada por la degradación del agua, relacionada (1) a la baja calidad del producto final o (2) a inversiones adicionales necesarias para paliar a la calidad insuficiente del agua, lo que aumenta el costo de producción. Los sectores económicos implicados aquí son la agricultura, la industria, los productores de agua potable.

- los costos que impactan a las personas que usan el agua como producto final de consumo. Se estiman aquí los gastos adicionales debidos a los cambios de comportamientos relacionados a temores o baja confianza frente al conocimiento de la contaminación (compra de botellas de agua mineral, de sistemas de purificación del agua.)

- los costos que afectan los usuarios indirectos del agua, o los que usan el agua como soporte de producción. Actividades como el turismo, la pesca recreativa, la acuicultura, pertenecen a esta categoría. Aquellos costos pueden ser multiformes incluyendo costos adicionales de protección o de operación, degradación de las ganancias relacionadas a una

disminución de frecuentación de un lugar turístico, costos adicionales de publicidad.

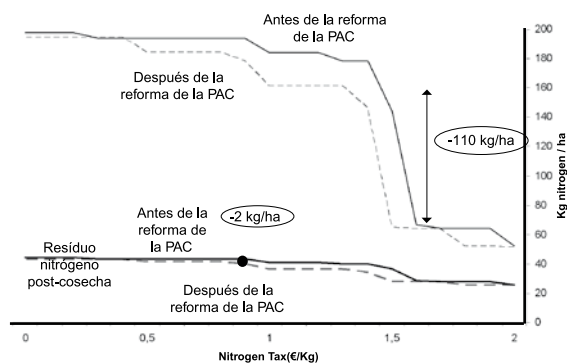
- los costos relacionados a la reducción de lo que se llama el “valor de no-uso” del agua cuando está contaminada. El “valor de no-uso” del agua puede asimilarse a un valor económico que se atribuye a un bien medioambiental sano, como una reserva de agua subterránea no-contaminada.

Los costos evitados o los beneficios relacionados a la implementación del escenario acelerado (en vez del escenario inicial) se determinaron por medio de modelos matemáticos y de investigaciones llevadas ante expertos, administraciones, sociedades privadas y profesionales de los campos correspondientes. Primero se calcularon los costos relacionados a la degradación del agua siguiendo el escenario inicial y después se hizo el mismo ejercicio para el escenario acelerado. La diferencia entre los costos generados en los dos escenarios (costos escenario inicial menos costo escenario acelerado) constituyeron los costos evitados o los beneficios relacionados a la restauración anticipada de la masa de agua (el acuífero del valle superior del Rin).

La Tabla 2 muestra un ejemplo de resultados de análisis costos-beneficios. Los beneficios fueron calculados sobre la base de los costos evitados por una rehabilitación más rápida (2015 en lugar de 2027) de la calidad del recurso en cuanto a la contaminación de salmueras. Solo algunos aspectos fueron considerados en el análisis ya que los objetivos del estudio eran la elaboración de una metodología general para tratar el problema de las masas de agua contaminadas con respecto a las exigencias de la DMA.

Aunque todavía no se pudo finalizar el análisis y cubrir todos los aspectos, ni tampoco la entera región; en su estado actual el estudio demuestra que frente a un costo de descontaminación que puede parecer a priori alto, los beneficios que resultan para la comunidad pueden ser muy importantes. Este estudio piloto, aunque no completo, ya permitió levantar muchas preguntas y los responsables del recurso hídrico están considerando la posibilidad de proceder con la descontaminación acelerada en vez de pedir una derogación a la UE para prorrogar los plazos y llegar al buen estado más tarde.

Otros problemas relacionados a la calidad del agua en este acuífero o masa de agua, hacen el objeto de desarrollos metodológicos o de elaboración de modelos socioeconómicos específicos con meta a reducir el nivel de contaminación del agua en el recurso. Estos trabajos se realizan también en el marco de estudios pilotos, como por ejemplo (1) para estimar la repercusión de decisiones políticas o fiscales sobre el medioambiente en cuanto a la introducción de un impuesto particular sobre los abonos nitrogenados (GRAVELINE et al., 2007) o (2) para establecer un modelo de impacto de la selección de las producciones agrícolas en Alsacia (RINAUDO et al., 2005).



Fuente: Modificado a partir de GRAVELINE et al. 2007

Fig. 7: impacto de un impuesto sobre los abonos nitrogenados antes y después de la reforma de la política agrícola comuna – Impact of the tax on nitrogen fertilizers before and after the Common Agricultural Policy

## CONCLUSIONES

Los 25 países de la Unión Europea hoy viven la implementación de la DMA. Ya se acabó la primera etapa en la mayoría de los países y se está implementando

la segunda etapa de la DMA. Consiste en la preparación de los planes hidrológicos de cuenca (los SDAGE en Francia) y de los programas de medidas correctivas y preventivas a la escala de la masa de agua (los SAGE en Francia). Se basan sobre un enfoque tanto técnico como socio-económico. Sus campos de acción son amplios con respeto a los aspectos preventivos y cubren todas las masas de agua de la demarcación hidrográfica. Pero también se focalizan con medidas curativas sobre las masas de agua contaminadas que arriesgan no lograr el buen estado en 2015.

El enfoque o el análisis socio-económico y los métodos que se están desarrollando tienen la meta de completar los estudios más clásicos de hidrología, hidrogeología y de modelación que se focalizan esencialmente sobre el medio físico o más generalmente, el medio ambiente.

Aunque todavía deben mejorarse algunos métodos socio-económicos, ya empiezan a contribuir de manera significativa al proceso de manejo de los recursos de agua, revolucionando a veces los modos de pensamientos y de razonamiento. Esas nuevas orientaciones dadas al manejo de los recursos de agua en Europa, permiten extender la visión que tenemos del manejo de los recursos, llevar un enfoque diferente a los problemas, y completar el análisis general, incluyendo, no solamente los parámetros del medio ambiente, sino también los intereses del conjunto de los actores socio-económicos. Se inscribe así en el concepto del desarrollo sostenible.

De este nuevo procedimiento de abordar el problema de los recursos de agua a veces resultan conclusiones que a priori no son intuitivas, que pueden sorprender e ir en una dirección muy distinta de la que sería trazada con un enfoque más clásico.

Además, en este modo de operación se informa al público permitiendo que participe y juegue un papel importante en el manejo de los recursos de agua. Esto resulta en una mejor apropiación por todos de las decisiones que se toman a alto nivel con respecto a los recursos hídricos.

## REFERENCIAS

BLUM, A; GRAVIER, A.; MARDHEL, V.; MALON, J.F. Elaboration d'un réseau de surveillance de la qualité des masses d'eau souterraine en Loire-Bretagne conforme aux prescriptions de la Directive Cadre sur l'Eau. Rapport de phase 2. Choix des sites de surveillance. **BRGM RP-54641-FR**, 55 p., 2006.

CHERY, L. **La qualité naturelle des eaux souterraines – Méthode de caractérisation des états de référence des aquifères français**. Guide technique, Orléans : BRGM édition, 2006.

CHERY, L. ; CATTAN, A. ADES: La banque nationale sur les eaux souterraines (ADES the national Data Base). **La Houille Blanche**, n.2, 2003.

Directiva 2000/60/CE del **Parlamento Europeo y**

**del Consejo**, de 23 de octubre de 2000, por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas, DO L 327 de 22.12.2000, p. 1/73

Directiva 2006/118/CE del **Parlamento Europeo y del Consejo**, de 12 de diciembre de 2006 relativa a la protección de las aguas subterráneas contra la contaminación y el deterioro, DO L 372 de 27.12.2006, p. 19/31.

GRAVELINE, N., RINAUDO, J.D., Segger, V., Lambrecht, H., Casper, M., Grimm, Strele, J., Van Dijk, P., Koller, R., Guder, T., Elsass, P. Integrating economic with groundwater modelling for developing long-term nitrate concentration scenarios in a large aquifer. In: CHERY L.; De MARCILLY, G. **Aquifer Systems Management: Darcy's Legacy in a World of Impending Water Shortage**. Selected Papers on Hydrogeology 10. London: Taylor and Francis group, 2007.

LANINI, S.; COURTOIS, N.; GIRAUD, F.; PETIT, V.; RINAUDO, J.D. Socio-hydrosystem modelling for integrated water resources management – The Hérault catchment case study, southern France - **Environmental Modelling & software**, v.19, p.1011-1019, 2004.

MARDHEL, V.; NORMAND, M.; GRAVIER, A. Mise en œuvre de la DCE – référentiel cartographique national des masses d'eau souterraine (version 1). **BRGM/RP-53923-FR**, 71 p., 7 fig., 7 tabl., 4 ann, 2005.

NORMAND, M.; CHADOURNE, D. Mise en œuvre de la DCE. Identification et délimitation des masses d'eau souterraines. Guide méthodologique. **BRGM/RP-52266-FR**, 45 p., 2003.

PEREIRA, A.G. ; RINAUDO, J.D. ; JEFFREY, P. ; BLASQUES, J. ; QUINTANA, S.C. ; COURTOIS, N. ; FUNTOWICZ, S.; PETIT, V. ICT tools to support public participation in water resources governance & planning : experience from the design and testing of a multi-media platform - **Journal of Environmental Assessment Policy and Management**, v.5, n.3, p.395-420, 2003.

PENNEQUIN, D.; POITRINAL, D.; POINTET, T.; MACHARD DE GRAMONT, H. Techniques d'optimisation environnemento-économique appliquées à la gestion intégrée des ressources en eau - **La Houille Blanche**, n. 3, 2003

PENNEQUIN, D.; SUZANNE, P.; D'ARRAS, D. Sophos: Modèle de gestion optimale de la nappe de Croissy », In: Les eaux souterraines et la gestion des eaux **XXIème Journées de l'Hydraulique** (1991, Sophia Antipolis). Proceedings des XXIème journées

de l'Hydraulique : SHF, 1991.

RINAUDO, J.D.; GRAVELINE, N.; SEGGER V. Modélisation économique des choix de production des exploitations agricoles en Alsace et Pays de Bade. In: **Développement des outils de prévision** (2005, Karlsruhe). Proceedings paper 1456153.

RINAUDO, J.D.; LOUBIER, S. Cost-benefit analysis of large scale groundwater remediation projects in France. In: BOUWER, R.; PIERCE, D. **Cost-benefit analysis and Water resources Management**. London: Edward Elgar Pub, 2005

SANDRE - Les documents du SANDRE - <http://sandre.eaufrance.fr>, 2006.



# EVIDENCIAS DE PLUMA DE CONTAMINACIÓN DETECTADAS POR MÉTODOS GEOFÍSICOS EN EL BASURERO MUNICIPAL DE GUALEGUAYCHÚ, ENTRE RÍOS, ARGENTINA

Pomposiello Cristina, Boujon Pamela, Dapeña Cristina y Favetto Alicia  
INGEIS-CONICET-UBA, Pabellón INGEIS, Ciudad Universitaria, (C1428EHA) Ciudad Autónoma de Buenos Aires, 4783-3021/3  
cpomposi@ingeis.uba.ar, pamelabou@ingeis.uba.ar, dapenna@ingeis.uba.ar, favetto@ingeis.uba.ar

**Resumen:** Este trabajo presenta los resultados geofísicos de un proyecto multidisciplinario en el basurero municipal de Gualeguaychú, provincia de Entre Ríos, Argentina. Se realizaron dentro y fuera del basural varios estudios geoelectrónicos, perfilajes horizontales y sondeos verticales utilizando configuraciones dipolo-dipolo y Schlumberger respectivamente y prospecciones con georradar utilizando antenas de 150 y 500 MHz. Los modelos 2D obtenidos dentro del relleno presentan una capa superficial de 2 a 3 m de espesor con resistividad eléctrica entre 100 y 1000 ohm m, donde se alojan los residuos. Por debajo se observa una capa conductora de 4 a 5 m de espesor con valores de resistividad entre 3 y 6 ohm m delimitando la posible zona de contaminación que se extiende hasta la tercer capa que presenta una resistividad de alrededor de 15 ohm m y 10 metros de espesor, lo cual indica que la contaminación no superaría los 8 metros de profundidad. Los modelos 2D medidos fuera del relleno (dentro del predio) presentan una capa conductora al mismo nivel que los perfiles realizados sobre el relleno, la cual no se observa fuera del predio. A partir de los resultados de las mediciones con georradar se determinó la ubicación de la capa freática a una profundidad aproximada de 2 a 3 metros y se pudo identificar el límite superior de la pluma de contaminación debido a la ausencia de reflectores o señales débiles. Los modelos geoelectrónicos y las interpretaciones de los datos de georradar muestran buena correlación y la interpretación fue integrada a la información geológica. A partir de los valores de conductividad eléctrica de las zonas más conductoras se estimaron algunos parámetros geoquímicos del lixiviado utilizando relaciones empíricas.

**Palabras-claves:** Geofísica ambiental, modelos de resistividad, Georradar, relleno sanitario.

**Abstract:** This paper presents the geophysical results of a multidisciplinary project at an urban solid waste in Gualeguaychú, Province of Entre Ríos, Argentina (Figure 1). Several geoelectric studies, horizontal profiling and vertical sounding using dipole-dipole and Schlumberger electrode configurations respectively and GPR profiles (antennas 150MHz -500MHz) were performed within and outside the landfill (Figure 2). The 2D model obtained within the landfill shows a shallow layer of about 2 - 3 m thick with resistivity values between 100 and 1000 ohm m. The conductive second layer of about 4 - 5 m thick presents values of resistivity between 3 and 6 ohm m, which are indicating a contaminated zone that is extended up to the third layer which has a thickness of more than 10 m and a resistivity of around 15 ohm m (Figures 3, 4). In the 2D model obtained outside the landfill boundaries it is also observed a conductive layer at the same depth level (Figure 6, 8). This conductive layer does not appear at the profile located out of the landfill (Figure 10).

The water table was determined at 2 - 3 m deep by GPR survey (Figure 7). The GPR profiles allowed the identification of the upper limit of the contaminant plume by the absence of reflectors or very weak signals (Figures 5 y 7) coinciding placed at the depths where the 2D resistivity model shows the presence of conductive materials. The geoelectric models and GPR results show a good correlation and their interpretations were integrated with information from regional geology.

Moreover, leachate geochemical parameters were predicted applying empiric relations from the electric conductivity values measured at the most conductive sections, (Table 1).

**Keywords:** Environmental geophysics, resistivity model, GPR, landfill.

## INTRODUCCIÓN

Una gestión integral de los residuos sólidos domiciliarios requiere un adecuado proceso de acciones para su manejo a diferentes escalas con el objeto de proteger el ambiente y la calidad de vida de la población. En la mayoría de los países desarrollados se observa una tendencia a disminuir la generación de residuos e incentivar los programas de reciclaje. En los rellenos sanitarios los residuos se descomponen o biodegradan y desprenden sustancias tóxicas contaminantes originando lixiviados, los cuales pueden migrar formando una pluma contaminante y llegar a cursos de agua superficial y acuíferos. Los métodos geofísicos empleados en esta investigación son altamente eficientes en la determinación de zonas con grandes contrastes de resistividad eléctrica y de la atenuación de la señales de georradar (GPR) en medios de muy baja resistividad, indicando la presencia de fluidos salinos en el medio. Este tipo de metodología permite monitorear el alcance de la contaminación a través del tiempo.

Este trabajo presenta resultados geofísicos desarrollados hasta abril de 2005 en el marco de un proyecto multidisciplinario en el basurero municipal de Gualeguaychú, provincia de Entre Ríos, Argentina. El predio del basurero se utilizó inicialmente como lugar de extracción de materiales y se generaron varias depre-

siones. Algunas de éstas se consideraron adecuadas para la acumulación y proceso de los residuos sólidos. Este sitio de deposición final de residuos no ha sido construido siguiendo los mecanismos de ingeniería moderna de los rellenos sanitarios que pretenden reducir sus impactos negativos en el medio ambiente. En la actualidad, los rellenos sanitarios se disponen básicamente en una depresión en el terreno, cubierta por una membrana inferior impermeable, con sistema de recolección de lixiviados, sistema de recolección de gases y una cobertura superior. No necesariamente todos estos elementos están presentes en todos los rellenos sanitarios. En el caso del basurero municipal de Gualeguaychú colmatado y cerrado que estamos investigando no hay registros de su construcción y no existe sistema de recolección de lixiviados ni de gases, aunque se observa que los residuos han sido depositados en celdas paralelas.

Para llevar a cabo este estudio se aplicaron las técnicas geofísicas mencionadas dentro y fuera del basural. Las tareas consistieron en varios estudios geoelectrónicos utilizando perfilajes horizontales con arreglo dipolo-dipolo (DD) para obtener modelos bidimensionales y sondeos eléctricos verticales (SEV) utilizando el arreglo Schlumberger. Además, en correspondencia con los estudios geoelectrónicos se obtuvieron varios perfiles con georradar (GPR) utilizando antenas de 500 MHz y

150 MHz.

Por otro lado, con el objeto de monitorear el nivel y composición química del agua freática se instalaron siete freatómetros de hasta 2,30 m de profundidad bordeando el área del relleno sanitario.

A partir de la conductividad eléctrica de las zonas más conductoras (sustrato saturado) determinada en los estudios geoelectrónicos se estimaron parámetros geoquímicos del lixiviado utilizando relaciones empíricas discutidas en Meju (2000). Al mismo tiempo, como algunos parámetros químicos varían con el tiempo es posible a partir de los modelos geoelectrónicos evaluar la edad del relleno (Farquhar, 1989; Meju, 2000).

## ANTECEDENTES

El área de estudio se circunscribe al predio del relleno sanitario municipal, situado al sur de la localidad de Gualeguaychú, cerca de la confluencia del arroyo del Cura con el río Gualeguaychú, provincia de Entre Ríos (Figura 1). El primero actúa como colector natural de la escorrentía superficial del área y lleva agua todo el año generando un fuerte impacto ambiental por la descarga sin tratar de los efluentes cloacales de la ciudad.

La ciudad de Gualeguaychú tiene una población de 80.000 habitantes y cuenta con numerosas actividades comerciales, industriales y agropecuarias. Las tareas en el basurero municipal colmatado fueron suspendidas hace 8 años pero se desconoce si se tomaron medidas de protección ambiental durante el período de operación. Actualmente, el relleno sanitario está a cargo de la Empresa Municipal de Higiene Urbana, la cual solicitó una evaluación del estado del viejo relleno (pasivo) y del actual (activo).

Pomposiello et al. (2004) efectuaron algunos estudios geofísicos preliminares dentro y fuera del basurero. El principal objetivo fue tomar contacto con el problema para poder diagramar los perfiles geofísicos futuros que garanticen la mejor evaluación de la posible contaminación producida por el basurero.

La composición química de los lixiviados de-

pende de varios factores tales como el tipo de residuo, las velocidades de descomposición química, las precipitaciones locales, la geomorfología y el ambiente geológico. Las modificaciones en parámetros tales como temperatura, pH, conductividad eléctrica ( $\sigma$ ), sólidos totales disueltos (STD), concentración de nitratos y cloruros, entre otros, son indicadoras de la calidad del agua. En tal sentido, se realizaron muestreos preliminares para evaluar química e isotópicamente las aguas superficiales y subterráneas, a partir de muestras obtenidas en los molinos cercanos y en varios pozos freáticos, ubicados alrededor del predio (Panarello et al., 2005). También se determinó la composición isotópica del CO<sub>2</sub> en el suelo para evaluar la madurez del relleno (Valencio et al., 2003).

Asimismo, Orgeira et al. (2004) realizaron un relevamiento magnetométrico y de acuerdo al modelo realizado con estos datos por Prezzi et al. (2005) descartaron la presencia de tambores enterrados conteniendo elementos tóxicos.

Pomposiello et al. (2005 a; b) presentaron el grado de avance en las interpretaciones de los estudios geofísicos realizados hasta abril de 2005.

## CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS E HIDRO-GEOLÓGICAS LOCALES

Desde el punto de vista regional esta zona forma parte de la Llanura Chaco Pampeana (Russo et al., 1979). Las unidades involucradas en la zona de trabajo corresponden a las unidades geológicas Formación Salto Chico, Grupo Punta Gorda y Formación La Picada y se describen de acuerdo a Iriondo (1980), Fili et al. (1994) y Fili (2001).

Formación Salto Chico (Rimoldi, 1963), de edad Plioceno - Pleistoceno inferior. Está compuesta por arenas gruesas y finas de color amarillo y rojo, también es frecuente la gravilla y la grava, con intercalaciones de arcillas de color verde y estratos irregulares de rodados finos y gruesos. Es de origen fluvial y portadora del acuífero principal de la zona. Tiene un espesor máximo de 60 m y se encuentra entre los 3,5 y 120 m

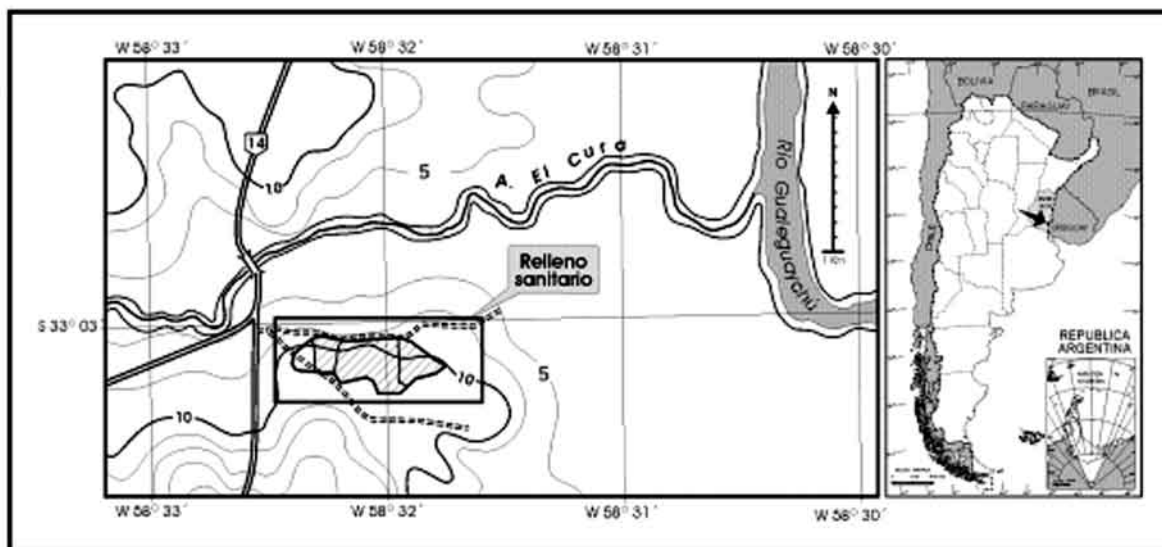


Figura 1. Mapa de ubicación del predio del relleno sanitario y la Provincia de Entre Ríos, Argentina.

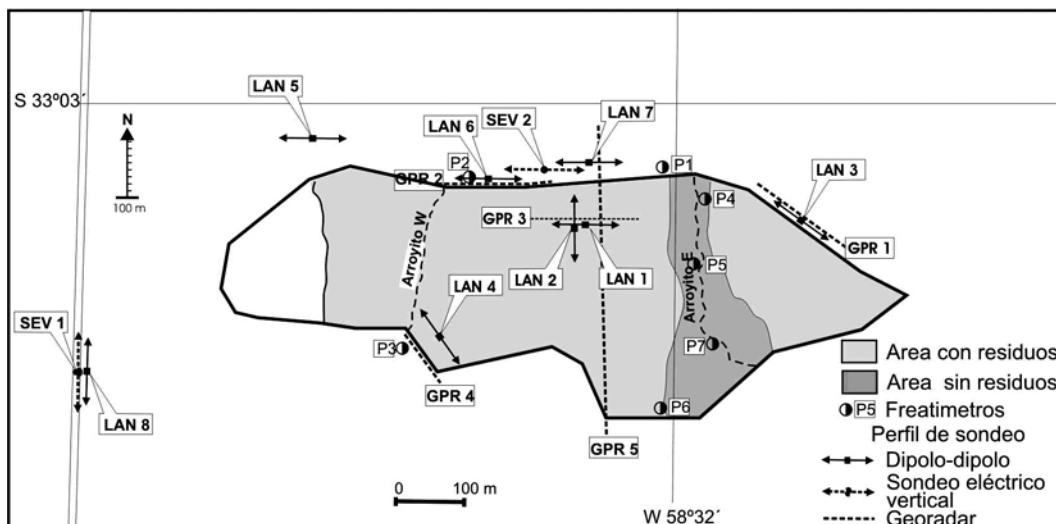


Figura 2 Mapa esquemático con los perfiles sondeados: DD, SEV y GPR y los freaticómetros.

de profundidad.

Grupo Punta Gorda (Iriondo, 1980) de edad Pleistoceno medio a superior. Comprende a las Formaciones Alvear y Hernandarias. En general para el este de la provincia de Entre Ríos se define la Formación Hernandarias (Reig, 1956) que corresponde a una cubierta sedimentaria de tipo pampeano depositada en ambientes palustres y eólicos. La parte superior está constituida por limos, limos arenosos y arcillas castaños, pardos y rojizos con presencia de abundantes concreciones de carbonato de calcio. La parte inferior es más arcillosa con presencia de yeso en forma de cristales hojosos aislados y de color gris verdoso. Por otro lado, en las cercanías del área de estudio Guida y González (1984) encontraron evidencias geomorfológicas y estratigráficas de expansiones estuáricas vinculadas a niveles marinos relativamente elevados durante el Pleistoceno superior que están incluidas en esta formación. El espesor de la Formación Hernandarias varía entre 20 y 40 m. Esta unidad constituye el sustrato del relleno sanitario y se encuentra entre 5 y 30 m de profundidad. Desde el punto de vista hidrogeológico es un acuitardo que contiene al nivel freático. La calidad del agua es pobre y se utiliza para proveer de agua potable a algunas chacras y para abreviar al ganado.

Formación La Picada (Iriondo, 1980) de edad Holoceno. Corresponde a los depósitos sedimentarios que forman el relleno aluvial de los ríos y arroyos de la región. Forma una terraza baja y bien desarrollada. Su composición varía de un valle a otro, dependiendo de la naturaleza de las cuencas respectivas (litología y pendientes locales). Su granulometría es en general arenosa en la sección inferior y en la superior está constituida por limo de color castaño y arcilla negra. La circulación del agua está limitada al subálveo y generalmente presenta contaminación. Su espesor varía entre 1 a 3,5 metros.

## APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS GEOFÍSICOS.

### DD

Se realizaron perfiles geoelectricos utilizando la configuración DD con 21 electrodos ( $a = 5$  m (apertura del dipolo) y una separación entre dipolos con  $n = 1, \dots, 8$ . De esta manera se obtienen pseudo secciones de resistividad eléctrica con un total de 100 m de longitud y se estima la profundidad máxima hasta la cual los datos experimentales dan información confiable de la resistividad eléctrica del medio. Los modelos bidimensionales (2D) de resistividad eléctrica se obtuvieron invirtiendo los datos obtenidos usando el algoritmo DCINV2D (Oldenburg et al., 1993).

### SEV

Para realizar la evaluación de la resistividad eléctrica en capas más profundas se realizaron SEV (arreglo Schlumberger) con apertura (AB) de inyección de corriente entre 6 y 1000 m, lo cual permite hallar un modelo de capas centrado en el lugar de medición y con una penetración entre 200 y 300 metros. Los modelos SEV se obtuvieron con el software de inversión IPIWIN (Bobachev, et al., 2000).

### GPR

El GPR permitió la observación de los primeros metros de profundidad ( $\approx 10$ m) y distinguir el límite entre los depósitos de residuos y la zona que está en contacto con los lixiviados. Los perfiles con GPR fueron realizados con antenas de 500 MHz (blindada) y 150 MHz (aérea). El análisis de los datos incluyó la estimación de la permitividad promedio del suelo, el filtrado de la señal y transformación de tiempo a distancia. Se utilizó el programa comercial Prism versión 2.01 de la firma Radar System, Inc (<http://www.radsys.lv>, 2004).

## RELACIÓN ENTRE LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA Y PARÁMETROS HIDROQUÍMICOS

Los análisis químicos realizados en agua subterránea contaminada por la presencia de lixiviados en diferentes regiones geográficas han demostrado que la conductividad eléctrica determinada en estudios geoeléctricos tiene una fuerte correlación lineal con el total de sólidos disueltos (STD) y con el contenido de cloruro disuelto (Cl-) (Meju, 2000 y sus referencias). Además, Farquhar (1989) y Meju (2000) señalan que la composición del lixiviado varía con la edad del relleno y que para rellenos recientes el contenido de ácidos orgánicos, amonios y STD son altos, pero a partir de la biodegradación de la masa en el tiempo la concentración de esos parámetros decrece. Es decir que conociendo estos valores se podría estimar la edad del relleno sanitario.

Asimismo, Meju (2000) señala que determinando la conductividad eléctrica del sustrato saturado ( $\sigma_b$ ) se pueden predecir los valores de STD a través de las siguientes ecuaciones:

$$\log \sigma_b = -0,3215 + 0,7093 * (\log \text{STD}) \quad (1)$$

$$\log \sigma_b = -0,333 + 0,6453 * (\log \text{STD}) \quad (2)$$

donde  $\sigma_b$  se expresa en mS/m y STD en mg/L. Las ecuaciones (1) y (2) determinan un valor mínimo y máximo de STD respectivamente.

A partir del valor de STD se puede predecir la conductividad del agua ( $\sigma_w$ ) y el contenido de Cl- utilizando las siguientes ecuaciones:

$$\log \text{STD} = 0,8 + 1,015 * (\log \sigma_w) \quad (3)$$

$$\log \text{Cl-} = -0,256 + 1,2 \log \sigma_w \quad (4)$$

donde  $\sigma_w$  se expresa en mS/m y los otros parámetros en mg/L.

Estas relaciones fueron determinadas en un relleno sanitario de Durban, Sudáfrica (Bell y Jermy, 1995). Datos de otros rellenos en Australia (Buselli et al., 1990) y Canadá (Birks y Eyles, 1997) también muestran la misma tendencia lineal que los datos de Durban.

El contenido de agua (W) se puede determinar a través de una relación entre la conductividad in situ y el contenido de agua en un yacimiento de sal de roca y libre de arcillas (Yaramanci, 1994):

$$\sigma_b = \sigma_w * W_m \quad (5)$$

Siendo W el contenido de agua en porcentaje de volumen (vol %) y m el factor de cementación, cuyo valor se encuentra entre 1.6 y 1.9.

Las edades de los residuos se pueden determinar considerando las relaciones y los cambios en la concentración de los parámetros químicos del lixiviado tales como Cl-, STD, pH, entre otros (Farquhar, 1989; Meju, 2000).

## TRABAJO DE CAMPO

### Prospección geofísica

El área de trabajo se ubica por debajo de la cota 10 m y la pendiente regional, de muy bajo gradiente, es aproximadamente N-NE, hacia el arroyo El Cura y el río Gualeguaychú (Figura 1). Los límites del relleno y su superficie son irregulares, siguiendo la geometría que deviene de la alineación de las celdas y

estableciendo un suave resalto. En el borde norte se forma una canaleta entre el relleno y el camino donde se acumula agua. El depósito está dividido en tres partes, entre el sector central y la parte oeste hay una zona sin depósitos que actúa como un curso de agua permanente. El sector oriental está separado del central por una zona sin residuos mas extensa que también funciona como un arroyo. Ambos tienen aproximadamente dirección N-S, llevan agua abundante después de grandes lluvias y desagan de manera indefinida del otro lado del camino formando zonas de anegamiento (Figura 2). Las depresiones entre celda y celda actúan como reservorios de agua después de las lluvias.

Se realizaron varios sondeos eléctricos coincidentes con perfiles de GPR en el basurero colmatado y en su zona de influencia. La ubicación de todos los sondeos geoeléctricos y de GPR se presenta en la Figura 2.

Los perfiles DD: LAN01, LAN02 y LAN04 están localizados en el interior del basurero para obtener información del relleno mismo y de los lixiviados. Los perfiles LAN03, LAN05, LAN06 y LAN07 se encuentran en los bordes del relleno donde no hay residuos. El LAN08 y el sondeo SEV1 ubicados a 500 m hacia el sudoeste se eligieron como referencia para determinar las resistividades de la zona no afectada por los residuos. El sondeo SEV2 se realizó en el borde norte del basurero y en coincidencia con el DD LAN06 y en la zona de descarga del flujo superficial y subterráneo. La interpretación preliminar de los perfiles LAN01, LAN02 y LAN03 fue realizada por Pomposillo et al. (2004).

En los perfiles GPR se utilizó una antena aérea de 150 MHz en el sector de las celdas donde el relieve es irregular y resultó dificultoso utilizar la antena blindada de 500 MHz. Además la penetración es mayor con la frecuencia de 150 MHz y se puede observar claramente el piso del relleno. En los caminos como la superficie era apta para el uso de la antena blindada (500 MHz) se utilizaron ambas antenas.

### Freatímetros

Se realizaron siete pozos de monitoreo afuera del área del relleno sanitario alcanzando hasta una profundidad de 2,30 m (Figura 2). Estas perforaciones se ubican, dos en el borde sur del relleno, dos en el borde norte y el resto en la zona de borde entre el sector central y el sector este del relleno. Fueron construidos para controlar el nivel, composición química e isotópica del agua freática. Se encamisaron con PVC y se colocaron filtros de grava y tapa en ambos extremos. La temperatura y la conductividad específica fueron medidas in situ.

Los niveles freáticos medidos responden rápidamente a la precipitación. El sentido del escurrimiento del sistema freático es N-NE hacia el arroyo Cura y el río Gualeguaychú, ambos de carácter efluente.

### Resultados y discusión

Los datos de resistividad aparente obtenidos en los perfiles DD se invirtieron para determinar modelos 2D de resistividad eléctrica. Se realizaron varias

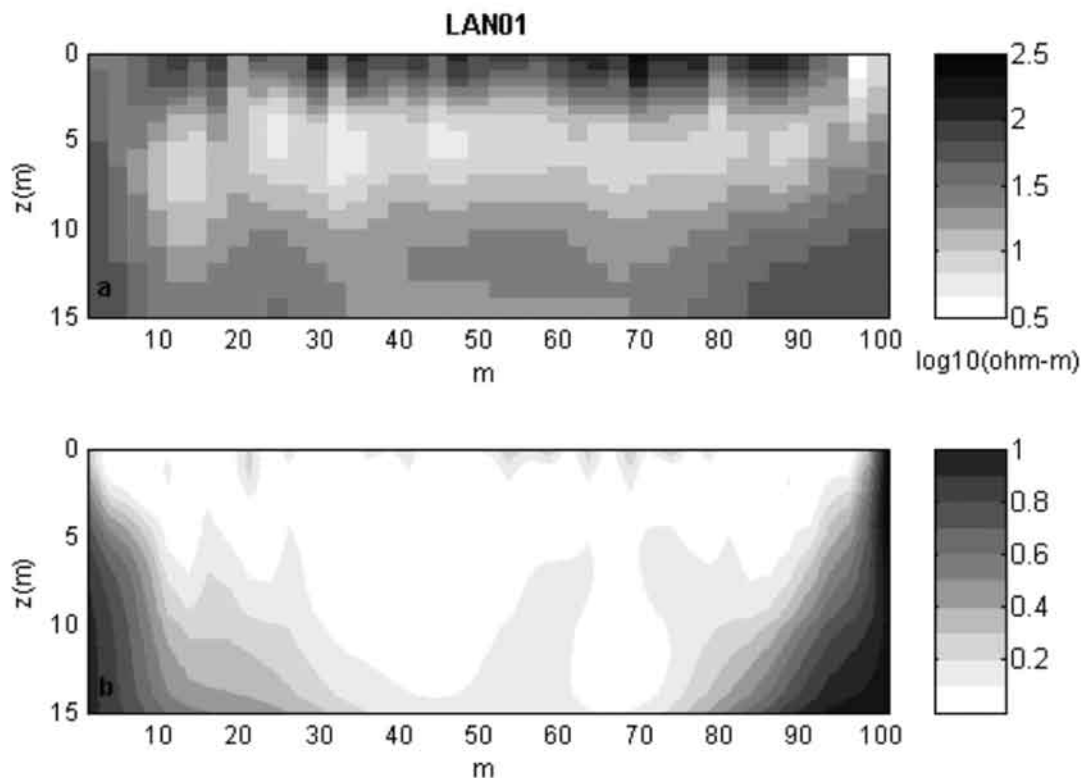


Figura 3 a) Modelo bidimensional de Resistividad Eléctrica para el DD LAN01; b) Índice DOI calculado a partir de la inversión de datos usando como modelo inicial 50 y 5 ohm m.

inversiones modificando los parámetros de entrada del programa logrando ajustes del orden del 5% entre los datos experimentales y los datos predichos por el modelo. En particular se usaron diferentes modelos iniciales con resistividad eléctrica uniforme de 5, 10, 50, 100, 500 y 1000 ohm m. Se estableció la “profundidad de investigación” definida como la profundidad por debajo de la cual los datos experimentales son insensibles al valor de la resistividad del modelo. Se cuantificaron las diferencias entre modelos posibles a través del índice DOI (“Depth of investigation”) que permite estimar a qué profundidad la estructura obtenida ya no es sustentada por los datos (Oldenburg y Li, 1999). Considerando dos inversiones con diferente resistividad eléctrica como modelo inicial,  $\rho_{1r}$  y  $\rho_{2r}$ , se define el índice DOI como

Siendo  $m_{1r}$  y  $m_{2r}$  el logaritmo decimal de la resistividad eléctrica del modelo inicial respectivamente y  $m_1(x, z)$  y  $m_2(x, z)$  los logaritmos de las resistividades del modelo resultante para cada caso en el punto  $(x, z)$ .

En los lugares donde R es cercano a cero el modelo obtenido tiene mayor confiabilidad, mientras que cuando R se acerca a 1 indica baja confiabilidad. Se considera un valor crítico de R igual a 0,3. En este estudio se presentan los resultados obtenidos de la comparación de los modelos usando 5 y 50 ohm m como modelo inicial.

Se han seleccionado los perfiles LAN01, LAN06 y LAN08 para presentar los modelos 2D de resistividad eléctrica y del índice DOI. Los mismos se han

graficado entre 0 y 15 m de profundidad. Se consideró que esta profundidad es la más apropiada para describir las características geoelectricas superficiales y además para poder comparar todos los modelos a las mismas profundidades. También se presentan los modelos de resistividad eléctrica y perfiles de GPR del LAN02 y LAN03, en estos casos la máxima profundidad se adecuó a los resultados de GPR.

En la Figura 3a se presenta el modelo obtenido por Pomposiello et al. (2004) para el DD LAN01 (Oeste-Este). El modelo muestra una primera capa con un espesor de 2 a 3 m y una resistividad de 100 a 1000 ohm m. Esta capa aloja los residuos y el espesor concuerda con el determinado en un estudio magnético realizado en la misma área (Orgeira et al., 2004). Una segunda capa de espesor entre 4 y 5 m y con bajos valores de resistividad (~ 5 ohm m) determina el piso del depósito de residuos y la alta conductividad indica la presencia de fluidos ricos en sales probablemente producto del lixiviado. La tercer capa tiene una resistividad de alrededor de 15 ohm m y un espesor de más de 10 metros.

En la Figura 3b se presenta el índice DOI, que en la parte central alcanza un valor de 0,3 a una profundidad mayor de 15m (~ 20 m), mientras que en las partes extremas (oeste y este del perfil) este valor se obtuvo a profundidades menores (<5 metros).

El modelo de resistividad eléctrica para el DD LAN02 (Norte-Sur) obtenido por Pomposiello et al. (2004) es muy similar al DD LAN01. Presenta una capa resistiva superficial, una capa muy conductora in-

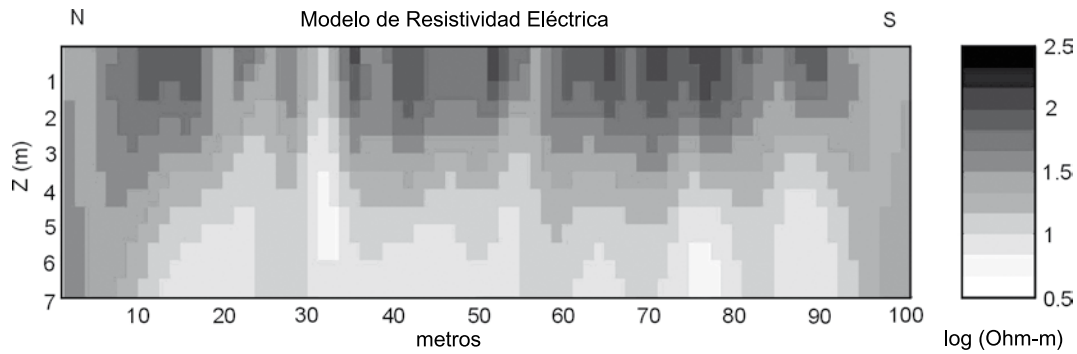


Figura 4 Modelo bidimensional de Resistividad Eléctrica para el DD LAN02.

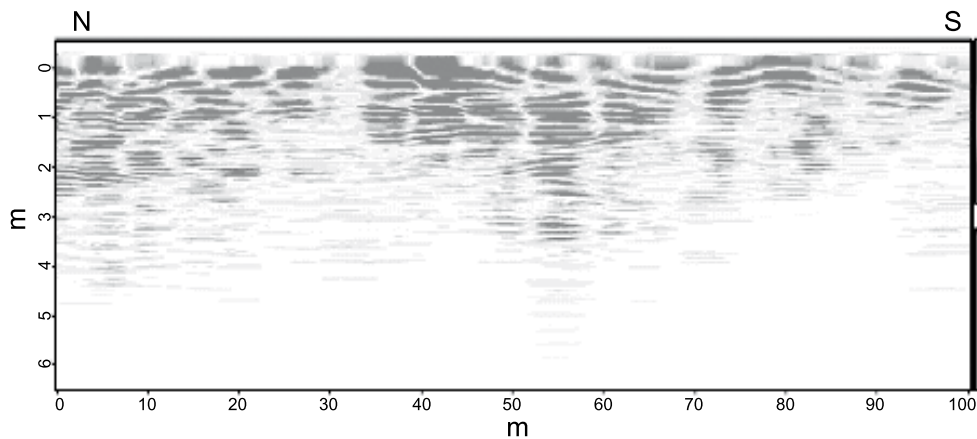


Figura 5 Perfil GPR adquirido con antena de 150 MHz, coincidente con DD LAN02.

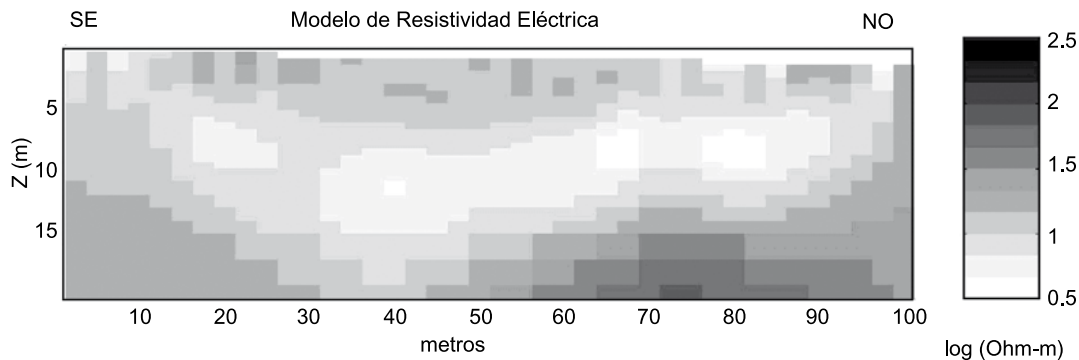


Figura 6. Modelo bidimensional de Resistividad Eléctrica para el DD LAN03, considerando la variación de la topografía (1m de desnivel en 100 m de perfil).

tercalada y una tercera capa más resistiva de alrededor de 15 ohm m. El índice DOI tiene valores similares a las mismas profundidades que el caso anterior, alcanzando el valor de 0,3 en la parte central a los 22 m de profundidad.

Los perfiles GPR realizados con antena de 150 MHz y orientación aproximadamente N-S cubren toda la extensión del relleno sanitario y las zonas exteriores próximas. Se analizó el sector que coincide con el DD LAN02 y para facilitar la comparación de ambas metodologías se graficaron en las mismas escalas espaciales. En la Figura 4 se presentan los 7 primeros metros del modelo 2D a pesar que la prospección tiene mayor pe-

netración (alcanza los 22 m en la parte central). En la Figura 5 se muestra el perfil equivalente de GPR usando la antena 150 MHz. Se puede ver que los reflectores aparecen en las profundidades donde se encuentran los residuos y a continuación se atenúa notablemente la señal. La forma geométrica de las partes más oscuras y más claras resultantes de ambos métodos muestra correlación entre las zonas de alta conductividad en la Figura 4 y la atenuación de reflectores en la Figura 5. En este caso, se observan zonas de atenuación en los mismos lugares donde se detectan cuerpos conductores en el modelo 2D. La alta conductividad de los materiales se atribuye a fluidos ricos en sales, los cuales ate-

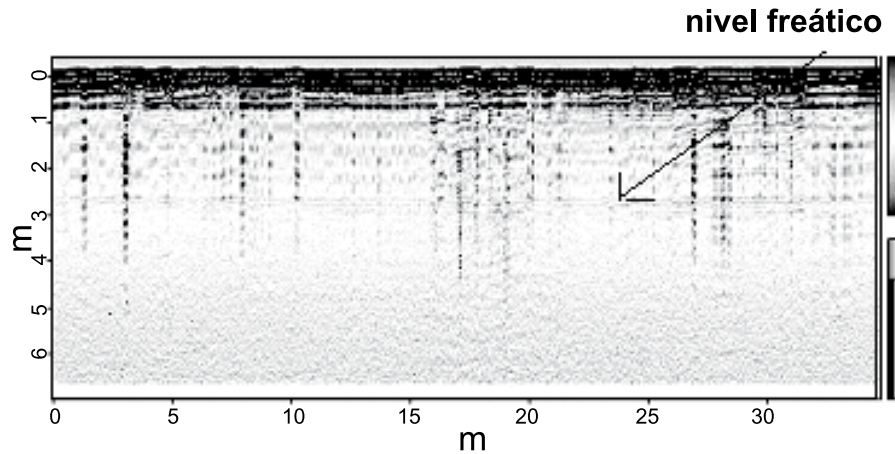


Figura 7 Perfil GPR adquirido con la antena de 500 MHz

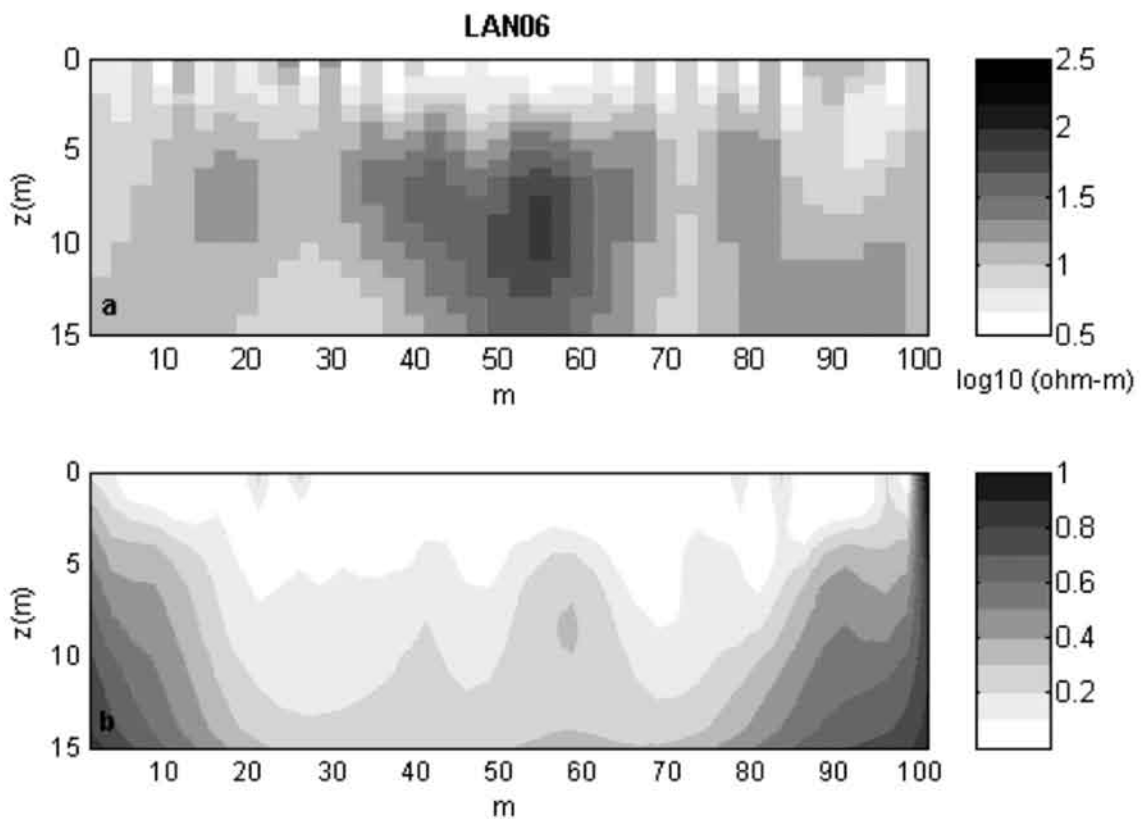


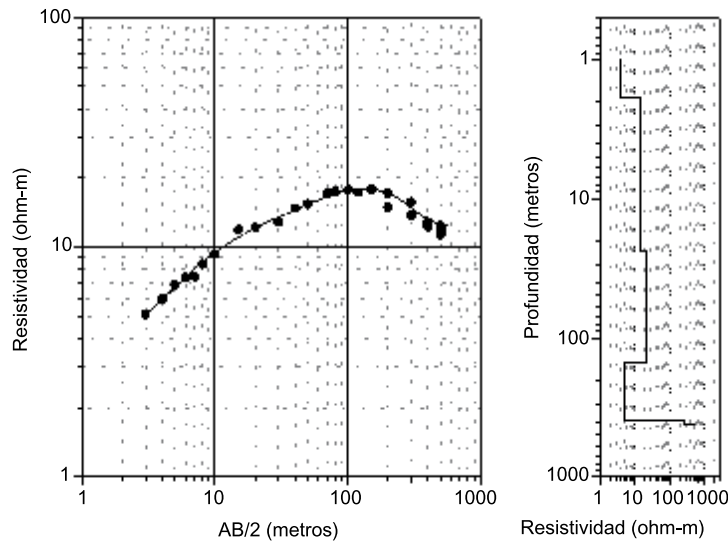
Figura 8 a) Modelo bidimensional de Resistividad Eléctrica para el DD LAN06.  
 b) Índice DOI calculado a partir de la inversión de datos usando como modelo inicial 50 y 5 ohm m.

núan las ondas de radar no permitiendo que las mismas alcancen grandes profundidades.

En el modelo correspondiente al DD LAN04, que está ubicado en la parte sur del relleno sanitario (Figura 2), se observa la capa más superficial con una resistividad eléctrica superior a los 100 ohm m y un espesor entre 2 y 3 metros. Tanto en esta capa como en los DD LAN01 y DD LAN02 se encuentran los residuos sólidos y subyacente se halla una capa cuyo espesor no supera los 6 m con bajos valores de resistividad (~ 6 ohm m) lo cual indica al igual que en los otros dos perfiles evidencias de contaminación. La tercera capa presenta una resistividad mayor a 10 ohm m y la máxima

profundidad de investigación obtenida es 23 metros.

El centro del DD LAN03 ubicado en el borde oriental del relleno sanitario, se encuentra alrededor de 2,27 m más bajo que los perfiles LAN01 y LAN02 y con una diferencia de nivel entre sus extremos de 1 m aproximadamente, siendo la parte más alta la ubicada al SE (Figura 2). En este perfil se tuvo en cuenta la topografía para invertir los datos y obtener el modelo (Figura 6). El mismo presenta una capa conductora de 4 ohm m a una profundidad entre 5 y 10 m con un espesor variable alrededor de 5 metros. La resistividad por encima y por debajo de esta capa es de alrededor de 20 ohm m. En este caso no se presenta la capa resistiva su-



Muestra una capa conductora superficial seguida por otra más resistiva de alrededor de 15-25 ohm m que se extiende hasta alrededor los 150 metros.

Figura 9 Modelo unidimensional de resistividad eléctrica para SEV2 (ajuste 2.88%).

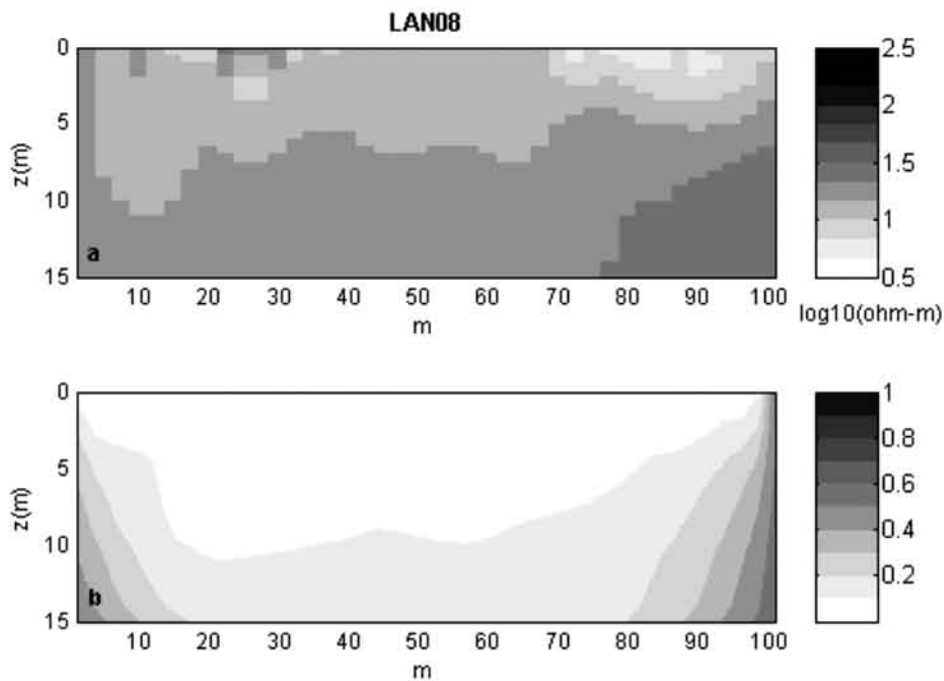


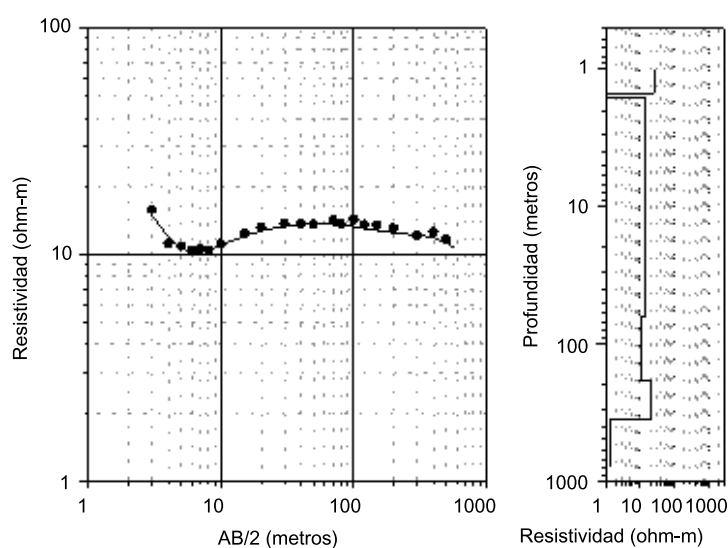
Figura 10. a) Modelo bidimensional de Resistividad Eléctrica para el DD LAN08; b) Índice DOI calculado a partir de la inversión de datos usando como modelo inicial 50 y 5 ohm m.

perficial ( $> 100$  ohm m) observada en LAN01, LAN02 y LAN04 debido a la ausencia de residuos.

A partir de los resultados de las mediciones de GPR con antenas de 500 MHz se obtuvo la ubicación del nivel freático para un sitio fuera del basural (LAN03) que al momento de realizar este trabajo estaba a una profundidad aproximada de 2 a 3 metros (Figura 7). Cabe destacar que el nivel freático fluctúa estacionalmente. Además, en los perfiles realizados con antena de 150 MHz se observa una zona con ausencia de reflectores y la existencia de señales muy débiles a

una profundidad variable pero alrededor de los 10 m en coincidencia con el modelo de DD (Pomposiello et al., 2004).

En el límite norte donde se efectuaron los perfiles DD (LAN05, LAN06 y LAN07) existe un desnivel de 2 m aproximadamente por debajo de los DD LAN01 y DD LAN02 (Figura 2). Los modelos obtenidos en estos perfiles muestran una resistividad superficial entre 3 y 5 ohm m. La resistividad obtenida coincide con la determinada en la segunda capa del relleno sanitario. Por debajo se halla una capa más resistiva



Muestra una resistividad promedio de 20 ohm m con una capa muy conductora a 1,6 m de profundidad de 0,14 m de espesor.

Figura 11 Modelo unidimensional de resistividad eléctrica para SEV1 (ajuste 2,55%).

(~15 ohm m) y se observan cuerpos resistivos (~100 ohm m) a una profundidad alrededor de los 10 metros. El modelo obtenido para el DD LAN06 se muestra en la Figura 8a, donde se observa que la capa superficial más conductora tiene un espesor entre 2 y 5 m y el cuerpo resistivo se encuentra en la parte central del perfil a 10 m de profundidad aproximadamente. En la Figura 8b se presenta el índice DOI cuyo valor de 0.3 se encuentra a una profundidad mayor de 15m (~ 20 metros). Figura 6. Modelo bidimensional de Resistividad Eléctrica para el DD LAN03, considerando la variación de la topografía (1m de desnivel en 100 m de perfil).

El modelo 2D coincide en su parte central con el modelo 1D que se obtuvo en el SEV2 expuesto en la Figura 9. Los resultados son comparables ya que este modelo muestra una primera capa con un espesor de 2 m y resistividad de 4 ohm m y otra capa de 20 m de espesor y resistividad de 14 ohm m. Por consiguiente, si se considera que la capa conductora detectada es explicada por la presencia de fluidos salinos típicos de lixiviados la contaminación está restringida solamente a la capa más superficial (< 5 metros).

En el DD LAN08, usado de referencia fuera del predio del basurero, se obtuvo un modelo que no presenta cuerpos conductores siendo su resistividad promedio de 20 ohm m (Figura 10a). El índice DOI alcanza valores de 0,3 a profundidades mayores debido a la ausencia de cuerpos de baja resistividad (Figura 10b).

El SEV1 realizado en el mismo lugar dio resultados coincidentes a los obtenidos en el perfil 2D del LAN08 (Figura 11).

Resumiendo a partir de los perfiles DD se puede asegurar que:

Dentro del área de relleno se distinguen 3 capas una superficial y resistiva, otra conductora y la tercera con valores de resistividad de 15-20 ohm m.

Fuera del relleno en los límites norte y este se observan zonas conductoras generalmente ubicadas en el mismo nivel que la observada dentro del área donde hay residuos e inmersa en un medio con una resistividad menor a 20 ohm m.

En la zona al SO, a una distancia mayor de 500 m, fuera de la influencia del basurero se ha encontrado una resistividad promedio de 20 ohm m y es coincidente con la resistividad de la última capa alcanzada en el resto de los perfiles DD.

Por otro lado, para los DD LAN01, LAN02 y LAN04 se graficó la resistividad en función de la profundidad (en el punto central de cada perfil) obtenida de la inversión de datos utilizando un modelo inicial de 50 ohm m (Figura 12).

Se observa a que profundidad en cada perfil se encuentra el mínimo valor de resistividad (Figura 12). Estas profundidades son 4,5 m para LAN01, 6 m para LAN02 y 5 m para LAN04 y se representó la variación horizontal de la resistividad a lo largo de cada perfil (Figura 13). Se observa que a lo largo de cada perfil la resistividad fluctúa encontrándose valores mínimos de resistividad a los 31 m en LAN01, a los 76 m en LAN02 y 33,5 m en LAN04, medidos desde los extremos Oeste, Norte y Sudeste respectivamente.

### Conductividad eléctrica en el agua

Los rangos de conductividad eléctrica medidos en los cuerpos de agua superficial dan valores entre 180  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y 700  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y los medidos en los freáticos entre 700  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y 8200  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (Figura 15). Se observa un aumento de Sur a Norte y SE a NO en la dirección del flujo regional. Estos valores están fuertemente influenciados por las precipitaciones observándose dilución después de cada evento.

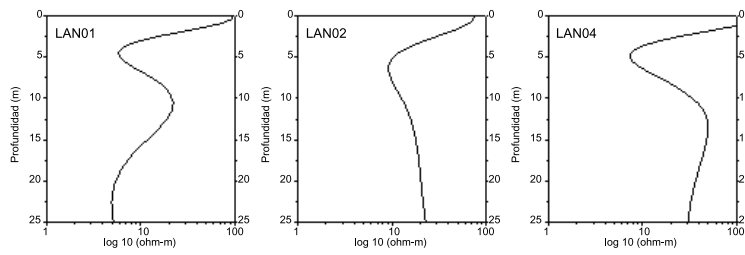


Figura 12 Variación vertical de la resistividad (en el punto central del perfil) para los DD LAN01, LAN02 y LAN04.

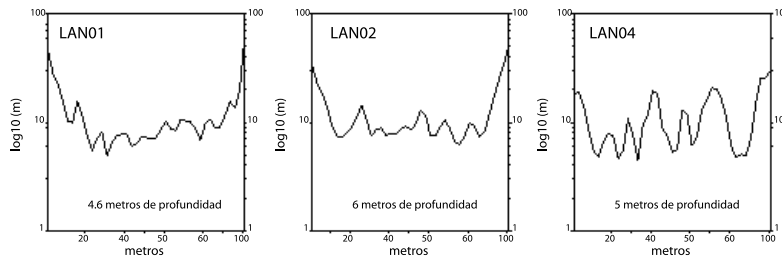


Figura 13: Variación horizontal de la resistividad (en el punto central del perfil) para los DD LAN01, LAN02 y LAN04.

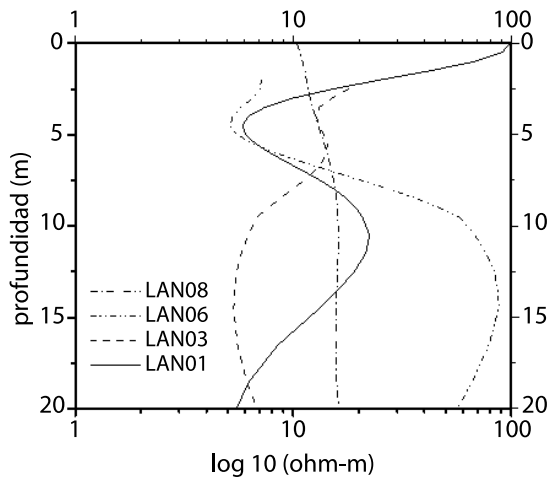


Figura 14 Variación vertical de la resistividad para los DD LAN01, LAN03, LAN06 y LAN08 en la parte central.

### Cálculo de parámetros químicos

A partir de las resistividades mínimas encontradas en la parte central de los DD LAN01, LAN02 y LAN04 y de las resistividades mínimas obtenidas a esas profundidades en los puntos en 31 m, 76 m y 33,5 m respectivamente (ver Figura 13) se aplicaron los procedimientos descriptos por Meju (2000) y se obtuvieron los parámetros hidroquímicos presentados en la Tabla 1. Si bien los resultados presentados en la misma son aproximados, estos valores son útiles para evaluar las condiciones ambientales presentes. Debe tenerse en cuenta que estos cálculos representan una aproximación y que los parámetros dependen de la composición del lixiviado, infiltración de agua subterránea o lluvia, los residuos depositados y los materiales geológicos.

Tabla 1. Parámetros químicos calculados.

Perfiles	$\sigma_b$ (mS/m) $\rho_b$ (ohm m)	STD Predicho (mg/L)	$\sigma_w$ Predicho (mS/m)	Cl Predicho (mg/L)	W Estimado (vol, %)	Años
LAN01 (a) X = 50m Z = 4,5m X = 31m Z = 4,5m	169,49 (5,9)	3944,58	568,43	1121,02	52,89	10-20
	206,18 (4,85)	5199,75	746,25	1554,06	50,81	5-10
LAN02 (a) X = 50m Z = 6m X = 76m Z = 6m	109,29 (9,15)	2124,89	309,02	539,49	57,86	10-20
	160,51 (6,23)	3653,17	527,04	1023,00	53,48	10-20
LAN04 (a) X = 50m Z = 5m X = 33,5m Z = 5m	135,50 (7,38)	2877,00	416,53	771,92	55,37	10-20
	225,73 (4,43)	5908,25	846,34	1807,40	49,87	5-10
LAN01 (b) X = 50m Z = 4,5m X = 31m Z = 4,5m	169,49 (5,9)	9342,64	1329,28	3106,98	33,82	5-10
	206,18 (4,85)	12657,56	1792,86	4448,93	32,03	0-5
LAN02 (b) X = 50m Z = 4,5m X = 31m Z = 4,5m	109,29 (9,15)	4733,25	680,25	1390,60	38,19	10-20
	160,51 (6,23)	8586,82	1223,26	2812,05	34,34	0-5
LAN04 (b) X = 50m Z = 4,5m X = 31m Z = 4,5m	135,50 (7,38)	6604,41	944,51	2061,80	35,98	5-10
	225,73 (4,43)	14565,26	2058,79	5252,087	31,24	0-5

X coordenada horizontal del perfil y Z profundidad. (a) usando la Eq. (1) y (b) usando la Eq. (2) para predecir STD; la conductividad del fluido es predicha usando la Eq. (3) y el contenido de cloro puede ser obtenido de la Eq. (4); El contenido de agua W es estimado de la Eq. (5) y los años son inferidos usando el contenido de STD y Cl- (Meju, 2000).

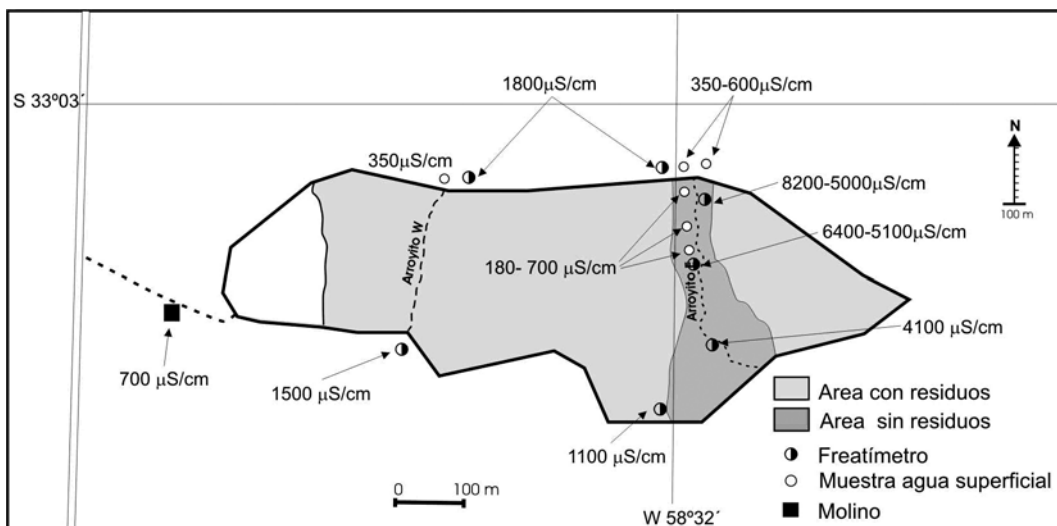


Figura 15: Ubicación de los frentímetros y muestras de agua superficial con sus valores de conductividad.

En el DD LAN01 el valor estimado de STD para la mínima resistividad eléctrica varía entre 5200 mg/L y 12 658 mg/L. La conductividad predicha del fluido varía entre (7462 y 17 929)  $\mu\text{S/cm}$  y el contenido de cloro varía entre 1554 mg/L y 4449 mg/L. La conductividad eléctrica medida en muestras superficiales cercanas a este perfil varía entre 180  $\mu\text{S/cm}$  y 700  $\mu\text{S/cm}$ . Estos valores no son comparables con los predichos.

Para el DD LAN02 el valor estimado de STD para la mínima resistividad eléctrica varía entre (3653 y 8587) mg/L. La conductividad predicha del fluido varía entre 5270  $\mu\text{S/cm}$  y 12233  $\mu\text{S/cm}$  y el contenido de cloro varía entre 1023 mg/L y 2812 mg/L. En este sitio la conductividad predicha es menor que en el caso anterior.

En el DD LAN04 el valor estimado de STD para la mínima resistividad eléctrica varía entre 5908 mg/L y 14 565 mg/L. La conductividad predicha del fluido varía entre 8463  $\mu\text{S/cm}$  y 20 588  $\mu\text{S/cm}$  y el contenido de cloro varía entre 1807 mg/L y 5252 mg/L.

Los años del relleno se han inferido utilizando los valores de máxima y mínima resistividad obtenida en los modelos (ver Tabla 1). Se puede definir un rango entre 5 y 20 años y el mismo coincide con la edad del basurero municipal ya que el mismo fue cerrado completamente hace aproximadamente 9 años.

La mínima resistividad determinada en los DD LAN05, LAN06 y LAN07 en la capa superficial (~ 3,8 ohm m), se utilizó para estimar el valor de STD que varía entre 7389 mg/L y 18 625 mg/L. La conductividad predicha del fluido varía entre 10 600  $\mu\text{S/cm}$  y

26 200  $\mu\text{S/cm}$  y el contenido de cloro varía entre 2368 mg/L y 7024 mg/L.

### CONCLUSIONES

A partir de los estudios realizados se han detectado valores altos de conductividad por debajo del relleno sanitario que alcanzarían los 10 m de profundidad, posiblemente debidos a los lixiviados alojados en el Grupo Punta Gorda.

Las zonas aledañas también presentan superficialmente zonas muy conductoras que pueden deberse a la migración de los lixiviados a través del flujo subterráneo o a la litología de los depósitos. En el límite norte del relleno se detectó una capa superficial eléctricamente conductora y se midieron valores relativamente altos de conductividad eléctrica en los pozos. También se han encontrado cuerpos resistivos (~100 ohm m) en un medio de resistividad del orden de los (~15 ohm m) Estas anomalías se han interpretado como variaciones litológicas del Grupo Punta Gorda. En el límite este se encuentra una zona conductora localizada a la misma profundidad que la determinada debajo del relleno sanitario y además, se observa otra zona muy conductora por debajo de los 12,5 metros. Hasta el momento, esta última anomalía no se ha podido interpretar y se necesitan nuevas investigaciones geofísicas y datos de perforaciones.

Los resultados obtenidos con GPR han permitido definir el nivel freático para el borde norte del basural cuando se utilizó la antena de 500 MHz, y al momento de realizar el trabajo, se encontró a una pro-

Tabla 2. Comparación entre la resistividad del fluido medida ( $\rho_{wm}$ ) en los frentímetros y la resistividad ( $\rho_b$ ) del modelo 2D.

Pozo	Perfil	Profundidad (m)	$\sigma_{wm}$ (fecha) (mS/m), (mes/año)	$\rho_{wm}$ (OHM m)	$\rho_b$ (OHM m)	$\rho_w$ Predicha (OHM m)	
						(a)	(b)
P1	LAN07	2,15	204,0 (4/05)	4,90	5,75	0,72	3,22
P2	LAN06	2,10	174,3 (4/05)	5,73	6,90	0,96	1,70

fundidad aproximada de 2 a 3 metros. Con la antena de 150 MHz se ha podido detectar el límite superior de la pluma de contaminación por debajo del basural. La misma se define por la ausencia de reflectores o por la existencia de señales muy débiles. En esas zonas los modelos de resistividad muestran materiales con alta conductividad que no permiten que las ondas de radar alcancen grandes profundidades.

A partir de la conductividad eléctrica de las zonas más conductoras se predijeron parámetros geoquímicos del lixiviado utilizando las relaciones empíricas establecidas por Farquhar (1989) y Meju (2000).

Los resultados obtenidos en los sondeos dipolo-dipolo, en los SEV y los resultados del GPR muestran buena correlación. Por último cabe destacar que las plumas de contaminación encontradas con los métodos geofísicos no superan los 10m de profundidad dentro del basural. En los bordes del relleno se determinó una capa muy conductora con espesor < 5m que podría representar la migración de lixiviado hacia las zonas aledañas del relleno. Estos resultados muestran zonas anómalas comparadas con el sitio más alejado del basural que se utilizó como representativo del terreno no modificado.

#### AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a Eduardo Llambías y Gabriel Giordanengo por su asistencia técnica y al Lic. Fernando Stöckli por su colaboración. Este trabajo de investigación fue realizado con fondos de la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica en el marco del proyecto PICT 2002, N°12243.

#### REFERENCIAS

- Bell, F.G., Jermy, C.A. **A seepage problem associated with an old landfill in the greater Durban area.** In: Sarsby, R.W. Ed. , Waste Disposal by Landfill GREEN'93. A.A. Balkema, Rotterdam, pp. 607–614. 1995.
- Birks y Eyles, 1997 Birks, J., Eyles, C.A. **Leachate from landfills along the Niagara Escarpment.** In: Eyles, N. Ed., Environmental Geology of Urban Areas. Geological. Assoc. Canada, Canada, pp. 347–363, Chap. 24.1997.
- Buselli et al., 1990 Buselli, G., Barber, C., Davis, G.B., Salama, R.B. **Detection of groundwater contamination near waste disposal sites with transient electromagnetic and electrical methods.** In: Ward, S.H. Ed. , Geotechnical Environmental Geophysics. vol. 2 SEG Publ, Tulsa, OK, pp. 27–39. 1990.
- Bobachev, A., Modin, I.N., Shevnev V. **Software. Department of Geophysics. Geological Faculty. Moscow State University y Geoscan-M.Ltd.** 1990-2000.
- Farquhar, G.J. **Leachate: production and characterisation.** Can. J. Civ. Eng. 16, p. 317–325. 1989.
- Fili, M., Tujchneider, O., Perez, M., Paris, M. **Investigaciones geohidrológicas en la provincia de Entre Ríos.** In: Temas actuales de la Hidrología subterránea. Bocanegra y Rapaccini (Ed.). Consejo Federal de Inversiones y Universidad Nacional de Mar del Plata, p. 299-313. Mar del Plata. 1994
- Fili, M. **Síntesis geológica e hidrogeológica del noroeste de la provincia de Entre Ríos – República Argentina.** Boletín Geológico y Minero, Vol.112, Número especial, p. 25-36. ISSN 0366-0176. Madrid. 2001.
- Guida, N.G., González, M.A. **Evidencias paleoestuarinas en el sudeste de Entre Ríos. Su evolución con niveles marinos relativamente elevados del Pleistoceno superior y Holoceno.** In IX Congreso Geológico Argentino, Actas III, p. 577-594. 1984.
- Iriondo, M.M. **El Cuaternario de Entre Ríos de Ciencias Naturales del Litoral.** Revista N° 11, p. 125-141, Santa Fé. Argentina. 1980.
- Meju, M. , **Geoelectrical investigation of old abandoned, covered landfill sites in urban areas: model development with a genetic diagnosis approach.** Journal of Applied Geophysics V.44, p. 115–150. 2000.
- Oldenburg, D. W., McGillivray, P. R., Ellis, R. G. **Generalized subspace method for large scale inverse problems.** Geophysics V.114, p.12-20. 1993.
- Oldenburg, D. W., Li, Y. **Inversion of induced polarization data.** Geophysics V.59, p.1327-1341. 1994.
- Orgeira, M. J., Vázquez, C. A., Ostera, H. **Relevamiento magnetométrico terrestre de rellenos sanitarios. Estudio piloto en Gualeguaychú. Entre Ríos.** Asociación Geológica Argentina, Revista V59, 3, p. 501-505. 2004.
- Panarello, H., Dapeña, C., Ostera, H., Stöckli, F. **Caracterización química e isotópica preliminar del basurero municipal de Gualeguaychú, provincia de Entre Ríos, Republica Argentina.** In:IV Congreso Hidrogeológico Argentino Actas II, p. 17-26. 2005
- Pomposiello, M.C., Favetto, A., Ostera, H.A., **Resistivity imaging and Ground Penetrating Radar survey at Gualeguaychú landfill, Entre Ríos Province, Argentina: Evidences of a contamination plume.** In: 17th Workshop on Electromagnetic Induction in the Earth, Hyderabad, India. Publicado en la web <http://www.emindia2004.org>.2004.
- Pomposiello C., Favetto A., Dapeña C., Boujon P., **Evaluación de la pluma contaminante aplicando métodos geofísicos en el relleno de residuo domiciliario Gualeguaychú, Entre Ríos, Argentina.** En: XVI Congreso Geológico Argentina Actas III, p.673-678. 2005a.
- Pomposiello C., Favetto A., Boujon P., Dapeña C. y Ostera, H., **Evidencias de pluma de contaminación detectadas por un estudio geofísico en el basurero municipal de Gualeguaychú, provincia de Entre Ríos**

**Argentina.** En: IV Congreso Argentino de Hidrogeología Actas I, p.181-190. 2005b.

Prezzi, C. Orgeira, M.J., Vásquez, C. J. Int. A., Ostera, H. **Ground Magnetic of a municipal solid waste landfill: pilot study in Argentina.** Environmental Geology, V. 47, p.889-897. 2005.

Radar System, Inc. Software Prism. <http://www.radsys.lv>, 2004.

Reig, O. **Sobre la posición sistemática de “Zygolestes paranensis” Amegh. y de “Zygolestes entrerrianus” Amegh.** Centro de Estudiantes del Doctorado en Ciencias Naturales de Buenos Aires. Revista Holmbergia 5, (12-13), p. 209-226, Buenos Aires. 1956.

Rimoldi, H. **Aprovechamiento del río Uruguay en la zona de Salto Grande.** In: Ieras. Jornadas Geológicas Argentinas, Anales 2, p. 287-310. 1963.

Russo, A., Ferello, R.E., Chebli, G. **Cuenca Chaco Pampeana.** In: Geología Regional Argentina, II Simposio de Geología Regional Argentina. Academia Nacional de Ciencias de Córdoba, Vol.I, 4, p.139-183. 1979.

Valencio, S.A. Ostera, H. A., Panarello, H. O. **Monitoring the evolution of <sup>13</sup>C of CO<sub>2</sub> gas from a landfill in Gualeguaychú, Argentina: First results from a case study.** In: IV South American Symposium on Isotope Geology, Short Papers 1, p. 128-130. 2003.

Yaramanci, U. **Relation of in situ resistivity to water content in rock salts.** Geophysical Prospecting V. 41, p. 229–239. 1994.



# INFLUENCIA DEL TECTONISMO EN EL MODELO HIDROGEOLOGICO CONCEPTUAL Y APLICACIÓN DE LA GEOFÍSICA EN LA DETERMINACIÓN DE LA INTRUSIÓN SALINA EN SÁMARA, COSTA RICA.

Mario Enrique ARIAS SALGUERO

**Resumen:** En la localidad de Sámara, se encuentran al menos dos acuíferos que están siendo aprovechados por la población del mismo nombre, uno de ellos es de tipo aluvial y su flujo proviene en dos secciones distintas desde la parte norte con una descarga hacia el mar, el segundo acuífero se encuentra en rocas sedimentarias estratificadas, brinda caudales reportados de hasta 8 l/s y abastece al acueducto rural de la localidad. Con ensayos geofísicos del tipo tomografías geoléctricas y perfiles electromagnéticos tanto en dominio temporal como frecuencial; se muestra claramente una predominancia de la variación lateral de la resistividad eléctrica; correlacionada con un sistema de fallamiento y estructuras de tipo canal en el aluvión que controlan el flujo del agua subterránea. Estas variaciones laterales de resistividad o su inverso -la conductividad- han sido muy efectivos para correlacionar y determinar la ubicación espacial de la intrusión salina en Sámara determinándose que el acuífero aluvial presenta en algunos sectores intrusión salina hasta 500 m tierra adentro de la línea de costa.

**Palabras-claves:** Acuíferos costeros; Tectonismo, Geofísica, Intrusión salina, Sámara, Costa Rica.

**Abstract:** In the town of Sámara, they are two aquifers that are being taken advantage by the population of the same name, at least one of them it is of type alluvial and their flow comes in two different sections from the north part with a discharge toward to the sea, the second aquifer is in stratified sedimentary rocks that it offers flows of up to 8 l/s and that it supplies to the rural aqueduct of the town. With geophysical research as geoelectrical tomography and electromagnetic profiles in temporary as frecuencial domain; shown a predominance of the lateral variation of the electric resistivity; correlated with a fault system and structures of type channel in the alluvium that they control the flow of the underground water. These lateral variations of resistivity or their inverse -the conductivity- has been very effective to correlate and to determine the space location of the saline intrusion in Sámara being determined that the alluvial aquifer presents saline intrusion until 500 m inland of the coast line.

**Keywords:** Coastal aquifers; Tectonic, Geophysics, Saltwater intrusion, Sámara, Costa Rica.

Escuela de Geología, Universidad de Costa Rica. Apartado: 214-2060, marioa@geologia.ucr.ac.cr

## INTRODUCCIÓN

Sámara se encuentra localizada en la península de Nicoya, en la costa pacífica de Costa Rica (figura 1). Esta playa se ha convertido en uno de los polos turísticos debido a la exuberante vegetación, el clima privilegiado y sin lugar a dudas a la belleza de sus playas.

La metodología de trabajo incluyó la realización de sondeos y tomografías eléctricas, perfiles electromagnéticos en el dominio de las frecuencias de tipo EM-34 y sondeos electromagnéticos en el dominio del tiempo (figura 1) para caracterizar el proceso de intrusión salina en la localidad de Sámara (ARIAS et al. 2003). Además se ha elaborado un estudio hidrogeológico que tiene como objetivo modelar conceptualmente los acuíferos existentes, a partir de la integración de información de pozos, litología, estructuras tectónicas, geomorfología y datos hidrogeoquímicos del agua.

## MARCO GEOLOGICO

En la localidad de Sámara afloran varias formaciones geológicas que se describen a continuación, así como una serie de estructuras tectónicas que influyen directamente en el modelo hidrogeológico.

### Complejo de Nicoya

Representa el basamento local y regional de Costa Rica (DENYER; ARIAS, 1991). El mismo autor, indica que el espesor no se puede comprobar por métodos directos y determinó un espesor mínimo aflorante de 1500 m con base en las alturas topográficas máxima y mínima. BAUMGARTNER (1987) asigna a las radiolaritas más antiguas edad Jurásico Inferior. DENYER; ARIAS (1991), datan el límite superior con los sedimentos pelágicos-hemipelágicos sobreyacentes e intercalados, en Campaniano Superior.

En el sector NE de Sámara, GAMBOA (1985), identifica que la litología predominante del Complejo

de Nicoya, son basaltos con estructura masiva con textura afanítica, de baja porosidad aparente, presenta pántinas de oxidación de hasta 0,5 cm de espesor, costras de manganeso producto posiblemente de la actividad hidrotermal y tonalidades verdes debidas aparentemente a cloritización.

### Formación Curú

ASTORGA (1987), define esta formación de tipo esencialmente turbidítico, que consiste de mezclas de arenas y lodos de variable porcentaje, y en menor proporción de gravas. Composicionalmente, este detrito es de origen volcánico básico, caracterizado principalmente por la abundancia relativa de magnetita y de minerales ferromagnesianos. Hacia el techo del sistema, la composición normativa basáltica cambia paulatinamente a una composición normativa andesítica. Este sistema depositacional alcanza un espesor promedio de 1500 m, con mínimos de 600 m y máximos de 2500 m. Su rango de sedimentación cubre el periodo Maastrichtiano Medio/Superior – Paleoceno Superior Basal.

Esta formación aflora en estratos decimétricos en varios cerros cercanos a la localidad de Sámara, mostrando buzamientos preferenciales hacia el SE.

### Formación Ario

ASTORGA (1987), la caracteriza como un sistema depositacional dominado por la sedimentación de turbiditas de grano fino e intercalaciones de sedimentos pelágicos. Su sedimentación está restringida únicamente a la cuenca Sámara – Cabo Blanco, durante el periodo Paleoceno Superior – Eoceno Superior/Oligoceno Inferior. El paquete de sedimentos de este sistema tiene un espesor mínimo de 500 m, sobreyace conformemente a la Formación Curú e infrayace a través de una marcada discordancia a los depósitos carbonatados neríticos del Eoceno Superior y Oligoceno Superior, respectivamente.

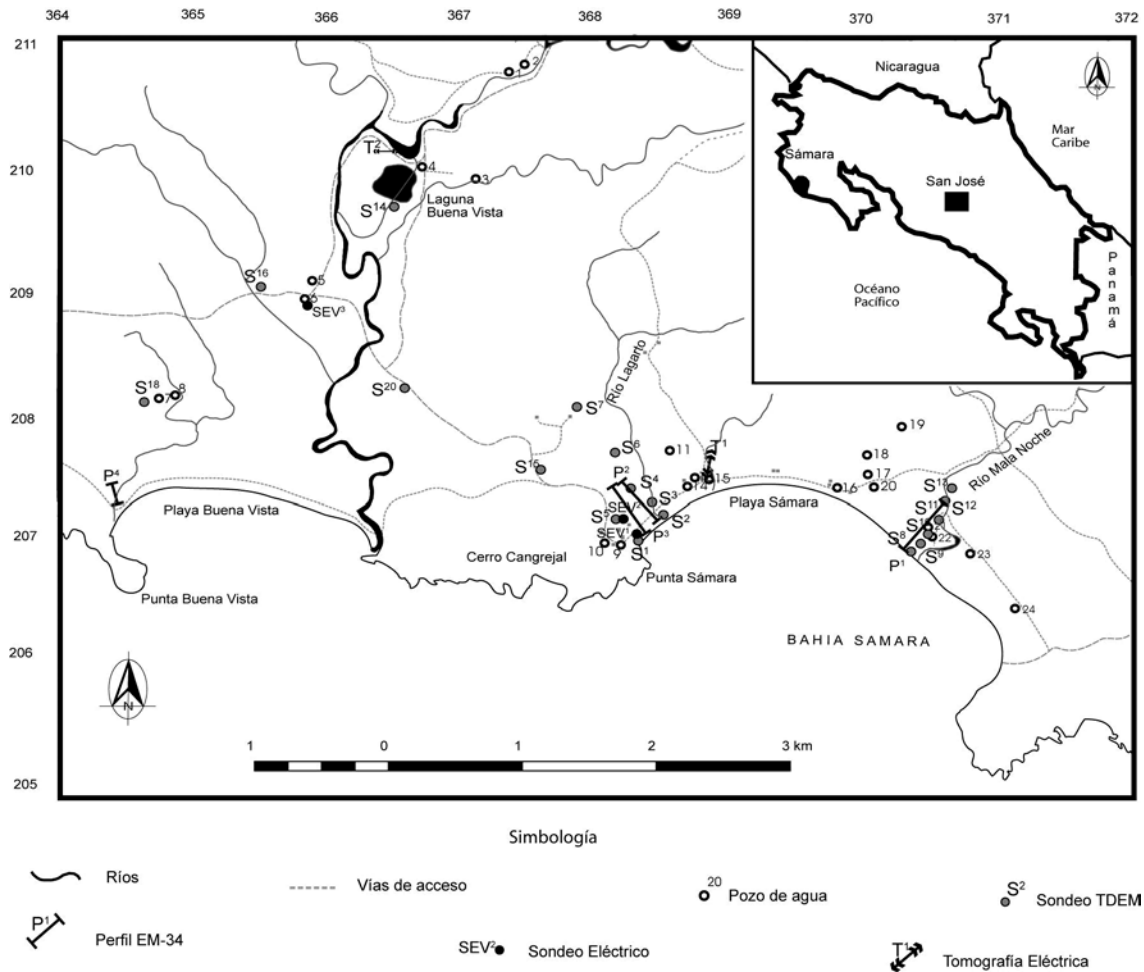


Fig.1: Ubicación del área de estudio y localización de ensayos geofísicos.

### Depósitos Recientes

Predominan depósitos cuaternarios tipo aluvial de composición tanto volcánica como sedimentaria que han sido acarreados de las partes altas por corrientes fluviales, el espesor máximo evidenciado en los registros de los pozos es de 33 m. Localmente; se observa un tipo de suelo limo arenoso de color café claro como producto de la meteorización.

### Elementos estructurales

En el aspecto tectónico, la zona pacífica de Costa Rica se ve influenciada por la interacción de las placas Coco y Caribe; cuya zona de subducción se encuentra a unos 60 km al W; y que ha condicionado gran parte de la historia geológica de este país. A una escala local, autores como DENYER; ARIAS (1993), DÍAZ (1980) y DENYER et al. (2003) han identificado una falla de desplazamiento de rumbo sinistral que pasa bajo el río Mala Noche. Del análisis de fotografía aérea, se ha delimitado una nueva falla inferida de rumbo N30E de tipo desplazamiento de rumbo dextral que presenta evidencias geomorfológicas tales como: facetas triangulares y distorsiones en el patrón de drenaje y que limita el sector este del valle aluvional del río Buenavista. Otras fallas inferidas que permiten el contacto entre las diferentes formaciones han sido descritas por

DÍAZ (1980), MOSHEIM (1980) y SAÉNZ (1980).

Otro efecto del tectonismo y de gran importancia desde el punto de vista hidrogeológico, es el buzamiento. Las rocas sedimentarias turbidíticas, aflorantes en la localidad presentan un buzamiento general hacia el SW variando entre los S60W y S25W con ángulos entre los 30 y 40 grados de inclinación, conformando el denominado homoclinal Buenavista (MOSHEIM, 1980). Por su parte, a partir de la interpretación foto-geológica, el plegamiento de las rocas de la formación Ario da origen al sinforma Lagarto, con una dirección de eje de pliegue NE-SW y que condiciona parcialmente la dirección del cauce del río Lagarto. Estos elementos tectónicos condicionan la descarga del agua subterránea, la recarga lateral hacia el acuífero aluvial de Samara y retardar el flujo de agua salada que pudiera entrar en el acuífero de rocas sedimentarias turbidíticas.

### CONTEXTO HIDROGEOLÓGICO

El sector de Samara; se encuentra inmerso dentro de dos microcuencas hidrográficas descritas por VARGAS; BARAHONA (2001), cuyas principales características son: La Cuenca Samara tiene un área aproximada de 23,3 km<sup>2</sup> y el tributario principal es el Río Mala Noche, otro afluente importante es el río La-

garto. Por su parte, la Cuenca Buenavista tiene un área de 114 km<sup>2</sup>, y el colector principal es el río Buenavista, otros afluentes son el río Frío, quebrada Esterones y quebrada Lagarto.

El patrón de drenaje es de tipo subdendrítico. Se observa una mayor densidad de drenaje en las partes montañosas por estar estas constituidas de rocas sedimentarias estratificadas e ígneas; algunos segmentos de ríos como en el Lagarto, Mala Noche están influenciados por el fallamiento, mientras que en sectores de la quebrada Esterones, el condicionamiento del rumbo del río es debido a la dirección estratigráfica de las rocas sedimentarias. Por su parte, en el valle aluvial, el drenaje es muy escaso debido a las propiedades físicas del suelo que favorecen la infiltración en esta litología.

Utilizando como referencia las estaciones pluviográficas Jabilla y Nosara, las zonas de Sámara y Buenavista presentan una precipitación media de 2200 mm anuales.

La figura 2, muestra el mapa hidrogeológico de Sámara y su relación con las estructuras tectónicas, en el cual se han identificado tres unidades hidrogeológicas:

gicas:

Rocas volcánicas de baja permeabilidad: por su génesis, edad y alteración, esta unidad no presenta condiciones idóneas para el flujo y almacenamiento del agua, con algunas excepciones donde el efecto del tectonismo ha incrementado la porosidad secundaria, permitiendo el aprovechamiento en pozos de hasta 1 l/s.

Acuífero en rocas sedimentarias turbidíticas: corresponde a las formaciones Curú y Arío, con una porosidad y permeabilidad aparentemente buena debido al fracturamiento, es evidente que el buzamiento de las capas centimétricas a métricas debe condicionar la dirección de flujo regional del agua subterránea, evidenciando una descarga hacia el mar y un posible aporte lateral (en algunos sectores) al acuífero aluvial. Registros de los pozos 5 y 21, reportan caudales de extracción de 9,5 l/s y 8 l/s respectivamente, siendo el segundo de ellos aprovechado para abastecer al acueducto rural de la localidad de Sámara.

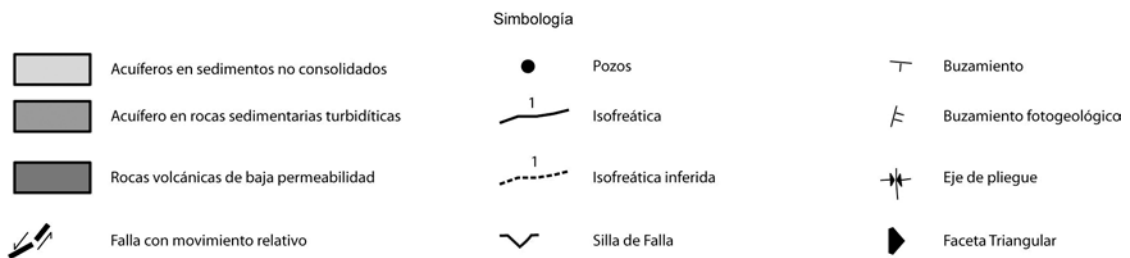
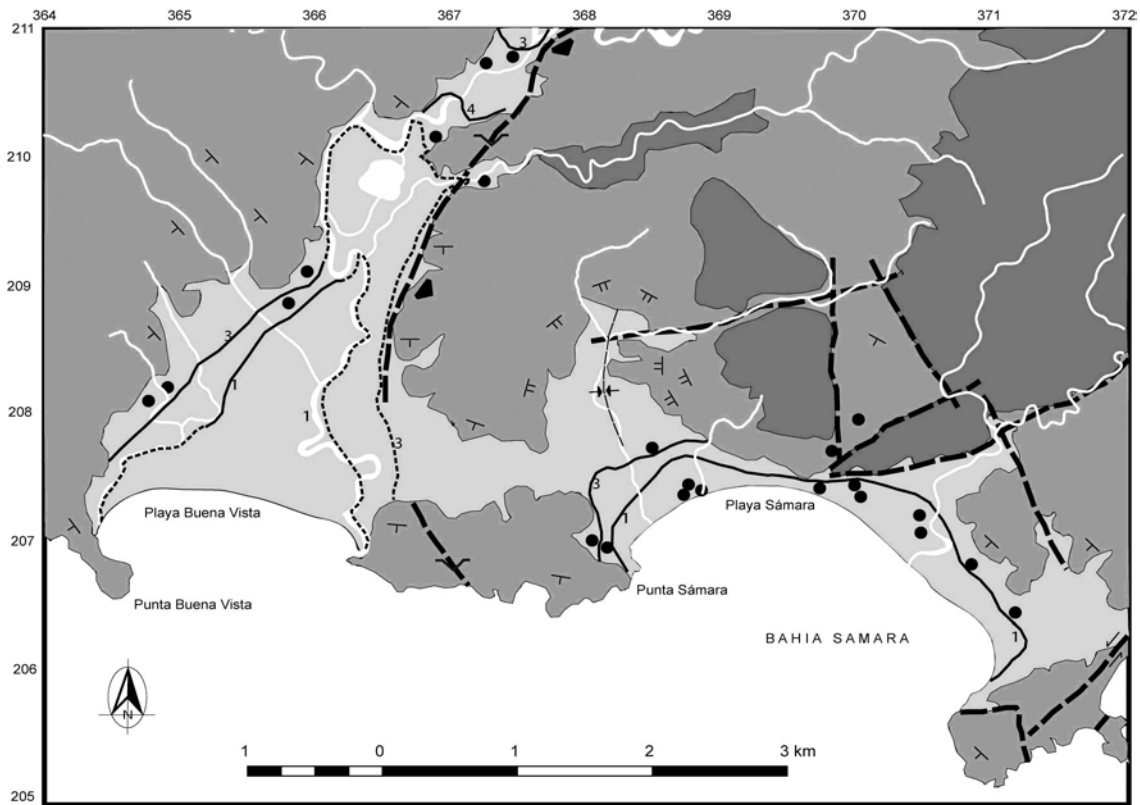


Fig. 2: Mapa Hidrogeológico y localización de elementos estructurales.

Acuífero en sedimentos no consolidados: se diferencian aquí los depósitos aluviales de Sámara y Buena Vista. La piezometría en el sector aluvial de playa Sámara, muestra una recarga directa y descarga en el mar. En este sector, el nivel de agua subterránea se encuentra muy superficial y es captado por algunos pozos excavados. En el depósito de Buena Vista, se ha inferido parte de las isofreáticas considerando las relaciones hidráulicas entre el río y el acuífero, pues en gran parte del sector, el río presenta un comportamiento dual influente-efluente, generando la recarga parcial de este acuífero aluvial. El aporte lateral está restringido a los elementos estructurales (buzamiento y fallamiento) que limitan este depósito aluvial.

Desde el punto de vista hidrogeoquímico, las aguas en sedimentos no consolidados se caracterizan como bicarbonatadas cálcicas y presentan un pH neutro, reflejando una relación directa de recarga producto de las aguas meteóricas que se infiltran en el material aluvial relativamente poco permeable (1,7E-1 hasta 1,87 m/d). Los valores de conductividad eléctrica del agua en los pozos varían desde 200  $\mu\text{S}/\text{cm}$  en aquellos localizados tierra adentro, hasta 1000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  en las regiones más cercanas a la costa, reflejando variable calidad del agua. Por su parte, desde el punto de vista bacteriológico; al menos 6 muestras exceden los valores de referencia establecidos para los coliformes fecales y totales, siendo los resultados en algunos pozos superiores a los 1100 coliformes.

La tabla 1, muestra los valores medidos de conductividad del agua, temperatura y concentración de Br<sup>-</sup> y Cl<sup>-</sup> para cinco muestras de agua subterránea.

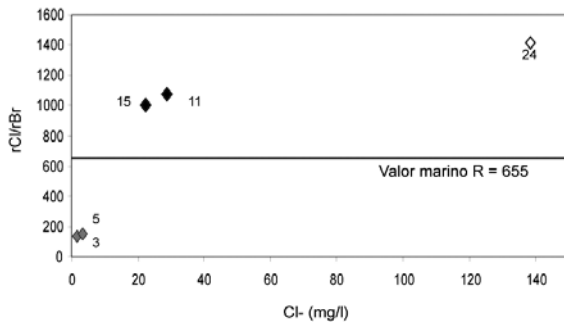


Fig.3 Relación de rCl-/rBr- para cinco muestras de agua.

Tabla 1: Valores de conductividad, temperatura y de concentración de iones de Br<sup>-</sup> y Cl<sup>-</sup> para cinco muestras de agua subterránea.

Pozo	Cond. ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	Resistividad ( $\Omega\text{m}$ )	Temp (C)	Salinidad (g/l)	Br <sup>-</sup> (mg/l)	Cl <sup>-</sup> (mg/l)	rCl-/rBr
3	200	50	28,80	0,10	0,03	1,78	133,50
5	400	25	28,40	0,20	0,05	3,29	148,05
11	850	11,76	29,00	0,47	0,06	28,68	1075,50
15	950	10,52	29,60	0,49	0,05	22,28	1002,60
24	1000	10,00	29,80	0,50	0,23	138,00	1350,00

A partir de estos datos, se ha calculado la resistividad, salinidad del agua y rCl-/rBr.

Tanto los valores de conductividad eléctrica del agua (y su inverso, la resistividad) así como los datos de salinidad, no evidencian en ninguna de las muestras valores extremos que pudieran asociarse con el proceso de intrusión salina como tal, sin embargo es evidente un aumento de estos valores con forme nos acercamos a la línea de costa.

La figura 3, muestra la relación existente rCl-/rBr- como indicador de la salinidad en las cinco muestras de agua contenidas en la tabla 1. Los valores fueron reportados (sin procesamiento ni interpretación) por MORERA; MATAMOROS (2002).

La relación cloruro/bromuro, se expresa como:

$$R = r\text{Cl-}/r\text{Br-} = 2,25p\text{Cl-}/p\text{Br-} \quad (1)$$

Donde r es la concentración molar o equivalente (meq/l) y p es la concentración ponderada (mg/l) (CUSTODIO; ALCALÁ, 2003). De acuerdo con diversos autores como DAVIS et al. (1998), WHITTEMORE (1998) y CUSTODIO; HERRERA (2000), esta relación para el agua de mar es de  $655 \pm 4$ .

Las muestras 3 y 5 que se localizan respectivamente a 2750 m y 1750 tierra adentro de la línea de costa en el sector de Buena Vista, se encuentran por debajo de la referencia al valor marino, reflejando valores típicos de agua de lluvia continental (CUSTODIO; ALCALÁ, 2003), siendo una evidencia de la recarga directa que ocurre en este sector del Acuífero en Rocas Sedimentarias Turbidíticas. Por su parte; las otras muestras de agua que pertenecen al Acuífero en Sedimentos No Consolidados se localizan a menos de 500 m de la línea de costa en playa Sámara, caracterizadas por presentar valores altos de la relación rCl-/rBr-. El origen del aumento de la salinidad puede ser explicado al efecto de intrusión salina, el cual se ve incrementado por el exceso de concentración en sales en el agua de lluvia debido a la topografía y cercanía del sistema montañoso, favoreciendo la generación de aerosol marino formado por la evaporación parcial de las gotículas de agua marina. No se descarta, el efecto de contaminación de aguas residuales, especialmente en la muestra 24 (debido a la alta concentración de Cl<sup>-</sup>).

## PROSPECCIÓN GEOFÍSICA

La interpretación de los datos geofísicos se ha realizado con el fin de obtener información sobre la litología, ambiente depositacional, relaciones estratigráficas, profundidad del nivel estático, conductividad y resistividad del suelo.

Los principios, características y ejemplos de aplicación de los métodos y dispositivos utilizados han sido descritos por gran cantidad de autores: HATCH et al. (1983), GRANDA SANZ et al. (1987), GOLDMAN et al. (1991), NABIGHIAM; MACNAE (1991), GEONICS (1992), RABINOVICH (1995), ARIAS (1999), ALBOUY et al. (2001), MONTEIRO (2004), KAFRI; GOLDMAN (2005), ARIAS (2007). Su selección se basó en el poder de resolución y tipo de información que proporcionan (ARIAS, 2002a; ARIAS 2002b), pues han ayudado a esclarecer el modelo conceptual y la extensión de la intrusión salina.

Con la ayuda de una tomografía geoelectrica se ha obtenido una buena idea del desplazamiento lateral y de la profundidad a la que se encuentra la cuña de intrusión (figura 4), que se realizó en una calle que conduce a la playa en la propiedad de uno de los hoteles de la localidad, con una separación entre electrodos de 4 m, una longitud total de 200 m y muestra una profundidad de investigación máxima de 30 m.

Entre las longitudes 0 y 80 m, se aprecia una capa con valores de resistividad mayor a los 30  $\Omega\text{m}$  y con un espesor del orden de 5 m; que puede corresponder con material de relleno. Aproximadamente entre la misma longitud descrita anteriormente; pero a una profundidad mayor a los 10 m, se observa una zona con valores de resistividad eléctrica muy baja (1-4  $\Omega\text{m}$ ) que presenta la forma de cuña con el vértice hacia tierra adentro, la cual corresponde con la parte del acuífero saturada de agua salada. Además en los bordes de esta sección se aprecia una zona de transición hacia valores de mayor resistividad que se ha asociado con la zona de mezcla.

Un tercer aspecto destacable en esta tomografía eléctrica corresponde con los materiales relativamente resistentes que se correlacionan con material aluvial de granulometría variable y saturado de agua dulce. Por su parte; el resto de la sección muestra valores de resistividad baja (5-15  $\Omega\text{m}$ ) que se han asociado con material arcilloso.

La figura 5, muestra una pseudosección geoléc-

trica realizada en las inmediaciones de la Laguna Buena Vista, en ella se pueden apreciar el efecto tectónico debido a que las capas interpretadas presentan una morfología muy irregular cortada por fallas de tipo normal.

Se muestra claramente una predominancia de la variación lateral de la resistividad eléctrica; correlacionada con un sistema de fallamiento y estructuras de tipo canal en el aluvión que controlan el flujo del agua subterránea.

Los sondeos electromagnéticos en el dominio temporal (TDEM) con un tamaño de bobina cuadrada de 25 m de lado, se correlacionaron con el fin de establecer varios perfiles, en esta oportunidad se describen dos de ellos en la figura 6.

El perfil de la figura 6 a se realizó en las cercanías de Punta Sámará y correlaciona los siguiente sondeos: S2, S3, S4, S6 y S7. En él, se puede observar las variaciones de la resistividad, correspondiendo con un modelo de estructuras lenticulares características de este tipo de ambientes depositacionales. Predomina el área con resistividad del orden entre los 10 y 100  $\Omega\text{m}$ , que se puede asociar con el aluvión saturado, con algunos lentes de materiales más resistentes que se asocian con aluvión seco y de mayor granulometría. Los valores más bajos (1-3  $\Omega\text{m}$ ) se ubican precisamente en la cercanía de la línea de costa a una profundidad de hasta 15 m y con una extensión de cercana a los 500 m, área que representa la ubicación de un manglar que ha sido cubierto por un material resistivo. Por su parte, la zona de alta resistividad a partir de los 15 m de profundidad y que se encuentra cercana a la costa, se asocia con la extensión de las rocas sedimentarias aflorantes en el Cerro Cangrejal.

La figura 6b, representa el perfil elaborado en las cercanías del pozo del acueducto de la localidad y correlaciona los sondeos S8, S9, S10, S12 y S13. La interpretación realizada contempla también la zona de aluvión saturado con lentes resistentes. A una profundidad de 25 m se refleja el basamento sedimentario como una zona resistiva. Existen además dos zonas conductoras (6 - 15  $\Omega\text{m}$ ) evidenciadas en los sondeos S8 y S9, las cuales son de poco espesor (2 a 4 m) que en se interpretan como dos lentes arcillosos, que están actuando como capas confinantes en ese sector.

Los perfiles electromagnéticos en el dominio frecuencial (figura 7) se realizaron con el equipo EM-34 usando un paso de muestreo de 10 m para las tres

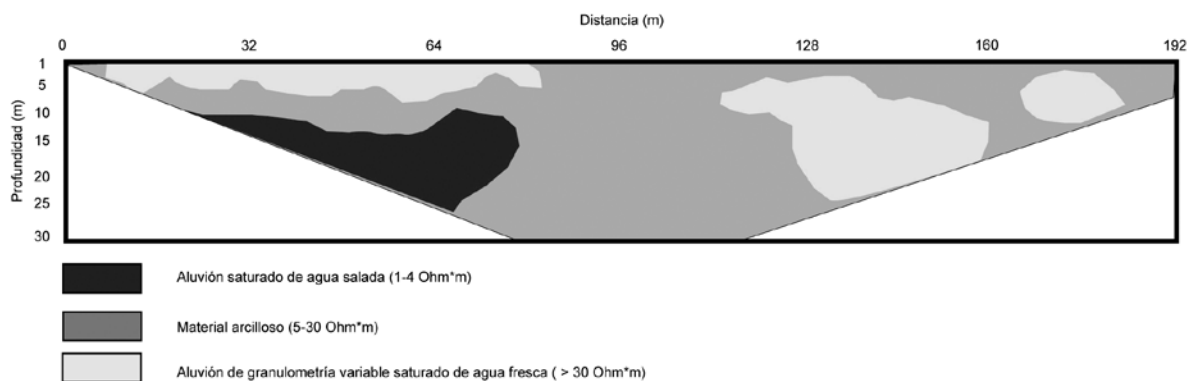


Fig.4: Tomografía eléctrica, que muestra la cuña de intrusión salina.

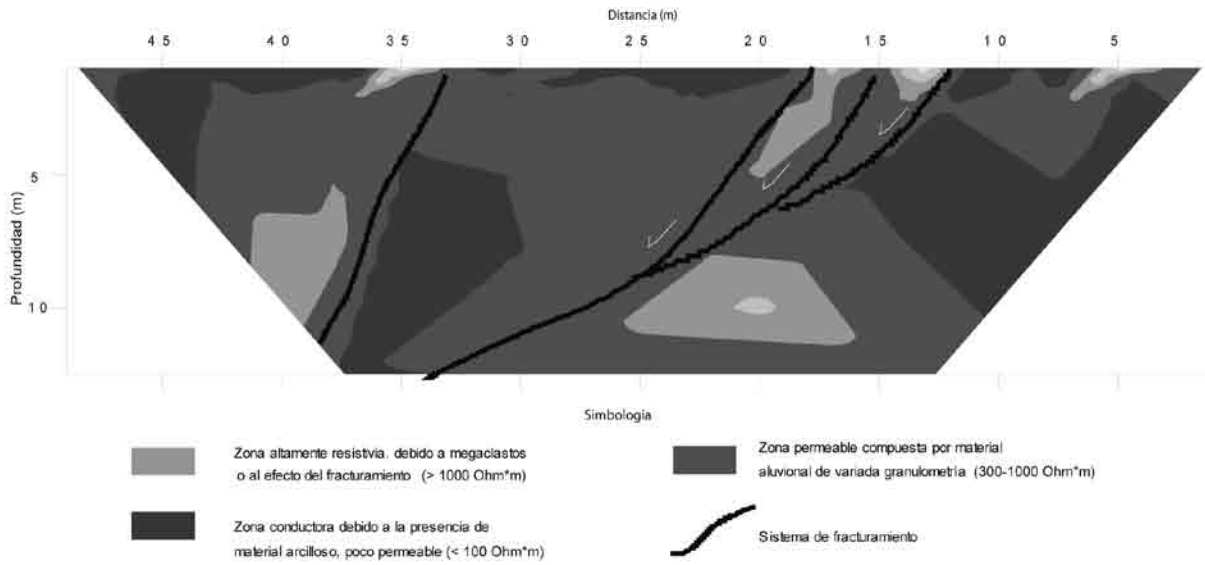


Fig. 5: Pseudosección geoelectrica que muestra las variaciones de la resistividad producto del efecto tectónico.

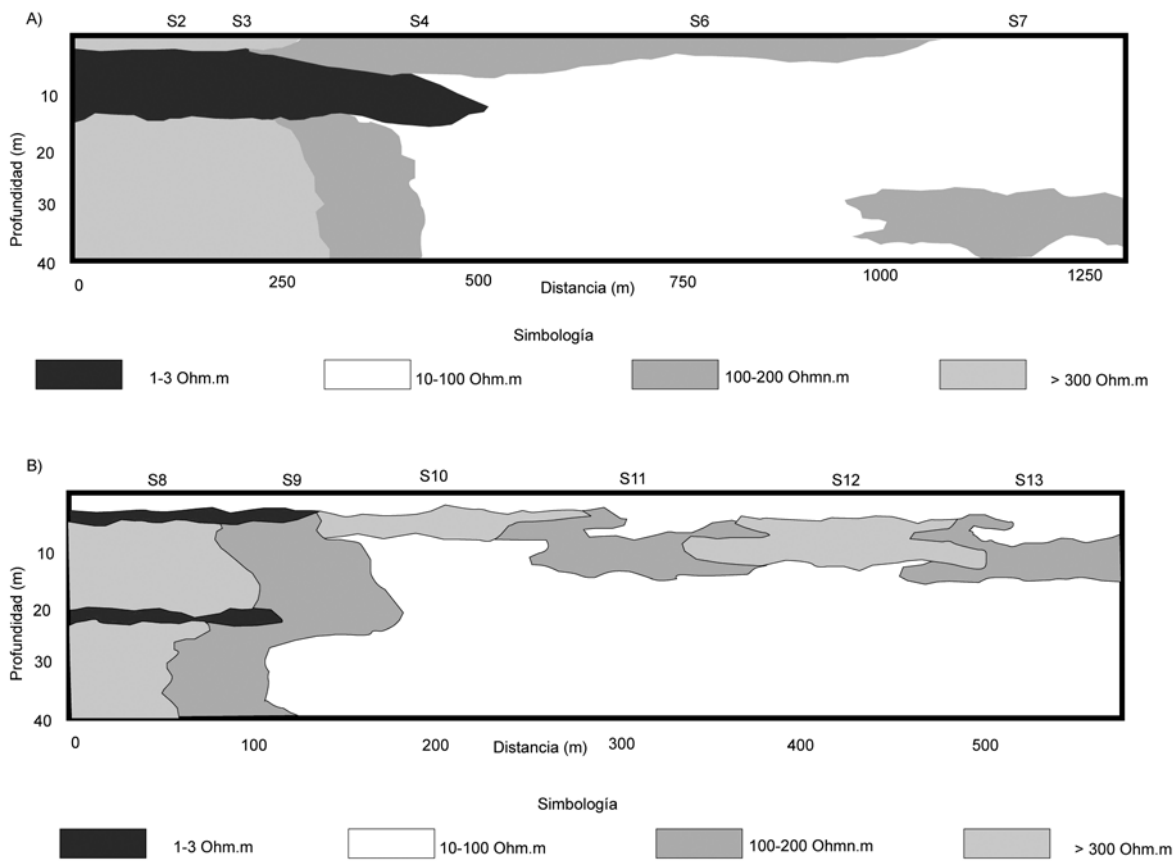
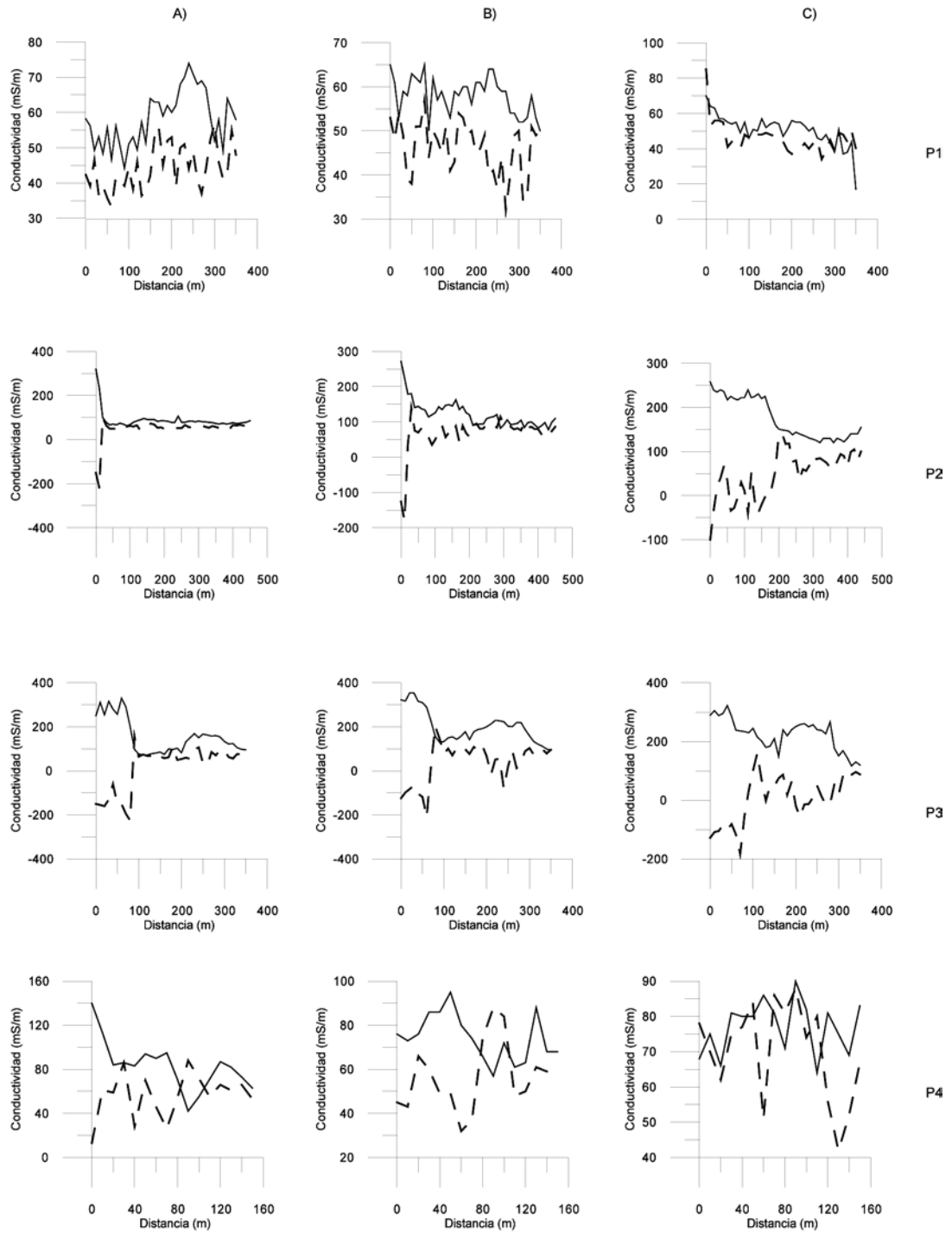


Fig. 6: Perfiles Electromagnéticos tipo TDEM.



A) separación entre bobinas de 10 m. B) separación entre bobinas de 20 m. C) separación entre bobinas de 40 m. Línea continua representa el dipolo horizontal y línea discontinua corresponde con el dipolo vertical.

Fig.7: Perfiles electromagnéticos tipo EM-34.

separaciones entre las bobinas (10, 20, 40 m) tanto en la modalidad de dipolo vertical como dipolo horizontal. Estos perfiles, realizados desde la línea de costa, reflejan variaciones de la conductividad del suelo tanto longitudinalmente y en profundidad en función de los cambios litológicos en el acuífero aluvial.

En los perfiles P2 y P3, los datos de conductividad para los primeros metros prospectados son reportados como valores negativos en los gráficos correspondientes al dipolo vertical, esto es debido al alto valor de la conductividad del suelo que ha sido invadido por el agua salada, excediendo el rango de medición del equipo utilizado.

Los gráficos A y B del P2 en la figura 7, representan la zona de alta conductividad (sector de valores negativos) con una extensión cercana a los 50 m desde la línea de costa y de casi 200 m para el gráfico C, los cual permite considerar una zona de interfase que va extendiéndose tierra adentro a mayor profundidad.

Por su parte, los tres gráficos del P3, muestran la zona de intrusión a 100 m de distancia desde la línea de costa, lo cual podría evidenciar un equilibrio hidrodinámico debido a que el contacto entre el aluvión saturado con agua dulce y del aluvión saturado con agua salada es vertical.

## CONCLUSIONES

En la localidad de Sámara se han identificado tres unidades hidrogeológicas denominadas: rocas volcánicas de baja permeabilidad; acuífero en rocas sedimentarias turbidíticas y acuífero en sedimentos no consolidados.

El modelo conceptual; incluye la existencia de dos acuíferos discordantes, uno en el material aluvial y otro en las rocas sedimentarias turbidíticas presentando ambos control estructural y variaciones en las propiedades hidráulicas de los mismos.

El efecto del tectonismo en la localidad de Sámara es de gran importancia desde un punto de vista hidrogeológico pues el buzamiento, plegamiento y fracturamiento de las rocas condicionan la descarga del agua subterránea, el posible aporte de recarga lateral, así como el flujo de agua salada que pudiera entrar en el acuífero de rocas sedimentarias turbidíticas.

En ensayos geofísicos realizados muestran a partir de las tomografías geoléctricas y perfiles electromagnéticos tanto en dominio temporal como frecuencial; una predominancia de la variación lateral de la resistividad eléctrica; correlacionada con estructuras de tipo canal que controlan el flujo del agua subterránea del acuífero en sedimentos no consolidados.

La aplicación de los métodos geofísicos ha sido de gran ayuda para la determinación del modelo conceptual y delimitación del proceso de intrusión salina en un sector aledaño al río Lagarto. La integración de los parámetros de conductividad eléctrica del agua y los valores de la relación  $rCl/rBr$  del pozo 11, así como la extensión de la zona altamente conductora evidenciada en uno de perfiles electromagnéticos en el dominio temporal (figura 6 a) y en los perfiles electromagnéticos en dominio frecuencial (P2 y P3), permite concluir que en este sector del acuífero aluvial, la extensión de la

intrusión salina llega hasta los 500 m desde la línea de costa.

La restricción areal de la zona que presenta intrusión salina en el acuífero en sedimentos no consolidados es explicada por la existencia previa del estero Lagarto, el cual fue rellenado con materiales aluvionales hace varios años atrás.

En el sector aledaño a la localización del pozo que es utilizado por el acueducto de la localidad en las cercanías del río Mala Noche no se evidencian rasgos ni de contaminación salina ni de intrusión salina propiamente dicha.

## AGRADECIMIENTOS

A las diversas instituciones que colaboraron con financiamiento parcial, préstamo de equipo y/o acceso a la información, entre ellas: UMR 7619 Sisyphe, Proyecto CARA, SENARA, AyA.

Esta publicación es un resultado parcial del proyecto 113-A6-077, inscrito en la Vicerrectoría de Investigación de la Universidad de Costa Rica.

## REFERENCIAS

ALBOUY, Y.; ANDRIEUX, P.; RAKOTONDRASOA, G.; RITZ, M.; DESCLOITRES, M.; JOIN, J. L.; RA-SOLIMANANA, E. Mapping coastal aquifers by joint inversion of DC and TEM sounding: Three case histories. *Groundwater*, 39(1), 87-97, 2001.

ARIAS, M. E. Les méthodes de sondages électriques et électromagnétiques : Exemples d'application en Hydrogéologie. Paris, 1999. [Rapport de fin de Stage, D.E.E.S.] Université Pierre et Marie Curie, Paris VI.

ARIAS, M. E. Aplicaciones geofísicas a la hidrogeología en Costa Rica. *Rev. Geól. América Central*: 27, 11-20, 2002a.

ARIAS, M. E. La prospección geoeléctrica y electromagnética en dos dimensiones y su aplicación en la hidrogeología. *Rev. Geól. América Central*: 27, 21-26, 2002b.

ARIAS, M. E. La primera experiencia en la aplicación de los Métodos Electromagnéticos en acuíferos costeros de Costa Rica: El caso de Tamarindo, Guanacaste. *Bol. Geol. y Minero de España*. 118 (1): 51-62, 2007.

ARIAS, M. E.; VARGAS, A.; GUERIN, R. Geofísica aplicada al problema de la intrusión salina en los acuíferos costeros de Costa Rica. —In. *Tecnología de la intrusión de agua de mar en los acuíferos costeros: países Mediterráneos* (2003 López – Geta, et al.) Instituto Geológico y Minero de España, Serie Hidrogeología y Aguas Subterráneas N° 8. Madrid, 2003.

ASTORGA, A. El Cretácico Superior y el Paleógeno de la vertiente pacífica de Nicaragua meridional y Costa Rica septentrional: Origen, evolución y dinámica de las cuencas profundas relacionadas al margen convergente de Centroamérica. San José, 1987. Tesis [Licenciatura en Geología]. Escuela de Geología, Univ. de Costa

Rica.

BAUMGARTNER, P. Tectónica y sedimentación del Cretácico superior en la zona pacífica de Costa Rica (América Central). In SIMPOSIO INTERNACIONAL: EL CRETÁCICO DE MÉXICO Y AMÉRICA CENTRAL, (1987, México). Universidad Autónoma de Nuevo León. p.251-260, 1987.

CUSTODIO, E.; ALCALÁ, F. El potencial de la relación Cl/Br como indicador del origen de la salinidad de los acuíferos costeros españoles. –In. Tecnología de la intrusión de agua de mar en los acuíferos costeros: países Mediterráneos (2003 López – Geta, et al.) Instituto Geológico y Minero de España, Serie Hidrogeología y Aguas Subterráneas N° 8. Madrid, 2003.

CUSTODIO, E.; HERRERA, C. Utilización de la relación Cl/Br como trazador hidrogeoquímico en hidrogeología subterránea. Bol. Geol. y Minero de España. 111 (4), 2000.

DAVIS, S.; WHITTEMORE, D.; FABRYKA-MATIN, J. Use of chloride/bromide ratios in studies of potable water. Ground Water, 36, 1998.

DENYER, P.; ARIAS, O. Estratigrafía de la Región Central de Costa Rica. Rev. Geól. América Central, 12, 1-59, 1991.

DENYER, P.; ARIAS, O. Geología del norte de la Península de Nicoya, Costa Rica. Rev. Geól. América Central: 16, 69-84, 1993.

DENYER, P.; MONTERO, W.; ALVARADO, G. Atlas Tectónico de Costa Rica. -79 págs; il., mapas. Editorial Univ. de Costa Rica. San José. 2003.

DIAZ, J. Estudio geológico del cerro Sámara y alrededores. Península de Nicoya, Guanacaste, Costa Rica. San José, 1980. [Inf. Campaña Geológica]. Univ. de Costa Rica, San José.

GAMBOA, E. Geología del área de Carrillo y alrededores, Península de Nicoya, Provincia de Guanacaste, Costa Rica. San José, 1985 [Inf. Campaña Geológica]. Univ. de Costa Rica, San José.

GEONICS, Groundwater Exploration Applications. Notario, 1992 [Technical Note].

GRANDA SANZ, A.; PÉREZ TERENES, A.; TORRES, J. L. Los sondeos electromagnéticos en el dominio del tiempo (SEDT): Aspectos más significativos y primeras experiencias en España. Boletín Geológico y Minero, XCVIII-III, 392-403, 1987.

GOLDMAN, M.; GILAD, D.; RONEN, A.; MELLOUL, A. Mapping of seawater intrusion into the coastal aquifer of Israel by the time domain electromagnetic method. Geoexploration, 28, 153-174, 1991.

HACT, M.; BARRET, B.; BENNETTS, D.; HEISON,

G.; TELFER, A.; ROBERTS, C. Improved near surface mapping in groundwater studies: Application of fast-sampling time-domain EM surveying methods. Australina Society of Exploration Geophysicists, Preview 1, 25-29, 2002.

KAFRI, U.; GOLDMAN, M. The use of the time domain electromagnetic method to delineate saline groundwater in granular and carbonate aquifers and to evaluate their porosity. Journal of Applied Geophysics, 57, 167-178, 2005.

MORERA, S.; MATAMOROS, G. Evaluación del potencial y demanda hídrica subterránea en los acuíferos costeros de Sámara, Guanacaste, Costa Rica. San José, 2002 [Inf. interno]. Servicio Nacional de Aguas Subterráneas, Riego y Avenamiento.

MONTEIRO, F. 1-D laterally constrained inversión of EM34 profiling data. Journal of Applied Geophysics, 56, 123-143, 2004.

MOSHIM, J. Geología de la zona de Buenavista de Sámara, provincia de Guanacaste, Costa Rica. San José, 1980 [Inf. Campaña Geológica]. Univ. de Costa Rica, San José.

NABIGHIAM, M. N.; MACNAE, J. C. Time Domaine electromagnetic prosectin methods. In: ELECTROMAGNETIC METHODS IN APPLIED GEOPHYSICS (1991, Nabighiam, M.N.), Society of Exploration Geophysicist, Tulsa, v. 2, p. 427-520, 1991.

RABINOVICH, M. B. Errors of 1D interpretation of 3D- TDEM data in the application of mapping salt-water/freshwater contact. Journal of Applied Geophysics, 34, 23-34, 1995.

SÁENZ, L. Geología del área de Mango y sus alrededores, Sámara Península de Nicoya, Provincia de Guanacaste, Costa Rica. San José, 1980 [Inf. Campaña Geológica]. Univ. de Costa Rica, San José.

VARGAS, C.; BARAHONA, M. Práctica Geológica realizada en Sámara y Buenavista, provincia de Guanacaste. San José, 2001 [Inf. interno]. Univ. de Costa Rica, San José.

WHITTEMORE, D. Bromide as a tracer in groundwater studies: geochemistry and analytical determination. Proc. Ground Water Geochem. 1998.



# GEOHIDROLOGIA DE HUMEDALES PROXIMOS A LA COSTA CON COTA BAJO NIVEL DEL MAR. PENINSULA VALDES, ARGENTINA.

María del Pilar Alvarez <sup>(1) (2)</sup>, Nilda Weiler <sup>(1) (2)</sup> y Mario Hernández <sup>(1)(3)</sup>

(1) CONICET (2) CENPAT (3) Universidad Nacional de La Plata  
CENPAT. Boulevard Brown s/n (U9120ACV) Puerto Madryn. Argentina Tel. 54 2965 451024  
Email: alvarez@cenpat.edu.ar

**Resumen:** La Península Valdés con una superficie de 3625 km<sup>2</sup>, situada sobre el Océano Atlántico entre los 42° y 43° de latitud Sur y cuyo istmo separa los golfos Nuevo y San José, en territorio de la Patagonia argentina, se halla bajo un clima árido con un marcado déficit hídrico y la consecuente escasez de recursos hídricos.

Carente de ríos o arroyos, las únicas posibilidades de provisión para la actividad ganadera y uso humano radican en las aguas subterráneas, en su mayor parte con alta salinidad y tipo iónico clorurado-sódico. Los principales registros de aguas menos salinas coinciden con unidades geomórficas de génesis eólica (médanos), y con manantiales asociados a grandes bajos.

Un rasgo geomórfico destacable es la presencia de humedales, algunos litorales de reducidas dimensiones, pero los más significativos son dos grandes cuerpos lacunares salinos yacentes en una depresión de cota 42 m bajo el nivel del mar, la más negativa de América del Sur. Son los denominados Salina Grande (superficie media 35 km<sup>2</sup>) y Salina Chica (12 km<sup>2</sup>).

El mecanismo geohidrológico responsable de la alimentación de estos humedales tan particulares es analizado en esta contribución, utilizando elementos de juicio hidrodinámicos (cartografía equipotencial), hidroquímicos e isotópicos (isótopos estables 2H y 18O), y a partir del reconocimiento hidrogeomorfológico basado en interpretación de imágenes satelitales y relevamiento de campo.

Se pretende contrastar los resultados obtenidos con la hipótesis de una fuente marina de sustento para estos humedales

**Palabras-claves:** Humedales – Geohidrología – Patagonia argentina.

**Abstract:** The Valdés Peninsula covers an area of 3625 km<sup>2</sup>; it is located on the Atlantic Ocean between 42° and 43° South latitude in Argentinean Patagonia.

An isthmus separates the Nuevo and San José gulfs. Its climate is arid, with a marked water deficit and scarcity of water resources.

Due to the lack of rivers or streams, groundwater is the only source of water for livestock production and human consumption. Most are high-saline, chloride-sodium waters. The less saline waters are found in eolian landforms (dunes) and springs associated to large depressions.

A remarkable geomorphic feature is the presence of wetlands. Some of them are small littoral areas, but the most important are two saline lakes: Salina Grande (mean area 35 km<sup>2</sup>) and Salina Chica (12 km<sup>2</sup>); they are located in a depression at 42 m below sea level, the lowest site in South America.

This contribution describes the geohydrological mechanism responsible for the support of these wetlands. Hydrodynamic (equipotential maps), hydrochemical and isotopic (stable isotopes 2H and 18O) criteria were used, complemented with a hydro-geomorphologic survey based on satellite images and field work. The hypothesis of a marine support source for these wetlands is discussed in the light of the results obtained.

**Key Words:** Wetlands - Geohydrology – Argentinian Patagonia.

## INTRODUCCIÓN

El área de estudio se ubica en el sector centro-sur de la Península Valdés en la Patagonia Argentina, delimitada por las coordenadas 42° 34' y 42° 44' de latitud Sur y 64° 45' y 63° 45' de longitud Oeste (figura 1). En la zona se encuentran dos grandes playas (salinas) ubicadas dentro de una depresión de forma semicircular elongada en sentido Este-Oeste cuya cota mínima es la más profunda de América del Sur, alcanzando los 42 m por debajo del nivel del mar. Son las denominadas Salina Grande (superficie 35 km<sup>2</sup>) y Salina Chica (12 km<sup>2</sup>).

El hecho de contar con una cota de lecho por debajo del nivel del mar hizo pensar, muchas veces, en un origen de las salmueras contenidas a partir del acceso de aguas marinas.

Se ha considerado entonces importante que a partir de elementos de juicio de carácter geomorfológico, hidrogeológico, hidrodinámico e hidroquímico, pueda establecerse la real génesis de estos humedales tan particulares.

## METODOLOGÍA

El estudio geomorfológico de la zona se basa principalmente en el análisis aerofotográfico (fotografías aéreas escala 1:60.000 del Servicio de Hidrografía Naval S.H.N.), de imágenes satelitales (imagen Landsat 7 227-26-agosto 1999 y 227-89-26 agosto 1999), cartas topográficas a escala 1:100.000 (4363-7-8-13-14), hoja geológica (4363-I, "Península Valdés") y con controles

de campo. El clima se caracterizó a partir de los datos de precipitación provenientes de la Estancia La Adela (42° 33' latitud Sur, 64° 18' longitud Oeste, 80 m s.n.m) y los de temperatura de la estación meteorológica Puerto Madryn (ubicada aproximadamente a 100 km de la zona de estudio).

Los trabajos de campo incluyeron la verificación de las unidades geomórficas y sus límites, mediciones freáticas y muestreo de agua subterránea y superficial con finalidad analítica. En laboratorio se determinaron los cationes Ca<sup>++</sup> y Mg<sup>++</sup> y los isótopos estables 18O y 2H.

## CLIMA

Los aspectos generales del clima de la Península Valdés son los mismos que caracterizan al de la región Noreste de la Patagonia, modificados localmente por las interacciones entre la atmósfera y los cuerpos de agua adyacentes. La circulación general troposférica que lo determina está influida por dos anticiclones, centrados aproximadamente en 30° S en los océanos Pacífico y Atlántico, y por el cinturón de bajas presiones o vaguada circumpolar, localizado entre 60° y 70° S. Las variaciones en intensidad y posiciones relativas de estos tres sistemas de presión determinan una circulación predominantemente del Oeste (vientos contralios) durante la mayor parte del año.

Desde Octubre a Febrero la velocidad media mensual del viento se halla por encima de la media anual. Un estudio del potencial eólico en Puerto Pirá-

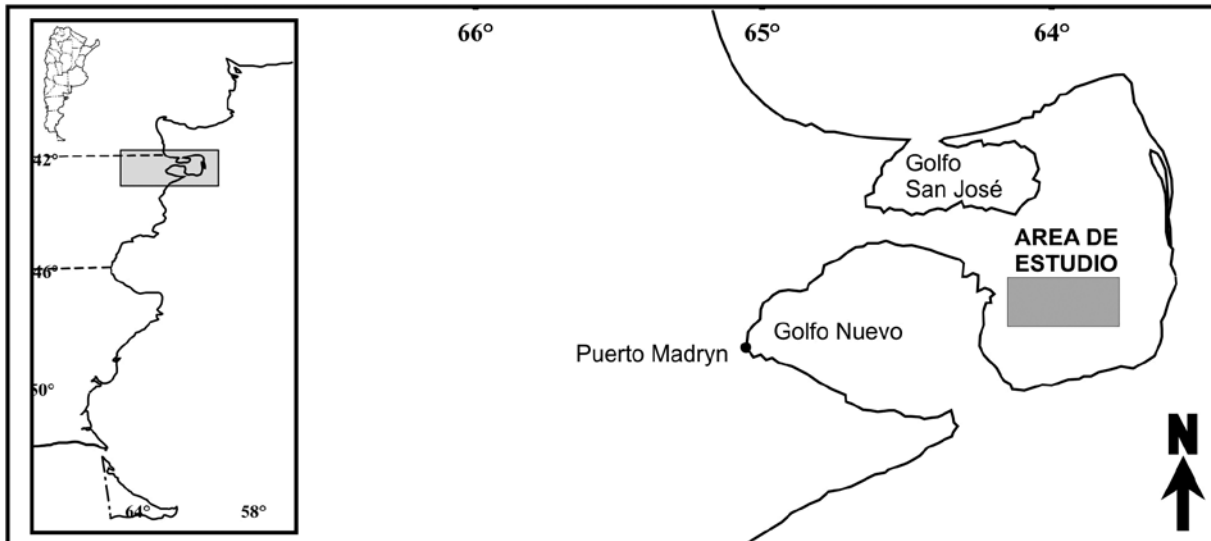


Figura 1. Mapa de ubicación

midas indica que el promedio anual de velocidad es de 25 km/h (Barros y Rodríguez Seró, 1981).

De acuerdo a la estación meteorológica de CENPAT, la temperatura media anual es de 13,4 °C con mínima de 6,4 °C en Julio y máxima de 20,4 °C en Enero.

Para caracterizar la precipitación pluvial se recurrió por su extensión a los registros de Ea. La Adela (1912-1999), que muestran una media anual de 232 mm, con un período más lluvioso en el trimestre Mayo - Julio con 81 mm y el de menores lluvias en el trimestre Noviembre-Enero con 40 mm. Esta radicación invernal de las precipitaciones es típica del régimen Pacífico.

El balance hídrico de la región según la metodología de Thornthwaite y Mather (1957) para capacidades de campo de 50 mm y 25 mm, muestra la existencia de déficit en todos los meses excepto los de Junio y Julio. La relación de la precipitación con la evapotranspiración potencial (704 mm/año) determina un déficit hídrico anual de 472 mm.

Según la difundida clasificación de Thornthwaite (Burgos y Vidal, 1951), el clima es de tipo Árido, mesotermal con nulo exceso de agua y concentración estival de la eficiencia térmica < 48% : (E B2'd a').

## GEOLOGÍA

### Caracterización Estratigráfica

La estratigrafía en la comarca que incluye a los bajos, de acuerdo con Haller et al (2001), está representada por los siguientes estratos cenozoicos (cuadro 1).

En cuanto al basamento rocoso de la cubeta, estaría compuesto por ignimbritas de la Formación Marifil y sedimentitas paleozoicas de la Formación Sierra Grande (Kostadinoff, 1992).

### Caracterización estructural

La formación de los bajos ha sido atribuida a un origen tectónico tanto por Roveretto (1921) como

por Kostadinoff (1992).

Roveretto describe para la cuenca que involucra ambos bajos una serie de fallas. De acuerdo a este autor, se encuentra en la margen Norte una falla de característica rectilínea y dirección E-O, una falla en la margen Este con rumbo NNO-SSE, una al Oeste también rectilínea, otra al Sur de morfología semicircular, y por último dos fallas secundarias entre las dos salinas, que generan la divisoria de sus cuencas dentro de la gran depresión. Las fallas están evidenciadas por paredes abruptas que dejan al descubierto los sedimentos cenozoicos.

Kostadinoff (1992), mediante un estudio geofísico del área, determinó la presencia de un pilar tectónico en el centro de la península, cuya falla Sur coincide con la margen Norte de la gran depresión. Menciona asimismo la importancia de las fallas menores (no más de 70 m) en la generación de los bajos de la península y remarca que su desarrollo solo afecta hasta los sedimentos terciarios, no así a los cuaternarios, por lo que se deduce que el origen de los bajos es pre-Cuaternario

## GEOMORFOLOGÍA

Los bajos que contienen a las salinas Grande y Chica se ubican en una gran depresión elongada en sentido Este-Oeste y están separados por un alto topográfico constituido por sedimentos del Terciario y rodados patagónicos. Son dos cuencas endorreicas independientes, con una red de drenaje típicamente centripeta conformada por numerosos cursos transitorios de distinto orden.

La cota topográfica a la cual se encuentra la Salina Grande es de 42 m bnm y la de Salina Chica 12 m bnm. El borde de la depresión que las engloba a ambas, se ubica a +/- 70 m sobre el nivel del mar, generándose así un desnivel entre el borde de la depresión y el fondo de la misma de 112 m.

Las principales unidades geomorfológicas reconocidas en ambas salinas (Figura 2) son pedimentos convergentes, bajadas y playas. Cabe aclarar que

Cuadro 1. Estratigrafía (modificado de Haller, et al., 2001)

Período	Época	Unidad Geológica	Litología
Cuaternario	Holoceno	Depósitos aluviales y coluviales	Arenas, gravas y arcillas
		Depósitos eólicos	Arenas y limos
		Sedimentos finos de bajos y lagunas	Limos, arcillas, evaporitas (halita, glauberita y yeso)
	Pleistoceno Superior Pleistoceno Inferior	Rodados patagónicos	Gravas
Neógeno	Mioceno	Formación Puerto Madryn	Areniscas, pelitas y coquinas
	Oligoceno superior	Formación Gaiman	Limos, cineríticos, arcilitas y areniscas

de acuerdo con González Díaz y Malagnino (1984) y González Díaz (2004), se denominan pedimentos convergentes a aquellas superficies de erosión que marginan bajos o depresiones endorreicas

#### a. Salina Grande

*Superficie de pedimentación convergente I:* Es la pedimentación más antigua, topográficamente ocupa la posición más elevada y se encuentra labrada sobre sedimentos terciarios. Forma parte de la barranca Norte como una faja de 10,3 km de largo en dirección Este-Oeste y bordeando el extremo sur-suroeste con una longitud de 15,8km. Se habría desarrollado con un nivel de base superior al actual.

*Superficie de pedimentación convergente II:* Se halla topográficamente por debajo de la anterior y fue labrada a partir de sedimentos aluvionales. Por sectores, este nivel alcanza a descubrir los estratos terciarios. Se manifiesta en todo el contorno de la Salina Grande con pendiente variable y su mayor desarrollo areal es en el sector Oeste, donde tiene la mínima pendiente.

*Superficie de pedimentación convergente III:* Desarrollada sobre sedimentos aluvionales, su distribución es discontinua apareciendo al Oeste, Noroeste y Sudoeste de la Salina Grande. No alcanza a exponer en ningún sector de la pendiente a los sedimentos del Terciario.

Superficie de pedimentación IV. Está completamente tendida sobre sedimentos aluvionales, es la superficie de pedimentación más moderna y su ubicación topográfica la más baja. Tiene una distribución prácticamente continua interrumpida en sectores por la bajada actual y en forma de estrecha faja alrededor de la playa.

#### Bajadas

La estructura litológica facilita el desarrollo de material aluvional depositado al pie de las superficies de pedimentación, dando origen a bajadas. Los sucesivos cambios, del nivel de base provocaron el desplazamiento de las superficies de erosión causando que antiguas bajadas hayan sido erosionadas constituyendo así nuevas superficies de pedimentación. Esto se observa en las superficies de pedimentación II, III y IV, las cuales se formaron a partir de sucesivas bajadas.

La bajada actual está compuesta por materiales detríticos (arena, rodados y limos) y se ubica entre la superficie de pedimentación IV y la playa. Tiene distribución uniforme en la margen Oeste y Norte de la salina, muy reducida en el sector Sur.

#### b. Salina Chica

La superficie de pedimentación convergente I está labrada sobre terrenos terciarios y cuaternarios, con relictos de sedimentos terciarios intercalados y pedimentación secundaria superpuesta, no mapeables a la escala de trabajo. Se extiende desde el borde superior del bajo de la salina hasta la superficie de pedimentación convergente II. En el Sur está parcialmente cubierta por médanos longitudinales y mantos arenosos.

La superficie de pedimentación II se desarrolla sobre los sedimentos aluviales y coluviales posiblemente de la bajada de la superficie de pedimentación I, con escasa expansión areal. Se dispone como una faja angosta rodeando la bajada actual de la salina y en parte se interdigita con esta geoforma.

La bajada actual está conformada por materiales sedimentológicamente similares a los de la Salina

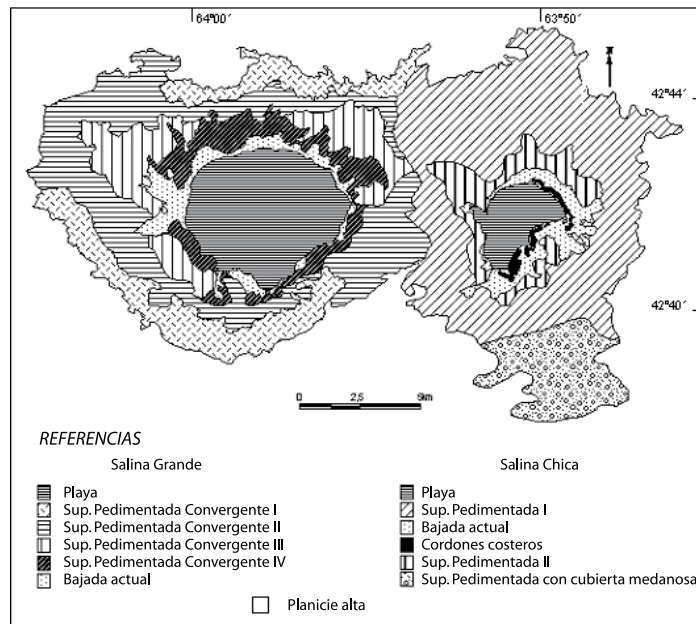


Figura 2. Mapa geomorfológico

Grande (arena, limo y rodados), dispuesto de forma irregular rodeando la salina.

### Playas

En la zona más deprimida de ambos bajos existen sendos cuerpos de agua con elevado contenido de sales, provenientes del recorrido y del lavado superficial y subterráneo de sedimentos marinos terciarios. Son lagunas transitorias cubiertas por una delgada capa salina de espesor variable, por debajo de la cual se ha desarrollado un ambiente anóxico fangoso con fuertes emanaciones mal olientes (Brodtkorb, 1999)

La variación temporal del nivel de las salinas se refleja en la presencia de cordones costeros claramente visibles en la salina Chica. Están compuestos por sedimentos arenosos (Súnico, 1996) y se ubican en las márgenes NE, E y SE de la playa.

### HIDROLOGÍA SUPERFICIAL

El límite de la cuenca "sensu strictu" definido a partir del mapa topográfico, coincide con la línea imaginaria que bordea el bajo que contiene a ambas salinas, respecto a la planicie circundante. En el mapa geomorfológico (Figura 2) se insinúan las vías de drenaje que conforman un avenamiento centrípeto de carácter transitorio efímero, activado en ocasión de precipitaciones extraordinarias dado el exiguo régimen pluvial imperante. En la figura 4 se marcan los cursos de tal carácter.

Según Cintrón-Molero y Schaeffer-Novelli (2002), las Salinas Grande y Chica se clasifican dentro de la unidad de paisaje endorreica, en el subsistema de cuencas áridas a hiperáridas donde  $P < ETP$ . Los cuerpos de agua dentro de estas cuencas son inherentemente inestables, hipersalinos y están sujetos a desecación completa o se encuentran secos la mayor parte del tiempo.

Atendiendo a la clasificación de humedales propuesta por Manzano (2005) desde el punto de vista

hidrológico, se los pueden clasificar como de descarga, recarga o de flujo a través de ellos.

Los de descarga son aquellos en los que la fuente de aporte principal es el agua subterránea y la pérdida se da por evaporación o flujo superficial. Si la evaporación es el flujo de salida dominante, el humedal puede evolucionar a un salar o lago playa. Los de recarga, son aquellos en los que el flujo de salida principal es la infiltración. En los de flujo a través la recarga de agua subterránea es la principal fuente de aporte y la infiltración el principal proceso de pérdida.

Este caso y por su conformación fisiográfica endorreica, se trata de un tipo distinto, con un ingreso mixto de amplio predominio subterráneo y pérdidas exclusivamente consuntivas.

### HIDROLOGIA SUBTERRANEA

Sobre la base del mapa equipotencial mostrado en la Figura 3, construido con información procedente del relevamiento realizado en Diciembre 2005, pueden reconstruirse los mecanismos hidrodinámicos para el acuífero freático

Puede reconocerse una morfología freática de tipo radial, con marcada tendencia a cilíndrica convergente en especial en torno a la Salina Grande. La cubeta que encierra a ambos humedales está contenida dentro de la curva isofreática 10 m snm, con una divisoria subterránea local que las separa. Los ápices de ambas hidroformas se hallan por debajo de los -20 m snm y -10 m snm en las salinas Grande y Chica respectivamente. La primera de ellas presenta los mayores gradientes hídricos, del orden de 0.016 en la margen Sur y 0.007 en la Norte, mientras que en la restante alcanza a 0.0075 y 0.005 respectivamente.

Constituyen estos cuerpos la zona de descarga local del sistema, al menos de su componente freática, mientras que la regional está representada por el Océano Atlántico incluyendo los golfos Nuevo y San José

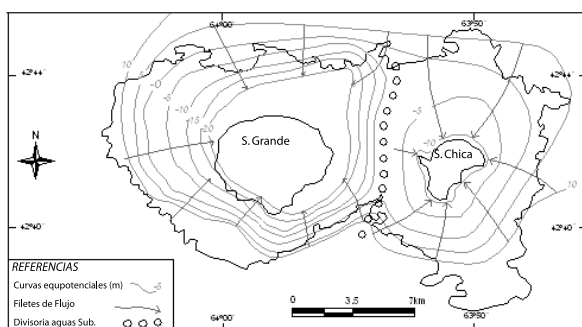


Figura 3. Mapa equipotencial

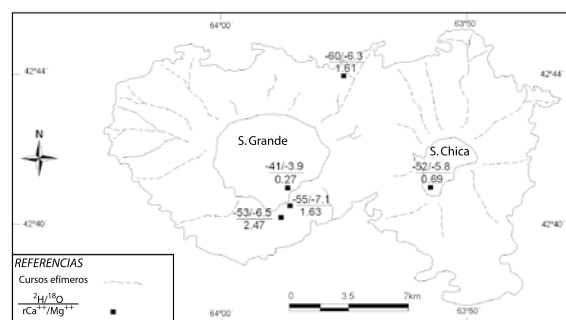


Figura 4. Mapa con valores 2H/18O y rCa++/Mg++

(Figura 1). Existe por lo tanto una divisoria subterránea regional que acompaña el contorno de la península, separando el flujo local centrípeto del regional centrífugo.

La recarga ocurre arealmente pese al ya mencionado importante déficit hídrico, por medio de diversos mecanismos descritos en Hernández (2005), uno de los cuales es el de infiltración rápida en médanos, que en este caso se encuentran en el ámbito de la Península Valdés predominantemente al Sur de estos humedales.

Queda evidenciada la descarga subterránea como fuente indiscutible de aporte a las salinas, además del más reducido provisto por el escurrimiento superficial. Inclusive fueron reconocidos manantiales en los bordes de la cubeta con aguas de baja salinidad, suelos con rasgos de hidromorfismo por debajo de la costra salina y/o con humedad aún en la época estival.

Desde el punto de vista hidroquímico surgen otros elementos de juicio que avalan la alimentación de los humedales salinos por medio de aguas continentales (subterráneas y superficiales) y no por aguas marinas.

El marco regional muestra un predominio de aguas de elevada salinidad (13800mg/l) y tipo iónico cloruradas sódicas, sobre otras más restringidas de 1000 mg/l y cloruradas bicarbonatadas sódicas.

En las aguas locales y a fin de establecer el origen de las influentes sobre los cuerpos salinos, se recurrió a la relación iónica rCa<sup>++</sup>/Mg<sup>++</sup> (calculada partir de las concentraciones en miliequivalentes por litro) que en el caso de un origen continental toma valores mayores a 0.2 (Custodio y Llamas 1983), producto de la precipitación del carbonato de Calcio en el medio marino y el consecuente predominio del otro catión alcalino-térreo.

Puede notarse en la Figura 4 que en las tres muestras de aguas subterráneas y una de cada salina se obtuvieron valores por encima de 0,2 (0,27 a 2,47), mientras que el análisis de agua de mar practicado arrojó un resultado de 0,22. La conductividad eléctrica en el caso de Salina Grande fue de 13.1300 μS/cm y en Salina Chica de 19.500 μS/cm, contra 60.400μS/cm del agua marina.

Habiéndose probado con argumentos hidrogeológicos, hidrodinámicos e hidroquímicos la procedencia continental y predominantemente subterránea del fluido contenido en los humedales salinos, se creyó conveniente utilizar también como indicador diagnóstico de alto valor a los isótopos ambientales Deuterio (2H) y Oxígeno 18 (18O), analizados sobre muestras

recogidas en los mismos puntos, en los laboratorios del Instituto Nacional de Geocronología y Geología Isotópica (INGEIS).

La distribución espacial de la relación isotópica se muestra en la Figura 4 junto a la relación catiónica. En la Figura 5 por su parte, se presenta el diagrama 2H y 18O (expresados en desviaciones por mil) con relación a la recta mundial de aguas meteóricas, representándose los valores de aguas subterráneas (dos vertientes y un pozo), ambas salinas, agua de mar y promedios ponderados de la precipitación.

Queda evidenciado que las aguas analizadas se alinean desde un origen próximo a las aguas pluviales en el dominio subterráneo, hasta de muy alta evaporación en el caso de las salinas, según una recta divergente de la mundial de aguas meteóricas no vinculada con la posición del agua marina.

Es también posible interpretar una mezcla de aguas, pero sin duda se trataría de la componente paleomarina emergente de los depósitos terciarios de tal origen, que pese al prolongado tiempo de lixiviación conservan el sello original del agua.

#### BALANCE HIDROLOGICO DE LOS HUMEDALES

En el estado actual de la investigación no es posible aún cuantificar un balance hidrológico para los humedales, ya que no se han concretado aún los ensayos hidráulicos para calcular los coeficientes de Permeabilidad y Almacenamiento (porosidad efectiva) para el dimensionamiento fundamental de la componente subterránea.

No obstante pueden anticiparse dentro de un régimen no-permanente los insumos a utilizar. Los ingresos están representados por la precipitación pluvial directa sobre los cuerpos salinos (calculable mediante los registros pluviométricos el área receptora), la afluencia superficial (estimable en función de las lluvias netas, el perímetro de ingreso y las pendientes) y la afluencia subterránea (cuantificable cuando se disponga de los coeficientes a determinar para una aplicación darcyana).

El egreso del sistema, por su conformación endorreica, está dado únicamente por la evaporación directa desde los humedales, que puede estimarse mediante fórmulas semiempíricas como la de Penman y su cotejo con mediciones directas de control, que deberán tener en cuenta la salinidad del agua acumulada.

Desde ya que cuando el sistema está en estado deficitario, como ocurre durante estiajes prolongados

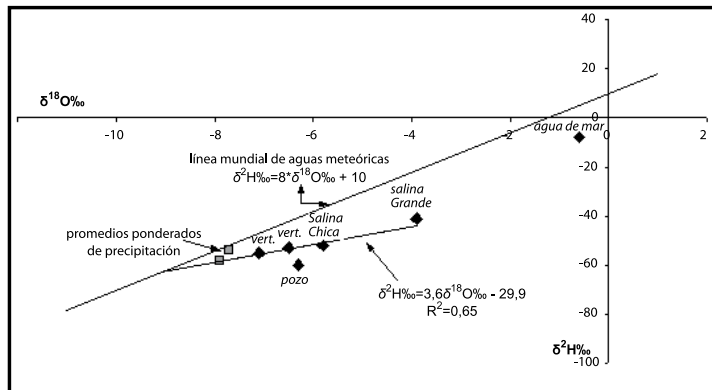


Figura 5. Diagrama de Isótopos Estables.

en la época estival, la superficie de los cuerpos es una costra continua de sal con una salmuera central. Debajo de la costra se reconocen fangos sapropélicos, demostrativos de un lógico estado anóxico. Históricamente coincidió esta situación con la esporádica extracción de sal con fines comerciales.

En cambio, con estados más generosos en aportes hídricos uno de los manantiales del sistema fue utilizado para la provisión de agua a la localidad de Puerto Pirámides. Inclusive actualmente se recurre a manantiales para la provisión a establecimientos rurales y en algún momento a un comercio hotelero.

## CONCLUSIONES

Las salinas ubicadas en la Península Valdés conforman un sistema de humedales hipersalinos, con una conformación endorreica tanto para el régimen superficial como para el subterráneo.

Pese a su proximidad con el mar y a la cota negativa (hasta -42 m) que llevó a pensar generalizadamente en una alimentación de tal procedencia, queda demostrado que estos humedales están soportados por aguas continentales.

Los elementos de juicio convergentes demostrativos proceden del campo de la hidrodinámica subterránea (afluencia verificada por la cartografía equipotencial del acuífero freático), de la hidroquímica (relación iónica  $rCa^{++}/Mg^{++} > 0.20$ ) y de la hidrología isotópica (relación de isótopos estables  $2H-18O$ ), en conocimiento del condicionante físico representado fundamentalmente por las características geomorfológicas.

Se plantean los insumos básicos para la resolución de un balance hidrológico bajo régimen no-permanente, quedando pendiente para concretarlo la realización de ensayos hidráulicos programados, para obtener los parámetros de cálculo de la afluencia subterránea.

## REFERENCIAS

Barros, V y Rodríguez Seró, J. A., 1981. Measurements strategies: use of short observations for the annual wind variations. Proceeding of the International Colloquium on Wind and BHRA Fluvial Engineering, 3-28.

Brodtkorb, A., 1999. Salinas grande y Chica de la Península de Valdés. Chubut. En: Recursos Minerales de la República Argentina (ED. E.O. Zappettini). SEGEMAR, Instituto de Geología y Recursos Minerales, Anales 35. 1971-1976, Buenos Aires.

Burgos, J. J., Vidal A. L., 1951. Los climas de la República Argentina, según la nueva clasificación de Thornthwaite. Revista Meteoros, Buenos Aires. Año 1, N° 1. 3-32

Cintrón-Molero y Schaeffer-Novelli, 2002. Documentos del curso-taller "Bases ecológicas para la clasificación de humedales en Argentina". Buenos Aires.

Custodio, E. y M. R. Llamas Madurga, 1983. Tratado de Hidrología subterránea. Omega (2ª. Ed.) Barcelona.

González Díaz, E.F. y Malagnino, E., 1984. Geomorfología de la provincia de Río Negro. Noveno Congreso Geológico Argentino. San Carlos de Bariloche, (con mapa escala 1:1.000.000), 159pp., Buenos Aires.

González Díaz, E.F. 2004 La Extensa zona de deslizamiento de la escarpa oriental de la Pampa de Salamanca, Chubut, entre los 45° Sur y los 45° 45' Sur. Revista de la Asociación Geológica Argentina, 59(4:743-762).

Haller, M., Monti, A. y Meister, C. 2001. Hoja Geológica 4363-I. Península Valdés. Servicio Geológico Mineiro Argentino. Boletín Nro 266. Buenos Aires.

Hernández, M.A. (2005) Mecanismos de recarga de acuíferos en regiones áridas (Síntesis). Actas II Seminario Hispano Latinoamericano sobre Temas Actuales de la Hidrología Subterránea, pp:249-254. ISBN950-665-349-6. Río Cuarto.

Kostadinoff, J. 1992. Estudio geofísico de la Península de Valdés y los golfos nordpatagónicos. Revista de la Asociación Geológica Argentina, 47(2:229-236).

Manzano, M. (2005). Hidrología de los humedales dependientes del agua subterránea e implicaciones ecológicas. Actas II Seminario Hispano Latinoamericano

sobre temas actuales de hidrología subterránea, pp: 269-290 ISBN950-665-349-6. Río Cuarto.

Roveretto, G., 1921. Studi di geomorfología argentina. V: La Penisola Valdés. Vol. Soc. Geol. Italiana, 30: 1-47. Roma.

Súnico, A. 1996. Geología del cuaternario y ciencia del suelo: relaciones geomórficas-estratigráficas con suelos y paleosuelos Tesis Doctoral. Universidad Nacional de Buenos Aires.

Thornthwaite C.W. & Mather J.R. 1957) - Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and water balance. Centerton, pp. 312.



# RELACIÓN AGUAS SUBTERRÁNEAS-AGUAS SUPERFICIALES EN PATAGONIA EXTRANDINA. REPÚBLICA ARGENTINA

María del Pilar Alvarez <sup>(1)</sup>; Lisandro Hernández <sup>(2)</sup>; Mario Hernández <sup>(1)(2)</sup> y Nilda González <sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup> CONICET <sup>(2)</sup> Universidad Nacional de La Plata

Cátedra de Hidrogeología-CISAUA. Calle 3 No 584 (1900) La Plata. Argentina Tel. 54 221 4229923

Email: alvarez@cenpat.edu.ar

**Resumen:** Con una extensión de 700.000 km<sup>2</sup>, la Patagonia Extrandina continental en Argentina está caracterizada por un clima semiárido a árido, con una media pluviométrica en general inferior a 200 mm/año y déficit hídrico del orden de 500 a 700 mm/año. Constituye la sombra orográfica del obstáculo impuesto por la Cordillera de los Andes a los vientos contralisios, procedentes del Pacífico Sur.

Una serie de importantes ríos en su mayor parte perennes (Negro, Colorado, Chubut, Deseado, Santa Cruz, Gallegos, Coyle) surcan la comarca, desde sus nacientes cordilleranas hasta desembocar en el Océano Atlántico, con módulos que van de 972 m<sup>3</sup>/seg a 5,88 m<sup>3</sup>/seg.

Se analiza en el trabajo la relación que guardan con el régimen subterráneo, utilizando diversos elementos de juicio procedentes de las características físicas propias de las cuencas, el condicionante climático, las variaciones de caudal a lo largo de los ríos y las evidencias aportadas por redes de flujo subterráneo elaboradas para varios tramos de los cursos.

Se trata en todos los casos de ríos perdedores o influentes, particularidad de comportamiento hidrológico muy importante tanto desde el punto de vista geohidrológico como ambiental. Diversos casos ejemplo son presentados para ilustrar dicho comportamiento y sus implicancias en la región.

**Palabras-claves:** Patagonia extrandina – Argentina – Aguas superficiales/ subterráneas.

**Abstract:** The Extra-Andean Patagonia covers 700,000 km<sup>2</sup> in Argentina. Its climate is semiarid-arid, with a mean annual rainfall of 200 mm/year and a water deficit of 500 to 700 mm/year. It is the orographic shadow of Andes Cordillera, which obstructs the counter-trade winds from the South Pacific Ocean.

The region is crossed by several important rivers, (Negro, Colorado, Chubut, Deseado, Santa Cruz, Gallegos, Coyle). These rivers, most of them perennial, originate in the Cordillera and empty into the Atlantic Ocean and their discharges range from 972 to 5,88 m<sup>3</sup>/second.

The relation of the rivers with the groundwater regime is analyzed, using various criteria such as physical characteristics of the watershed, climate, discharge variations along the rivers and evidences provided by groundwater flow networks designed in several sections of the rivers.

They are all inflow rivers, an important hydrological characteristic from the geohydrological and environmental viewpoints Several examples illustrating such behavior and its regional implications are presented.

**Key Words:** Extra-Andean Patagonia – Argentina - Groundwater-Surface water relations.

## INTRODUCCIÓN

El extenso territorio correspondiente a la región natural Patagonia Extrandina en la República Argentina (aproximadamente 700.000 km<sup>2</sup>) está signado por condiciones de aridez que lo diferencian netamente de la aldea Cordillera de los Andes, con un pronunciado déficit hídrico.

La disponibilidad de agua para diferentes usos (ganadero, agrícola, minero, doméstico) está dada por localizados y reducidos sistemas acuíferos portadores de aguas aptas para tales fines en un marco regional de aguas salobres/salinas, carácter impuesto por el clima, y principalmente por el caudal de importantes ríos de nacientes andinas desde los 35° a los 52° de Latitud S, que atraviesan la región para descargar en su mayoría en el Océano Atlántico (Figura 1).

Ambos recursos son utilizados para atender los usos mencionados. El superficial implica caudales importantes y buena calidad fisicoquímica, pero tiene la limitación de la geometría lineal de su disponibilidad, pese a la construcción de canales y/o acueductos para riego, abastecimiento humano, minería metalífera y de hidrocarburos. El subterráneo, relativamente reducido en volumen en lo que respecta a aguas de baja salinidad, posee en cambio la ventaja geométrica de su mayor difusión areal.

Estas características y los problemas ambientales derivados del desarrollo, hicieron necesario establecer fehacientemente la relación entre los cursos de agua y el régimen subterráneo, ya que fueron suscitándose problemas por supuestas transferencias de contaminantes desde el sistema acuífero subterráneo a los álveos (producto de la explotación petrolífera, minera

o uso de agroquímicos), cuando la lógica geohidrológica indicaba que los ríos tendrían un comportamiento perdedor o influente.

Se llega así a plantear y tratar de establecer esta interrelación desde diferentes elementos de juicio, que van desde los hidrometeorológicos a los geomorfológicos, hidrológicos y geohidrológicos, cada uno de ellos tomado con diferente escala de definición, desde la suprarregional a la local.

## MARCO HIDROCLIMÁTICO

Dos características gravitan fundamentalmente en el tipo climático imperante en la región: la latitud en cuanto a la temperatura, y la presencia de la Cordillera de los Andes influyendo sobre el régimen pluvial.

Los vientos contralisios procedentes del Pacífico al llegar a la cordillera ascienden, enfriándose adiabáticamente, y originando copiosas lluvias al poniente mientras que el territorio extrandino argentino conforma una verdadera “sombra orográfica” de características desérticas. Una excepción lo constituyen los sectores más bajos, generalmente lagos andinos, por donde los vientos penetran con humedad desplazando hacia el Este la isohieta de 300 mm y facilitando la incursión del biotopo de la selva valdiviana.

Mientras que en las cumbres cordilleranas las precipitaciones pueden alcanzar los 3000 mm/año, en la región extrandina se ubican entre 150 y 300 mm/año, con un ligero incremento en sectores de la costa atlántica y en el extremo austral, por neta influencia oceánica (Figura 1).

Muy importantes son las precipitaciones nivales, en cordillera-precordillera y en las mesetas centra-

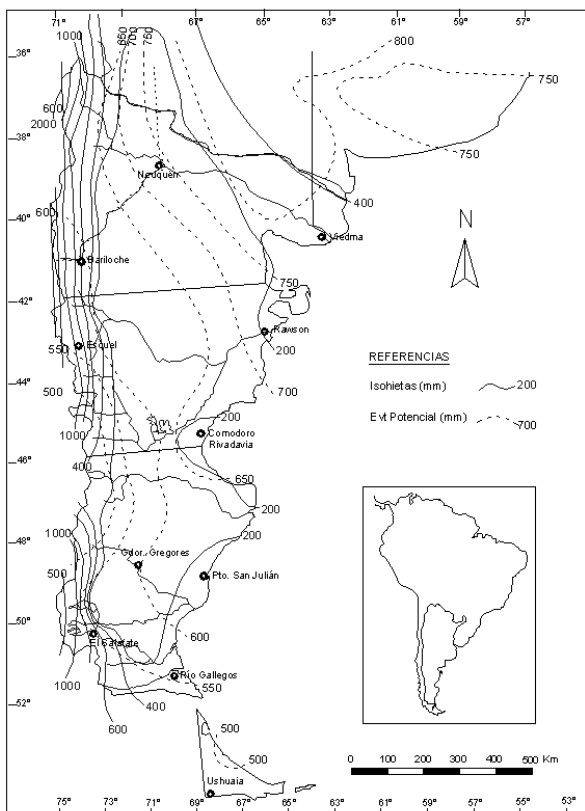


Figura 1 (Ubicación y curvas isohietas- isoevtp)

les, por su influencia en el régimen hidrológico y aún en la hidrogeología.

Del cotejo entre las precipitaciones medias anuales y el monto promedio de la evapotranspiración potencial media anual (600 a 900 mm/año) surgen déficit hídricos que superan los 500-600 mm/año. Pese a ello, existen mecanismos que posibilitan la recarga del sistema acuífero (recarga diferida, reducción de pérdidas consuntivas, concentración rápida) uno de los cuales es precisamente el aporte de las aguas superficiales (Hernández, 2005).

El tipo climático es frío húmedo en la zona andina, pasando a templado y templado frío hacia el Este, desde subhúmedo en las vecindades andinas a arido-semiárido en la mayor parte del territorio.

Las temperaturas medias anuales van desde 12°C a 15°C en la mitad septentrional y desde 6°C a 11°C en el Sur y Oeste, siendo habituales mínimas invernales inferiores a los 0°C.

## HIDROGRAFIA GENERAL

En la Figura 1 se muestra la localización de los ríos patagónicos de nacientes andinas objeto de esta contribución. Desde el Norte al Sur, el más septentrional que marca el ingreso a la región patagónica es el río Colorado, originado por la confluencia de los ríos Grande y Barrancas además de otros tributarios menores, desembocando en el océano al Sur de la ciudad de Bahía Blanca.

El siguiente álveo es el río Negro, producto de la confluencia de dos cursos cordilleranos: el Neuquén

procedente desde el Noroeste (altas cumbres andinas) y el Limay desde el Suroeste (Lago Nahuel Huapi).

El río Chubut recoge el tributo de una amplia zona generadora extendida entre las latitudes de 41° 30' y 44° y más al Sur el río Senguerr no consigue actualmente llegar al mar, al truncarse su vinculación pretérita con el río Chubut por medio del río Chico. Los otros ríos señalados en la Figura 1 son el Deseado, Santa Cruz, Coyle (Coig) y Gallegos.

Existen otros cursos transitorios como el río Chico (entre el río Deseado y el Santa Cruz) y el río Seco, entre el Deseado y el Chico, único patagónico de nacientes extrandinas.

Los módulos anuales medios para los ríos principales son: Colorado 148 m<sup>3</sup>/seg, Negro, 858 m<sup>3</sup>/seg, Chubut 48 m<sup>3</sup>/seg, Senguerr 48.6 m<sup>3</sup>/seg, Santa Cruz 790 m<sup>3</sup>/seg, Coyle 5 m<sup>3</sup>/seg y Gallegos 34 m<sup>3</sup>/seg, con una descarga media totalizada del orden de 1950 m<sup>3</sup>/seg.

Esta red hidrográfica surca, como más arriba se menciona, un territorio de características desérticas con un marcado déficit hídrico, una de las circunstancias que explica el comportamiento de los cursos respecto a las aguas subterráneas que se describe en el siguiente capítulo.

## RELACIÓN AGUAS SUPERFICIALES-AGUAS SUBTERRÁNEAS

Las posibles relaciones entre el régimen superficial y subterráneo está clásicamente formulada en cuatro posibles comportamientos: cursos ganadores (efluentes, reciben caudal básico de las aguas subterráneas), cursos perdedores (influentes, aportan una parte de su caudal al dominio subterráneo), cursos indiferentes (no guardan relación aparente con los acuíferos) o cursos efluente-influentes (de margen a margen o en el trayecto aguas arriba-aguas abajo) incluyendo en este último a la estacionalidad que provoca el almacenaje de banco o ribera (Custodio y Llamas, 1983; Chow et al, 2000).

Para establecer en el caso de la Patagonia Extrandina la relación entre los grandes ríos y el sistema acuífero se recurre a elementos de juicio que, desde una visión general a la particular, comprenden las características fisiográficas e hidrológicas de las cuencas, la variación de los caudales fluviales y la interpretación de mapas equipotenciales en sitios representativos.

### Características fisiográficas e hidrológicas

Para un observador situado en la Patagonia Extrandina, los cursos fluviales que la atraviesan son netamente alóctonos, de nacientes montañas, régimen nival o pluvio-nival y mayoritariamente exorreicos y perennes.

La conjunción de estos atributos está desde ya anticipando su posible comportamiento, ya que el carácter alóctono con una fuente de alimentación nival permanente (pluvio-nival para los ríos Colorado y Senguerr), su transcurso por un paisaje donde la superficie potenciométrica del medio acuífero yace profundamente en razón del elevado déficit hídrico y el régimen perenne que poseen (excepto el río Deseado), dan la pauta

Cuadro 1. Datos fluviométricos (tomado de <http://hidricos.obraspublicas.gov.ar>)

Nro.	Río	Estación	Período	Q medio (m <sup>3</sup> /s)
1	Barrancas	Barrancas	1960 - 2000	34,67
2	Colorado	Ruta Ranquil	1939 - 2000	145,6
3	Neuquén	Varvaco	1981 - 2000	86,46
4	Neuquén	Andacollo	1971 - 2000	107,8
5	Neuquén	Rahuenco	1984 - 2000	177,5
6	Agrio	Bajada del Agrio	1953 - 2000	72,05
7	Neuquén	Paso de los Indios	1903 - 2000	308,1
8	Neuquén	Dique Ballester	1990 - 2000	214,6
9	Colorado	Pichi Mahuida	1918 - 2002	130,2
10	Negro	Paso Córdoba	1922 - 2000	972,2
11	Negro	Primera Angostura	1927 - 2000	845,8
12	Alto Chubut	Nacimiento	1967 - 2000	7,28
13	Chubut	El Maitén	1943 - 2000	19,65
14	Chubut	Gualjaina	1990 - 2000	30,12
15	Chubut	Los Altares	1943 - 2000	46,4
16	Chubut	Ameghino	1992 - 2000	41,01
17	Chubut	Valle Inferior	1992 - 2000	36,2
18	Senguer	Nacimiento	1949 - 2000	33,97
19	Senguer	Los Molinos	1986 - 2000	48,62
20	Senguer	Puente Camino Buen Pasto	1945 - 2000	23,01
21	Gallegos	Puente Blanco	1993 - 2000	34,19
22	Santa Cruz	Charles Führ	1955 - 2000	698
23	La Leona	La Leona	1955 - 2000	249,5

de que no resulta posible la existencia de un caudal básico.

El aporte desde los cursos hacia el medio subterráneo se vería facilitado por el pasaje de una morfología montana a otra más llana y por el predominio de materiales geológicos permeables (Lapido y Ferreira, 1999; Panza, 2002).

### Caudales fluviales

En el Cuadro 1 se sintetizan los datos fluviométricos aportados por las estaciones de aforo existentes, en realidad bastante escasas para cursos de tanta importancia, indicándose el record y la ubicación, mostrada a su vez en la Figura 2.

Se presentan todas las estaciones activas, resaltándose aquellas que por su posición habrán de ser utilizadas en el análisis de la relación con las aguas subterráneas. Para un mismo curso, se van a relacionar aquellas situadas en tramos donde no existan aportes de tributarios en el trayecto. Para el caso de records de diferente longitud se utilizaron estaciones con valores que no mostraban mayor diferencia para intervalos comunes, descartándose las demás. De esta manera, solo se recurre a algunas de las consignadas en el Cuadro 1.

Los datos más ilustrativos proceden, para el río Colorado, de las estaciones Buta Ranquil y Pichi Mahuida separadas unos 529 km, con un valor en la primera de 145,60 m<sup>3</sup>/seg y en la segunda (aguas abajo) de 130,20 m<sup>3</sup>/seg.

La diferencia atribuible a pérdida desde el río sería del orden de 15,30 m<sup>3</sup>/seg, el 10.5 % del caudal en la primera.

Para el río Negro, el módulo en la estación Paso Córdoba es de 972,20 m<sup>3</sup>/seg y en Primera Angostura (378 km aguas abajo) de 845,80 m<sup>3</sup>/seg, con una merma de 126.4 m<sup>3</sup>/seg (el 13%).

En el caso del río Chubut, las estaciones extremas en un tramo lineal (Los Altares y Valle Inferior-La Angostura) registran módulos de 46.2 m<sup>3</sup>/seg y 36.2 m<sup>3</sup>/seg, mediando entre ambas 218 km. La diferencia (10 m<sup>3</sup>/seg) representa el 21.6 % del módulo mayor. Si se utilizan dos segmentos intermedios con la estación Florentino Ameghino, los valores son similares pese a existir un embalse en esta última posición.

Finalmente, para el río Senguer se midieron 48.65 m<sup>3</sup>/seg en Los Molinos y 23.01 m<sup>3</sup>/seg en el Puente Camino a B. Pasto (distancia 84 km). La diferencia es de 25.6 m<sup>3</sup>/seg (el 52.6 %).

Con las limitaciones emergentes de la diferente longitud del período de medición, puede observarse en general una disminución de caudal en sentido del escurrimiento fluvial, aportando un indicio acerca de la posible pérdida desde el álveo en beneficio del régimen subterráneo.

Puede notarse que las diferencias entre los valores modulares de estaciones contiguas están por encima del 10%, estimativo utilizado para poder validar una pérdida ante los errores de los métodos de medición, aportes o sustracciones encubiertos y disparidad temporal de los registros.

Es necesario aclarar que los criterios hidroquímicos, que suelen resultar de mucha utilidad cuando los álveos son ganadores, no son para este caso diagnósticos ya que además, los importantes caudales y la muy

baja salinidad del agua fluvial no permitirían distinguir aportes de caudal básico, si el comportamiento fuese en sentido contrario. (Lerner et al, 1990).

### Mapas equipotenciales

El argumento de mayor peso valorativo para atribuir el carácter de los cursos fluviales respecto al dominio subterráneo emerge de la confección de mapas equipotenciales, para observar la actitud de las curvas (isofreáticas en este caso) y los filetes de flujo respecto a aquellos.

En la Figura 3 se indica la localización de los sectores donde se realizaron estudios hidrogeológicos, que resultaron en un producto de cartografía equipotencial. Fueron llevados a cabo en distintas épocas por la Cátedra de Hidrogeología UNLP, Cátedra de Hidrogeología UNS, CFI, ex-Empresa Agua y Energía y Empresa Hidroar SA e involucran a los ríos Colorado, Neuquén, Limay, Negro, Chubut, Senguerr, Desead, Santa Cruz, Coyle y Gallegos.

La distribución de los sitios donde se cuenta con mapas hidrodinámicos es bastante representativa, considerando el déficit de información que caracteriza a la región extrandina de Patagonia.

Se trata en todos los casos analizados de un comportamiento claramente perdedor de los ríos, denotado por una morfología freática radial con filetes de flujo divergentes y gradientes de distinta expresión, decrecientes hacia el Este.

Un detalle de algunos de los sectores tomados como ejemplo es presentado en la Figura 4 (a-d), donde

se reproducen los mapas equipotenciales correspondientes al río Colorado occidental (Valle de Catriel - Veinticinco de Mayo) y terminal (CORFO Río Colorado), valle inferior del río Chubut y río Senguerr (Codo del Senguerr - Los Monos). El espacio disponible para esta contribución no permite reproducir a todos ellos.

En el primero se puede advertir la influencia del curso sobre el acuífero freático, aún cuando el valle se halla enmarcado por terrazas fluviales relativamente elevadas por sobre su piso (González Díaz y Malagnino, 1984). En ciertos sectores, existe además de la influencia del río una descarga desde los niveles de terraza hacia la planicie aluvial, con un escurrimiento sub-alveo curso abajo como ocurre mucho más al Sur en el caso del río Coyle (Fasano et al, 2003).

Sobre la comarca terminal del río Colorado incluyendo su desembocadura en el mar, con un gradiente mucho más bajo pero idéntica morfología radial, el acuífero se manifiesta también como efluente e inclusive los canales construidos para riego en el sistema CORFO Río Colorado (Figura 4b) poseen este carácter (Albouy et al, 1997). Algunos pobladores han construido perforaciones someras próximas al río y canales, para poder abastecerse de agua dulce para consumo y abevamiento de ganado, dado el predominio regional de aguas salobres.

Otro ejemplo corresponde al valle inferior del río Chubut, incluyendo también su salida al océano (Hernández et al, 1983). Este valle es morfológicamente del tipo "Yazoo" con su piso más alto que el relieve circundante y reconoce una regulación por medio del

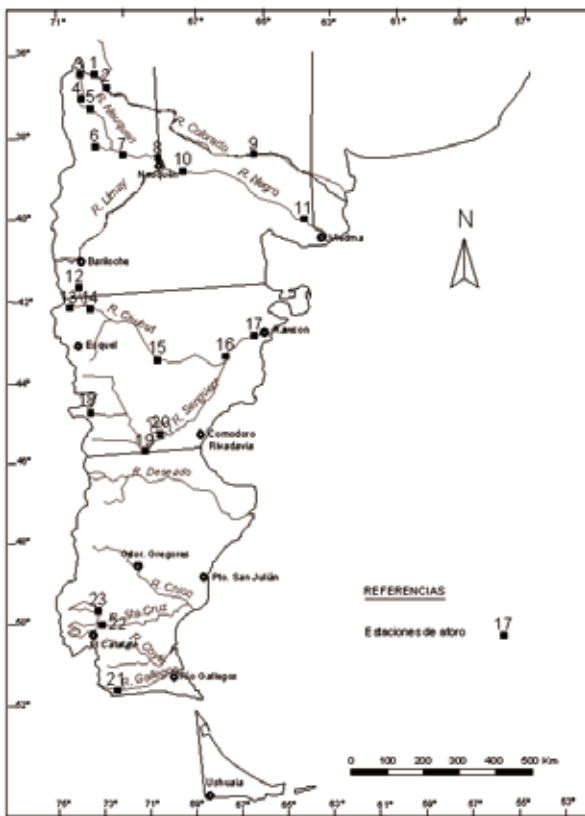


Figura 2 (Ubicación estaciones de aforo)

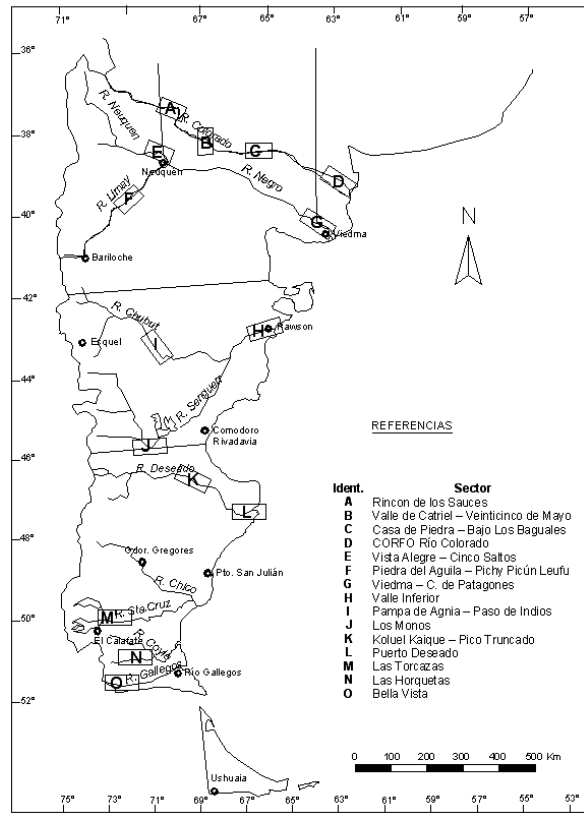


Figura 3 (Ubicación sectores con mapas equipotenciales)



como impacto ambiental negativo sobre las aguas fluviales, por medio del supuesto aporte de los acuíferos con contaminación por hidrocarburos o aguas salinas (aguas de formación o de purga), especialmente sobre los ríos Colorado, Neuquén, Senguerr y Coyle.

Recién cuando fueron concretándose los estudios hidrogeológicos en comarcas petrolíferas a imperio de la nueva legislación de los años '90, se reconoció la inexistencia de tal posibilidad porque los cursos lejos de recibir el tributo subterráneo, actuaban como emisores e incluso facilitaban la dilución de las altas concentraciones salinas en la porción marginal de los acuíferos.

Otro tanto sucede con el impacto del empleo de productos agroquímicos en zonas bajo riego de las provincias de Neuquén, Río Negro y Chubut sobre el régimen subterráneo y la posibilidad de su traslado aguas abajo a través del escurrimiento fluvial.

Inclusive a nivel legislativo no es recogida adecuadamente la posibilidad de transferencia de solutos contaminantes desde los álveos al régimen subterráneo, a la luz de la normativa vigente en el orden nacional y provincial.

De allí la importancia de rescatar a la investigación geohidrológica como valioso auxiliar para dilucidar los mecanismos de relación hidrológica entre el régimen superficial y el subterráneo y su correlato con la componente hidroquímica y fundamentalmente ambiental.

## CONCLUSIONES

Las características geomorfológicas e hidrológicas de las cuencas fluviales de los ríos que disecan una región desértica con importante déficit hídrico, ofrecen una pauta general de su comportamiento perdedor con respecto al régimen subterráneo.

El cotejo de los registros de caudales a lo largo de tramos de los cursos sin aporte de tributarios, muestra una merma importante atribuible a pérdidas hacia el sistema acuífero.

La mejor demostración de la actitud influente del arco terrestre superficial del ciclo hidrológico sobre el subterráneo, proviene de estudios hidrogeológicos. El producto hidrodinámico demuestra clara y fehacientemente esta relación, mediante una morfología freática radial con filetes de flujo divergentes de los cursos, generalmente con una relación de aporte directa.

La importancia de estos resultados atañen significativamente al planeamiento físico y ordenamiento territorial, a las ingenierías civil e hidráulica, al manejo de sistemas de riego soportados en aguas fluviales y esencialmente, a dilucidar mecanismos de contaminación que pudiesen afectar a uno u otro dominio hidrológico.

## REFERENCIAS

- Albouy, R., G. Bonorino, N. González y J. Carrica (1997). Caracterización hidrogeológica regional del Partido de Patagones, Provincia de Buenos Aires". I Congreso Nacional de Hidrogeología. IAH-UNS. Actas, pp. 37-52. Bahía Blanca.
- Custodio, E. y Llamas Madurga, M. R. (1983). Hidrología Subterránea. Omega (2ª. Ed.). Barcelona.
- Chow, V.T, D. R. Maidment y L. W. Mays (2000) Hidrología aplicada. McGraw Hill. Santa Fe de Bogota.
- Fasano, J., M. A. Hernández, P. Molina, J. H. Ceci y C. F. Scatizza (2003) Diagnóstico geohidrológico de efectos originados por un derrame de petróleo. Paraje Las Horquetas (Santa Cruz). Metodología. Memorias 5as Jorn. de Preservación de Agua, Aire y Suelo. IAPG. Mendoza.
- González Díaz, E. F. y E. Malagnino (1984) Geomorfología, en Relatorio del IX Congr. Geol. Argentino I (13):347-364. Buenos Aires.
- Hernández, M.A. (2005) Mecanismos de recarga de acuíferos en regiones áridas (Síntesis). Actas II Seminario Hispano Latinoamericano sobre Temas Actuales de la Hidrología Subterránea, pp:249-254. ISBN950-665-349-6. Río Cuarto.
- Hernández, M. A., F. Fidalgo y V. A. Ruiz de Galarreta (1983) Diagnóstico geohidrológico aplicada en el Valle Inferior del Río Chubut". Rev. Ciencia del Suelo Vol. I,2:83-91. Buenos Aires.
- Lapido, O. y F. X. Pereyra (1999) Cuaternario de la Patagonia extraandina. En Geología Argentina, SEGEMAR Anales No 29, 23:704-709. Buenos Aires.
- Lerner, D. N., A. S. Issar y I. Simmers (1990). Groundwater recharge. IAH, 8. Verlag Heinz Heise Ed. Hannover.
- Panza, J. L. (2002) La cubierta detrítica del Cenozoico superior. En Geología y Rec. Naturales de S. Cruz. Relatorio XV Congr. Geol. Argentino (M.J.Haller Ed), pp. 259-284. Buenos Aires ISBN 987-20190-0-2.

# EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA IMPORTACIÓN DE AGUA SUPERFICIAL EN UN SISTEMA ACUÍFERO EN EXPLOTACION

Ofelia TUJCHNEIDER (1,2); Marcela PEREZ (1); Mónica D'ELÍA (1) y Marta PARIS (1)

(1) (2) Grupo de Investigaciones Geohidrológicas. Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas. Universidad Nacional del Litoral. Casilla de Correos 217. (3000) Santa Fe. Argentina.

TEL: +54 342 4575245, interno 150. E-mail: pichy@fich.unl.edu.ar

(3) Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas. Argentina.

**Resumen:** La ciudad de Santo Tomé, Provincia de Santa Fe, República Argentina, tiene una población cercana a los 60.000 habitantes, y su fuente de abastecimiento de agua potable la constituye el sistema hídrico subterráneo multicapa que la subyace. Los pozos de bombeo se encuentran ubicados dentro del ejido urbano y explotan un acuífero semiconfinado, en general con aguas de buena calidad, aunque con altos contenidos de hierro y manganeso. Los volúmenes extraídos son cada vez mayores como consecuencia de la demanda creciente y alcanzaron en el año 2004 casi 4 millones de metros cúbicos.

Si bien hasta el presente la disminución del nivel de agua en el acuífero en explotación no es significativa, sí lo son los cambios puntuales operados en la calidad del agua. El aumento sostenido de residuo seco, cloruros y sulfatos en numerosas obras de captación, evidencia una situación progresiva de deterioro de la calidad del recurso. Esto es el resultado de la falta de un modelo de gestión adecuado para la explotación del sistema que no ha tenido en cuenta las peculiaridades de sus condiciones hidrológicas y comportamiento hidrodinámico.

El acuífero en explotación está constituido por arenas medianas con intercalaciones de arena fina, con nódulos de material calcáreo, de edad Plioceno- Pleistoceno. Por debajo de este acuífero se encuentra una capa alojada -a presión- en sedimentos de origen marino conteniendo agua de elevada salinidad.

Resulta evidente que la ruptura del equilibrio hidrodinámico es lo que ha dado lugar al ascenso de agua salada infrayacente dentro del nivel de agua dulce utilizado para el abastecimiento. A esto debe sumarse la falta de mantenimiento y control de las perforaciones, como así también su cantidad y distribución espacial.

Ante esta situación, las autoridades municipales de la ciudad han decidido evaluar la posibilidad de reemplazar la actual fuente de provisión por un sistema de captación de agua superficial.

El presente trabajo muestra los resultados de los estudios hidrogeológicos llevados a cabo con el objeto de evaluar la afectación que produciría el cese del bombeo debido a la importación de agua, sobre los niveles piezométricos del sistema acuífero del área considerada. Para ello, se definió el modelo conceptual de funcionamiento y se implementó el modelo de flujo subterráneo tridimensional como herramienta matemática para la simulación y pronóstico de comportamiento futuro. El resultado de la simulación numérica indica que se produciría un paulatino incremento de los niveles de agua subterránea hasta anegar la superficie del terreno, transcurridos 5 años a partir del cese del bombeo. Para mitigar esta situación se han definido estrategias de gestión conjunta de los recursos hídricos superficiales y subterráneos.

**Palabras-claves:** hidrogeología urbana, aguas subterráneas, gestión conjunta

**Abstract:** Santo Tomé city (Santa Fe province, Argentine Republic), with a population of approximately 60,000 inhabitants, is supplied by a multi-layered groundwater system underlying the area. The pumping wells are located in the urban area and they exploit a semiconfined aquifer, which lodges good quality water, although with high iron (Fe) and manganese (Mn) contents. As a consequence of the increasing demand, the aquifer system is more and more exploited. In 2004 the production of the pumping wells reached almost 4 millions of cubic meters.

Even though, up to the moment, the drop of the water level in the exploited aquifer is not significant. However, the specific changes produced in the groundwater quality are important. The sustained increasing of Total Dissolved Solids (TDS), Chloride (Cl) and Sulphate (SO<sub>4</sub>)

in many pumping wells, shows a progressive deterioration of the groundwater quality. This is a consequence of the absence of an aquifer management model properly adapted for this system. The peculiarities of its hydrogeological features and hydrodynamic behaviour have not been considered in the exploitation schedule.

The exploited aquifer is comprised by Pliocene - Pleistocene medium grain sands, with inter-layered fine grain sands, and lime nodules, with good quality water. Underlying this aquifer, are marine sediments lodging water with high saline contents and artesian conditions.

It is evident that the break of the hydrodynamic equilibrium between both layers caused the upconing process which damages the supplying groundwater system. This process must be considered together with the lack of wells maintenance and operation controls, as well as the quantity and spatial distribution of the pumping wells.

To cope with this situation, the local authorities have decided to evaluate the possibility of replacing the current groundwater supply by a surface water supply.

This paper shows the results of the hydrogeological studies carried out in order to evaluate what would be the variations in the groundwater levels due to the surface water import and the pumping stop. A conceptual model was defined and a 3-D mathematical model was implemented. The mathematical model indicates a gradual increasing of the groundwater levels up to the land surface as a result of the water imported. The rise of the groundwater levels would happen five years after the stop of the pumping wells. In order to mitigate this situation jointly water resources management strategies (groundwater and surface water) have been defined.

perennial, originate in the Cordillera and empty into the Atlantic Ocean and their discharges range from 972 to 5,88 m<sup>3</sup>/second.

The relation of the rivers with the groundwater regime is analyzed, using various criteria such as physical characteristics of the watershed, climate, discharge variations along the rivers and evidences provided by groundwater flow networks designed in several sections of the rivers.

They are all inflow rivers, an important hydrological characteristic from the geohydrological and environmental viewpoints. Several examples illustrating such behavior and its regional implications are presented.

## INTRODUCCIÓN

La ciudad de Santo Tomé se encuentra ubicada a 30° 30' latitud S y 60° 56' longitud W, sobre la margen derecha del río Salado. Dista 5km de la vecina ciudad de Santa Fe, capital de la provincia homónima en la República Argentina, formando parte de su conurbano (Figura 1). Cuenta con una población cercana a los 60.000 habitantes, y su principal fuente de abastecimiento de agua potable la constituye el agua subterránea. Hasta la década del '60 la ciudad de Santo Tomé se abastecía exclusivamente de agua potable a través de perforaciones domiciliarias particulares.

Desde la década del '70 esta localidad cuenta con un servicio público de agua potable (actualmente a cargo del Municipio) mediante la explotación de un conjunto de perforaciones que abastecen a un tanque principal, constituyendo el sistema central y sistemas independientes que proveen a los barrios: Villa Adelina, General Paz, Loyola, Monseñor Zaspé y Villa Libertad. En la Figura 2 se muestra el área de servicio y la ubicación de las perforaciones de cada sistema.

Los volúmenes extraídos del sistema acuífero son cada vez mayores como consecuencia de la demanda creciente (incrementada en forma sostenida durante los



Figura 1. Ubicación del área de estudio.



Figura 2. Ubicación de los pozos de explotación.

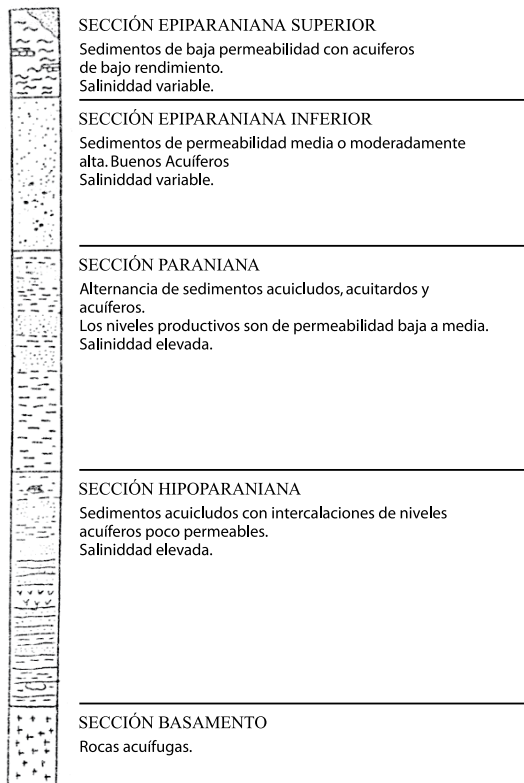


Figura 3. Esquema de la columna hidrogeológica regional en la Provincia de Santa Fe.  
Fuente: Filí y Tujchneider (1977)

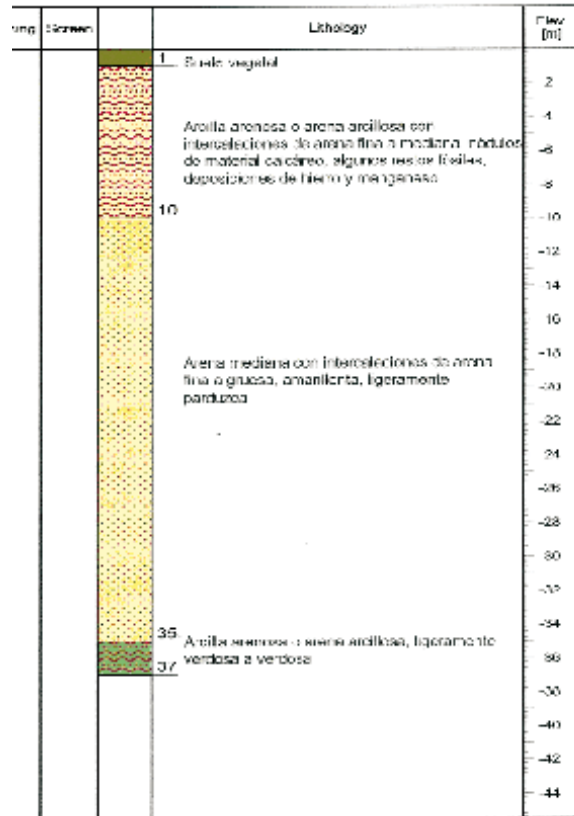


Figura 4. Perfil litológico característico del área de estudio

últimos veinte años) y que alcanzaron en el año 2004 casi 4 millones de metros cúbicos.

Si bien hasta el presente la disminución de nivel de agua en el acuífero productivo no es muy significativa, sí lo son los cambios operados en la calidad del agua. El aumento sostenido de los contenidos de residuo seco, cloruros y sulfatos en numerosas obras de captación, evidencia un deterioro progresivo de la calidad del recurso.

Ante esta situación, las autoridades municipales de la ciudad han decidido evaluar la posibilidad de reemplazar la actual fuente de provisión por un sistema de captación de agua superficial proveniente del Río Coronda, vecino al área.

El presente trabajo muestra los resultados de los estudios hidrogeológicos llevados a cabo durante el año 2005 con el objeto de evaluar la afectación que produciría la importación de agua superficial y el abandono progresivo de las fuentes de agua subterránea para el abastecimiento, con el consecuente cese del bombeo, sobre los niveles piezométricos del sistema acuífero del área considerada.

Para ello sobre la base de información existente, se definió el modelo conceptual de funcionamiento del sistema hídrico subterráneo y se implementó un modelo de flujo tridimensional como herramienta matemática para la simulación y pronóstico de comportamiento futuro.

Además se consideró la posibilidad de establecer estrategias de gestión conjunta de los recursos hídricos superficiales y subterráneos.

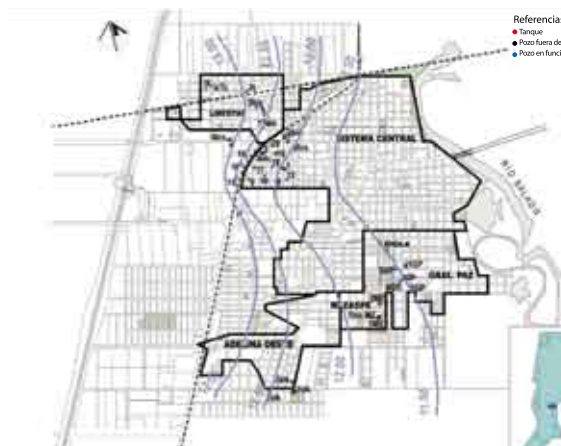


Figura 5. Piezometría correspondiente a mediciones de julio – agosto 2004

### CARACTERIZACION DEL ÁREA DE ESTUDIO

La ciudad de Santo Tomé, provincia de Santa Fe, República Argentina, tiene una superficie aproximada de 111 km<sup>2</sup>. Geográficamente se encuentra asentada en la margen derecha del Río Salado, contigua a la ciudad de Santa Fe, capital de la provincia homónima, formando parte de su conurbano.

El clima de la región es templado, con precipitaciones medias anuales del orden de los 1.000mm. Las precipitaciones medias mensuales presentan valores de entre 20 y 60mm para los meses de mayo a septiembre. Entre los meses de octubre y abril, se contabilizan valores superiores a 80mm, registrándose el máximo en el mes de marzo. La temperatura media anual presenta valores mínimos y máximos del orden de 12°C y 25°C, respectivamente. Los mayores valores medios mensuales se registran entre los meses de noviembre a marzo, superando los 20°C. Los valores mínimos se presentan en los meses de junio, julio y agosto, y oscilan entre los 10 y 15°C. La humedad relativa es del orden del 75%, los mayores valores de heliofanía relativa se presentan en los meses de primavera y verano, superando el 55%. Y los máximos valores de velocidad de viento se consignan de julio a noviembre (más de 12 km/h). La dirección predominante del viento corresponde a los cuadrantes S-E y N-E.

Sobre esta información meteorológica, la formulación de un balance hídrico seriado utilizando la metodología de Thornthwaite-Matter arrojó valores de excesos del orden de los 60 mm anuales.

Las características geohidrológicas regionales del subsuelo de la Provincia de Santa Fe fueron descritas por Filí y Tujchneider en 1977. El esquema de la columna hidrogeológica regional se presenta en la Figura 3. Localmente, la columna sedimentaria de interés hidrogeológico fue elaborada sobre la base de los perfiles litológicos de las perforaciones de explotación que integran el sistema de abastecimiento de agua potable de la ciudad (Figura 4). Otros antecedentes acerca del comportamiento de las aguas subterráneas en el área fueron elaborados por Bolzicco et al., en el año 1994.



Figura 6. Evolución temporal del residuo seco. Perforación 19 (Sistema Central)

### MODELO CONCEPTUAL DE FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA HÍDRICO SUBTERRÁNEO.

#### Hidrogeología

El sistema hídrico subterráneo está conformado por: una capa acuífera libre, una semiconfinada (en explotación) y un nivel inferior igualmente acuífero con agua de alta salinidad. Por lo que este sistema tiene un comportamiento hidrodinámico multicapa.

La primera capa de aproximadamente entre 5 y 9 m de espesor, es de muy bajo rendimiento alojada en sedimentos pampeanos (Cuaternario) caracterizados regionalmente por fracciones variables de limos, arcillas y loess, principalmente de origen eólico.

La segunda capa acuífera, corresponde a las arenas "puelches" (Plioceno- Pleistoceno), se localiza entre los 10 y 40m de profundidad. Esta formación de origen fluvial está constituida predominantemente por arenas de grano fino a mediano. Posee agua de buena calidad (aunque con altos contenidos de hierro y manganeso) y constituye la fuente actual de abastecimiento de agua potable a la ciudad de Santo Tomé.

Inferiormente (a partir de los 40m de profundidad) existe una tercera capa acuífera alojada -a presión- en sedimentos de la Formación Paraná (Mioceno). Esta formación está compuesta predominantemente por arcillas verdes de origen marino sobre las que se apoyan arenas grises directamente vinculadas con las arenas de origen fluvial. Esta capa acuífera contiene agua de alta salinidad (superiores a 2500mg/l) elevada dureza y contenidos altos de sulfatos lo que la hace no apta para el consumo.

El nivel estático de la primera capa acuífera se ubica en promedio a los 5m bbp, aunque en períodos de excesos hídricos llega a 1 ó 2m bbp. Las profundidades del nivel estático correspondientes a la segunda capa se encuentran entre 3 y 6m bbp, según registros del período 1994-2004 (período de exceso hídrico).

A la fecha de realización del presente estudio la información antecedente referida a mediciones de nivel de agua en pozos y perforaciones indica que éstas no han sido realizadas de modo sistemático, por lo cual la calidad de la misma es deficiente. Sólo se constatan registros de profundidad de nivel piezométrico ocasionales en algunas de las obras de captación del sistema de abastecimiento.

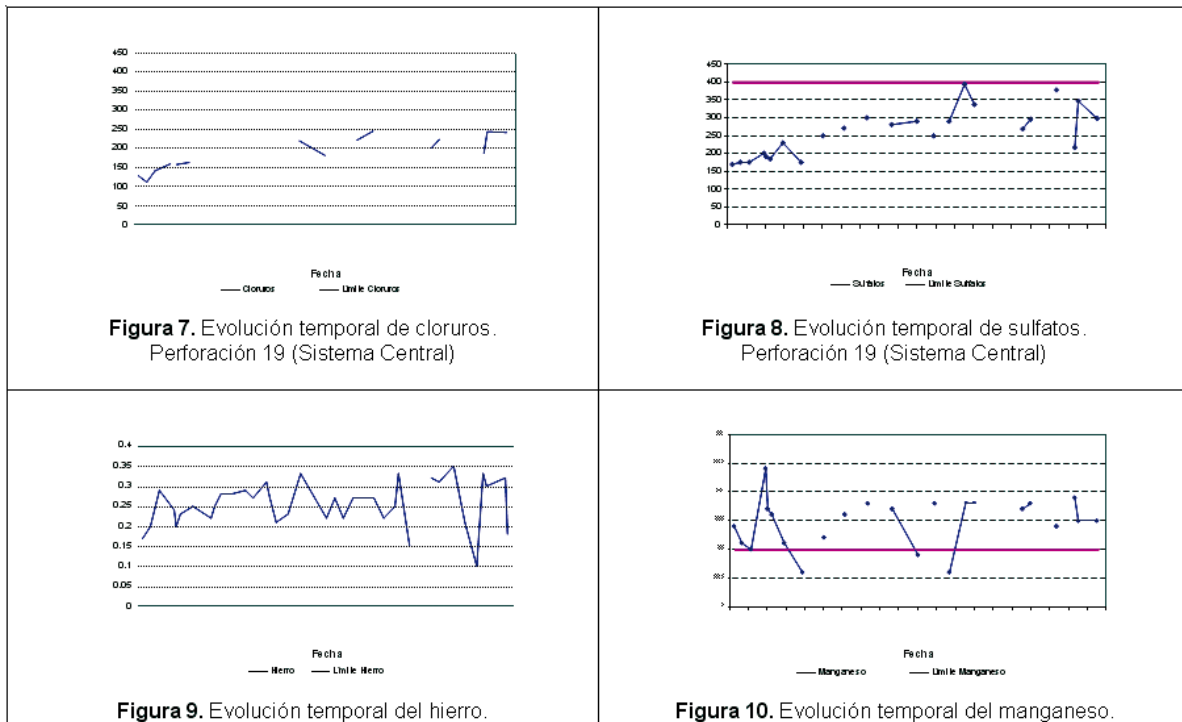


Figura 7. Evolución temporal de cloruros. Perforación 19 (Sistema Central)

Figura 8. Evolución temporal de sulfatos. Perforación 19 (Sistema Central)

Figura 9. Evolución temporal del hierro.

Figura 10. Evolución temporal del manganeso.

Con ello resulta dificultoso apreciar variaciones temporales previas.

La Figura 5 muestra la morfología de la superficie piezométrica elaborada sobre la base de información de campo, medida en perforaciones de abastecimiento (en servicio y fuera de servicio), para el período julio-agosto 2004. De acuerdo a ella, se distingue que la dirección general del escurrimiento del acuífero semiconfinado es de W a E. Regionalmente las áreas de recarga se ubicarían al oeste del área de estudio y el nivel de descarga natural lo constituiría en el este el río Salado.

### Hidrogeoquímica

Las características químicas del agua subterránea han sido evaluadas regularmente en tiempo y espacio en aquellas obras de captación que integran los distintos sistemas de abastecimiento de agua potable (central y por barrios) a cargo del municipio.

La Municipalidad de Santo Tomé realiza análisis químicos y bacteriológicos de las muestras de agua de los pozos de abastecimiento, en forma periódica, desde el año 2001. Con esta información se ha podido establecer la evolución temporal de las concentraciones iónicas de los distintos parámetros químicos que determinan la aptitud del agua para consumo humano. Si bien, en general se adecuan a lo exigido por la Ley Provincial 11.220, el análisis de la evolución de los contenidos iónicos en función del tiempo (1996-2004), permite observar:

1. aumento en los valores de residuo seco hasta concentraciones cercanas al límite obligatorio dado por la Ley (1500 mg/l), Figura 6.
2. incremento progresivo en las concentraciones tanto

de cloruros como de sulfatos, que contabilizan aumentos superiores al 100% (Figuras 7 y 8).

3. presencia de hierro y manganeso muy por encima de los valores indicados por la normativa vigente (Figuras 9 y 10).

Se presenta a modo de ejemplo la evolución de los elementos indicados en el párrafo precedente de uno de los pozos de abastecimiento del Sistema Central.

### MODELO MATEMÁTICO HIDROGEOLÓGICO

La modelación matemática hidrogeológica se llevó a cabo utilizando el software Visual Modflow v.2.7.1 (Guiguer y Franz, 1997), que contiene el modelo de flujo subterráneo tridimensional denominado MODFLOW (McDonald y Harbaugh, 1988).

El área modelada (de aproximadamente 20 km<sup>2</sup>) se discretizó en elementos cuadrangulares y/o rectangulares, en función de la ubicación de las perforaciones de explotación.

Se consideran las siguientes hipótesis para representar el funcionamiento del sistema acuífero:

1. constituido por tres capas
2. parámetros hidrogeológicos estimados en función de la litología de los sedimentos que componen cada una de las capas consideradas para la discretización vertical.
3. caudales de explotación y la cantidad de horas de funcionamiento se adoptaron en función de los registros existentes para los últimos 12 meses.

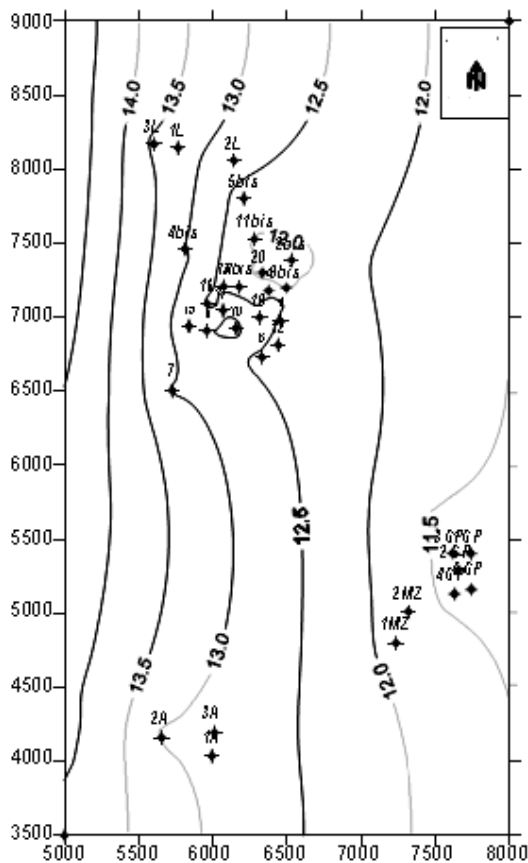


Figura 11. Niveles piezométricos simulados. Situación: Julio – Agosto de 2004.

4. condiciones de borde definidas en función del comportamiento local y regional del sistema acuífero.
5. condiciones iniciales de carga hidráulica que se reflejan en el mapa de isopiezas presentado en la Figura 5.
6. Además de las erogaciones ya mencionadas se consideraron otros flujos tales como: recarga natural, pérdida de las redes de conducción, saneamiento básico y otros usuarios.

Una vez calibrado el modelo matemático (Figura 11 y 12), y para el análisis de la evolución futura de los niveles piezométricos se tuvieron en cuenta las siguientes hipótesis:

1. las perforaciones seguirían en funcionamiento y con el actual régimen de explotación por 5 años más (tiempo estimado para la construcción de las obras requeridas para el reemplazo y puesta en funcionamiento de la nueva fuente de abastecimiento).
2. a partir del quinto año comenzaría paulatinamente a mermar la explotación del agua subterránea, hasta que a fines del décimo año el agua proveniente del sistema hidrogeológico dejaría de ser extraída para abastecimiento.
3. las condiciones hidrológicas se consideraron medias

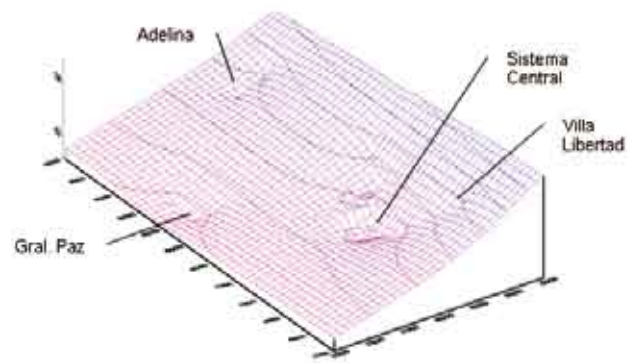


Figura 12. Vista 3-D de la superficie piezométrica simulada.

durante todo el periodo simulado.

4. las condiciones de borde no sufrirían cambios.

Con dichas hipótesis, los resultados obtenidos se muestran en las Figuras 13 a 15.

### CONSIDERACIONES FINALES Y RECOMENDACIONES

Si bien hasta el presente en función de la explotación que se realiza la disminución de nivel de agua en el acuífero productivo no es muy significativa, sí son los cambios hidroquímicos observados. El aumento sostenido de residuo seco, cloruros y sulfatos en numerosas obras de captación, evidencian una situación progresiva de deterioro de la calidad del recurso. Del mismo modo, en algunas de las perforaciones se han detectado valores de hierro y manganeso muy superiores a lo que indica la normativa vigente en el estado provincial, en relación con la calidad del agua para consumo humano. Además, estos elementos se depositan tanto en las cañerías de las obras de captación como en las de la red de distribución generando inconvenientes de obstrucción de conductos, turbidez del agua, etc.

Asimismo, teniendo en cuenta las condiciones hidrológicas del sistema, su comportamiento hidrodinámico y el equilibrio hidráulico entre las diferentes capas, se debe prestar especial atención a la capa acuífera infrayacente de agua de elevada salinidad alojada en las arenas grises de la Formación Paraná. La ruptura del equilibrio hidráulico por explotación inadecuada puede generar un ascenso del agua salada infrayacente con mayor presión dentro del nivel de agua dulce del acuífero semiconfinado utilizado para el abastecimiento. Este proceso denominado "upconing" sólo puede ser detectado tempranamente por cambios en los contenidos salinos del acuífero de agua dulce (Tujchneider et al., 2004). El análisis de la información temática antecedente ha permitido identificar este proceso en el Área Central evidenciado por un incremento en cloruros y sulfatos de más del 100% desde el momento en que los pozos involucrados se han puesto en operación. Además en esta área, los tenores de residuo seco,

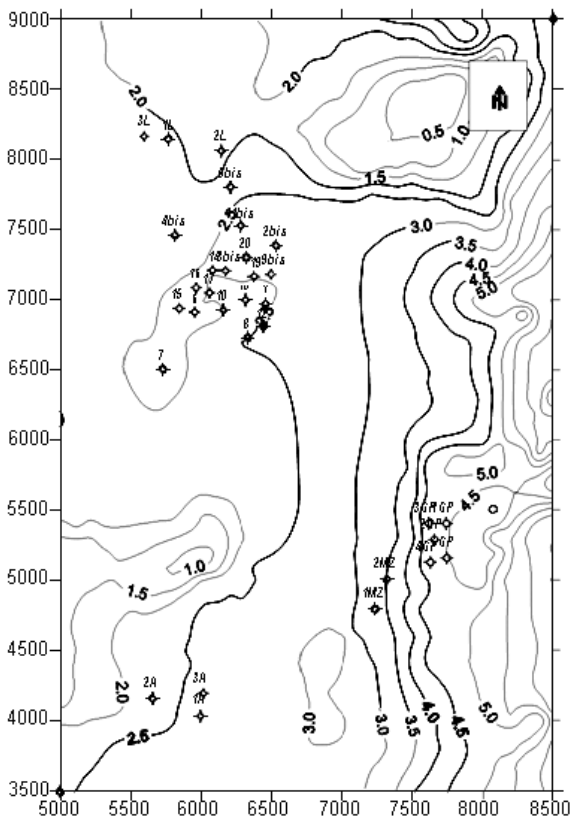


Figura 13. Profundidad del nivel de agua. Simulación año 1. Situación con bombeo.

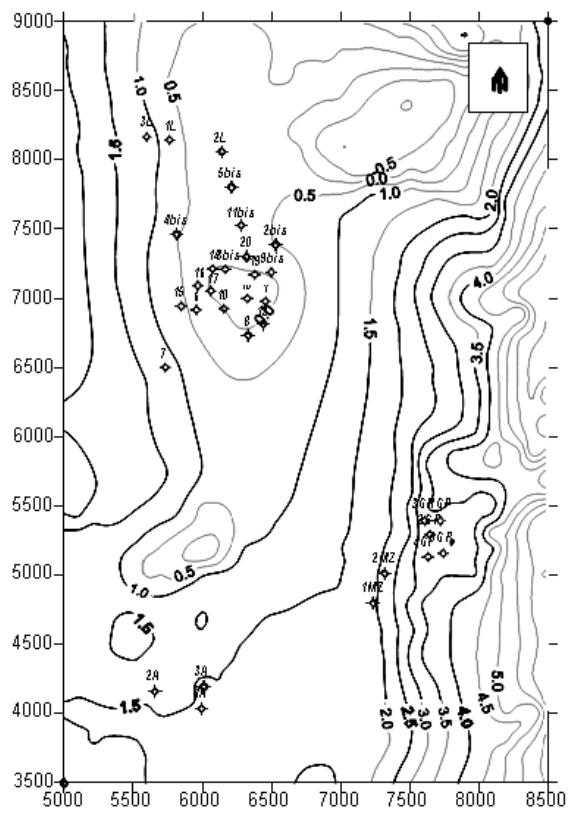
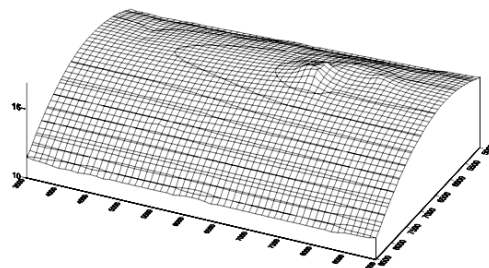
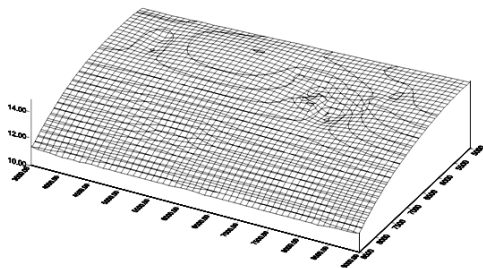


Figura 14. Profundidad del nivel de agua. Primer año del cese del bombeo.



hierro, cloruros y sulfatos del agua subterránea para el período estival 2003-2004, superan los límites recomendados por la normativa vigente, Ley Provincial 11220.

De esta manera, podría considerarse en forma preliminar que el aumento de cloruros y sulfatos y la disminución puntual de niveles en algunos de los pozos de explotación en relación con los volúmenes extraídos cada vez mayores, indican una situación de stress hídrico susceptible de empeorar ante mayores requerimientos volumétricos.

Por otra parte, ante la eventual importación de agua superficial y el cese del bombeo, el resultado de la simulación numérica indica que se produciría un paulatino incremento de los niveles de agua subterránea hasta anegar la superficie del terreno. Esto se materializaría paulatinamente, haciéndose evidente el ascenso del

nivel del agua subterránea por sobre el nivel del terreno a partir del quinto año del cese del bombeo tal como se presentó en las figuras 13 a 15.

Dada la importancia de los resultados obtenidos se advierte que será necesario elaborar un modelo de gestión conjunta de los recursos hídricos superficiales y subterráneos considerando la articulación entre la evolución de los niveles de agua subterránea y los volúmenes de agua a importar y la necesaria ampliación de la red cloacal. Para ello, se deberá realizar una utilización estrictamente programada, tanto del agua importada como del agua subterránea existente en el área -acorde a criterios hidrológicos ambientales- y un programa de monitoreo de la evolución del sistema hidrogeológico, a partir de un diseño de una red de mediciones freáticas y piezométricas acorde al problema descrito. Esto permitirá evitar situaciones no





## PROSPECCIÓN GEOELÉCTRICA CON FINES HIDROGEOLÓGICOS EN LA CUENCA SUR DEL PARTIDO DE GENERAL PUEYRREDÓN, PROVINCIA DE BUENOS AIRES, ARGENTINA.

Massone, Hector <sup>(1)</sup>; Martinez, Daniel <sup>(1,2)</sup>; Quiroz Londoño, Mauricio <sup>(1)</sup>; Ferrante, Angel <sup>(1)</sup>; Tomas, Monica <sup>(1)</sup>; Bernasconi, Virginia <sup>(1)</sup> y Marcelo Farenga <sup>(1)</sup>.

<sup>(1)</sup> Centro de Geología de Costas y del Cuaternario, UNMDP, CC 722 Correo Central, 7600 Mar del Plata, Argentina.

<sup>(2)</sup> Conicet

**Resumen:** La importante expansión que verifica la ciudad de Mar del Plata (Argentina) hace necesaria la búsqueda de nuevas áreas con posibilidades de explotación de acuíferos para el abastecimiento urbano. La Cuenca Sur del Partido de General Pueyrredon, ocupa 415 km<sup>2</sup> y en ella se ha llevado a cabo un estudio geoelectrico cuyo objetivo es mejorar el conocimiento hidrogeológico del área y seleccionar las zonas con mejores posibilidades de explotación. Se realizaron 164 sondeos eléctricos verticales (SEV) y 16 perforaciones de control litológico que permitieron definir, desde el punto de vista estructural, la presencia de un pilar y dos fosas tectónicas, denominados Pilar Batan-Peralta Ramos y Fosas del Barco y Chapadmalal. Se comprobó una buena correlación entre los SEV y la litología analizada en las perforaciones, lo que permitió determinar con seguridad la profundidad del basamento hidrogeológico (ortocuarcitas de la Formación Balcarce), del nivel freático y de los niveles arcillosos de mayor espesor. En base a la interpretación de los SEV se realizaron los mapas de profundidad del basamento, y de nivel freático; a partir de esta información se generaron modelos digitales de elevación (MDE) de ambas superficies y un mapa de espesor del acuífero. Por último se seleccionaron tres áreas que, en una escala regional, presentan las mejores posibilidades para ser explotadas.

**Palabras-claves:** hidrogeología, geoelectrica, Mar del Plata.

**Abstract:** The expansion presented by the city of Mar del Plata renders the search for new potential aquifer areas for urban supply necessary. The southern basin of General Pueyrredon District occupies 415 km<sup>2</sup> and a geoelectric study has been carried out there. The aim of this study is to enhance the hydrogeological knowledge of the area and to select the areas with the best potential for exploitation. A field work with 164 vertical electrical surveys (SEV) and 16 boreholes of lithologic control have been carried out. These allowed for the definition, from a structural viewpoint, of the existence of an horst (called "Batán-Peralta Ramos") and two tectonic basins ("del Barco" and "Chapadmalal"). A good correlation was found between the SEVs and the lithology analyzed by means of the cutting. As a result of this, the depth of the hydrogeological bedrock (orthoquartzites of the Balcarce Formation), of phreatic level and thicker clay levels were clearly determined. Based on the interpretation of the SEVs, maps of the hydrogeological bedrock and phreatic level depths were outlined. This information led to the generation of elevation digital models (MDE) for both surfaces and a thickness aquifer map. Finally, three areas were selected which, in a regional scale, present the best exploitation potential.

**Keywords:** Hydrogeology, geoelectrical survey, Mar del Plata.

### INTRODUCCIÓN

El Partido de General Pueyrredon se localiza en el sudeste de la Provincia de Buenos Aires, y su ciudad capital es Mar del Plata (700.000 habitantes). La llamada Cuenca Sur del Partido ocupa 415 Km<sup>2</sup> y se encuentra delimitada por las rutas provinciales 11 y 88, el Arroyo Las Brusquitas (límite con el Partido de General Alvarado) y el límite del ejido urbano de Mar del Plata (Figura 1).

La actividad económica dominante es la hortícola, especialmente pequeños y medianos productores. Hacia el sector sudeste del área esta actividad deja paso a la agricultura extensiva. Juntamente, se desarrollan la minería de rocas (ciudad de Batan) y en menor medida la de suelos. Los cementerios y las zonas de disposición final de residuos sólidos domiciliarios (desde 1979 a la actualidad) también se encuentran en el área.

Con respecto a los desarrollos residenciales, es posible ubicar tres zonas urbanizadas: Estación Chapadmalal y Batán, segunda en importancia en el Partido, que se encuentran en el noroeste de la zona, y que tienen una densidad poblacional de 10 a 50 hab/Ha; el Barrio "Parque Hermoso" localizado hacia el límite norte de la zona, con una densidad poblacional de 1 a 5 hab/Ha y el Barrio "Quintas de Peralta Ramos", hacia el sureste y lindando con Punta Mogotes, que tiene una densidad poblacional menor a 1 hab/Ha. En la faja costera también se desarrollan numerosos barrios que si bien presentan baja densidad de población (<1 hab/Ha) constituyen un eje que se extiende casi sin solución de continuidad hasta el límite del Partido. Por otra parte, son un importante núcleo receptor de turistas y marplatenses en la época veraniega.

El objetivo de este trabajo es presentar la primer caracterización hidrogeológica de la Cuenca Sur del Partido, que sirva de base para la realización de futuros estudios de detalle tendientes a localizar nuevos pozos de explotación, como también, aportar a la hora de planificar intervenciones en el territorio que puedan, de alguna manera, impactar el recurso hídrico subterráneo.

### RASGOS GEOMORFOLÓGICOS GENERALES

Según el esquema geológico bonaerense dado por ROLLERI (1975) el área de estudio se ubica en la provincia geológica de Tandilia. El sistema de Tandilia está constituido por una serie de cerros alargados de cumbres planas, integrados en el Partido de General Pueyrredon por estratos subhorizontales de cuarcitas pertenecientes a la Fm Balcarce (DALLA SALDA e ÍÑIGUEZ, 1975). Los afloramientos conforman lomas suaves y regulares con alturas relativas de 30 a 50 m. Hacia el sudoeste el sustrato de cuarcitas paleozoicas se hunde suavemente hasta profundidades que varían entre 100 y 170 m (ZARATE, 1989). El relieve ondulado, pierde expresividad gradualmente en dirección sudeste, en las proximidades de las desembocaduras de los arroyos Lobería, Seco, Chapadmalal y las Brusquitas. En estas zonas el paisaje es sólo moderadamente ondulado resultando de la acción fluvial y la existencia de una cubierta eólica que ha suavizado las formas del relieve. Este paisaje contrasta con la amplia planicie que se inicia en los alrededores de Miramar y que corresponde al ámbito de la provincia geológica de Llanura interserrana Bonaerense (ROLLERI, 1975).

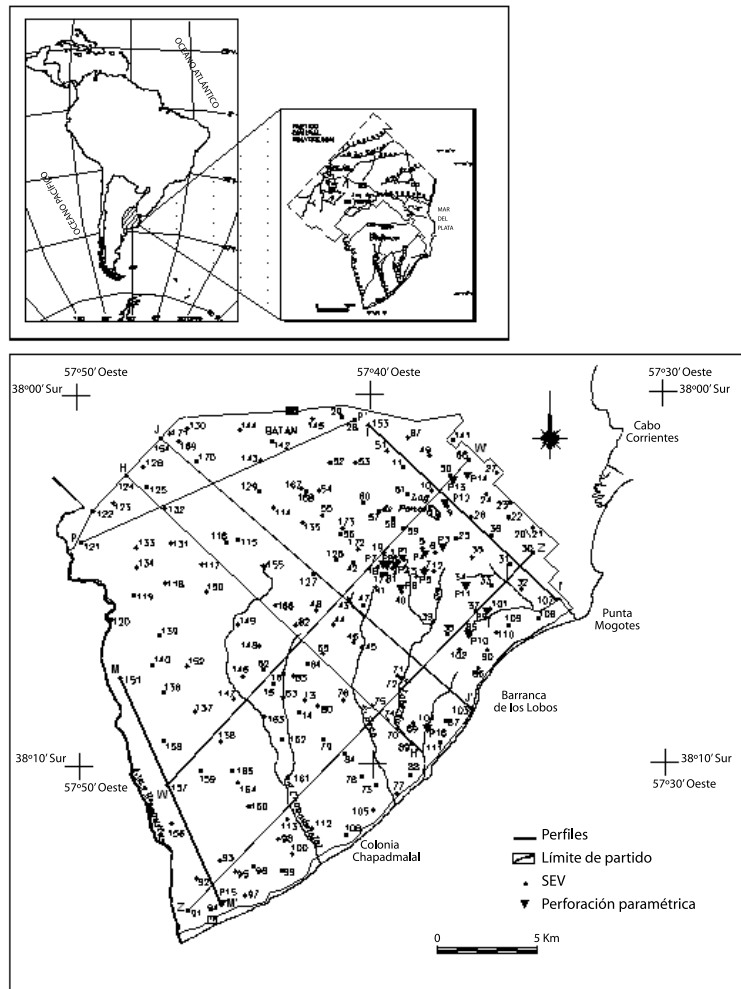


Figura 1. Mapa de Ubicación del área de estudio y localización de SEV y perforaciones

El 50% del área de estudio se corresponde con el sistema morfodinámico (en el sentido de CENDRERO y DIAZ DE TERAN, 1987) de llanura ondulada, destacándose los cortes que en las lomadas producen los cauces de los arroyos Lobería, Chapadmalal y Seco, flanqueados por barrancas que alcanzan un par de metros de altura. Este sistema está caracterizado por un relieve suave, de pendientes rectas, cortado profundamente por los valles de los cursos que tienen sus nacientes en las tierras altas del oeste del Partido, lo que le confiere un aspecto ondulado al ser atravesada de norte a sur. En el 50 % restante, especialmente los extremos NE y NW, lindantes con la zona urbana, corresponde al ambiente morfodinámico denominado Sistema de Lomas; estas lomas presentan superficies tendidas y redondeadas y conforman divisorias caracterizadas por una pendiente que oscila entre 3 y 6 %. Hacia el este (área urbana de Mar del Plata) y oeste (área Batan-Chapadmalal), muestran un fuerte control estructural debido a que los sedimentos eólicos pleistocenos que forman las lomadas se dispusieron copiando la topografía preexistente de cumbres planas; son las llamadas “lomadas con control tectónico”, donde la cuarcita se encuentra subsuperficialmente. Hacia el sudeste y sudoeste, el basamento ortocuarcítico se profundiza generándose, así, netas formas depositacionales (DEL

RIO et al., 1995). La expresividad topográfica de las lomadas decrece hacia la transición con la llanura ondulada, alcanzando cotas de alrededor de 30 msnm, contra los más de 100 msnm que tienen sobre la ruta 88.

#### ANTECEDENTES

Existen un par de trabajos que pueden tomarse como antecedente, que permiten acceder a una primera caracterización geoelectrica del área de estudio.

El primero, elaborado por PERURENA (1984), incluye la realización de 65 sondeos eléctricos verticales (SEV) dispuestos en tres transectas que cubren el extremo sur del Partido de General Pueyrredon.

El segundo, es el estudio realizado por el Centro de Geología de Costas y Cuaternario para el Ente Municipal de Servicios Urbanos (MARTÍNEZ y MASSONE, 1997) incluye la realización de cinco SEV en las proximidades del Sitio de Disposición Final de Residuos de Mar del Plata, a lo que se agregan cinco perforaciones, de las cuales tres alcanzaron el basamento hidrogeológico, lo que permite su utilización como perforaciones paramétricas.

Por último (CALVETTY AMBONI, 1995) presenta diversos cortes geoelectricos en el sector del partido de General Alvarado lindante con la zona de estudio.

Las principales conclusiones acerca de estos antecedentes pueden sintetizarse diciendo que se observa un gran contraste entre el basamento resistivo, que corresponde a las ortocuarcitas de la Fm. Balcarce, y los sedimentos que le sobreyacen. PERURENA (1984) estima el valor de resistividad de este basamento en 500 ohm.m, mientras que las resistividades de los sedimentos en general no exceden los 30 ohm.m. En consecuencia, para conocer la profundidad del basamento es suficiente la obtención de un tramo ascendente de pendiente unidad en la curva de campo (CALVETTI AMBONI y RAPACCINI, 1993).

En los trabajos de CALVETTI AMBONI (1995) y de MARTÍNEZ y MASSONE (1997) se reconocen capas superficiales, de no más de dos metros de espesor, de resistividades entre 20 y 30 ohm.m; por debajo de estas capas, tanto en estos trabajos, como en el de PERURENA (1984), se mencionan diferencias en rangos de 10 a 20 ohm.m y, menos frecuentemente, menores de 10 ohm.m. Estas variaciones han sido asignadas a cambios litológicos, en especial en la granometría de los sedimentos.

Un completo análisis de los métodos de interpretación de curvas de campo ha sido publicado por RAPACCINI et al. (1993), quien, más allá del método que seleccionado, destaca la importancia que tiene el conocimiento de la geología del área para lograr buenos resultados con cualquiera de ellos. ORELLANA y MOONEY (1966) reconocen tres tipos de curvas de campo: el tipo I que corresponde a una morfología de curva de tres capas tipo H, el tipo II corresponde a curvas de tres capas tipo K o bien a curvas de dos capas, y por último el tipo III que corresponde a curvas de cuatro capas del tipo KH.

## METODOLOGÍA

Se realizaron 168 SEVs y 16 perforaciones paramétricas (Figura 1) que alcanzaron, en su mayoría, la cuarcita. El promedio resultante para toda el área es de un SEV cada 2,4 Km<sup>2</sup>. Las perforaciones tienen un diámetro de 125 mm y fueron realizadas con equipo rotary e inyección de agua. Para que puedan ser utilizadas como piezómetros todas fueron entubadas con caño camisa de PVC de 110 mm ranurado en su tercio inferior y aisladas con cañería ciega y cementación hasta los 25 mbbp.

El dispositivo electródico empleado en este estudio es el Schlumberger simétrico (con hasta 300 m de apertura de ala), en virtud de mayor rapidez operativa y su menor sensibilidad ante inhomogeneidades laterales (ORELLANA, 1982; ORELLANA y MOONEY, 1966). Se utilizó un instrumento digital equipado con un milivoltímetro con una precisión de 0,1 y para un rango de operación de 199,9 y 1.999 milivoltios, y un miliamperímetro de 0,1 Amp. de precisión. La fuente de energía es una batería recargable de ácido-plomo. El instrumental cuenta con sistema de compensación de potencial espontáneo.

La interpretación automática de las curvas de campo se efectuó mediante el programa ZOHDI (1975), empleándose el programa SOUNDER (GRADIENT GEOLOGY AND GEOPHYSICS, 1991) para

obtener una mejor graficación, como también una constatación visual del ajuste del modelo. En algunos casos se ha aplicado el método gráfico de superposición y reducción empleando las curvas patrón de ORELLANA y MOONEY (1966) con el método del punto auxiliar de Ebert.

Los criterios para la realización de los perfiles en el campo se basan en hipótesis de trabajo clásicas y altamente demostradas. El primero de éstos se refiere a la identificación del basamento hidrogeológico que es, desde el punto de vista geoelectrico, "basamento resistivo". El reconocimiento de esta unidad es fundamental dentro del estudio, por cuanto sirve para determinar el espesor de sedimentos que constituyen el acuífero clástico. Los criterios de identificación a seguir son (CALVETTI AMBONI y RAPACCINI, 1993):

- Debido al gran contraste de resistividad entre el basamento y las formaciones sobreyacentes, el último tramo de la curva de resistividad aparente debe tener pendiente 1 (45°) y estar definido al menos por tres puntos.
- No es necesario prolongar el tramo de pendiente 1 mas allá de los tres puntos, a excepción de que existan capas intermedias muy resistivas. Si bien no puede descartarse la existencia de capas de tosca de alta resistividad, los espesores de las mismas serían bajos, por lo cual no es necesario modificar este criterio de identificación del basamento.

Otros conceptos a tener en cuenta son tomados de RAPACCINI et al., 1993:

- La identificación de capas geoelectricas requiere contrastes de resistividad, por lo que el modelo puede no percibir diferencias formacionales con contrastes geoelectricos bajos.

Dentro del paquete sedimentario, las resistividades más bajas corresponden en general a sedimentos más finos, y viceversa.

Por otra parte, se preparó un modelo digital utilizando software Arcview 3.1 y tomando como información de base las curvas topográficas de las planchetas IGM 1:50.000 con equidistancias de 10 metros. A partir de este modelo se obtuvieron las cotas topográficas de cada uno de los pozos y sondeos eléctricos utilizados, lo que permitió generar el MDE del techo del basamento cuarcítico y la realización de perfiles que permitieran una mejor visualización de su posición topográfica (Figura 1).

## RESULTADOS

En todos los SEVs realizados las curvas terminan en un tramo ascendente de pendiente uno o próxima que se corresponde con el basamento resistivo de la sección. Sobre la base de los SEVs efectuados en zonas de roca subsuperficial, se ha estimado la resistividad de la cuarcita en el orden de los 600 a 1000 ohm.m.

La mayor parte de los SEVs se corresponden al tipo I y su más sencillo esquema conceptual es el de una secuencia de tres capas con una superior de resistividad mayor que la intermedia y una inferior de resistividad sensiblemente mayor que las anteriores, que se asocian respectivamente al sedimento no saturado, al sedimento saturado y al basamento hidrogeológico.

Los SEVs de tipo II son frecuentes en sectores

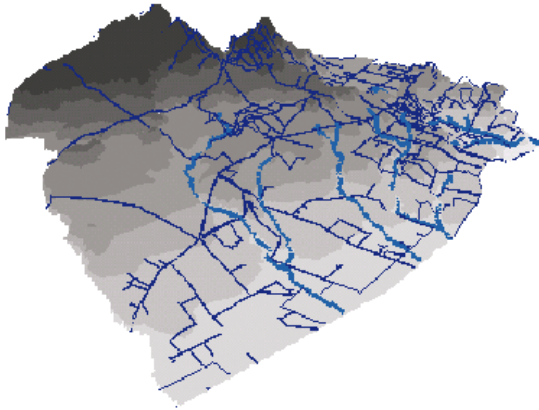


Figura 2. Modelo digital de elevación de la zona de estudio.

donde la roca se encuentra a baja profundidad (menos de 30 m) y en los que el sedimento saturado no existe o su espesor es escaso. Por último, se determinaron unos pocos SEVs tipo III, que manifiestan la existencia de una capa resistiva dentro de la zona no saturada, que podría corresponder, especialmente en los sondeos que coinciden con lomadas, a sedimentos entoscados.

El MDE (Figura 2) muestra claramente la presencia de lomadas en el norte del área estudiada, donde aflora el basamento cuarcítico que es explotado en numerosas canteras. El comportamiento de este basamento en el resto de la cuenca ha sido inferido a partir de los resultados de los SEVs, ya que en la mayoría de los casos la determinación de la profundidad del basamento no ha dejado lugar a dudas. Los perfiles realizados con estos datos (Figura 3) permiten comprobar el control tectónico de las lomadas del área norte y noroeste (perfiles H, J, P, I, y W); tomando como referencia el área donde el techo de este basamento se encuentra sobre el nivel del mar, puede observarse que, estructuralmente, la cuenca sur presenta un pilar tectónico, denominado en este trabajo Pilar Batan-Peralta Ramos, que atraviesa la cuenca sur en dirección SW-NE, hasta el extremo norte del área de estudio y luego toma rumbo NW-SE hasta la Punta Mogotes, y dos fosas tectónicas, una en el extremo noroeste, que denominamos Fosa de Las Chacras y otra que ocupa todo el sector sur y sureste denominada Fosa de Chapadmalal (Figuras 4 y 5). Claramente, los límites de este pilar coinciden con las tres direcciones principales de fallamiento del sistema de Tandilia, ya descritas por TERUGGI y KILMURRAY (1975), a saber, SE-NW, NW-SE y N-S. Dentro de estas estructuras principales, los perfiles muestran, además, la presencia de bloques altos y bajos en todas las transectas (Figuras 3 y 4), cuyo mapeo y análisis excede los objetivos de este trabajo.

Con la finalidad de ajustar la interpretación del los SEVs, se han procurado realizar seis de ellos próximos a las perforaciones paramétricas efectuadas para este trabajo. De acuerdo a la posición topográfica se reconocen tres tipos de perfiles litológicos: las perforaciones P1, P2, P6 (Figura 6) y P14, ubicadas en

posiciones altas del paisaje (cumbre de lomadas o tercio superior de pendiente) presentan una sucesión limoarenosa muy homogénea, con escasos niveles arenosos medianos a gruesos intercalados; aparecen, hacia el sector central de los perfiles, delgadas intercalaciones arcillosas y limo arcillosas.

En sectores de media pendiente de loma se ubicaron las perforaciones P3, P4, P5 (Figura 6) y P13. En las dos primeras, topográficamente más bajas, predominan los limos arenosos, encontrándose escasas intercalaciones de arcillas y limos arcillosos y, más frecuentemente, niveles entoscados. En las dos últimas, ubicadas en sectores topográficamente más altos, los limos arenosos ya no son predominantes, existe una importante participación de niveles con arena mediana a gruesa y otros que conforman intercalaciones arcillosas o limoarcillosas de regular espesor.

Las perforaciones P9, P10, P12, P15 (Figura 6), P11 y P16 ubicadas en sectores bajos se caracterizan en general por una secuencia muy homogénea, en general muy arcillosa, donde es posible identificar niveles arenosos que en P10 y P11 son muy escasos y aparecen en el tercio superior del perfil, en tanto que en las otras cuatro perforaciones aparecen mucho más frecuentemente, especialmente en las dos últimas. En P9, P12 y P15 se encuentran delgados niveles entoscados.

En la Figura 6 se presenta el esquema litológico de las seis perforaciones seleccionadas y la curva de resistividad correspondiente al SEV próximo. A pesar que la sensibilidad del método geoelectrico no permitió identificar niveles con el detalle que tiene la recolección de cutting, la correlación es buena, especialmente en la determinación del nivel freático, el basamento cuarcítico y niveles más arcillosos.

Los valores de resistividad observados en los SEVs permiten interpretar que las capas que presentan resistividades de entre 20 y 30 ohm.m son representativas del sedimento limoso no saturado. Se reconocen, también, capas con resistividades mayores de 30 y de hasta 60-80 ohm.m, que ocupan frecuentemente la posición más superficial y que se adjudican a formaciones portadoras de tosca, o bien (especialmente en el extremo sureste del área) a depósitos de antiguos médanos. Las capas con resistividades menores de 20 ohm.m y de hasta 10 ohm.m, se interpretan como representativas del sedimento saturado. Por otra parte, capas de resistividad menor de 10 ohm.m se han asimilado a la presencia de horizontes de textura arcillosa predominante, cuyo ordenamiento según un criterio de profundidad y espesor de esos horizontes, ha permitido delimitar tres áreas con arcillosidad dominante (Figura 7).

A partir de esta interpretación se ha preparado la representación espacial de tres atributos hidrogeológicos esenciales: profundidad del acuífero, profundidad del basamento ortocuarcítico y espesor saturado. La Figura 8 muestra el MDE de la superficie freática, mientras que la Figura 9 es el mapa de isoprofundidad del acuífero.

En la mayor parte del sector noroeste y central-norte de la zona de estudio el agua subterránea se encuentra a profundidades de hasta 5 metros. Profun

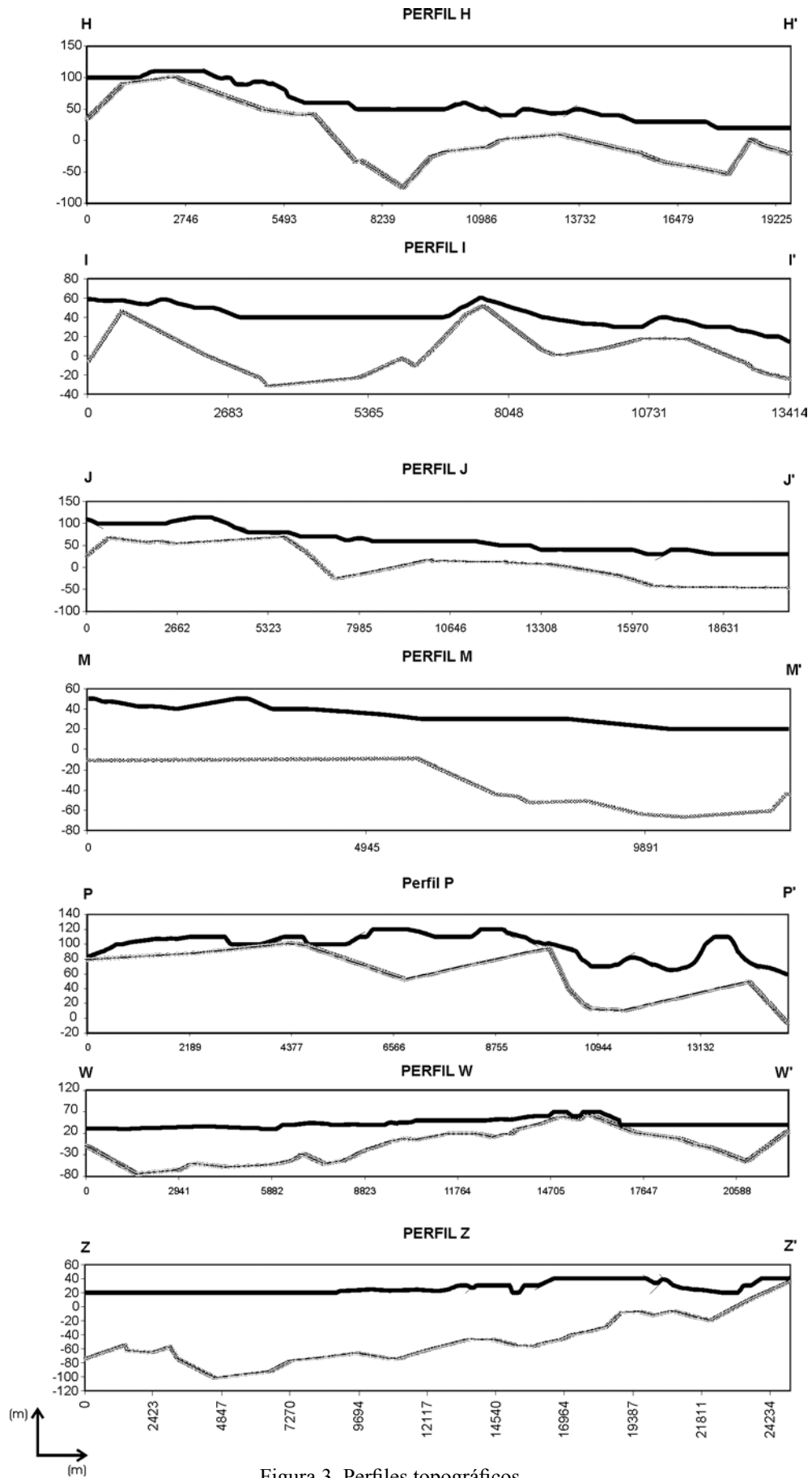


Figura 3. Perfiles topográficos.



Figura 4. MDE del techo del basamento cuarcítico.

didades mayores, hasta superiores a los 20 metros, se observan hacia el norte del área de estudio, contra la ruta 88 y hacia los sectores centro-oeste y sur donde llegan a 15 m. Profundidades intermedias, de alrededor de 10 m, aparecen en el sector central (cuenca del Arroyo Seco) y en el límite noreste del área de estudio.

La profundidad del basamento ortocuarcítico se representa en la Figura 10. La línea de profundidades menores que 10 metros marca la divisoria de aguas principal; ésta sigue en principio una orientación NE-SW y luego se desvía hacia el noroeste en dirección a la ruta 88, siguiendo el diseño del Pilar Batán-Peralta Ramos (Figura 5). Hacia el sur y suroeste, la profundidad del basamento aumenta también en forma abrupta, alcanzando 150 m en el sector sudeste. En la franja costera existe un gradiente desde el sector de Punta

Mogotes hasta el Arroyo Las Brusquitas, desde profundidades del basamento de 30 metros hasta más de 90 metros en el extremo sur.

El mapa de isoespesor de zona saturada (Figura 11) se obtuvo a partir de los dos anteriores. En él se puede observar que también se verifica la presencia de las dos áreas separadas por la divisoria principal. En todo el trayecto de la divisoria y en los sectores noreste y noroeste el espesor saturado no supera los 10 metros. A partir de estos sectores el espesor saturado aumenta progresivamente, alcanzando hasta 150 m en el sector sudeste y más de 90 m en el norte, contra la ruta 88.

Por otra parte, se calculó el volumen existente entre las superficies freática y la del basamento cuarcítico a partir de los MDE respectivos. Dichos modelos fueron divididos en celdas de igual tamaño y cargados

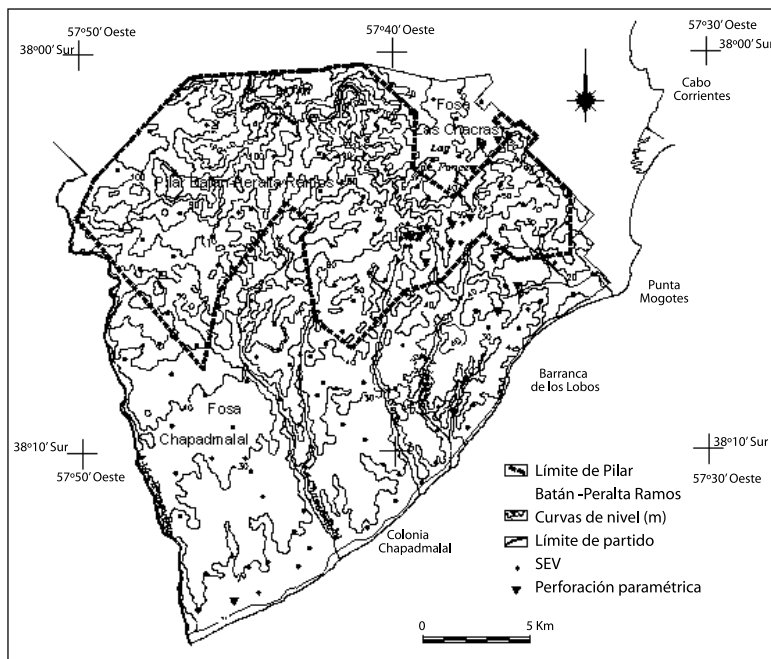


Figura 5. Pilar y Fosas Tectónicas inferidas para la Cuenca Sur.

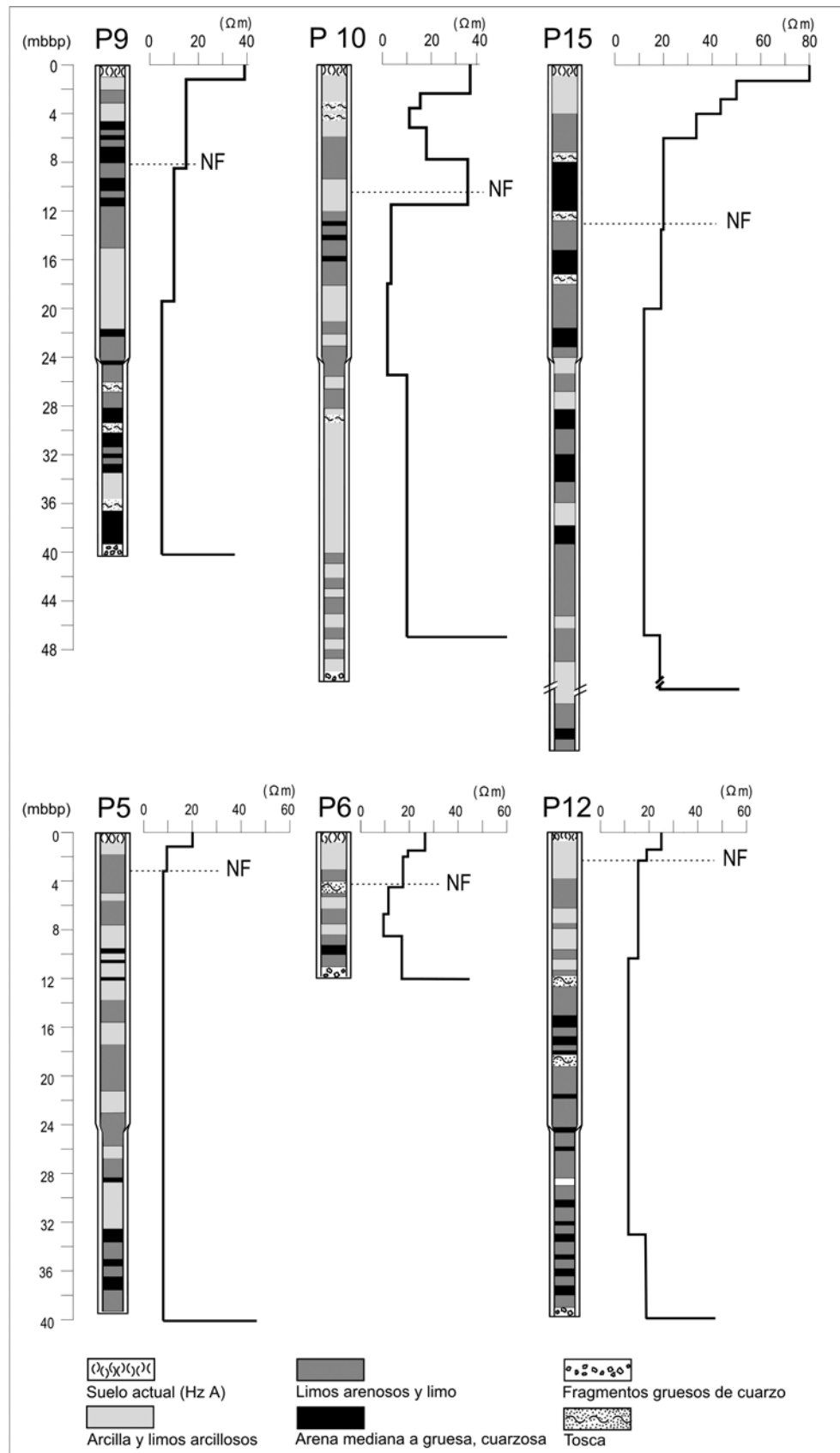


Figura 6. Perforaciones seleccionadas y comparación con el SEV más cercano.

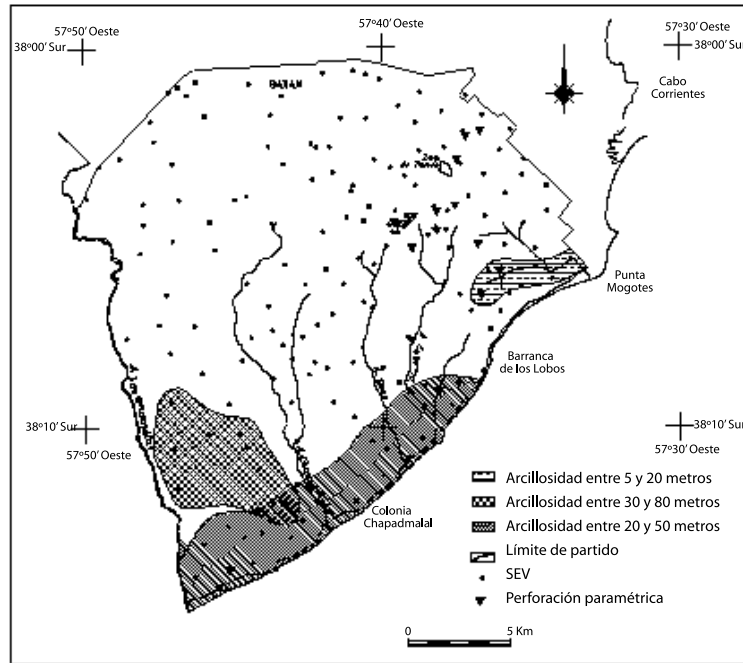


Figura 7. Ubicación de áreas con arcillosidad dominante.

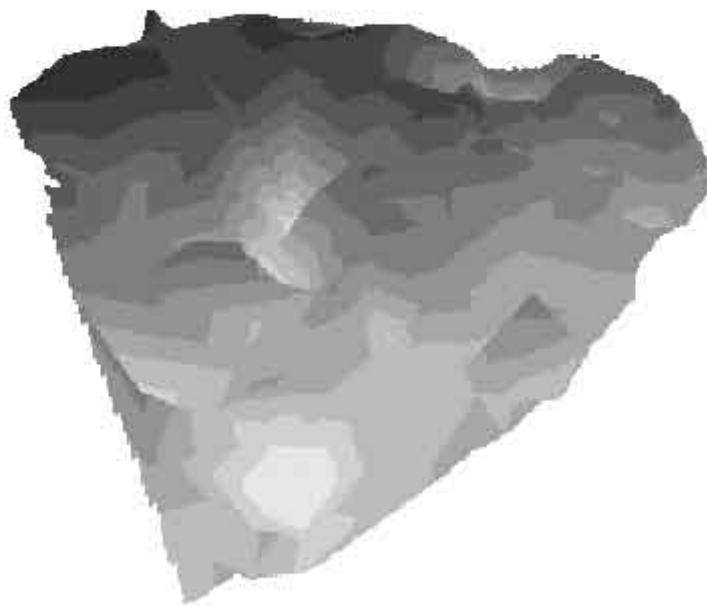


Figura 8. MDE de la superficie freática.

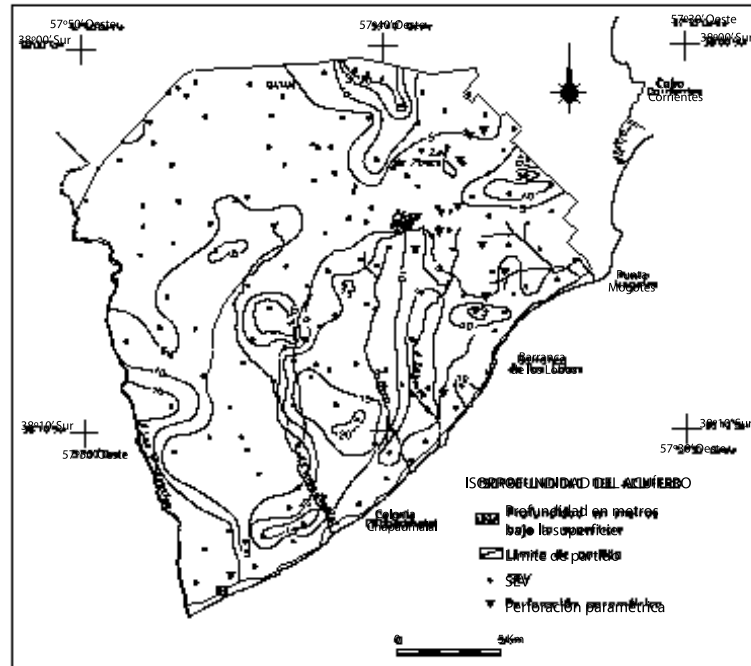


Figura 9. Mapa de isopropundidad del acuífero.

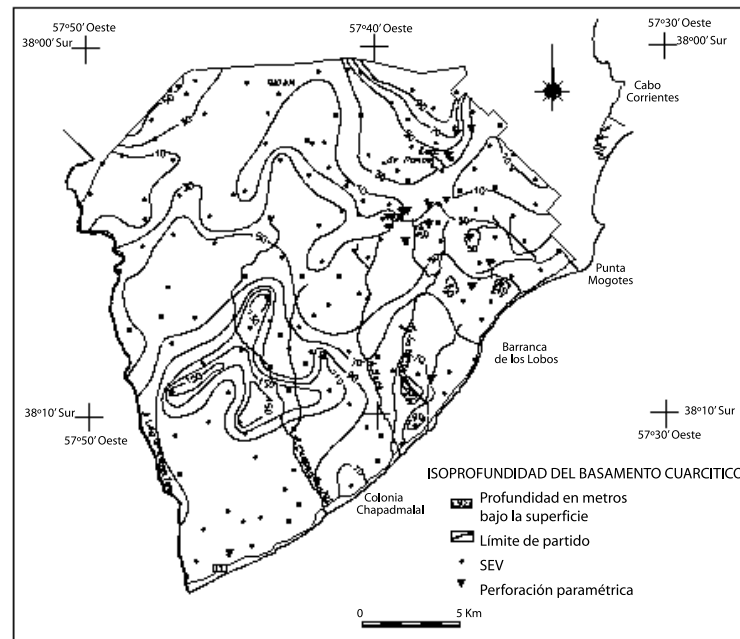


Figura 10. Mapa de isopropundidad del basamento cuarcítico.

Tabla 1. Cálculo del volúmenes.

Método	Volumen (hm <sup>3</sup> )
Trapezoidal Rule:	19295.77
Simpson's Rule:	19300.79
Simpson's 3/8 Rule:	19305.65

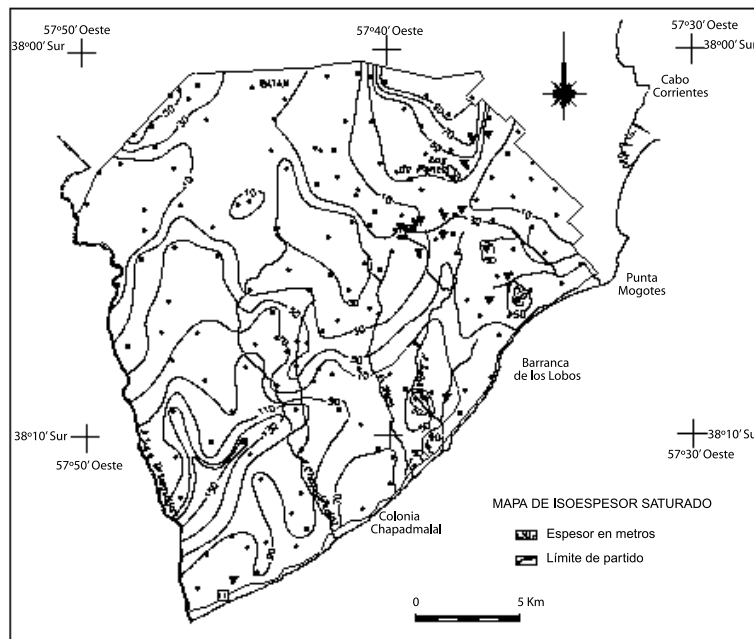


Figura 11. Mapa de isoespesor saturado

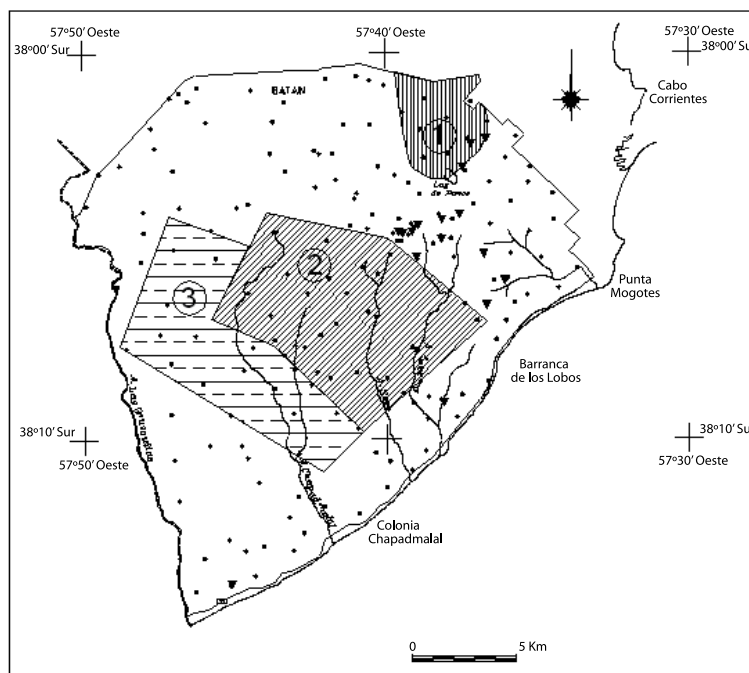


Figura 12. Las tres áreas potenciales de explotación del acuífero

en el software Surfer 8. Este programa realiza el cálculo volumétrico entre dos superficies por medio de tres algoritmos diferentes “Extended Simpson’s 3/8 Rule”, “Extended Simpson’s Rule” y “Extended Trapezoidal Rule”. Los resultados calculados por medio de la aplicación de cada uno de estos algoritmos fueron bastante similares (tabla 1).

Para la definición del volumen total del acuífero, se tomó un promedio entre los resultados obtenidos mediante la aplicación de los tres algoritmos citados anteriormente, el resultado obtenido fue de 19300.74

Hm<sup>3</sup>; por lo tanto, si se asume una porosidad eficaz de 0.20%, se pueden estimar que el volumen total de agua en el acuífero sería de 3860 Hm<sup>3</sup>.

### CONCLUSIONES

La realización de los 168 SEVs y 16 perforaciones en la cuenca sur del Partido de General Pueyrredón han permitido lograr un sustancial avance en la caracterización geológica e hidrogeológica de este sector. Se ha puesto en evidencia la complejidad estructural del área, dada por su disposición de bloques

elevados y fosas. Los más destacables, corresponden al aquí denominado Pilar Batan-Peralta Ramos y a las Fosas Las Chacras y Chapadmalal.

Desde el punto de vista de la explotación del serie de dificultades relacionada con los aspectos estructural y textural. Desde el punto de vista estructural, la posición del basamento determina que gran parte del área presente espesores saturados inferiores a los 50 m, mientras que texturalmente aquellos sectores en los que se alcanzan espesores saturados de 70 m y más son en los que predominan sedimentos arcillosos en su composición.

Desde el punto de vista de la posible proyección de perforaciones de abastecimiento de agua, la Fosa Las Chacras aparece como uno de los sectores más promisorios del área estudiada, no solo por sus características hidrogeológicas sino por su proximidad al área de consumo urbano (sector 1, Figura 12). Dentro de lo que es la Fosa Chapadmalal resulta dificultoso determinar algún sector en el cual las condiciones hidrogeológicas permitan presuponer la extracción de caudales importantes. No obstante, se ha identificado dos áreas que parecen reunir mejores condiciones a este respecto y que se encuentran en la Figura 12 (sectores 2 y 3). El sector 2 verifica buenos espesores saturados, no hay una marcada arcillosidad en los sedimentos presentes y se encuentra lo suficientemente alejado de la costa como para evitar procesos de intrusión marina. Lo mismo se aplica al sector 3, diferenciado del anterior por encontrarse más alejado del área de consumo.

Se recomienda efectuar estudios de detalle como paso previo a la localización definitiva de un nuevo campo de bombeo.

#### AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se realizó en el marco de un convenio de asistencia técnica con Obras Sanitarias Mar del Plata S.E., por lo que los autores agradecen a la empresa la autorización para su publicación.

#### REFERENCIAS

CALVETTI AMBONI, B. Prospección geoelectrica para la evaluación del recurso hídrico subterráneo en Miramar, Partido de general Alvarado, provincia de Buenos Aires. IV Jornadas Geológicas y Geofísicas Bonaerenses, Actas (2):187-195, 1995..

CALVETTY AMBONI, B.; RAPACCINI, A. Determinación de la profundidad del basamento resistivo mediante el método SEV. E.Bocanegra y A.Rapaccini Eds.: Temas actuales de la Hidrología subterránea: 247-269. UNMDP, 1993.

DEL RIO, L. y otros, Convenio Municipalidad del Partido de General Pueyrredon- Universidad Nacional de Mar del Plata (CGCyC). Inédito , 3 tomos, 1995.

CENDRERO, A.; DIAZ DE TERAN, J. The environmental map system of the University of Cantabria, Spain. Arndt y Lüttig (Eds.): Mineral resources extraction, environmental protection and land-use planning

in the industrial and developing countries, 149-181, 1987.

DALLA SALDA, L.; IÑIGUEZ, M., La Tinta, Precámbrico y Paleozoico de Buenos Aires. VII Cong. Geol. Arg., Actas, I, 539-550, 1978.

GRADIENT GEOLOGY AND GEOPHYSICS. SOUNDER source and executable code. User's guide. Gradient Geology and Geophysics, Montana, 10 pp. , 1991.

MARTÍNEZ, D.; MASSONE, H. Relevamiento geológico en el nuevo sitio de disposición final de residuos y preparación de una red de monitoreo. Convenio Municipalidad de General Pueyrredón-Universidad de Mar del Plata, informe técnico final, inédito, 1997.

ORELLANA, E. Prospección geoelectrica en corriente continua. Edit. Paraninfo, Madrid, , 1982.

ORELLANA, E.; MOONEY, H. Tablas y curvas patrón para sondeos eléctricos verticales. Interciencia, 34 pp. Madrid, 1966.

PERURENA, A. Estudios geoelectricos en el área de Mar del Plata sur. Municipalidad de general Pueyrredón, Instituto Municipal de Desarrollo Urbano, inédito, 1984.

RAPACCINI, A., CALVETTI AMBONI, B.; GONZÁLEZ ARZAC, R. Interpretación de sondeos eléctricos verticales. Compatibilización de resultados con otras evidencias geohidrológicas. E.Bocanegra y A.Rapaccini Eds.: Temas actuales de la Hidrología subterránea:23-36. UNMDP, 1993.

ROLLERI, E. Provincias geológicas bonaerenses. VI Congreso Geológico Argentino. Relatorio Geol. Pcia. de Buenos aires: 29-53, Bahía Blanca, 1975

TERUGGI, M.; KILMURRAY, J. Tandilia. Relatorio Geología de la Provincia de Buenos Aires, VI Congreso Geológico Argentino, 55-77, 1975.

ZARATE, M. Estratigrafía y geología del Cenozoico tardío aflorante en los acantilados marinos comprendidos entre playa San Carlos y el arroyo Chapadmalal, partido de Gral. Pueyrredón, Pcia. De Buenos Aires. Inédito. Tesis Doctoral, Fac. de Cs. Y Museo, Univ. Nac. de La Plata, 1989.

ZOHDY, A. Automatic interpretation of Schlumberger Sounding Curves, using modified Dar Zarruk functions. Geological Survey Bulletin 1313-E., 1975.



# ANÁLISIS DE RIESGO PARA SITIOS CONTAMINADOS. APLICACIÓN A UN CASO DE INTERÉS NACIONAL ITALIANO.

M. F. Rivera\*, E. Migliari, C. Fallico, S. Troisi

Universidad de la Calabria; Departamento de Defensa del Suelo, Italia

**Resumen:** El presente estudio es una aplicación de las metodologías de análisis de Riesgo Sanitario adaptadas a un caso de “interés nacional” italiano, el sitio indagado es la ex-industria química de la pertusola de Crotona – Italia Meridional, que presenta altas concentraciones de metales pesados, siendo As, Cd y Zn aquellos encontrados en mayores concentraciones.

El análisis de riesgo ha sido calculado tanto para el riesgo cancerígeno y como para el tóxico. En el cálculo ha considerado 1) el punto de exposición coincidente con el punto fuente de contaminación (contaminación directa); 2) las matrices suelo y agua; 3) los receptores niños, trabajadores y adultos; y 4) las vías de exposición ingestión y contacto dérmico. Las metodologías consideradas son de dos tipos, la primera determinística y la segunda probabilística. Los resultados obtenidos del cálculo del riesgo evidencian una sobrestima del riesgo mediante el método determinísticos (MLE, RME); al ser confrontados con el método probabilístico, de este análisis se deduce que los valores de riesgo serán mayores. De consecuencia los costos en las obras de remediación basados en el análisis de riesgo determinístico resultan generalmente elevados y algunas veces insostenibles.

**Palabras claves:** Metales pesados, analisis de riesgo, método determinístico, método probabilístico, objetivos de remediación.

**Abstract:** Defining Cleanup Goals for Contaminated sites by applying of risk analysis methodologies, can be considered as a new measure of effectiveness in remediation measures. In fact, risk analysis aims to focus the objective of the goals of remediation, identifying only the pollutants found to be “truly dangerous” for human health, namely those who should be treated and taken within the levels of “safety”, or acceptability to humans, and on the other side look for a rational utilization of resources of all kinds of nature.

Two types of methodologies can be used in the calculation of risk analysis: deterministic and probabilistic. When the risk is calculated in the deterministic approach, two values are obtained, one with features Most Likely Exposure (MLE) and other features Reasonable Maximum Exposure (RME). None of these two values at this level can provide some kind of indication in the case that the admissible risk is surpassed. The probabilistic Approach allows greater complexity characterizing the risk, provides a better indication on the involved uncertainty, as well as on the degree of caution to be safeguarded.

This study deals with a risk analysis in former industrial area of Crotona, declared as a “national interest” zone due to high concentrations of heavy metals found at the scene. The data corresponds to the pollution found in the year 2006. Several pollutants were analyzed, among which it can be counted: As, Cd and Zn. The point of exposure Cpoe has been defined by taking the most conservative approach, namely receptors directly exposed to contamination, whilst further migration processes of contaminants in soil and water have been excluded. The active exposure pathways considered in the work have been ingestion and dermal contact.

Total risk has been calculated as the sum of all individual risks obtained by each route of exposure and for each pollutant. Receptor in the study are adults, children and workers. For carcinogenic effects, a target risk of 10<sup>-5</sup>, and for non-carcinogenic effects, a target risk (as a hazard quotient) of 1 have been considered as recommended by the EPA.

From a Monte Carlo Simulation, carried out for each case, evidence has been found to support that points MLE, RME and the average probability in the graph can be used as means of comparison between the deterministic and probabilistic methodologies. When confronting the values of risk deterministic (MLE and RME) and the average probability, it is clearly shown that there is a risk of overestimating when calculated using the deterministic method. The most notorious case of overestimation is found when comparing the RME value with the average value of the distribution, as they are different in one magnitude level. It is also important to note that the value of RME always lies within the code of the probability distribution, which is where the apparent probability of an event becomes lower. The values of MLE and the average distribution are quite close (i.e., in the same magnitude order), and the range defined by these two points is where the highest possibility that an event occurs is verified.

It is important to emphasize, that in the fact risk analysis is not a “magic recipe” to solve problems of economic-social-environmental dimensions, but can be considered as a tool that serves as an input for decision-making, why should be handled with transparency, objectivity and above all responsibility.

**Keywords:** Heavy metals, risk analysis, deterministic approach, probabilistic approach, cleanup goals

Símbolos:

ABS =	Factor de absorbtimiento (adimensional).
ADI	dosis media diaria - Average Daily Intake (mg/Kg. d)
AF =	Factor de adherencia (mg/cm <sup>2</sup> )
AT =	Duración media de la exposición (años)
BW =	Peso corporal (Kg.)
CF <sub>1</sub> =	Factor de conversión (Kg./mg)
CF <sub>2</sub> =	Factor de conversión (día/año)
CF <sub>3</sub> =	Factor de conversión (Kg.-cm <sup>2</sup> )/(mg.-cm <sup>2</sup> )
CF <sub>4</sub> =	Factor de conversión (l.-m)/(cm.-m <sup>2</sup> )
C <sub>POE</sub> =	Concentración del contaminante al punto de exposición.
E =	Tasa exposición. Representa la cantidad media de cada componente ambiental (agua, suelo, aire) ingerido, inhalado o contactado por unidad de peso corporal o por unidad de exposición. Dimensionalmente, vale (1Kg <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup> ) para agua y aire, (mg/(kg.d)) para suelo.
ED =	Duración de la exposición (años)
EF <sub>soil</sub> =	Factor de exposición (día/año)
EF <sub>water</sub> =	Factor de exposición (eventos/año)
ET =	Tiempo de exposición (horas/eventos)
FIA	Fración ingerida de suelo contaminado (adimensional)
HQ	Índice de riesgo crónico - Hazard Quotient (adimensional)
IR <sub>w</sub> =	Cantidad diaria de agua ingerida (l/día)
IR =	Cantidad diaria de suelo ingerido (mg/día)
MLE	Representa la exposición media - Most Likely Exposure
P <sub>c</sub> =	Constante de permeabilidad de la piel (cm/hr)
R <sub>n,m</sub>	representa el número de eventos de cáncer probabilísticamente manifestados en una población expuesta al contaminante n-ésimo, a través la vía de exposición m-ésima (adimensional)
RME	Representa la exposición máxima razonablemente posible, que considera el 95% de la población expuesta -Reasonable Maximum Exposure que
SA <sub>water</sub> =	Área de contacto (m <sup>2</sup> ).
SA <sub>soil</sub> =	Área de contacto (m <sup>2</sup> /día).
SF	potencial cancerígenos - Slope factor (adimensional)

## INTRODUCCIÓN

Con el crecimiento de la población y la búsqueda de mejores condiciones de vida, las actividades industriales se han vuelto necesarias para todos, sobre todo en los países desarrollados que necesitan sostener las grandes exigencias de vida moderna. La comodidad como sinónimo de progreso desde una óptica “no sustentable” ha traído consigo problemas de todo tipo, donde el hombre en calidad de receptor final se ha visto siempre involucrado. Los países en vías de desarrollo, por otra parte, en su afán de modernizarse (algunos en forma acelerada) han generado el mismo tipo de problemas, en algunos casos más agudos, debido a la falta de recursos económicos, tecnológicos, científicos y humanos adecuados para enfrentarlos.

Desde comienzos del siglo XX vienen firmándose tratados, aumentando estos en número y alcance a partir de la II Guerra Mundial. Una de sus primeras manifestaciones tiene su origen en la Conferencia de Estocolmo, convocada por las Naciones Unidas y celebrada en 1972, que aumentó la conciencia política sobre la naturaleza global de muchas amenazas al ambiente. A partir de esta, se intensificaron las actividades internacionales, que llevaron a la creación del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, y por otro lado, la Comunidad Económica Europea (hoy Unión Europea) consolidó una serie de iniciativas con miras a la protección ambiental.

Son las experiencias generadas a nivel mundial las que han permitido mediante un proceso de retroalimentación el desarrollo de diversas técnicas para la remediación de sitios contaminados, así como también, la creación y aplicación de la mayor parte de normativas actualmente en vigor. La EPA (Environment Protection Agency - USA) ha sido una de las instituciones más comprometidas en esta temática convirtiéndose en la pionera de las Metodologías en Análisis de Riesgos, sus numerosos estudios que a la vez han generado amplias bases de datos de dominio público lo demuestran. Otras instituciones a nivel mundial que tienen roles similares son por ejemplo (Australian ONORM - Australia), (OVAM – Public Waste Agency of Flanders-Bélgica), (Environment Agency -Irlanda), etc. Por otra parte, la Unión Europea, actualmente ha creado la primera red de diálogo y búsqueda mancomunada de soluciones para sitios contaminados a través del “Foro Común de Sitios Contaminados en Europa” (Common Forum on Contaminated Land in Europe) donde participan todos sus estados miembros.

La idea de “contaminación industrial” es algo que preocupa a todos, de casos nefastos producto de la contaminación se podría hablar ampliamente, esto de una u otra manera, ha producido una alarma general dentro de la población que se siente amenazada a un potencial peligro. Al momento de juzgar si los desechos industriales son un riesgo o no, dos hipótesis pueden ser consideradas. 1) Existe riesgo producto de desechos industriales. Si es comprobada esta hipótesis, se vuelve indispensable tomar alguna medida de protección, que significa en la mayoría de los casos una gran inversión de recursos, que muchas veces no se puede afrontar. 2) Los desechos producidos no causan riesgo a la población, la

razón es simple, para que un riesgo se manifieste necesariamente con dos factores; la dosis y el tiempo de exposición, si uno de estos dos no existe el riesgo es cero. Cuando se habla de dosis, es importante diferenciarla según el tipo de contaminante y la forma como llega al hombre, es decir las vías de migración. De esta manera individualizados los contaminantes “verdaderamente peligrosos” y “las vías de migración activas” se puede pensar en crear medidas de atenuación “inteligentes” que conlleven de forma inmediata a la optimización de recursos de toda índole. El “Análisis de Riesgo Sanitario” se fundamenta dentro de este principio, salvaguardar la salud del hombre y optimizar recursos. El estudio presentado, es una aplicación del análisis de riesgo a un sitio declarado de “interés nacional” como es la Pertusola Crotone, cuyo calificativo se lo ha ganado por los altos niveles de metales pesados encontrados en este lugar. En este análisis se toman en consideración dos tipos de metodologías la primera de tipo determinístico (valor típico y valor RME) y, la segunda de tipo probabilístico. Finalmente se confrontan ambos resultados, los cuales servirán de referencia para definir objetivos de remediación que busquen la optimización de recursos, poniendo en primer lugar la salud del hombre.

## FASES EN EL ANÁLISIS DE RIESGO.

El término “peligroso” define la capacidad de una sustancia en producir efectos adversos en el organismo, y el término “riesgo” describe la probabilidad de que en una situación dada, una sustancia peligrosa produzca o no daño.

Se dice que una persona está en “riesgo” cuando está “expuesta” a un “peligro” y la magnitud del riesgo es una función de la peligrosidad de la sustancia y de la magnitud de la exposición. (Peña 2001), ó sea:

$$\text{Riesgo} = f(\text{exposición, peligro})$$

Por lo tanto, se puede afirmar que para que exista un riesgo es necesario que el individuo esté expuesto a una sustancia y que esta exposición represente un peligro para la salud. Se necesita tanto el peligro como la exposición, si alguno de ellos es igual a cero entonces no hay riesgo.

La toxicidad es una medida del peligro inherente a la sustancia.

Para estimar el riesgo del sitio particular, es necesario identificar la presencia de la(s) sustancia(s) tóxica(s) en el sitio estudiado, la cantidad que entra en contacto con el organismo y las condiciones en que se da el contacto. Es decir, de esta manera se puede determinar si la población tolera o no la(s) sustancia(s) en las cantidades presente in situ. Si resulta que la población está expuesta a un riesgo real, entonces se definen adecuados objetivos de remediación que salvaguarden la salud de los receptores y que al mismo tiempo permita un ahorro de recursos en los costos de tratamiento, limitando el tratamiento solamente aquellas sustancias peligrosas.

El procedimiento para llevar a cabo un análisis de riesgo puede ser articulada en las siguientes fases:

2.1 - Caracterización del sitio (Site Assessment): comprende todos los estudios ambientales para individualizar las posibles fuentes de contaminación y para

caracterizar las diferentes matrices ambientales contaminadas.

2.2 - Definición del modelo conceptual: es la reconstrucción de la vida productiva histórica del sitio y permite conocer las fuentes de contaminación, de seleccionar los contaminantes indicadores y de individualizar las vías de migración y las vías de exposición de los receptores

2.3 - Determinación de la concentración al punto de exposición : para evaluar el riesgo relativo a un contaminante es necesario determinar la concentración al punto de exposición (Cpoe). Se puede asumir el punto de exposición en el punto fuente de contaminación (contaminación directa), o evaluar los efectos de las vías de migración de los contaminantes en el suelo, es decir dos puntos distantes. Los modelos matemáticos que simulan los fenómenos de transporte y difusión son comúnmente usados para esta finalidad. La Figura 1 ejemplifica el receptor expuesto en los dos casos.

Sin embargo, algunas de las más importantes agencias ambientales mundiales, como por ejemplo la EPA (Environment Protection Agency – USA ) y la APAT (Agenzia per la Protezione dell’Ambiente e per i Servizi- Italia), recomiendan que para ejecución del análisis de riesgo de sitios contaminados, se tome en consideración, el así llamado criterio UCL (Upper Confidence Limit), con un nivel de significancia igual a 95%. El UCL representa la estima del valor medio de la concentración generado desde el conjunto de datos muestreados in situ, que además es dotado de un adecuado carácter conservativo y que se considera de mayor confiabilidad con respecto a una estadística básica. El UCL se genera mediante un criterio de interferencia estadística paramétrica y no paramétrica de las distribuciones de probabilidad de la concentración del contaminante.

2.4 - Cálculo de riesgo: Antes de abordar el riesgo pro-

piamente dicho, es necesario definir algunos conceptos que ayudaran a su comprensión.

- Sustancia Peligrosa (Hazardous Substance). Por sustancia peligrosa se puede entender un material que representa una amenaza a la salud pública o al ambiente, así como es definido del CERCLA (Comprehensive Environmental Response, Compensation, and Liability Act – USA ).

- Sustancia Tóxica (Toxic Substance) Una sustancia tóxica es una sustancia o mezcla química que puede representar un riesgo excesivo de daños a la salud o al ambiente.

Los contaminantes tóxicos de hecho, pueden presentar efectos de inmediata o larga verificación que son función de: la dosis y el tiempo de exposición. Cuando la dosis de exposición es alta y el tiempo de exposición es reducido, se puede verificar toxicidad aguda que se puede reflejar en la muerte inmediata del individuo expuesto. Cuando existe una exposición a bajas dosis, pero por largos y repetidos periodos de tiempo, se habla de toxicidad crónica que puede provocar desordenes de tipo genético, como enfermedades de tipo cancerígeno.

La correlación de forma sigmoide esquematizada en la Fig. 2 (curva A) muestra la existencia de un umbral mínimo de no efecto, que se puede interpretar como el comportamiento típico de todas las sustancias químicas no cancerígenas. La correlación de tipo linear esquematizada en la Figura 2 (curva B) evidencia que, si aún la presencia de un contaminante es mínima, existe un efecto no deseado; sin embargo este es el comportamiento hipotizado de las sustancias químicas cancerígenas, pero no demostrado.

El modelo dosis - respuesta, representado en la Figura 2, permite estimar aquella que puede ser definida como la dosis aceptable o dosis máxima admisible de la sustancia examinada, abajo de la cual no se veri-

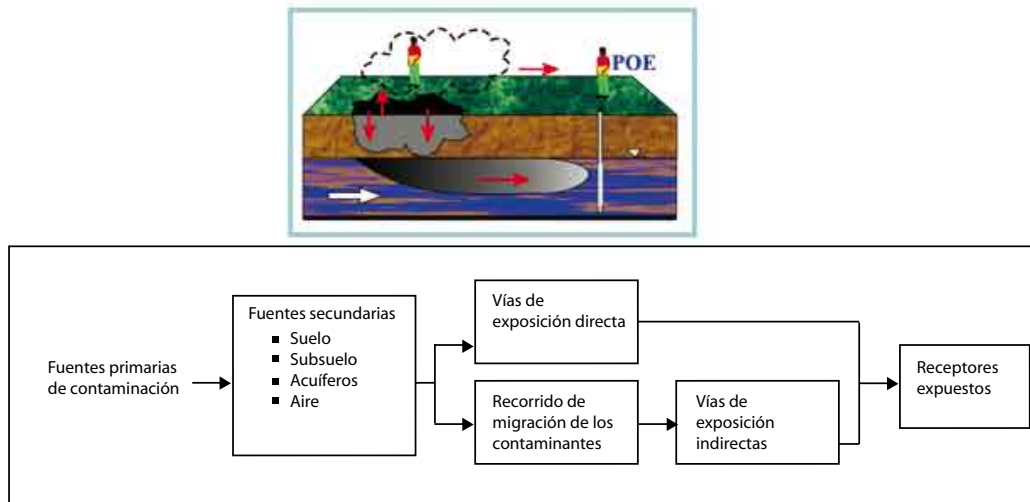


Figura 1: Ubicación del punto de exposición y esquema de migración de los contaminantes. (Location of the exposition point and scheme of the movement of the contaminant)

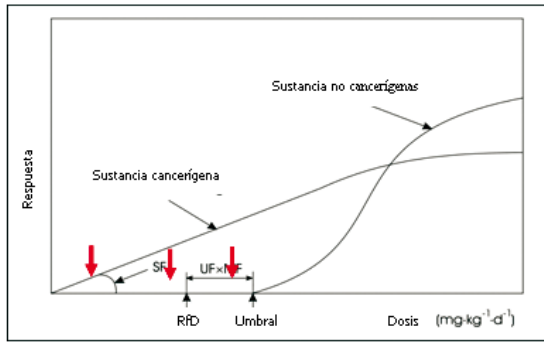


Figura 2: Curva típica Dosis –Respuesta: Sustancia cancerígena, sustancia no cancerígena (Typical doses – response curve for cancer and non-cancer risk)

fican efectos nocivos para la población. Los datos relativos a la toxicidad de cada una de las sustancias vienen descritos en términos de dosis máxima admisible (Chronic Reference Dose – RfD) para las sustancias no cancerígenas, mientras que para las sustancias cancerígenas se habla de potencial cancerígeno (Cancer Slope – SF) y no existe límite, teniendo siempre efecto nocivo también a bajas concentraciones. Estas definiciones son válidas para todas las matrices ambientales (agua, aire, suelo).

Las propiedades toxicológicas cancerígenas o no cancerígenas de los contaminantes índices tienen como fuente algunas instituciones internacionales como:

- La Organización Mundial de la Salud – OMS;
- NCEA (National Center for Environmental Assessment – US EPA);
- IRIS (Integrated Risk Information System – US EPA)- <http://www.epa.gov/iris/>;
- HEAST (Health Effects Assessment Summary Table – US EPA);
- ISS (Istituto Superiore di Sanita - Italy ).

Para cada una de las vías de exposición identificadas en el modelo conceptual del sitio es posible calcular la dosis media diaria (Average Daily Intake [mg/kg d]) que es la cantidad que asimila el ser humano diariamente por unidad de peso corporal durante su ciclo vital completo.

La tasa de exposición  $E$  depende del uso del suelo (residencial – comercial y/o industrial) y del factor de seguridad o nivel de prevención que se le quiera dar al análisis de riesgo. Desde este punto de vista se encuentran dos valores de referencia para cada vía de exposición (Exposure Factors Handbook –EPA):

- RME ( Reasonable Maximum Exposure) que representa la exposición máxima razonablemente posible, que considera el 95% de la población expuesta.

- MLE ( Most Likely Exposure) que representa la exposición media más probable desde el punto de vista estadístico para la media poblacional.

Los factores de exposición para sustancias no radioactivas que se consideran en el presente estudio son ingestión y contacto dérmico, respectivamente para las matrices agua y suelo contaminadas, se definen en la tabla 1.

Los significados de los términos que se encuentran en estas relaciones son descritas al final del presente estudio.

### Cálculo del riesgo cancerígeno:

El riesgo cancerígeno es el incremento de probabilidad de contraer un tumor en el curso de la vida a causa de la exposición a un número  $n$ -esimo de sustancias, es dado por el producto de la dosis media diaria (calculada para el tiempo de vida de una persona y para cada vía de exposición  $m$ -esima) por la tangente SF (Lopez factor) a la curva que expresa la correlación dosis - efecto.

$$R_{n,m} = C_n \cdot E_m \cdot SF = ADI_{n,m} \cdot SF \quad (5)$$

(parámetro adimensional) representa el número de eventos de cáncer probabilísticamente manifestados en una población expuesta al contaminante  $n$ -esimo, a través la vía de exposición  $m$ -esima. El número de eventos así determinados es de considerarse en exceso respecto al número de casos de cáncer que normalmente afectan a una población análoga no expuesta.

El riesgo calculado con la expresión precedente tiene un límite de confianza superior al 95%, es decir solamente existe el 5% de probabilidad que el riesgo efectivo pueda ser mas alto que aquel estimado.

### Riesgo Tóxico:

Para las sustancias no cancerígenas el riesgo es expresado mediante un indicador definido como “índice de riesgo crónico” (Hazard Quotient - HQ). Determinado dividiendo la dosis media diaria, (calculada considerando la duración efectiva de la exposición de la sustancia  $n$ -esima por la vía de exposición  $m$ -esima) para la dosis de referencia

$$HQ_{n,m} = \frac{(C_n \cdot E_m)}{RfD} = \frac{ADI_{n,m}}{RfD} \quad (6)$$

El índice de riesgo crónico (HQ) (parámetro adimensional) expresa cuantas veces la dosis media diaria, calculada sobre la base del efectivo periodo de exposición, supera la dosis de referencia. Si  $HQ < 1$  no

Tabla 1: Ecuaciones usadas para el cálculo de los límites de concentración al punto de exposición. (Equation used to calculate target receptor point concentration).

Matrix Vía de exposición	Suelo	Agua
Ingestión	$E_{SI} = \frac{CF_1 \cdot EF \cdot FI \cdot ED \cdot IR}{CF_2 \cdot BW \cdot AT} \quad (1)$	$E_{WI} = \frac{IR_w \cdot EF \cdot ED}{CF_2 \cdot BW \cdot AT} \quad (3)$
Contacto dérmico	$E_{DC_s} = \frac{CF_3 \cdot SA_{cont} \cdot AF \cdot ABS \cdot EF_{der} \cdot ED}{CF_2 \cdot BW \cdot AT} \quad (2)$	$E_{DC_w} = \frac{SA_{cont} \cdot P \cdot CF_4 \cdot ED \cdot EF_{der} \cdot ET}{CF_2 \cdot BW \cdot AT} \quad (4)$

existe riesgo, mientras si  $HQ > 1$  podría producirse potencialmente efectos no cancerígenos, pero patológicos en la población más sensible.

#### Riesgo Total o acumulado:

En presencia de más de una vía de exposición para un mismo contaminante y/o un compuesto, o más compuestos tóxicos por una sola vía de exposición, vale la propiedad aditiva del riesgo. En este modo el efecto tóxico o cancerígenos del riesgo debido a más sustancias o vías de exposición se obtiene por la sumatoria de simples efectos.

$$R_{Total} = \sum_{1-n,m} R_{n,m} \quad (7)$$

$$HQ_{Total} = \sum_{1-n,m} HQ_{n,m}$$

2.5 - Gestión del riesgo ("Risk Management"): Los estándares para la protección de la salud humana definidos de los organismos internacionales y recopilado del D.M 471/99 de la normativa Italiana, se basan en los siguientes criterios.

#### Riesgo Cancerígeno

- 1) Riesgo  $< 1 \times 10^{-6}$  (incremento del riesgo es relativo a un individuo sobre un 1.000.000): el riesgo es considerado nulo o insignificante y no requiere ninguna acción de bonifica.
- 2) Riesgo comprendido entre y (desde 1/1.000.000 a 1/10.000): es necesario realizar una acción de bonifica evaluándola caso por caso.
- 3) Riesgo  $> 1 \times 10^{-4}$  (1/10.000) acciones de bonifica necesarias, con la finalidad de reconducir los valores de riesgo al interno del intervalo de aceptabilidad.

#### Riesgo Tóxico

Los potenciales efectos de sustancias no cancerígenas vienen evaluados con el cálculo del índice de riesgo crónico. La dosis de referencia (RfD) constituye el valor límite conservativo indicado que debe resultar superior a la dosis efectiva suministrada (el índice de riesgo debe ser  $< 1$ ), de tal modo no tener efectos adversos para la salud humana. La dosis de referencia es un valor límite y no cuantifica directamente la relación entre la dosis suministrada y el efecto sobre la salud.

#### Riesgo Acumulado

Cuando se considera más de un compuesto y más de una vía de exposición, el índice de riesgo es expresado como la sumatoria de las relaciones entre dosis suministrada y dosis de referencia; el riesgo resultante deberá ser menor  $< 1$ .

#### Riesgo cancerígeno

El incremento de probabilidad de contraer un tumor en el curso de la vida por efecto de la exposición de una sola sustancia que no debe superar el rango  $10^{-4}$  -  $10^{-6}$ . Cuando se confrontan varias vías de exposición el límite es de  $10^{-4}$  (una probabilidad más de tumor cada 10.000 individuos expuestos.)

#### 2.5.1 - Estrategia de bonifica basada en el análisis de riesgo

Al aplicar el análisis de riesgo se puede verificar dos situaciones distintas:

- El nivel de riesgo calculado en todos los puntos de exposición y para todos los contaminantes indicados se considera aceptable, en consecuencia no se requiere ningún tipo de intervención, solo una adecuada red de monitoreo es suficiente, con la finalidad de verificar a medio y largo plazo, que las condiciones de riesgo aceptables perduren en el tiempo con los posibles cambios de las condiciones de contorno.
- El nivel de riesgo acumulado supera los estándares de aceptabilidad, consecuentemente es necesario intervenir operativamente en el sitio contaminado. Al momento de reconducir el riesgo dentro del límite de aceptabilidad, es necesario intervenir en uno o más de los siguientes factores:
  - Fuente: Remoción de la contaminación o su inmovilización (inertización, vitrificación, etc.)
  - Vías de exposición: Desactivación de una o más de las vías de exposición mediante diafragmas, coberturas, barreras hidráulicas. etc.
  - Receptores: modificación del uso del suelo.

#### 2.6. La incertidumbre en el análisis de riesgo

La incertidumbre puede ser definida como la falta de conocimiento preciso o desconocimiento de las causas que determinan el comportamiento de un sistema real o de las variables que definen el modelo.

La incertidumbre puede ser clasificada del siguiente modo:

- Incertidumbre en los escenarios: Es la carencia de datos que describen la génesis de la contaminación, influyen sobre la relación fuente – vías de migración-receptores.

La incertidumbre en los escenarios también se puede entender como la falta de información requerida para definir en forma completa el análisis del sistema.

- Incertidumbre en los parámetros: Es la incertidumbre vinculada al tamaño de la muestra y a los factores que intervienen en la modelación de la ecuación de riesgo.

- Incertidumbre en el modelo: Es la incertidumbre intrínseca propia del modelo que esta relacionada a las variables que lo caracterizan y a la cuantificación de sus interacciones. La cuantificación de estos tipos de incertidumbre es fundamental para conocer cuanto confiable son los pronósticos descritos del modelo en el Análisis de Riesgo. Este tipo de incertidumbres pueden ser determinadas mediante la aplicación del método Monte Carlo:

- Métodos para calcular el efecto que producen cambios en los parámetros en el resultado final (Análisis de Sensibilidad).
- Métodos para calcular la incertidumbre resultante del modelo debido a la incertidumbre de los parámetros (Propagación de la Incertidumbre).
- Métodos para estimar la contribución de la incertidumbre de los parámetros de entrada (Análisis de Incertidumbre).

**METODOLOGÍA USADA PARA EL CÁLCULO DEL ANÁLISIS DE RIESGO SANITARIO. CASO DE LA PERTUSOLA - CROTONE- ITALIA.**

En el presente estudio se muestran los resultados de una aplicación de las metodologías determinística y probabilística del riesgo sanitario en un sitio específico. El área de estudio tomada en consideración esta ubicada en la parte periférica norte de Crotone (Calabria -Italia meridional), que corresponde al área de una ex-industria química "Pertusola", actualmente cerrada. Estudios anteriores evidencian la contaminación por metales pesados producto de las actividades industriales anteriormente desarrolladas en el lugar. La aplicación de esta metodología busca definir nuevos objetivos que permitan llevar a cabo acciones de remediación del sitio contaminado basados en criterios racionales, tratando solamente aquellos contaminantes "realmente" peligrosos para la salud humana y de esta manera optimizar los recursos económicos y humanos en la ejecución de los trabajos futuros.

Las fases de caracterización del sitio y definición del modelo conceptual han sido objeto de anteriores investigaciones (Trosi et. Al, 2003, Migliari et., 2004), por tal motivo en el presente estudio describirá solamente el cálculo del riesgo en las fases determinística y probabilística, que son aquellos aspectos donde el estudio intenta entrar con mas fuerza.

El primer paso para iniciar un estudio de análisis de riesgos es la ubicación del punto de exposición y la concentración de los contaminantes en este lugar. En este estudio se ha tomado en consideración el caso más conservativo que es el de hacer coincidir el punto fuente de contaminación y el punto de exposición. Se recuerda que el punto fuente de contaminación es el sitio mismo donde se verificó la contaminación directa; en vista de la coincidencia de los puntos, se descartan

procesos de migración de contaminantes a través de suelo y agua.

Para el caso determinístico la Cpoe considerada es dada de UCL . En el caso probabilístico se calcula la Cpoe para cada contaminante a través de su media y de su desviación estándar de conjunto de datos de contaminación tomados in situ. Los contaminantes analizados son Arsénico, Cadmio y Zinc. Las funciones de distribución de la probabilidad (pdf) asumidas para cada contaminante son de tipo normal y lognormal; la tabla 2 muestra los valores tomados para el cálculo.

El riesgo es calculado desde dos perspectivas, la primera determinística y la segunda probabilística. En el caso determinístico, se calculan los valores típicos y los valores RME mediante los modelos de la Tabla 1. En el caso probabilístico a cada factor input de los modelos se le asigna un pdf descrito por su media y desviación. Los valores tomados para ambos casos determinístico y probabilístico son aquellos dados por la EPA en el Exposure Factors Handbook. Los valores de SF (slope Factor y Reference Dosis) se muestran en la tabla 3. El riesgo tanto tóxico como cancerígeno es adimensional.

Se considera el riesgo total como la suma de riesgos individuales para cada escenario de riesgo y por cada receptor. Los receptores estudiados son: Adultos, Niños y Trabajadores.

La incertidumbre en el modelo de riesgo probabilístico, es calculada desde las propagaciones de los factores input para cada modelo individual (contacto dérmico e ingestión de agua tanto para agua como para suelo) que alimentan los output parciales y estos a su vez propagan la incertidumbre hasta al output final o riesgo total, tanto tóxico como cancerígenos, considerando la propiedad aditiva del riesgo.

Tabla 2. Valores de concentraciones tomadas para el cálculo del riesgo. (Values of the concentration used to evaluate probabilistic risk)

	As		Cd		Zn	
	AGUA	SUELO	AGUA	SUELO	AGUA	SUELO
Distribución	Normal	Lognormal	Normal	Lognormal	Lognormal	Lognormal
Media	1.80E-03	2.08E+02	5.10E-02	2.34E+02	3.06E+00	1.48E+04
Desviación Standard	1.20E-03	3.07E+02	1.01E-01	6.02E+02	8.39E+00	3.17E+04
Valor UCL	2.25E-03	3.94E+02	1.07E+00	3.01E+02	8.28E+00	1.85E+04

Tabla 3: Valores de SF (slope factor) y RfD (Reference Dosis) para As,Cd,Zn (Values of slope factor- SF and Reference Dosis- RfD for As,Cd,Zn)

	Unidades	As	Cd	Zn
SF Ingestión	(1/(mg/kg-día))	1.5	ND	ND
RfD Ingestión	(mg/kg-día)	3.00E-4	5.00E-4	0.30
SF Contacto Dérmico	(1/(mg/kg-día))	1.5	ND	ND
RfD Contacto Dérmico	(mg/kg-día)	3.00E-4	5.00E-4	0.30

ND. No determinado



Figura 3. Distribución de la concentración de As, Cd, Zn (de izquierda a derecha) en el estrato de suelo comprendido entre 1 y 3 m (Distribution of As, Cd, Zn concentration ( from left to right) in the layer between 1 and 3 m)

Fuente: Ufficio Commissario Emergenza Rifiuti in Calabria

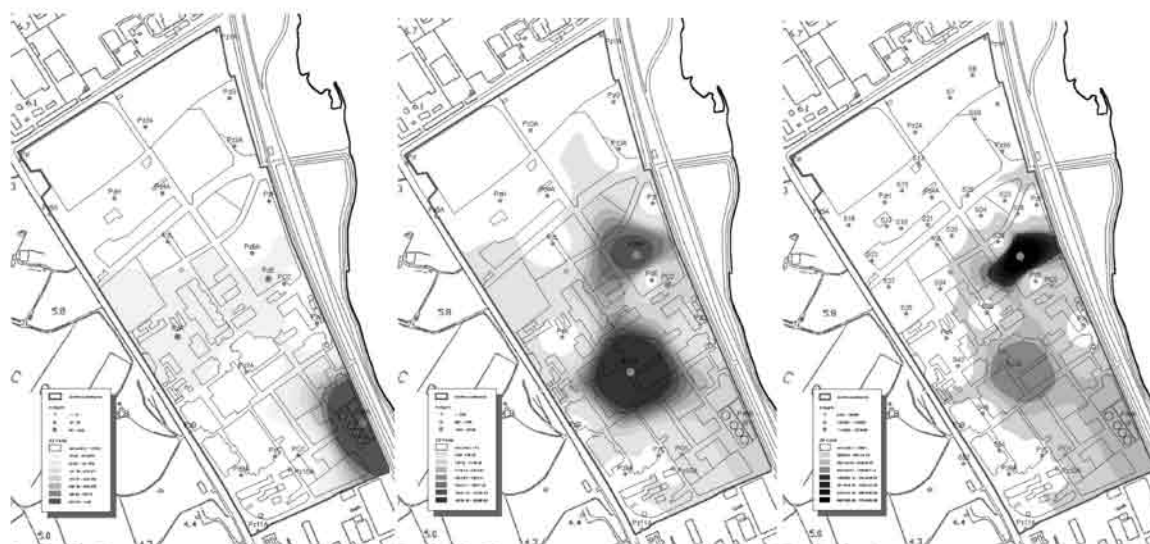


Figura 4. Distribución de la concentración de As, Cd, Zn (de izquierda a derecha) en el acuífero (Distribution of As, Cd and Zn concentration (from left to right) in the groundwater)

Fuente: Ufficio Commissario Emergenza Rifiuti in Calabria

#### DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO LA PERTUSOLA DE CROTONE.

El sitio en análisis es ex-zona industrial de Crotona conocida como la Pertusola Sud. Se presume que el asentamiento de la zona industrial y consecuentemente las actividades en este lugar comenzaron a principios de los 900 por iniciativa de los mayores grupos que desarrollaban la industria química nacional en ese entonces. Las actividades industriales que se generaron en la zona jugaron un rol importante en el desarrollo económico de la Calabria y de Italia en general.

Las producciones más relevantes fueron, Zinc, Cobre, Cadmio y otros metales producidos hasta 1998,

año en el cual la planta industrial cerró, y el lugar fue abandonado. Por primera vez en el año 2000 se estudio los efectos causados luego de la vida productiva de la industria, que sacó a la luz la presencia de una elevada concentración de metales pesados (As, Cd, Cu, Hg, Pb, Zn) en el suelo, en el subsuelo y a su vez por procesos de infiltración y escorrentía en el acuífero.

En el año 2006 se hace un nuevo estudio con un enfoque más amplio e integral a pedido del Ministerio del Ambiente Italiano. Los resultados obtenidos en este estudio corroboran el cuadro contaminativo anterior, si bien con una cierta tendencia al decremento en los niveles de contaminación en particular de Hg.

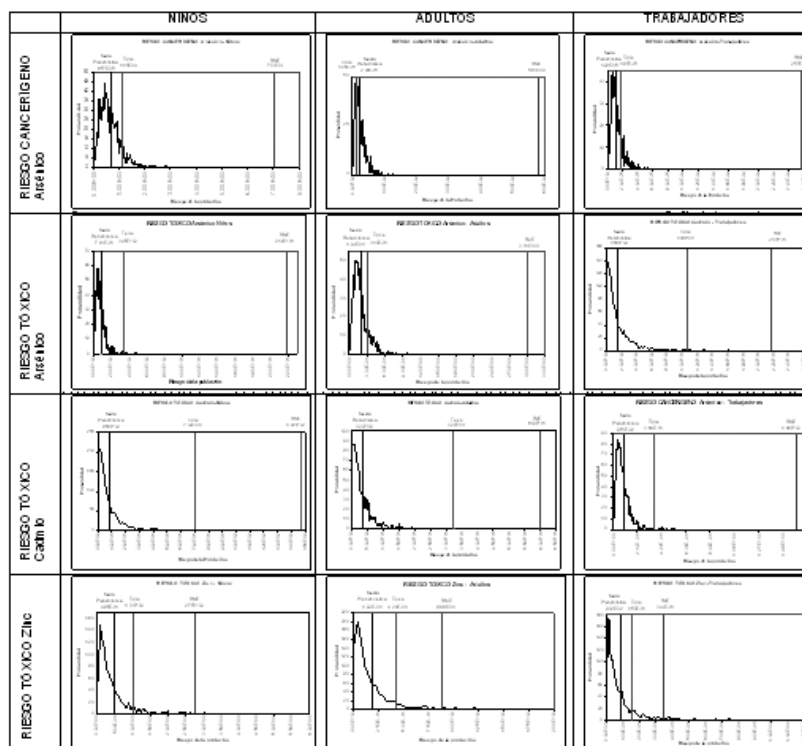


Figura. 5. Confronto de los valores de riesgo probabilístico y determinístico (MLE y RME).  
(Comparison of values in the probabilistic and deterministic risk)

En puntos muestreados estratégicamente se encontró significativas evidencias de lixiviación de Cd y Zn a través del suelo hasta alcanzar el acuífero. Para mayor detalle del estado de contaminación de suelo y de agua en el sitio véase Troisi et. Al, 2003 e Migliari et., 2004.

El presente análisis toma en consideración datos de contaminación de As, Cd y Zn muestreados 2006 en suelo y agua. Las Figuras 3 y 4. muestran la distribución de la concentración de los contaminantes en el suelo y agua. Las vías de exposición consideradas han sido el contacto dérmico y la ingestión tanto para agua y suelo y han sido analizadas desde tres puntos de vista: RME (Reasonable Maximum Exposure), MLE (Most Likely Exposure) y riesgo calculado probabilísticamente. Los receptores considerados son: adultos, niños, trabajadores

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Como se evidencia en los gráficos de la Fig 5 y en los valores de la tabla 4, resultados del estudio de análisis de riesgo en el caso "Pertusola Crotona"; los niveles de riesgo con algunas raras excepciones, se muestran "no aceptables" cuando son sometidos al confronto de los criterios internacionales, los cuales han fijado a  $10^{-5}$  el límite aceptable para el riesgo cancerígeno y 1.0 para el riesgo tóxico siendo estos valores adimensionales.

Al hablar de riesgo cancerígeno, es importante recordar que se hace referencia solamente al contaminante As. Considerando el valor límite de  $10^{-5}$  antes mencionado, resulta evidente que para ningún caso (Adultos, Niños y Trabajadores) los niveles de riesgo son aceptables, sea analizándolos con el método deter-

minístico o sea con el método probabilístico.

Cd y Zn no son considerados compuestos cancerígenos.

Al hablar de riesgo tóxico, recordando que el valor límite es 1.0 como se ha mencionado anteriormente, resulta en la mayor parte de los casos el riesgo "no aceptable". En particular para el receptor NIÑO, el límite de riesgo viene superado en todos los casos analizados determinísticamente, sin embargo, al analizar este mismo caso con el método probabilístico, se pasa de los límites de "no aceptabilidad" dados por el cálculo determinístico (RME y/o MLE), a un valor medio de riesgo sensible inferior a 1.0 y por los tanto "aceptable".

Cuando se analiza el riesgo tóxico asociado al Zn para los receptores ADULTO y TRABAJADOR, el riesgo se muestra "aceptable", sea evaluándolo determinísticamente basados en los criterios de tipo RME y/o MLE, sea haciendo referencia al valor medio de la distribución probabilística por medio de una generación random.

En el caso del riesgo tóxico producido por el arsénico, sea para el receptor ADULTO, sea para el receptor TRABAJADOR, los valores de riesgo se muestran "no aceptables" cuando se los evalúa a través de los valores de referencia de tipo RME; en cambio si el cálculo para los mismos receptores es hecho con los valores de referencia de tipo MLE, o haciendo referencia al valor medio probabilístico el riesgo toma una característica de "aceptabilidad".

El riesgo tóxico asociado al Cd, es siempre superior al límite de "aceptabilidad", para todos los receptores.

Tabla 4 . Esquema de Aceptabilidad del riesgo.  
(Scheme Acceptability of risk)

CALCULO DETERMINISTICO			CALCULO PROBABILISTICO		
TIPICO		RME			
As	1,26E-05	As	5,81E-04	As	2,41E-05
Cd	0	Cd	0	Cd	0
Zn	0	Zn	0	Zn	0
Cancerogenico					
As	1,11E-04	As	7,03E-04	As	6,57E-05
Cd	0	Cd	0	Cd	0
Zn	0	Zn	0	Zn	0
TRABAJAD ORES					
As	1,87E-05	As	2,57E-04	As	1,22E-05
Cd	0	Cd	0	Cd	0
Zn	0	Zn	0	Zn	0
ADULTOS					
As	2,18E-01	As	3,01E+00	As	0,194
Cd	32,36578	Cd	60,04127	Cd	3,22
Zn	0,420666	Zn	0,887528	Zn	0,193
TRABAJAD ORES					
ADULTOS					
Tóxico					
As	3,450251	As	21,87991	As	0,781
Cd	70,02241	Cd	146,9047	Cd	8,5
Zn	1,032526	Zn	2,767836	Zn	0,485
TRABAJAD ORES					
As	0,364225	As	1,601954	As	0,0953
Cd	10,63963	Cd	21,68029	Cd	1,56
Zn	0,150349	Zn	0,341681	Zn	0,0902

Es interesante notar como en el cálculo probabilístico produzca en cada uno de los casos una reducción de riesgo esperado. En particular, si se confronta el valor medio de la distribución del riesgo con el valor obtenido con el método determinístico a través de los factores de exposición del tipo RME, el cual se encuentra siempre en la extremidad de la cola de la distribución, se nota claramente la reducción del riesgo en el cálculo probabilístico de por lo menos un orden de magnitud con respecto a los valores obtenidos de tipo RME.

La tabla 4 mostrada a continuación provee un cuadro sinóptico que resume la aceptabilidad del riesgo calculado en cada uno de los casos.

**CONCLUSIONES**

El análisis de Riesgos no proporciona una fórmula para tratar la problemática de riesgos. No soluciona las complicadas soluciones políticas y sociales que se tienen que hacer en la toma de decisiones sobre riesgos. Lo que si mejora es la capacidad de los científicos y tomadores de decisiones en la identificación, evaluación, control y reducción de los riesgos asociados a las actividades del hombre. (Peña, 2001)

Al confrontar los resultados obtenidos a través de método determinístico (MLE y RME) y del método probabilístico es evidente que una de las mayores limitaciones del cálculo determinístico del riesgo sanitario es la sobrestima del riesgo, en vista que los valores que entran el juego para el cálculo de estos dos puntos tienen características conservativas, que por una parte da

valores no reales de riesgo y por otra conduce a no razonables objetivos de bonifica. El riesgo calculado desde un enfoque probabilístico permite caracterizar con mayor complejidad el riesgo, da mayores indicaciones de incertidumbre y el grado de cautela reflejada en los resultados finales que se evidencia en la reducción de los valores de riesgo. Si se confronta los resultados obtenidos a través el método probabilístico y determinístico siendo sus valores de referencia MLE, RME y el valor medio de la distribución se tiene: 1) MLE vs valor medio de la distribución, valores muy cercanos que no difieren mayormente como orden de magnitud. 2) RME vs el valor medio de la distribución, las distancias se agrandan existiendo como diferencia por lo menos un orden de magnitud. El valor RME se encuentra generalmente en la cola de la distribución.

El análisis de riesgo pretende ser una herramienta de decisión “inteligente” para la toma de decisiones llevado con un sentido de transparencia y responsabilidad; y de ninguna manera se deberá considerar una potencial herramienta de “indiscriminada e incontrolada utilización” donde los valores objetivos de remediación sean manipulados de tal manera que los vuelvan inseguros y peligrosos. Los valores utilizados para análisis de riesgos deben en todos los casos ser normados por el ente de control en cada país, de esta manera evitar interpretaciones irresponsables.

**REFERENCIAS**

Camerini, H.; Pozzi, C.; Uguccini, D.; Boromo, L., Siti Contaminati: Indagini, Analisi di rischio e tecniche di Bonifica. En 51 Corso di aggiornamento in Ingegneria Sanitaria – Ambientale. P. 427-446, 2000.

Peña, C. Dean, C. Ayala, F. 2001. Toxicología Ambiental: Evaluación de Riesgos y Restauración Ambiental. Distributed on the Internet via the Southwest Hazardous Waste Program website at <http://superfund.pharmacy.arizona.edu/toxamb/>.

U.S. Environmental Protection Agency (EPA). Risk Assessment Guidance for Superfund Volume I Human Health Evaluation Manual (Part A), 2007. Office of superfund and technology innovation.

Troisi S., Migliari E., Straface S. Aspetti modellistici della contaminazione da metalli pesanti: il caso Pertusola, Siti contaminati, V. 3/2003, pp 82-105, 2003

Migliari E., Ruga F., Straface S., Troisi S. Efficacia di un intervento di fitoestrazione combinato con PRB per la rimozione dei metalli pesanti, Siti contaminati, v. 4/2004, pp 46-69, 2004



# HIDROQUÍMICA DEL ACUÍFERO LIBRE EN EL ÁREA INDUSTRIAL COSTERA DE BAHÍA BLANCA

Daniela Lafont; René Albouy; Jorge Carrica y Guillermo Bonorino

Universidad Nacional del Sur, Departamento de Geología, Hidrogeología. San Juan 670, 8000 Bahía Blanca, provincia de Buenos Aires, Argentina. Tel: (0291) 4595101 int. 3015. E-mail: dlafont@uns.edu.ar

**Resumen:** El desarrollo industrial de la zona costera de Bahía Blanca, iniciado a principios del siglo XX, e intensificado en los últimos años con la implantación del polo petroquímico e industrial, introdujo modificaciones en el funcionamiento del sistema hidrológico. En particular, el flujo subterráneo local que presentaba su nivel de descarga natural en el mar, ha sido sustancialmente modificado debido a la presencia de rellenos artificiales del suelo y la construcción de zanjas de drenaje. La investigación hidrogeológica, hidrodinámica e hidroquímica, llevada a cabo en el área, ha permitido establecer relaciones hidrológicas peculiares. En este sentido, se analizan las características hidrogeoquímicas que imperan bajo las actuales condiciones del sistema acuífero y su evolución espacio-temporal. Se realiza además un análisis de la presencia de algunos elementos traza e hidrocarburos totales de petróleo en el agua subterránea y su distribución areal. Metodológicamente se utilizan técnicas clásicas de estudio, complementadas con el empleo de un software específico de análisis y graficado de datos. Se concluye que las características hidroquímicas del agua subterránea son producto, tanto de las condiciones litológicas e hidrodinámicas naturales del acuífero, como también de las notorias modificaciones y actividades antrópicas introducidas en el sistema. Si bien las aguas del acuífero freático son hipersalinas y sólo aptas para usos recreativos, la potencial contaminación de las mismas, constituiría una amenaza a todo el ecosistema marino local, destino final del escurrimiento superficial y subterráneo del sector.

**Palabras claves:** acuífero costero, hidroquímica, contaminación.

**Abstract:** The industrial development of Bahía Blanca coastal area has introduced changes in the natural hydrological system. The local underground flow has been substantially modified by soil fills and drainage ditches. The hydrologic, hydrodynamic and hydrochemical studies carried out in the zone has allowed to establish peculiar hydrological relationships. In this paper the hydrogeochemical characteristics of groundwater and their space-time evolution are analyzed. The presence of some trace elements and total petroleum hydrocarbons in the aquifer and their areal distribution are also studied. Classic study techniques and a specific software of data analysis and plotting are used. It is concluded that the hydrochemistry of the groundwater is controlled by the natural lithological and hydrodynamic characteristics of the aquifer and the anthropogenic modifications introduced into the system. Although the waters of the phreatic aquifer are hypersalines and only apt for recreational uses, potential contamination of the aquifer, certainly would affect the local marine ecosystem owing to this one receives the surface and ground water flows.

**Keywords:** coastal aquifer, hydrochemistry, contamination.

## INTRODUCCIÓN

El desarrollo industrial del área costera de Bahía Blanca que incluye el puerto de Ingeniero White ha introducido modificaciones en el medio natural. Particularmente la presencia de rellenos artificiales de suelo y zanjas de drenaje, han cambiado las condiciones hidrológicas originales del sector. En este trabajo se analizan las características hidrogeoquímicas del agua subterránea, existentes en las actuales condiciones hidrodinámicas del sistema. También se estudian las concentraciones de metales traza e hidrocarburos, a fin de determinar la presencia de contaminación en el acuífero, y su probable vinculación con los diferentes procesos industriales que se desarrollan en el sector.

## ÁREA DE ESTUDIO Y GENERALIDADES DEL MEDIO FÍSICO

El área de trabajo, de aproximadamente 80 hectáreas, se sitúa a unos 8 km al sur de la ciudad de Bahía Blanca y limita al noreste y sureste con la ciudad de Ingeniero White y al oeste y sur con el estuario de Bahía Blanca. La misma abarca los predios de las plantas del polo petroquímico y algunos sitios que aún conservan sus condiciones naturales (Figura 1).

El clima de la zona es de transición entre el de la Pampa húmeda y el estepario de la Patagonia. La precipitación media anual (período 1860-2000) es de 555 mm. (Caló et al., 2004).

Los suelos y la vegetación natural del lugar han sido disturbados por actividades antrópicas y sólo se conservan en sectores aislados. Consisten en suelos de escaso desarrollo, mal drenados, alcalinos y salinos, con bajos contenidos de materia orgánica; se clasifican como Acuisalid típico de acuerdo a la Soil Taxonomy

(USDA, 2003).

En las áreas modificadas antrópicamente se observan rellenos artificiales, entre 1 y 4 m de espesor, compuestos por una mezcla de arena y limo con fragmentos de tosca (sedimentos pampeanos) y arenas de refulado provenientes del dragado del estuario.

## Geología y geomorfología

Desde el punto de vista geomorfológico, el área de estudio se enmarca dentro de una plataforma de abrasión marina elaborada sobre sedimentos Plio-Pleistocénicos por las últimas ingresiones del Holoceno (Sala et al., 1985). Dicha área actualmente se vincula con una zona costera, llana, de escasa pendiente, 2 a 3 por mil, elevada unos 4 m sobre el nivel del mar.

Hidrológicamente el lugar se encuentra en una zona de interfluvio de la cuenca del arroyo Napostá Grande sin una red de drenaje superficial claramente definida.

Estas características y la escasa profundidad del nivel freático generan frecuentes anegamientos en los sectores que todavía conservan sus condiciones naturales; a fin de drenar el área se ha construido una red de zanjas de poca profundidad.

El subsuelo de la zona de estudio se encuentra constituido por los limos loessoides o sedimentos pampeanos (Fidalgo et al., 1975) del Plioceno Medio a Superior, que subyacen a los depósitos costeros pospleistocénicos de la Formación Maldonado (Fidalgo, 1983). Los primeros tienen una amplia distribución regional y un espesor de aproximadamente 200 m. Se trata de limos arenosos pardo-rojizos cementados con carbonato de calcio, que a partir de la cota de 10 m afloran o están cubiertos por suelos de poco espesor.

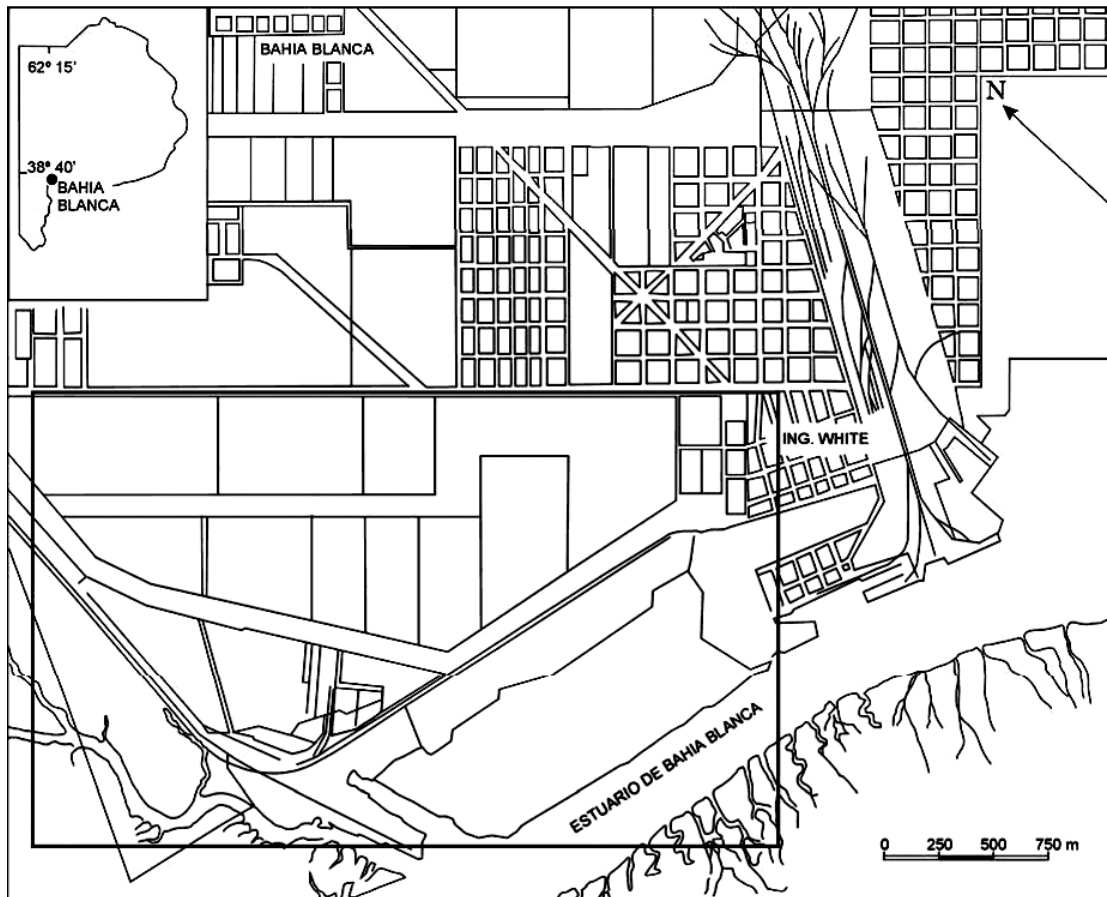


Figura 1: Área de estudio

Los sedimentos de la Formación Maldonado, yacen en discordancia erosiva sobre los limos loessoides, o sus productos de erosión y afloran o están cubiertos por una delgada capa de suelo vegetal. Hacia el norte, se acuñan sobre los depósitos pampeanos, y hacia el sur continúan por debajo del nivel del mar. Perforaciones realizadas en el lugar de estudio registran espesores de hasta 10 m aunque se citan máximos de hasta 15 m. Esta unidad, constituye una típica facies granodecreciente, con arenas oscuras en la base, que pasan gradualmente a limos arenosos, limos arcillosos y arcillas limosas. Corresponden a depósitos de albúferas y marismas costeros conocidos vulgarmente como “cangrejalos” (Fidalgo, 1983). Mineralógicamente, los términos más finos están compuestos por una asociación de arcillas expandibles del grupo de las esmectitas donde predominan interstratificados de montmorillonita-illita y aparecen illita y clorita subordinadas. Como minerales no arcillosos se observa cuarzo, feldespato y calcita. En las arenas predominan minerales alterados, plagioclasas, cuarzo, litoclastos volcánicos y magnetita y aparecen en escasa cantidad augita, hipersteno, apatito, vidrio volcánico y fitolitos.

#### Hidrogeología

Desde el punto de vista hidrogeológico se distinguen dos secciones:

*Sección hidrogeológica Pampeana:* está constituida

por los sedimentos predominantemente limosos de la Formación Pampeana. Los procesos que los originaron, generan anisotropías hidrolíticas que dan lugar a una alternancia de niveles acuíferos-acuitados, aunque regionalmente se comportan como un sistema único, más o menos homogéneo. La presencia de macroporos, microfisuras, y canaliculos, conforman una porosidad secundaria muy significativa que aumenta la permeabilidad de este material.

*Sección hidrogeológica Pospampeana:* se encuentra constituida por los sedimentos de la Formación Maldonado y los suelos actuales. El nivel inferior de esta sección está representado por arenas de buena conductividad hidráulica, que gradualmente pasan hacia arriba a sedimentos predominantemente arcillosos. Desde el punto de vista del funcionamiento global se pueden considerar como un sistema continuo de transmisión de agua.

#### Régimen hidrodinámico

El flujo subterráneo local, que presentaba su nivel de descarga natural en el mar, fue modificado, principalmente, por la implantación de rellenos artificiales del suelo y la construcción de zanjas de drenaje. Actualmente, en el mapa de isopiezas se observan domos con flujos divergentes, generados por una recarga preferencial y áreas de descarga del flujo local del acuífero, en las zanjas que desaguan en el estuario. La

acción antrópica ha ocasionado un aumento de los gradientes hidráulicos y ha disminuido considerablemente el tiempo de llegada de un contaminante hipotético al mar (Carrica et al, 2003).

El balance hidrológico modular del área aparece como deficitario, aunque se comprueba un importante volumen de recarga, verificable durante casi todo el año. Este hecho está relacionado con la porosidad secundaria de los sedimentos arcillosos de la Formación Maldonado y la presencia de materiales de relleno que favorecen la infiltración del agua.

La presencia de arcillas en superficie y la escasa o a veces nula profundidad del nivel freático, favorecen la transferencia del agua por ascenso capilar, potenciando la evapotranspiración. Otro proceso significativo es la descarga areal difusa que se verifica en las zonas bajas, comúnmente anegadas, que conservan sus características naturales.

## EVALUACIÓN HIDROQUÍMICA DEL ACUÍFERO LIBRE

### Metodología

Para llevar a cabo el estudio se muestrearon 22 pozos someros, emplazados en la Formación Maldonado. Por tal motivo se utilizó un muestreador tipo bailer y las muestras de agua fueron almacenadas en envases de plástico de 250 mL de capacidad. En todos los casos se determinaron in situ: pH, conductividad eléctrica, turbidez y temperatura. Estas mediciones se realizaron mediante un equipo Horiba y un pHímetro Cole Parmer. Además, con una electrobomba sumergible, se muestrearon 3 pozos de 15 m de profundidad, que alcanzan el término superior de los sedimentos pampeanos, y uno de 25 m emplazado en los materiales subyacentes.

Los análisis químicos fueron realizados en ACME (Analytical Laboratories Ltd., Canadá) mediante ICP-MS (Inductively Couple Plasma Mass Spectrometry). En el Laboratorio de Química Ambiental de la UNS se determinaron las concentraciones de bicarbonatos con un titulador Metrohm Herisau Multi-Dosimat E 415 utilizando HCl 0.0200 M y sulfatos por medio del SPECTRONIC 20+ Spectronic Instruments  $\lambda = 420$ . Los análisis de hidrocarburos totales de petróleo (HTP) se llevaron a cabo con la técnica SM (Standar Method) 5520 B y F.

Para realizar el procesamiento de los datos se utilizó el programa AquaChem v. 5.0. (Waterloo Hydrogeologic, Inc., 2005). El mismo incluyó: balance de aniones y cationes, clasificación de los distintos tipos de agua según iones mayoritarios y estudio de los principales índices hidrogeoquímicos. Complementariamente, se representaron las características químicas del agua mediante el diagrama triangular de Piper. Además se analizaron y volcaron en mapas hidroquímicos los metales pesados analizados junto con los HTP, a fin de estudiar la distribución areal de los mismos y su concentración en los diferentes niveles que conforman el acuífero.

## Resultados y discusión

La primera caracterización hidroquímica general del área fue realizada por Bonorino y Sala (1983). En este trabajo se hace referencia a una zonación salina atribuible a la predominancia de los movimientos verticales del agua (infiltración y evaporación) sobre el flujo subterráneo horizontal. En un estudio posterior, Sala et al. (1985) indican que los condicionantes de la salinidad del agua subterránea, son la baja velocidad del flujo en cercanías de áreas de descarga, la elevada evaporación y consecuentemente precipitación y disolución de sales. Además, se menciona la modificación de la hidrodinámica y calidad del agua subterránea, debido a la presencia de rellenos artificiales.

La Figura 2 muestra la composición química de las aguas correspondientes a las Formaciones Maldonado y Pampeano. En el mismo gráfico también se han volcado, a modo de referencia, los análisis químicos del agua de lluvia en Bahía Blanca, del agua del estuario y del acueducto que abastece de agua a la ciudad y a las industrias.

En general la conductividad eléctrica del agua de los niveles arcilloso y arenoso de la Formación Maldonado, en condiciones naturales, varía entre 45.000 y 75.000  $\Gamma S/cm$ . Son del tipo cloruradas sódicas o cloruradas sulfatadas sódicas (Figura 2a). Presentan una relación  $rMg/rCa$  entre 2,4 y 6 por lo que se infiere una mezcla con agua de mar contenida en los sedimentos de origen marino.

Los lugares con rellenos artificiales contienen aguas menos salinas, con conductividades entre 1.400 y 30.500  $\Gamma S/cm$  que evidencian la probable mezcla con aguas de menor salinidad, producto de recarga con agua de lluvia, por riego de parques o pérdidas de cañerías. Hidroquímicamente corresponden a facies clorurada sódica y clorurada bicarbonatada sódica (Figura 2a). Los índices  $rMg/rCa$  y  $rCl/rHCO_3$  confirman los fenómenos de mezcla anteriormente comentados, con valores menores a 1,5 y 5 respectivamente.

El agua subterránea del techo de la formación de los sedimentos pampeanos, presenta conductividades entre 40.185 y 82.197  $\Gamma S/cm$  y es clorurada sódica o clorurada sulfatada sódica (Figura 2b). Las relaciones  $rMg/rCa$ , con valores próximos a 5 y  $rCl/rHCO_3$  superiores a 100, indican circulación por terrenos de origen marino, lo que se vincula, probablemente, a la erosión y redepositación de aquellos sedimentos durante la ingresión pleistocénica. En el material loésico subyacente se observa una conductividad de 29.167  $\Gamma S/cm$  y un agua de tipo clorurada sódica (Figura 2b) con una relación  $rMg/rCa$  de 2. La información antecedente, de análisis químicos del agua alojada en estos sedimentos, indica valores de conductividad menores (en general hasta 5000  $\Gamma S/cm$ ) y relaciones  $rMg/rCa$  inferiores a 1,5. Por lo dicho, los valores determinados en el presente trabajo, evidenciarían una mezcla, entre el agua alojada en los sedimentos pampeanos con la de los materiales suprayacentes. Dicha mezcla probablemente tuvo lugar durante el bombeo para la limpieza del pozo de estudio y la toma de la muestra de agua.

**Metales pesados en el agua subterránea**

Los metales pesados se consideran elementos traza, es decir que aparecen en el agua, en concentraciones más bajas que 1000 ppb (Freeze and Cherry, 1979; Drever, 1982; Hem, 1989). Su origen se asocia a la meteorización de los materiales de la corteza terrestre y/o a la contaminación industrial u otras actividades humanas.

En este apartado se analizan las concentraciones de Ag, Cd, Cr, Hg, Mn, Ni, Pb, Sb, Se, U, y Zn medidas en el agua subterránea del área estudiada. Para establecer la importancia del impacto de estos metales se consideraron los niveles guía de calidad de agua para protección de vida acuática, según el Decreto 831/93, de la Ley Nacional 24.051. Teniendo en cuenta que el estuario constituye el nivel de descarga de los escurrimientos superficial y subterráneo, se tomaron los límites consignados para cuerpos de agua salada. En los casos del Cr, Sb y Mn se contrastaron con los de descarga a cuerpos de agua dulce. Los valores estándar para fuentes de bebida humana no se consideraron, debido a que la salinidad natural del agua la imposibilita para ese uso. En la Tabla 1 se consignan las concentraciones máxima y mínima de metales detectados en el agua subterránea y los niveles guía recomendados.

De acuerdo con esta distribución se observa que: *Cadmio (Cd)* y *Mercurio (Hg)*: las concentraciones de estos metales se encuentran por debajo de los límites de detección y no alcanzan los niveles guía. *Antimonio (Sb)* y *Uranio (U)*: en todos los casos los tenores están por debajo del nivel guía. *Manganeso (Mn)*, *Selenio*

(*Se*) y *Cromo (Cr)*: aparecen valores superiores al nivel guía en el agua de la Formación Maldonado y también de Mn y Se en los sedimentos pampeanos. En la Figura 3 se muestra la distribución espacial de las concentraciones de estos metales; como puede apreciarse, se detectaron valores de hasta 1019 ppb de Se, 6353 ppb de Mn y 145,10 ppb de Cr. *Plata (Ag)*, *Níquel (Ni)*, *Plomo (Pb)* y *Cinc (Zn)*: en 5 pozos que alcanzan los niveles de agua en las arcillas, arenas y sedimentos pampeanos redepositados, se detectan concentraciones de Ag superiores al límite establecido por la legislación; los tenores fluctúan entre 6 y 27 ppb. En los mismos niveles, se observan puntualmente, altas concentraciones de Ni, Pb y Zn, que superan el valor recomendado.

A fin de analizar la fuente de metales pesados encontrados en el agua subterránea, se tiene en cuenta la concentración de éstos en el agua de mar (Hem, 1989) y en un agua subterránea de origen continental fuera del área de trabajo (paraje Los Mirasoles). Como se aprecia en la Tabla 2, las concentraciones en el agua de mar no son significativas en relación a los valores medidos en el acuífero de la Formación Maldonado y en el Pampeano redepositado. En tal sentido, se asume que los elevados tenores de metales provienen de una fuente externa ya que, dado el contenido mineralógico de dichas formaciones, no es posible esperar un aporte importante de elementos traza a partir de su lixiviación natural. Por lo tanto, la variabilidad espacial y altas concentraciones observadas parecen indicar una contaminación antrópica que incorpora al acuífero Mn, Se, Cr, Ag, Ni, Pb y Zn.

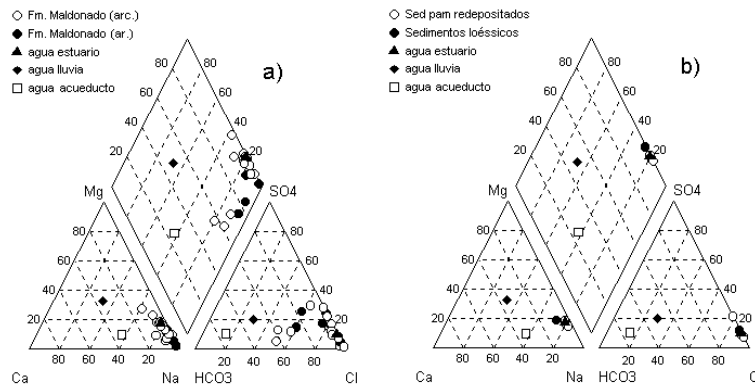


Figura 2: Diagramas triangulares de Piper

Tabla 1. Concentraciones de metales y niveles guía de calidad del agua.

Muestras de agua subterránea	Valores (ppb)	Metal										
		Ag (5)	Cd (5)	Cr (2)	Hg (0.1)	Mn (100)	Ni (7.1)	Pb (10)	Sb (16)	Se (10)	U (500)	Zn (0.2)
Fm. Maldonado (arcillas)	máximo	6.36	<0.05	145.10	<0.1	6353.27	76.00	26.40	4.25	873.40	55.06	72.80
	mínimo	<0.05		<0.5		<0.05	<0.2	<0.1	<0.05	5.50	2.32	<0.5
Fm. Maldonado (arenas)	máximo	7.43	<0.05	101.30	<0.1	3566.84	6.60	<0.1	<0.05	811.40	19.18	<0.5
	mínimo	<0.05		<0.5		<0.05	<0.2		<0.05	<0.5	<0.02	
Sedimentos loésicos	máximo	27.41	<0.05	<0.5	<0.1	4108.59	<0.2	<0.1	<0.05	1019.90	5.74	75.80
	mínimo	<0.05				175.69				201.40	2.11	<0.5

<0.5: límite de detección en ppb

(100): valor del nivel guía de calidad de agua en ppb



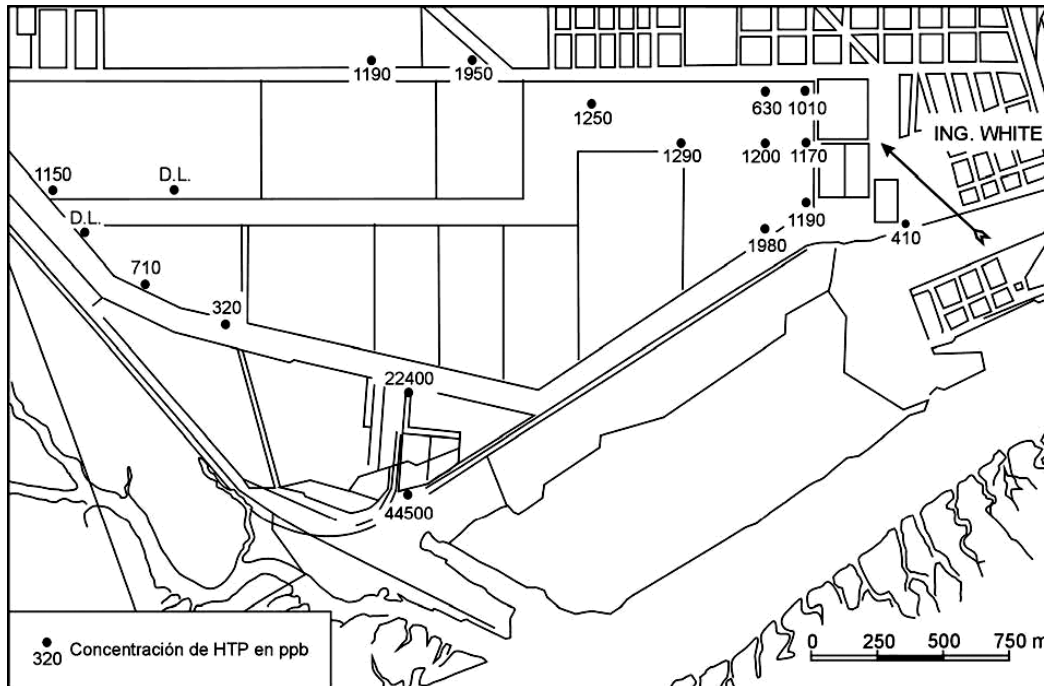


Figura 4: Concentraciones de HTP en el agua subterránea de las arcillas de la Fm. Maldonado

arrojados en forma furtiva, han sido observados en el lugar de trabajo. Eventualmente estos desechos pueden lixiviar y aportar Zn y otros metales al medio natural.

Por último, las altas concentraciones de plomo encontradas en dos pozos someros, se encuentran en cercanías de donde existía una planta que refinaba combustible y otra que tenía depósitos de combustible de gran porte.

Hidrocarburos totales de petróleo (HTP) en el agua subterránea.

En este ítem se analizan los contenidos en HTP de 18 muestras de agua, correspondientes a pozos someros emplazados en las arcillas. Como referencia se tuvo en cuenta el límite establecido para la calidad de agua de recreación, según el Decreto 831/93, de la Ley Nacional 24.051, ya que no existen niveles guías taxativos con respecto a los otros usos.

Se comprobó que 16 pozos presentan concentraciones por encima del nivel permitido (300 ppb) y 2 de ellos, exceden ampliamente este valor, registrando valores de 22400 y 44500 ppb (Figura 4). Los mismos se sitúan en inmediaciones de plantas de depósitos de combustibles, donde se descubrieron lentes de hidrocarburos soterrados.

## CONCLUSIONES

El área de estudio muestra una complejidad hidroquímica derivada de la concurrencia de factores naturales y antrópicos. Dentro de la sección hidrogeológica Pospampeana la recarga natural o inducida por riego o pérdidas de acueductos genera una zonación hidroquímica, especialmente en los sectores con relleno artificial.

En términos de concentración y distribución, el metal contaminante del agua subterránea más importante es el Se, le siguen el Mn y Cr. Con una reparti-

ción más aislada aparecen el Zn, Ag, Pb y Ni. Dichos metales están asociados espacialmente con la actividad industrial de diverso género y, en otros casos, antiguas refinerías y depósitos de hidrocarburos hoy ya desaparecidos.

Sin embargo, son los hidrocarburos totales los más difundidos ya que, no sólo están en los mismos lugares vinculados a los metales sino que, también aparecen en sitios naturales o sin actividad antrópica visible.

Tanto el agua contenida en la Formación Maldonado del nivel superior (arcilloso), como la del inferior (arenoso) y el término superior del Pampeano (redepositado) aparecen contaminadas con algunos metales pesados de origen incierto.

## REFERENCIAS

Bonorino A. G. y J. M. Sala, 1983. Capítulo: Geohidrología. Comisión Estudio de Suelos White-Cerri. MOP de la Provincia de Buenos Aires. Informe Final. La Plata.

Carrica, J., R. Albouy y G. Bonorino, 2003. Modificaciones hidrodinámicas en el acuífero costero del área industrial de Bahía Blanca. III Congreso Argentino de Hidrogeología, Tomo I :113-122. Rosario, Argentina.

Caló, J., E. Fernández, A. Marcos y M. Sequeira, 2004. Medidas de mitigación de los impactos ambientales producidos por lluvias intensas en la ciudad de Bahía Blanca. SINERGIA 2004. VIII Simposio de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Medio Ambiente. ASAGAI. Córdoba, Argentina.

Drever, J. I., 1982. The Geochemistry of natural waters.

Prentice Hall. 388 pp.

Fidalgo F., F. de Francesco y R. Pascual, 1975. Geología superficial de la llanura bonaerense. VI Congreso Geológico Argentino. Bahía Blanca. Relatorio: 103-138.

Fidalgo F., 1983. Geología y Geomorfología del área de White-Cerri y los alrededores de Bahía Blanca. Comisión Estudio de Suelos White-Cerri. MOP de la Provincia de Buenos Aires. Informe Final. La Plata.

Freeze, A. R. and J. A. Cherry, 1979. Groundwater. Prentice Hall. 604 pp.

Hem, D. J., 1989. Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water. Third Edition. U. S. Geological Survey Water Supply. Paper 2254. 263 pp.

Sala, J. M., A. G. Bonorino y J. C. Carrica, 1985. Aspectos hidroquímicos del acuífero libre en los alrededores de Ingeniero White, provincia de Buenos Aires. Primeras Jornadas Geológicas Bonaerenses. Tandil. Actas: 505-524.

USDA (United States Department of Agriculture), 2003. Keys to Soil Taxonomy. Natural Resources Conservation Service (NRCS). Ninth Edition, 332 pp.

Waterloo Hydrogeologic, Inc., 2005. AQUACHEM V. 5.0. Water Quality Data Analysis, Plotting and Modeling.



# EL SISTEMA ACUÍFERO GUARANÍ EN LA TRIPLE FRONTERA SUR

Montaño J <sup>(1)</sup>; Gagliardi S <sup>(2)</sup>; Montaño M <sup>(2)</sup>; Decoud P <sup>(3)</sup>;

<sup>(1)</sup> Facultad de Ciencias, Universidad de la República montanox@movinet.com.uy

<sup>(2)</sup> GeoAmbiente SRL (info@geoambiente-uruguay.com)

<sup>(3)</sup> Obras Sanitarias del Estado (OSE)

**Resumen:** El Sistema Acuífero Guaraní (SAG) es un acuífero transfronterizo compartido por cuatro Países: Argentina, Brasil, Paraguay y Uruguay abarcando una superficie de casi 1.200.000 km<sup>2</sup>, con espesores que alcanzan los 800m y una gran capacidad hídrica que determina que en sus áreas de mayor espesor sea potencialmente posible la extracción de caudales entre 500 y 800 m<sup>3</sup>/h mediante perforaciones profundas.

El presente trabajo se realiza en el área de la triple frontera sur, que comprende las localidades de Monte Caseros (Argentina), Bella Unión (Uruguay) y Barra do Quaraí (Brasil). Se trata de una zona en la que como sucede aproximadamente en el 60 a 65% de su superficie - el SAG - se encuentra cubierto por basaltos con espesores importantes que determinan un alto grado de protección, además de brindar condiciones favorables para la existencia de fenómenos de termalismo y surgencia.

Se presenta un análisis hidrogeológico en un área inexplorada hasta ahora desde el punto de vista de la prospección hidrotermal, elaborando el modelo hidrogeológico preliminar para la zona de estudio.

Entendemos que el conocimiento científico es básico para la elaboración de marcos de gestión sustentables; en este sentido el presente trabajo pretende ser un aporte, en un área en el que el Sistema Acuífero Guaraní es compartido y debe por lo tanto ser gestionado por Argentina, Brasil y Uruguay en forma conjunta.

**Palabras claves:** Sistema Acuífero Guaraní, acuífero transfronterizo, termalismo, surgencia.

**Abstract:** The Guaraní Aquifer System (GAS) is a transboundary aquifer shared by four Countries: Argentina, Brazil, Paraguay and Uruguay including a surface estimated in 1,200,000 km<sup>2</sup>, with thicknesses that can reach 800m and a great hydric capacity, in its greater thickness areas it is potentially possible to obtain volumes between 500 and 800 m<sup>3</sup>/h by mean of deep wells. The present work is made in the South Triple Border area, that includes the cities of Monte Caseros (Argentina), Bella Unión (Uruguay) and Barra do Quaraí (Brazil). In this zone - as it happens approximately in the 60 to 65% of its surface - the GAS is cover by basalts with important thicknesses that determine a high level of protection, in addition to offer favorable water thermal and flowing conditions. This work show an hydrogeological analysis of an unexplored area from the point of view of the hydrothermal prospection, in addition a preliminary hydrogeological model that include the zone of study is exposed here. We understand that the scientific knowledge is basic for the elaboration of sustentables marks of management; in this way the present work try to be a contribution, in an area in which the Guaraní Aquifer System is shared and must therefore be managed by Argentina, Brazil and Uruguay in joint form.

**Keywords:** Guaraní Aquifer System, Transboundary Aquifer, Thermal water, Flowing.

## INTRODUCCIÓN

El Sistema Acuífero Guaraní es compartido entre distintos países, y como tal debe ser gestionado de una manera conjunta como forma de lograr un uso sustentable del recurso. En este marco resulta importante, sin ir en detrimento de la investigación en otras zonas, profundizar en el conocimiento científico en áreas fronterizas.

El presente trabajo se concentra en una zona limítrofe de Argentina, Uruguay y Brasil, la cual reviste una importancia estratégica en cuanto a que el acuífero se presenta, con propiedades de termalismo y surgencia. Se intenta en primera instancia ordenar y correlacionar la información existente, para luego complementarla con datos resultantes de trabajos geológicos e hidrogeológicos recientes realizados por los autores en el área de estudio.

Como objetivo principal se pretende lograr un Modelo Geológico e Hidrogeológico Preliminar, con la elaboración de mapas de isópacas de techo de acuífero, espesores de acuíferos, posición aproximado de piso y mapa de isotermas, con el fin de alcanzar una caracterización hidrogeológica del área considerada.

Entre las actividades desarrolladas, se cuentan:

- Revisión de antecedentes geológicos e hidrogeológicos.

- Relevamiento de afloramientos e inventario de perforaciones

- Análisis e interpretación de la información: elaboración de cortes geológicos, mapas temáticos. Elaboración del Modelo Geológico e Hidrogeológico conceptual.

## ÁREA DE ESTUDIO

### Ubicación

El área de estudio se localiza en la triple frontera, donde se ubican las localidades de Monte Caseros (Argentina), Bella Unión (Uruguay) y Barra do Quaraí (Brasil) ver figura 1.

### Características generales

El clima en el área de estudio es de tipo mesotermal, cálido templado, sin estación seca. El promedio anual de precipitaciones es de 1270 mm, los veranos son muy cálidos con temperaturas superiores a 22° C y una temperatura media anual de 19,5° C. La temperatura media del mes más frío (julio) es de 13,1° C y la del mes más cálido (enero) es de 26,2° C.

## GEOLOGÍA

### Marco Geológico Regional

La zona de estudio se encuentra ubicada en la denominada Cuenca Chaco-Paraná, que presenta una extensión aproximada de 1.400.000 km<sup>2</sup> en Argentina, Brasil, Uruguay y Paraguay. Se emplaza dentro de un área cratónica, está constituida por secuencias sedimentarias paleozoicas y mesozoicas, cubiertas por importantes derrames basálticos.

La parte basal de la cuenca está materializada en Uruguay por la secuencia devónica, integrada por las Formaciones Cerrezuelo, Cordobés, y La Paloma, que constituyen el Grupo Durazno (Bossi 1966) (Formaciones Furnas y Ponta Grossa en Brasil). El segundo

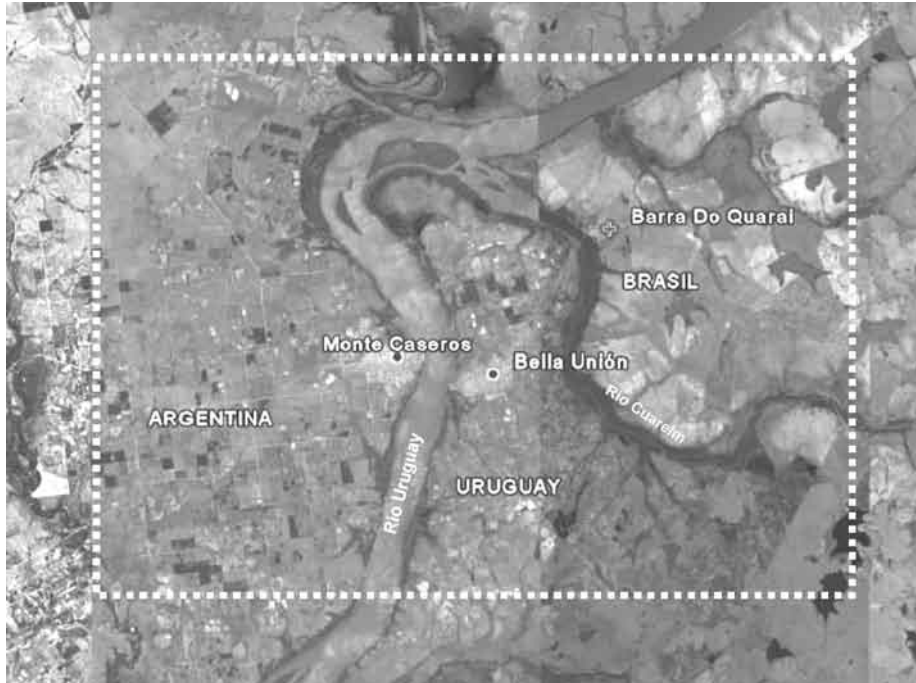


Figura 1. Mapa de ubicación del área de estudio

episodio registrado se inicia en el Pérmico Inferior, con espesos depósitos glaciales y fluvio-glaciales correspondientes a la Formación San Gregorio evolucionando luego de un ambiente de depositación continental a litoral constituyendo la Formación Tres Islas conformada por areniscas finas a medias y conglomerados. Ambas unidades son correlacionables con las Formaciones Sachayoj y Charatá en Argentina y Grupo Itararé y Formación Río Bonito en Brasil.

El Pérmico Superior comienza con la depositación, en condiciones litorales o infralitorales, de sedimentos pelíticos grises de la Formación Melo correlativa con la Formación Chacabuco de Argentina y con las Formaciones Palermo, Iratí y Salta en Brasil.

La aparición de areniscas y pelitas rojizas marca el pasaje de condiciones reductoras a oxidantes, y constituyen las Formaciones Yaguari y Buena Vista (Estrada Nova y Río do Rastro en Brasil). La sedimentación de plataforma somera del Pérmico Superior evoluciona en el Triásico Inferior a depósitos fluviales que definen la Formación Buena Vista (Bossi et al 1998). Discordantemente sobre ella se desarrollan areniscas de origen eólico, que luego son invadidas por cuerpos de agua, que culminan nuevamente con sedimentos eólicos, conformando el Grupo Batoví Dorado (Bossi et al 1998), constituido por las Formaciones Cuchilla del Ombú, Tacuarembó y Rivera (Piramboia, Guará y Botucatú en Brasil).

En estas condiciones desérticas, comienza la fracturación del Supercontinente Gondwana que da origen a las fosas tectónicas pericratónicas y a los actuales océanos. A partir del Cretácico Inferior, se produce un importante vulcanismo de tipo fisural con dirección EW y NW, representado por extensos derrames basálticos predominantemente toleíticos de la Formación Arapey (Formación Curuzú Cuatiá en Argentina y Se-

rra Geral en Brasil).

La columna estratigráfica para el área de estudio es la siguiente (Tabla 1).

#### Descripción de las Formaciones Geológicas

Luego de un período erosivo durante el Carbonífero comienza, a partir del Carbonífero Superior – Pérmico Inferior, la sedimentación de las unidades registradas en el área, que luego son cubiertas por rocas efusivas cretácicas y sedimentos modernos.

Las Formaciones que conforman la cuenca en el área se agrupan en: Eogondwana (Formaciones San Gregorio, Tres Islas, Melo y Yaguari), de edad básicamente Pérmico y Pérmico superior y Neogondwana (Formaciones Buena Vista, Cuchilla del Ombú, Tacuarembó y Rivera), de edad Triásico a Cretácico Inferior (De Santa Ana, 2003).

#### Formación San Gregorio (Pérmico Inferior)

La Formación San Gregorio (Bossi et al 1998), de ambiente glacial, está constituida por diamictitas resedimentadas, tillitas y, en menores proporciones, conglomerados clastosoportados.

Se definen dos facies para esta Formación: una proximal, integrada por depósitos predominantemente psefiticos y secundariamente ritmitos psamo-pelíticos y una facies distal integrada por fangolitas, ritmitos, diamictitas finas grises y pelitas negras y castañas con intercalaciones arenosas.

La Formación San Gregorio se apoya en forma directa sobre el Basamento Cristalino o sobre los sedimentos devónicos. El contacto con la Formación suprayacente es gradual, pasando de areniscas muy finas a areniscas gruesas, hacia el tope con intercalaciones de sedimentos más finos negros con gran contenido de materia orgánica vegetal.

Tabla 1. Columna Estratigráfica

Edad	Edad	Unidad		Litología	Ambiente
	Brasil	Uruguay	Argentina		
Pleistoceno		Salto	Salto Chico	Psamitas y ortosefitas, cuarzosas, de colores predominantemente rojos y rosados, ocasionalmente silicificadas.	Fluvial
Cretácico Inferior	Serra Peral	Arapey	Curuzú Cuatía	Denares basálticos y riolíticos	Continental, Árido
	Botucatuí	Rivera	Misiones	Areniscas eólicas en estructuras dunares, medias y medias a finas, con menor participación de psamitas finas de colores rojizos	Eólico
Jurásico	Guará	Tacuarembó	Tacuarembó	Areniscas finas y muy finas y subordinadamente pelitas e intraconglomerados. Colores claros, neutros a levemente reductores.	Fluvio lacustre
	Piramboia	Cuchilla del Ombú		Areniscas medias a finas y en menor proporción finas y medias	Eólico
		Itacumbú		Areniscas sublíticas y arcólicas	
		Gaspar		Basaltos subsuperficiales	
Triásico	Río do Rastro	Buena Vista	Buena Vista	Areniscas finas hasta gruesas y menores cantidades de pelitas, conglomerados finos clasto sostén y brechas intraformacionales. Tonos rojizos.	Fluvial
Pérmico Superior	Estrada Nova	Yaguari	Yaguari	Psamitas y pelitas (macizas o laminadas). Dos miembros: uno inferior compuesto por materiales finos y uno superior más arenoso.	Transicional a Fluvial
Pérmico Medio	Palermo, Iratí y Salta	Melo	Chacabuco	Las facies dominantes son arenosas y heterolíticas; a estas se asocian, en menor proporción, facies pelíticas, psefiticas. Colores: verde amarillento, grises claros hasta negro (reductor).	Marino Restringido
Pérmico Medio	Río Bonito	Tres Islas	Sachayoj y Charatá	Psamitas finas hasta muy gruesas, a veces algo sabulíticas, con porcentajes importantes pero variables de pelitas y cantidades subordinadas de psefitas.	Deltaico Fluvial
Pérmico inferior	Cpo Itará	San Gregorio		Diamictitas resedimentadas, tillitas y, en menores proporciones, conglomerados clasto soportados.	Glacial
Precámbrico	Basamento Cristalino			Rocas ígneas, metaígneas y metasedimentarias.	

### Formación Tres Islas (Pérmico Medio)

Esta Formación según Bossi et al (1998) marca un pasaje hacia un ambiente deltaico y fluvial, representado por psamitas finas hasta muy gruesas, a veces algo sabulíticas, con porcentajes importantes pero variables de pelitas y cantidades subordinadas de psefitas. La presencia de óxido de hierro da a las areniscas tonalidades amarillentas, rojas, pardas y rosadas. Las limolitas presentan estratificación paralela y se encuentran tanto como potentes capas intercaladas en las areniscas, como lentes de poca potencia dentro de las areniscas. Las areniscas predominantes son finas a medias, muy bien seleccionadas, los granos están compuestos principalmente por cuarzo, redondeados a subredondeados.

### Formación Melo (Pérmico Medio)

La Formación Melo representa una nueva transgresión marina, siendo las facies dominantes arenosas y heterolíticas; presenta en menor proporción, facies pelíticas, psefiticas, de colores verde amarillento, grises claros hasta negro (reductor); todo este conjunto fue depositado en un ambiente marino restringido.

### Formación Yaguari (Pérmico Superior)

La Formación Yaguari (Bossi et al 1998) (psamitas y pelitas macizas o laminadas) marca la mayor incidencia gradual de un ambiente continental. Se separan en esta unidad dos miembros: uno inferior compuesto por materiales finos y uno superior más arenoso, depositados en un ambiente transicional fluvial.

### Formación Buena Vista (Triásico Inferior)

Continuando en un régimen continental, la Formación Buena (Bossi 1998) Vista (Triásico), de ambiente fluvial, integra areniscas finas hasta gruesas y menores cantidades de pelitas, conglomerados finos clasto sostén y brechas intraformacionales, con tonalidades predominantemente rojizas.

### Formación Gaspar (Jurásico Medio)

Esta conformada por una sucesión de coladas basálticas a las que hacia el tope, se intercalan niveles métricos de areniscas. En el pozo de Gaspar se reconocieron 7 coladas con potencia que varían desde 50 m a 4m (20 m de potencia media). Son basaltos masivos negros con tonos verdes y grises, de grano fino a grueso, con textura ofítica y porfirica con el desarrollo de fenocristales subhedrales y euhedrales de plagioclasas y piroxenos. Tanto esta unidad como la suprayacente Itacumbú fueron definidas por De Santa Ana y Veroslavsky (2003) a nivel de perforaciones en los pozos Gaspar e Itacumbú en Uruguay, ambos de relativa cercanía al área de estudio.

### Formación Itacumbú (Jurásico Superior)

Constituye una sucesión de estratos de areniscas sublíticas y arcólicas, micáceas grises, naranjas y marrones, a las que se intercalan estratos pelíticos y, ocasionales niveles arcillosos, margosos y carbonáticos. Esta unidad se desarrolla en subsuperficie. Se apoya sobre los basaltos de la Formación Gaspar y en discordancia erosiva sobre la Formación Buena Vista, mostrando hacia el tope relaciones de concordancia con la suprayacente Formación Tacuarembó De Santa Ana y Veroslavsky (2003).

### Formación Cuchilla del Ombú (Jurásico)

El Jurásico está representado por las Formaciones Cuchilla del Ombú (areniscas medias a finas de ambiente eólico) que no superan los 10m de espesor en la localidad tipo (Montaño M, 2005).

### Formación Tacuarembó (Jurásico Superior)

La Formación Tacuarembó según Montaño (2005) está representada por areniscas finas en mayor proporción, también se encuentran areniscas muy finas y en menor porcentaje areniscas finas a medias, limolitas, fangolitas, wackes y pelitas. Los colores predominantes para las areniscas finas son el 5YR8/1

(gris rosa), tonalidades amarronadas como el 5YR4/4 (marrón moderado), 5Y6/4 (marrón amarillento) y el 10R8/2 marrón rojizo y tonalidades rojas como el 10YR8/2 (naranja muy pálido) y el 10R5/4 (rojo pálido). Todos estos colores marcan un ambiente oxidante de sedimentación.

Las pelitas presentan colores sugiriendo ambiente con Eh=0 como el 10Y5/4 (verde oliva).

Las limolitas y fangolitas presentan los siguientes colores 5YR4/4 (marrón moderado) y 5Y7/2 (gris amarillento) y en menor porcentaje 5Y6/4 (marrón amarillento) y 5YR8/1 (gris rosa).

El ambiente de sedimentación es fluvio lacustre con eventos eólicos en la base.

### Formación Rivera (Cretácico Inferior)

Areniscas predominantemente finas a medias (granulometría entre 0.125 y 0.5 mm) con colores que van del marrón rojizo (10 R 5/4 y 10 R 4/6; Geological Society of America, 1991) al rojo (10 R 4/2), anaranjado (10 YR 7/4) y gris rosa (5 YR 8/1). Los clastos son en general muy bien seleccionados, compuestos de cuarzo, bien redondeados y con superficie frecuentemente pulida.

Presentan estratificación cruzada de gran porte, con caras de avalancha buzando hasta 33° y gradación inversa en los foresets típicos de ambiente eólicos.

En la Figura 2 se observan diferentes afloramientos y canteras de areniscas silicificadas del cretácico inferior situadas a unos 18km al S de la ciudad de Mercedes.

### Formación Arapey (Cretácico Inferior)

La Formación Arapey según Bossi (1966) está constituida por lavas de composición toleítica depositadas por fisuras cuya estructura se desarrolla de la siguiente manera:

a) Nivel Inferior: Corresponde al nivel de tipo lajoso debido a la deposición de la lava sobre la superficie que por rozamiento determina esta estructura, la cual presenta cierta permeabilidad en dirección horizontal (Figura 4).

b) Nivel Intermedio: Formado por un basalto tipo masivo, su porosidad únicamente puede ser debida a fenómenos de fracturación tectónica.

c) Nivel Superior: presenta una estructura de tipo vacuolar, constituida por entrapamiento de burbujas de aire durante la deposición del basalto.

Cada derrame presenta una potencia que varía entre 10 y 60m.

### Formación Salto (pleistoceno)

Las litologías dominantes en esta unidad son psamíticas y ortosefíticas, cuarzosas, de colores predominantemente rojos y rosados, pudiendo variar a tonalidades grises, naranjas y verdosos cuando están afectadas por procesos de silicificación (Figura 4)

### Unidades que constituyen el Sistema Acuífero Guaraní en el área de estudio

El Sistema Acuífero Guaraní está constituido en el área por sedimentos y rocas sedimentarias asimilables a las Formaciones Misiones, Tacuarembó y Buena Vista, en Argentina, en Uruguay a las Formaciones Rivera, Tacuarembó, Cuchilla del Ombú, y Buena Vista, en Brasil Formaciones Botucatu, Guará, Piramboia y Río do Rastro.

Estas secuencias sedimentarias están cubiertas en parte por potentes coladas basálticas correspondientes al denominado Magmatismo Mesozoico, ligado a la apertura del Océano Atlántico en el Cretácico Inferior y representado en la cuenca Paraná por la Formación Curuzú Cuatiá (Argentina), Formación Arapey en Uruguay y Serra Geral en Brasil.

Unos, 100km al NW del área de estudio, en la localidad de Mercedes, pueden observarse afloramientos de litologías correspondientes a la Formaciones Misiones como también la relación de contacto entre las areniscas del SAG y los basaltos.

### MODELO GEOLÓGICO E HIDROGEOLÓGICO

Para la elaboración del modelo geológico e hidrogeológico primario del área de estudio nos basamos en los antecedentes de perforaciones profundas y en los datos inventariados durante el trabajo de campo.

En la provincia de Corrientes existen pocas perforaciones profundas; solamente se tienen antecedentes de tres localidades: Guaviraví, Curuzú Cuatiá y Yapeyú, la más reciente, pero que permanece inconclusa:

En Curuzú Cuatiá, al NW del área de estudio, existe



Figura 2. Izquierda: Frente de cantera de arenisca eólicas Fm Rivera, Misiones o Botucatu en la localidad de Mercedes Provincia de Corrientes. Derecha: Cantera principal, muro lateral.



Figura 3. Afloramiento de basalto de la Fm Curuzú Cuatia, Arapey o Serra Geral Ruta 123, puente sobre Río Miriñay, Prov. Corrientes, Argentina.

Tabla 2. Perforaciones profundas

Pozo	País	Profundidad	Cota de Pozo	Espesor del techo del SAG	Temperatura °C
Colón	Argentina	1502		725	33,5
Villa Elisa	Argentina	1036			41
Concordia I	Argentina	1200			48
Federación	Argentina	1260	38		45
Chajari	Argentina	811	37	665	40
Uruguayana(UR-06)	Brasil	296	80	190	
Queri (QU)	Brasil	112	118	96	
Paso Ulvestie	Uruguay	950		720	26
Almarón	Uruguay	930	68.50	506	32
Guaivú	Uruguay	1105	34.71	680	37
San Nicandro	Uruguay	1096	63	338	44
Dayman	Uruguay	2206	19.08	900	46
Kanarek	Uruguay	1200	15	990	47
Posada SXXII	Uruguay				46
COE	Uruguay		46.20		48
Club Remeros	Uruguay	1322	12	1072	48
Horacio Quiroga	Uruguay	1295	37	968	44
Arapey	Uruguay	1494	49	540	39
Belén	Uruguay	2365	77	556	37
Coloana Palma	Uruguay	2298	56	523	
Coloana Vañad	Uruguay		80	500	37
Gaspar	Uruguay	520	31.20	520	
Itacumbi	Uruguay	2100	108	421	
Peñado	Uruguay	2005	199.100	235	
Yacare	Uruguay	2390	90.10	230	

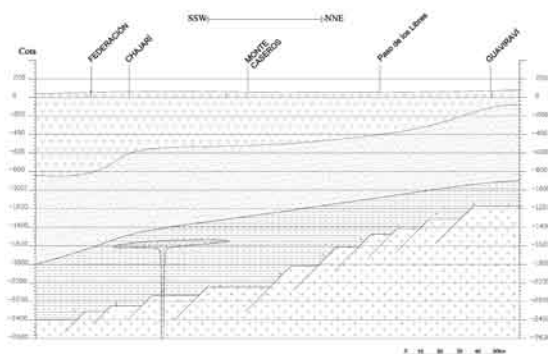


Figura 4. Corte Geológico 1

una perforación que según la Secretaría de Minería de la Nación, Planes de Muestreo, Provincia de Corrientes ([www.mineria.gov.ar](http://www.mineria.gov.ar)) registra una profundidad de 485m de basaltos en ese lugar. En el registro de perforación se establece que no se encontró agua en el pozo lo que sería indicativo de que no se atravesó totalmente el basalto.

En Yapeyú se realizó una perforación profunda para abastecimiento de un futuro complejo termal donde se nos comunicó por parte del encargado que no habían encontrado basaltos durante la perforación. Para el estudio geológico e hidrogeológico además de

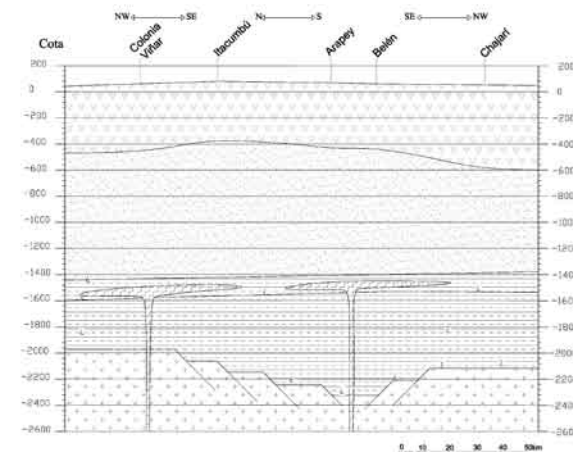


Figura 5. Corte geológico N° 2

las perforaciones mencionadas se incluyeron las perforaciones realizadas en la Provincia de Entre Ríos, las correspondientes a Uruguay y al estado de Río Grande Do Sul en Brasil, cuyas características se detallan a continuación (tabla 2):

Con la interpretación de la información geológica aportada por los perfiles de pozo se determinaron en primera instancia las posibilidades de encontrar aguas termales en la zona de estudio estimando espesor

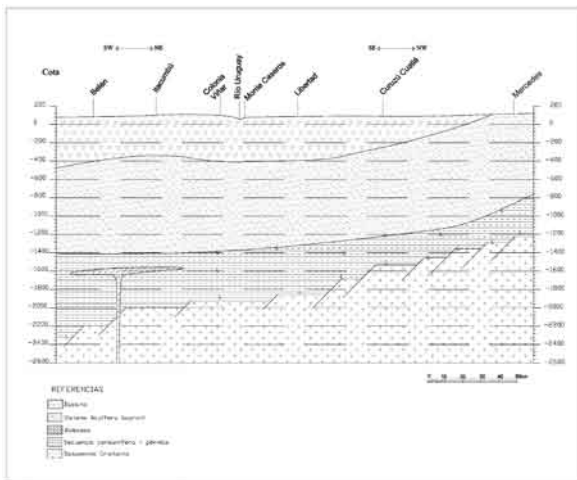


Figura 6. Corte geológico N° 3

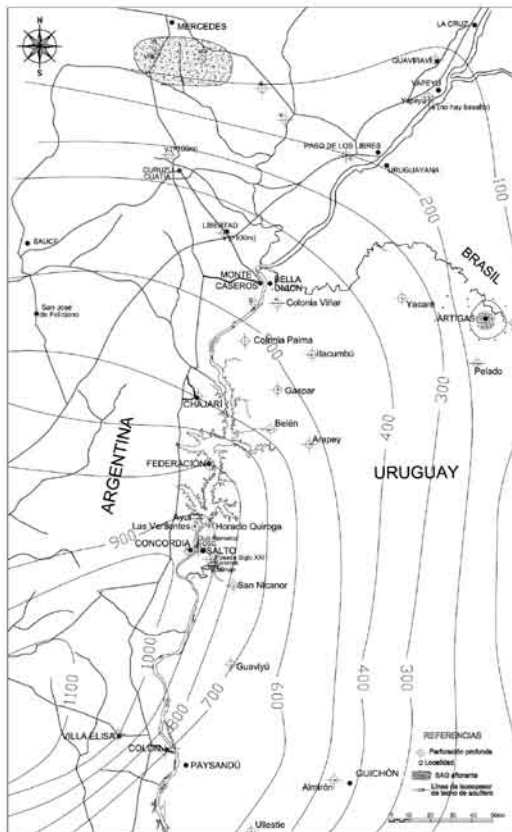


Figura 7. Mapa de Isopacas de techo de acuífero

del techo, del acuífero, temperatura y características químicas probables del agua.

De manera de visualizar la estructura geológica y establecer un modelo conceptual que nos indique cual sería la probabilidad de la ocurrencia de agua termal en la zona de estudio se construyeron cortes geológicos (Figuras 4, 5 y 6) en diferentes direcciones

Tabla 3. Espesores de basalto y acuífero

Pozo	Espesor Basalto	Espesor acuífero	Distancia al área de estudio (km. aproximados)
Termas de Chajari	554	144	70
Termas de Arapey	540	755	80
Belen	480	450	75
Colonia Palma	518		28
Termas de Salto Grande	947	330	115

representativas.

Como puede observarse en los cortes, el modelo geológico del área implica una cobertura o techo basáltico sobre el Sistema Acuífero Guaraní, el cual se apoya sobre un piso impermeable Pérmico-Carbonífero o sobre el Basamento Cristalino.

La profundidad del acuífero influye de manera importante en lo referente a la temperatura, en función del gradiente geotérmico tendremos a mayor profundidad, aumento de temperatura. El espesor del acuífero junto con la permeabilidad controla el caudal que se obtendría mediante una perforación profunda en el área. El espesor de basalto sobre el acuífero es el factor que condiciona la profundidad del acuífero y por lo tanto la temperatura del agua.

Sobre los espesores de basalto, cabe esperar alternativas diferentes por la existencia o no de estructuras tectónicas de importancia: en caso de no existir accidentes tectónicos significativos (fallas con desplazamiento importante), se estima un espesor de basalto por encima de los depósitos sedimentarios de 450 a 550m. De todas maneras, a los efectos de tener una noción preliminar de los espesores de basalto en el área así como los rangos de temperatura y surgencia se elaboraron mapas específicos, los cuales se incluyen en el capítulo de Hidrogeología.

## HIDROGEOLOGÍA

### Antecedentes

El Sistema Acuífero Guaraní (SAG) está constituido por una potente sucesión de estratos porosos y permeables más o menos interconectados, que en su gran mayoría se depositaron durante el Mesozoico (Triásico Inferior al Cretácico Inferior).

En primera instancia, se divide el acuífero en función de sus características geológicas e hidrogeológicas en dos grandes ámbitos: zona confinada y aflorante.

La zona de estudio se ubica en su mayoría en el área de confinamiento del SAG. No se detallarán las características del área aflorante del mismo.

Las lavas confinantes corresponden a la Formación Arapey (Cretácico Inferior), compuesta por sucesivas coladas de basalto, en cantidad y espesor variables dentro del área mencionada, dependiendo de los pulsos efusivos, y de la distancia a los centros de emisión; se han llegado a identificar 26 coladas en la ciudad de Salto. La perforación de OSE (Salto) mostró un espesor de basaltos de 1021 metros.

### Espesores del techo del Acuífero

Los pozos termales en el área presentan caudales de surgencia que alcanzan los 400 m<sup>3</sup>/h.

La perforación en producción más cercana al predio de estudio es la de las Termas de Chajari (70 km

Tabla 4. Caudales

Pozo	Caudal (m <sup>3</sup> /h)	Presión a boca pozo (m.c.a)
Termas de Arapey	350-400	48
Termas de Salto Grande	230	58

Tabla 5. Antecedentes de estimaciones de T y S para el SAG confinado

Autor	Zona	Trasmisividad (T) (m <sup>2</sup> /día)	Coefficiente de almacenamiento (S)
Tahal 1986	NW del Uruguay	1000	10 <sup>-4</sup>
IPT 1988	NW del Uruguay	363 - 762	10 <sup>-4</sup>
Hidrosud 1988	NW del Uruguay	1500	10 <sup>-4</sup>
Montaño J et al 1998	NW del Uruguay	250 - 1500	10 <sup>-4</sup>
De los Santos 1999	NW del Uruguay	100	10 <sup>-4</sup>
Decoud & Rocha (2001)	NW del Uruguay	145 - 190	10 <sup>-2</sup> - 10 <sup>-4</sup>
Montaño J (2002)	Corredor termal del Río Uruguay	150	10 <sup>-4</sup>
Oleaga & De los Santos 2003	Corredor termal del Río Uruguay	67 - 141	10 <sup>-2</sup> - 10 <sup>-4</sup>

al SSW). Lo sigue el pozo de Arapey (80 km al SSE). Unos 75 km al Sur se encuentra el pozo de Belén (inactivo); 28 km al SE el pozo de Colonia Palma (inactivo) y 115 km al S el pozo de las Termas de Salto Grande.

Los perfiles geológicos de estos pozos nos indican los espesores relativos de basalto para cada uno de ellos (Tabla 3).

En la figura 7 se puede observar el mapa de isoespesores del techo del acuífero, constituido por los basaltos de la formación Arapey más la cobertura sedimentaria cenozoica.

Los caudales de las perforaciones en explotación son los siguientes (tabla 4).

**Hidráulica**

En la tabla 5 se presentan algunos resultados de parámetros hidráulicos como trasmisividad y coeficiente de almacenamiento, obtenidos en diferentes trabajos.

La gran dispersión de valores de trasmisividad observados se debe a que las determinaciones fueron realizadas en condiciones diferentes, los valores altos de los primeros antecedentes se corresponden a regímenes de surgencia mientras los valores menores son el resultado de ensayos bajo bombeo con depresiones significativas. En función de estas condiciones se entiende que estos últimos son los más representativos desde el punto de vista hidráulico fijando los valores de trasmisividad para esta área entre 60 y 200 m<sup>2</sup>/d.

La diferencia de valores para iguales condiciones de ensayos hidráulicos indicarían variaciones tanto en la conductividad hidráulica como en los espesores portadores del SAG. Los estudios comparativos realizados por Decoud & Rocha (2001), entre la perforación de Federación (Argentina) y Salto Grande (Horacio Quiroga, Uruguay), determinan que las causas de los altos caudales obtenidos, obedecen principalmente a una mayor porosidad en el paquete sedimentario que compone el acuífero y un mayor espesor del mismo.

**Hidrogeoquímica**

Según Montaño et al. (1998), las aguas del SAG Típico no presenta limitaciones de potabilidad, salvo que se mezclen con aguas del subsistema inferior. Las aguas se clasifican, según el diagrama de Piper, en bicarbonatadas sódicas para este sistema, con un valor

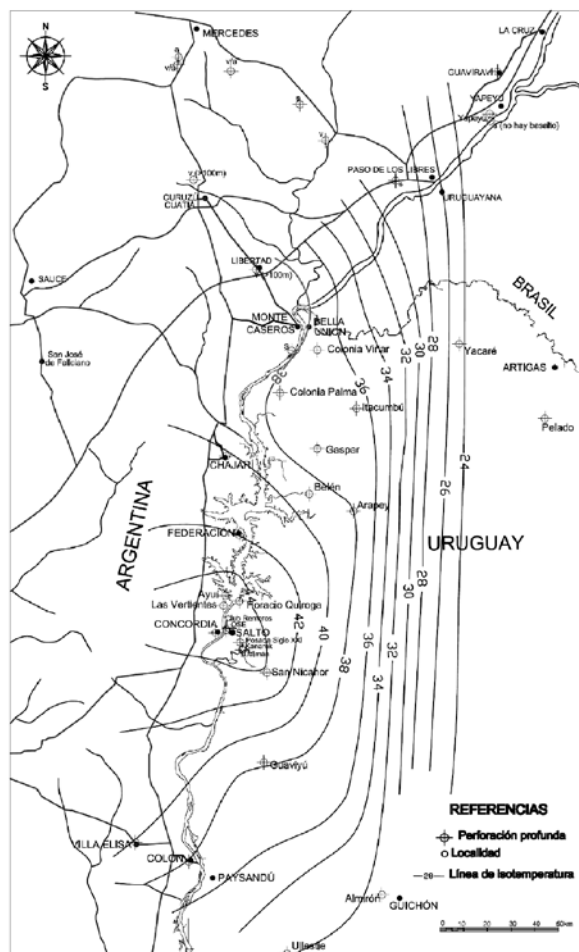


Figura 8. Mapa de Isotermas del área de Estudio

medio de dureza total de 65 mg/l. Se observa mayor concentración de Na sobre el Ca (Na >> Ca) y en menor grado el ión bicarbonato sobre el ión Cloro (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> > Cl<sup>-</sup>).

Decoud & Rocha (2001) realizaron estudios de 7 perforaciones profundas confinadas por el basalto en los departamentos de Salto y Paysandú (Uruguay) y en la provincia de Entre Ríos (Argentina), basados en una serie de análisis de agua de las perforaciones realizados en un período de 7 años.

Estos autores distinguen dos grupos en función de la calidad química del agua:

Grupo 1: Arapey, Daymán, San Nicanor y Guaviyú: tipo bicarbonatadas sódicas

Grupo 2: Federación, Ose y Salto Grande (Horacio Quiroga): tipo bicarbonatadas sódica cloruradas.

Es probable que el agua sea de tipo bicarbonatada sódica.

**Temperatura**

En la región bajo estudio por tratarse de una plataforma continental la corteza terrestre tiene un comportamiento relativamente estable.

Si descendemos verticalmente en la corteza terrestre desde la superficie del terreno, la temperatura aumenta a un ritmo promedio de 3° Centígrados cada 100 metros aproximadamente. A esta variación de tem-

peratura del terreno al aumentar la profundidad se le llama Gradiente Geotérmico, y es la fuente de calor, origen de la temperatura de las aguas termales en los pozos existentes en el área de estudio.

Estas zonas se clasifican con una actividad geotérmica de baja entalpía por presentar aguas con temperaturas inferiores a los 90°C; sus aplicaciones están vinculadas al uso directo del calor en múltiples emprendimientos económicos, principalmente el uso de complejos turísticos recreativos y de balneo-terapia de aguas termales.

Las rocas sedimentarias (Areniscas) que son la estructura del Acuífero Guaraní, se hallan a grandes profundidades en este sector del Acuífero, la temperatura de éstas rocas se encuentran a varios grados por encima de la temperatura media de la superficie, por efecto como se dijo del gradiente geotérmico.

Como el agua contenida en las areniscas del acuífero circula lentamente, se crea un equilibrio entre roca y agua, tomando el agua parte del calor del terreno y aumentando su temperatura gradualmente con la profundidad.

Por lo tanto, en función de las diferentes profundidades a la que se encuentren los aportes de agua en el perfil, se observan diferentes temperaturas del agua termal.

En una perforación dada, la temperatura del agua que sale en superficie es un promedio de la temperatura que tiene cada uno de los distintos niveles de aporte de agua que existan en el perfil del pozo a diferente profundidad.

En función de los antecedentes se elaboró un mapa de isoespesores de techo de acuífero (figura 8) y un mapa de en el que puede observarse que el rango de temperatura estimado para el área de estudio es de 35 a 40°C.

## CONCLUSIONES

El estudio realizado en la Triple Frontera Sur aportó información que permite estimar establecer que debajo de un techo de Basaltos de la Formación Curuzu Cuatiá con espesores estimados en por lo menos 450 a 550 m se encontraría el Sistema Acuífero Guaraní apoyado sobre un piso conformado por sedimentos de origen pérmico.

Se destaca como aporte geológico el afloramiento de las areniscas de Misiones en la localidad de Mercedes ( Corrientes).

En la región existiría una tectónica importante que determina diferencias significativas en el espesor del basalto para puntos relativamente cercanos entre sí

El espesor de sedimentos por sobre el basamento cristalino es probable que se encuentre en un mínimo de 400 m.

El rango de temperatura de las aguas en una hipotética captación situada en el área se ubica entre los 35°C y los 40°C dependiendo de la profundidad final a la que encuentre el techo de las areniscas.

En función que las areniscas portadoras de agua pertenecería al SAG y en correlación con los pozos más cercanos y según el diagrama de Piper, las aguas se clasificarían en bicarbonatadas sódicas, las

cuales serían aptas para la balneoterapia.

## REFERENCIAS

**Bossi J; Ferrando L, Montaña J; Campal N, Morales H, Gancio F, Schipilov A, Piñeiro D, Sprechman P (1998):** Carta Geológica del Uruguay. Escala 1:500.000. Edición Geoeditores SRL (CD-ROM)

**De Santa Ana H. y Veroslavsky G. (2003).** La tectosecuencia volcanosedimentaria de la Cuenca Norte del Uruguay. Edad Jurásico – Cretácico Temprano. In: Veroslavsky G; Ubilla M, Martínez S. (ed) Cuencas sedimentarias del Uruguay. DIRAC, Montevideo. pp 51-74  
**Decoud P & Rocha L (2001):** Aportes de la hidráulica subterránea del Acuífero Guaraní en el NO del Uruguay.

**Herbst, R. y Santa Cruz, J. (1985)** Mapa Litoestratigráfico de la Prov. de Corrientes. Revista D'Orbignyana. INGEPA- PRINGEPA- UNNE- CONICET N° 2 Pág. 1-51.

**Montaño J, Tujchneider O, Auge M, Fili M, Paris M y D'Elia M, Pérez M, Nagy M, Collazo P, Decoud P (1998):** SAG-Acuíferos Regionales en América Latina-Capitulo Argentino Uruguayo. Centro de Publicaciones, Secretaría de Extensión Nacional del Litoral. Santa Fé, Argentina, 217pp.

**Montaño M, (2005):** Estudio Hidrogeológico del Sistema Acuífero Guaraní en los alrededores de la ciudad Tacuarembó. Trabajo final de la Licenciatura en Geología. FCIEN – UDELAR. Inédito.

**Montaño J, Gagliardi S; Montaño M (2006):** Recursos Hídricos del Uruguay. Boletín Geológico y Minero. Instituto Geológico y Minero de España (ITGME). ISSN: 0366-0176. pp 201-222

**Veroslavsky G; Ubilla M, Martínez S. (ed) (2006):** Cuencas sedimentarias del Uruguay. DIRAC, Montevideo.

