

Estudio geofísico aplicado a la evaluación del recurso geotermal en el sudeste de Entre Ríos

Alicia FAVETTO¹, Cristina POMPOSIELLO¹, Claudia SAINATO², Cristina DAPEÑA¹ y Nora GUIDA¹

¹Instituto de Geocronología y Geología Isotópica. Ciudad Universitaria, Pab. INGEIS, (1428), Buenos Aires.

Email: favetto@ingeis.uba.ar

²Cátedra de Física, Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires, Av. San Martín, 4453, (1417), Buenos Aires.

RESUMEN. El Sistema Acuífero Guaraní es un gran reservorio transfronterizo de agua subterránea compartido por Brasil, Uruguay, Paraguay y Argentina. Es parte de las cuencas sedimentarias de Paraná y Chacoparanense. Las unidades geológicas relacionadas con este sistema son las Formaciones Piramboia y Botucatu, los basaltos de Serra Geral y sus intercalaciones clásticas (Miembro Solari). Estas coladas basálticas cretácicas cubren a las areniscas triásico-jurásicas de origen eólico y fluvial, actuando como factor confinante de los acuíferos termales alojados en ellas. Su importancia se debe a que contiene una de las reservas de agua dulce más grandes del mundo. En este estudio se utilizó el método geoelectrico para describir la geometría de los basaltos, la secuencia sedimentaria infrayacente y la profundidad del techo del basamento cristalino así como evaluar la presencia de aguas termales en el sudeste de la provincia de Entre Ríos. Se realizaron un total de 14 sondeos geoelectricos verticales en los alrededores de las localidades de Gualeguaychú, Aldea San Antonio, San José y Concepción del Uruguay. A partir de la interpretación de los sondeos se obtuvieron modelos de resistividad eléctrica que ubican al basamento cristalino a una profundidad promedio de 900 m excepto en los lugares donde no aparece la capa infrabasáltica y se halla entre 800 y 670 metros. Analizando todos los antecedentes y los resultados de esta investigación se concluyó que el factor determinante para la presencia de los sedimentos que alojan al Sistema Acuífero Guaraní en esta zona, es de tipo estructural y directamente vinculado con la profundidad del basamento cristalino.

Palabras claves: Sondeo Eléctrico vertical, Sistema acuífero Guaraní, Cuenca Chacoparanense, Entre Ríos

ABSTRACT. *Geophysical study applied to the evolution of the geothermal resource in the southeastern Entre Ríos.* The Guarani Aquifer System is a large transboundary groundwater reservoir shared by Brazil, Uruguay, Paraguay, and Argentina. It forms part of the Parana and Chacoparanense sedimentary basins. The geological units related to this system are the Triassic-Jurassic eolian and fluvial sandstones of the Piramboia and Botucatu Formations, and the Serra Geral Basalts which present clastic intercalations (Solari Member). This effusive Cretaceous complex covers the sandstones and provides a high-confinement degree. This aquifer is one of the most important fresh groundwater reservoirs in the world. Geoelectrical methods were used to describe the geometry of the geological units and to determine the depth of the crystalline basement, the presence of intercalated clastic deposits, and the existence of thermal waters in the southeast of the Entre Rios province, Argentina. Geoelectrical models were obtained from a set of fourteen Vertical Electrical Soundings carried out in the vicinity of Gualeguaychú, Aldea San Antonio, Concepción del Uruguay, and San José towns. These models indicate that the basement is at a depth of around 900 m, except in those places where the sedimentary sequence does not appear, in which case it is found between 800 and 670 meters. Analyzing all the features and the results obtained, we conclude that the main factor determining the presence of the sediments which contain the Guarani Aquifer System in this area is the structural setting which is directly related to the depth of the crystalline basement

Key words: Vertical electrical sounding, Guarani aquifer system, Chacoparanense basin, Entre Ríos

Introducción

El Sistema Acuífero Guaraní es un gran reservorio transfronterizo de agua subterránea compartido por Brasil, Uruguay, Paraguay y Argentina. Este acuífero cubre un área de 1.195.500 km² (Araujo *et al.* 1999) y es parte de las cuencas sedimentarias de Paraná y Chacoparanense. Su importancia se debe a que contiene una de las reservas de agua dulce más grandes del mundo, con espesores variables que llegan hasta los 800 m y un volumen de agua almacenado que se estima en 30.000 km³ (Da Rosa Filho *et al.* 2001). Las perforaciones profundas, algunas de las cuales son surgentes, brindan caudales de hasta 1.000 m³/h y los pozos artesianos de alrededor de 100 m³/h

(Tuchjneider *et al.* 2003). La temperatura del agua varía desde 25°C hasta más de 60°C en pozos de 1000 a 1500 m de profundidad y es función de la profundidad (Fili *et al.* 1998). Este recurso es utilizado fundamentalmente por Brasil y Uruguay, y está en desarrollo en Argentina, con distintos niveles de explotación y para diferentes propósitos tales como provisión de agua pública, industrial, rural, recreación, balneoterapia.

El Sistema Acuífero Guaraní propiamente dicho está representado por areniscas triásico-jurásicas confinadas por los basaltos cretácicos de Serra Geral; sin embargo algunos autores incluyen dentro del sistema a las intercalaciones clásticas entre las rocas volcánicas y a los basaltos fracturados (GEF-Banco Mundial-OEA 2001). Sus características geológicas,

hidrogeológicas, hidráulicas, hidroquímicas y termales varían a lo largo de toda la cuenca y están controladas por variaciones en el ambiente de depositación, la evolución estructural y el tiempo de permanencia del agua en las formaciones.

El aprovechamiento del Sistema Acuífero Guaraní en la provincia de Entre Ríos, Argentina comenzó su desarrollo en la última década. Las primeras investigaciones para determinar su posible explotación comenzaron a fines de 1987 cuando la Sociedad del Estado, Agua y Energía y la Dirección de Minería de Entre Ríos realizaron estudios geofísicos en varias localidades de la provincia. El gran interés de los municipios y privados entrerriano para conocer las posibilidades de explotación del acuífero termal impulsó el desarrollo de nuevas exploraciones. Al presente su principal uso es para balneoterapia y recreación.

Debido a la gran profundidad a la que se encuentra el acuífero termal es importante conocer la geometría de la secuencia sedimentaria que lo aloja así como la de las unidades supra e infrayacentes, con el objeto de realizar una correcta planificación de las perforaciones. Los métodos geoelectrónicos son una herramienta muy útil y permiten discriminar los estratos del subsuelo que, debido a su composición y porosidad, tienen fuertes contrastes en la resistividad eléctrica. Son utilizados en la exploración del recurso hídrico hasta profundidades del orden de los 1.000 metros. Los modelos de capa resultantes de su aplicación permiten correlacionar los datos geológicos obtenidos de las perforaciones y la resistividad eléctrica.

El objetivo de este estudio es el uso de metodologías geoelectrónicas para describir la geometría de los basaltos, la secuencia sedimentaria infrayacente (infrabasáltica) y la profundidad del techo del basamento cristalino así como evaluar la presencia de aguas termales en el sudeste de la provincia de Entre Ríos, particularmente en el sur de la cuenca del río Guaqueguaychú y en el tramo distal de la margen derecha del río Uruguay. La zona de estudio abarca los alrededores de las localidades de Guaqueguaychú, Aldea San Antonio, Concepción del Uruguay y San José (Fig. 1).

Antecedentes

La presencia del Paleozoico y Mesozoico en el subsuelo de la Mesopotamia es conocida a través de las primeras perforaciones realizadas por la Dirección de Geología, Minería e Hidrogeología para brindar abastecimiento de agua al ferrocarril a principios del siglo XX. Posteriormente campañas de exploración, prospección geológica y geofísica y los pozos profundos de YPF (Yacimientos Petrolíferos Fiscales), como Nogoyá-1 (YPF 1962) suministraron gran caudal de información.

La geología de las cuencas de Paraná y Chacoparanense fue tratada por numerosos autores, siendo alguna de las contribuciones regionales más completas las de Padula y Mingramm (1968), Herbst (1971), Padula (1972), Gentili y Rimoldi (1979), Russo *et al.* (1979), Iriondo (1980), Sprechmann *et al.* (1981), Soares (1981), Chebli *et al.* (1989, 1999), Milani *et al.* (1994) y Fernández Garrasino (1995). Desde el punto de vista hidrogeológico regional el Sistema Acuífero Guaraní fue in-

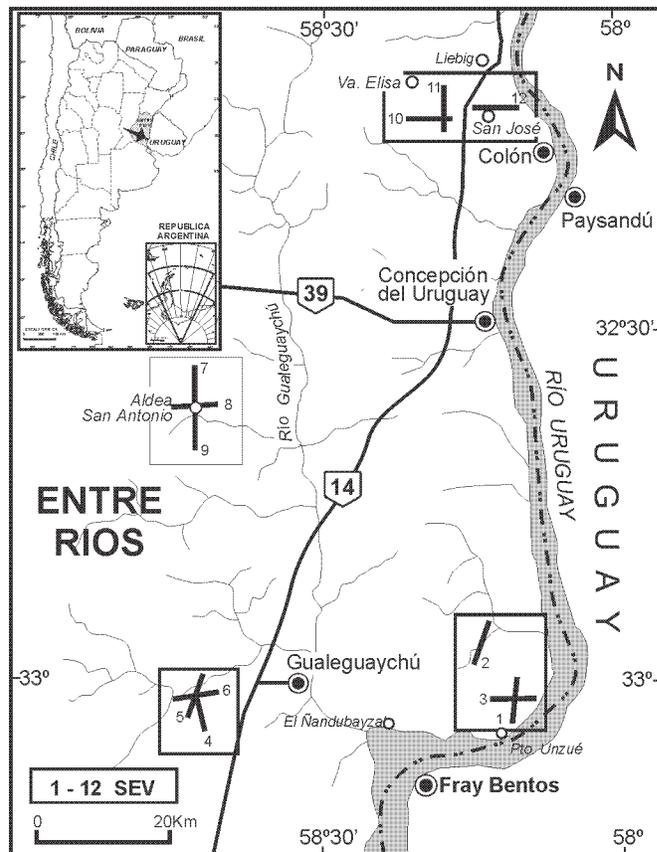


Figura 1: Mapa de ubicación mostrando los lugares estudiados (SEV).

vestigado por Montañó *et al.* (1998), Campos (1999), Araujo *et al.* (1999), Silva Busso (1999), Pesce *et al.* (2002a) entre otros.

Particularmente en la provincia de Entre Ríos, Díaz *et al.* (2003) analizaron los estudios geológicos y geofísicos, las perforaciones, la explotación y gestión llevados a cabo desde 1987 para conocer las condiciones hidrogeológicas del Acuífero Guaraní. Con respecto a las investigaciones geofísicas realizadas en la región mesopotámica merecen mencionarse los trabajos de prospección sobre aguas subterráneas profundas realizados a fines de la década del 80 por el Convenio Agua y Energía - Dirección de Minería de Entre Ríos, por las municipalidades de Federación, Colón, Villa Elisa, Concordia, entre otras, así como estudios magneto telúricos y perfilajes de pozos (Ainchil y Giusso 1996, Silva Busso 1999, Zunino y Ainchil 2000, Díaz *et al.* 2003). Asimismo, las perforaciones realizadas en Chajarí, Federación, Villa Elisa, Colón, Concordia, Concepción del Uruguay, Guaqueguay y Guaqueguaychú aportaron nueva información sobre la presencia del recurso termal (Silva Busso 1999, Benítez y Mársico 2002, Pesce *et al.* 2002b, Díaz *et al.* 2003).

Marco geológico regional y local

La Llanura Chacopampeana, en sentido amplio, es parte de una gran cuenca que recibió desde el Mioceno sedimentos

provenientes del levantamiento andino y que hoy constituye el lugar de tránsito de esos sedimentos hacia la plataforma y talud continental atlántico (Chebli *et al.* 1999). El conjunto de rocas sedimentarias y volcánicas que rellenan esta cuenca está integrado por varios ciclos sedimentarios que abarcan desde el Paleozoico hasta el Reciente. El Paleozoico presenta desarrollo de facies continentales, litorales y también marinas y glaciáricas, mientras que en el Mesozoico existen registros de sedimentitas fluviales y eólicas del Triásico al Jurásico medio y basaltos toleíticos del Jurásico superior a Cretácico inferior que las cubren. Estos basaltos actúan como factor confinante de los acuíferos termales profundos alojados en esos sedimentos fluviales y eólicos infrayacentes. En el Cretácico superior y en el Terciario pueden definirse nuevos episodios sedimentarios, entre los que se identifican depósitos fluviales, intercalados con sedimentos marinos y loésicos. Durante fines del Terciario y todo el Cuaternario se disponen nuevos elementos fluviales y loésicos, que hacia el sudeste se interdigitan con depósitos estuáricos. La cuenca sedimentaria tiene un espesor total variable y la parte más profunda se encuentra en el sur, donde alcanza más de 4500 metros (Favetto *et al.* 2004).

Tomando como base la geohidrogeología descrita por Fili *et al.* (1994) para la provincia de Entre Ríos y en base a nuevos aportes publicados, datos extraídos de numerosas perforaciones y observaciones de campo se ha integrado la siguiente columna estratigráfica y las características hidrogeológicas para la región involucrada en el estudio (Cuadro 1).

A los fines de este estudio se ha considerado conveniente sólo describir con mayor detalle las unidades geológicas relacionadas con los acuíferos termales que son las correspondientes a la sucesión clástica infrabasáltica (Formaciones Piramboia y Botucatu), las intercalaciones clásticas entre los basaltos de Serra Geral (Miembro Solari), los basaltos y el basamento hidrogeológico (basamento cristalino). Estas unidades que se describen sintéticamente se conocen en la literatura geológica de cada país con diferentes designaciones formacionales. En este trabajo se las menciona con el nombre empleado en Brasil y de acuerdo con la recomendación de Silva Busso y Garrasino (2004) quienes realizaron una completa recopilación de los nombres y correlaciones de estas unidades.

Basamento cristalino (Precámbrico-Paleozoico inferior): El basamento cristalino forma el sustrato donde se apoyan los depósitos que integran la columna estratigráfica de la cuenca Chacoparanense. Está compuesto por rocas plutónicas de variada composición. Se identificaron granitos, cuerpos básicos y metamorfitas de diverso grado cuyas edades se extienden desde el Precámbrico hasta el Paleozoico inferior (Russo *et al.* 1979). No aflora en el área considerada pero ha sido encontrado en el subsuelo en varias perforaciones como Colón-1, Concepción del Uruguay-1, Gualaguaychú-1 y con ciertas dudas en Gualaguay-4.

Estas rocas han sido correlacionadas con las que forman el sustrato cristalino que aparece en pozos de la provincia de Buenos Aires y con rocas cristalinas que afloran en la isla Martín García y en la República Oriental del Uruguay (Dalla

Salda 1999).

En el cuadro 2 se resume la información de las perforaciones cercanas a los estudios realizados indicando la profundidad del techo y espesor de los basaltos y la profundidad del basamento cristalino (Silva Busso 1999, Benítez y Marisco 2002, Pesce *et al.* 2002b).

Sucesión clástica infrabasáltica

Formación Piramboia (Sanford y Lange 1960) (Triásico, Ladiniano a Jurásico) y **Formación Botucatu** (Sanford y Lange 1960) (Jurásico tardío): Estas formaciones fueron descritas por primera vez en Brasil y reciben distintos nombres en Uruguay, Paraguay y Argentina. Son las unidades representativas del sistema acuífero termal conocido como Guaraní. Silva Busso y Garrasino (2004) recomiendan unificar y utilizar estos nombres formacionales para toda la región de acuerdo al principio de prioridad establecido en el Código Estratigráfico Argentino (1992).

La Formación Piramboia está compuesta por areniscas blancas y rojizas, de granulometría fina con intercalaciones de arcillas en la base y responde a ambientes lacustres, fluviales y eólicos.

La Formación Botucatu está constituida por areniscas rojizas finas a medianas cuarzosas, con granos redondeados, bien seleccionadas y con frecuente estratificación entrecruzada, de origen eólico y fluvial. Predominan los sedimentos depositados bajo un clima desértico semejante al actual Sahara y que Fernández Garrasino (1995) describe como un gran paleodesierto.

Estas formaciones ocupan la Mesopotamia, la región chacopampeana norte y central de nuestro país y presentan espesores variables entre 200 y 600 metros. Esta columna sedimentaria fue cubierta y confinada por las coladas basálticas de Serra Geral.

Unidades geológicas o sedimentos equivalentes se han detectado en las perforaciones de Concordia-1 (C-1), Federación (F-1), Gualaguaychú-1 y con reservas en Villa Elisa-1 (VE-1), mientras que en los pozos de Concepción del Uruguay (CU-1) y Colón (CI-1) no aparecen y el complejo basáltico se apoya directamente en discordancia sobre el basamento cristalino (Montaño *et al.* 1998, Silva Busso 1999, Benítez y Mársico 2002).

Sucesión basáltica

Formación Serra Geral (White, 1908) (Jurásico superior-Cretácico inferior): está integrada por potentes derrames basálticos, vinculados con la apertura del Atlántico Sur e interestratificados con sedimentitas clásticas. Cubren una superficie superior a 1.000.000 km² en Argentina, Brasil, Paraguay y Uruguay. El máximo espesor se registró en Brasil en la región de Cuiabá Paulista (Estado de São Paulo) con 1930 metros (Da Rosa Filho *et al.* 1997, en Fili *et al.* 1998). Las areniscas intercaladas fueron denominadas Miembro Solari en Argentina por Gentili y Rimoldi (1979). Petrológicamente se trata de basaltos toleíticos con textura dominante de grano fino a afanítica, rara vez porfírica y tonalidades gris oscura a negra (Fili *et al.* 1998). El número de coladas aún no se ha de-

Cuadro1: Cuadro estratigráfico integrado para la región de estudio.

Edad	FORMACION	LITOLOGÍA	COMPORTAMIENTO HIDROGEOLOGICO
Holoceno	LA PICADA	Arenas finas, limos y arcillas	Areal y temporalmente acumulación y circulación en el subálveo
Pleistoceno	TEZANOS PINTO	Limoarcilitas con niveles de tosca intercalados	Acuitardo
	EL PALMAR	Areniscas cuarzosas con lentes de canto rodado y grava	Acuífero
	HERNANDARIAS	Limos calcáreos-arcillas arenosas	Acuitardo
Plioceno superior	SALTO CHICO	Arenas- medianas, gravas intercaladas con arcillas	Acuífero de alto rendimiento
Oligoceno inferior a medio	FRAY BENTOS	Areniscas y limos calcáreos	Acuitardo con arenas acuíferas intercaladas de baja potencia y bajo rendimiento.
Cretácico superior	PAY UBREA	Areniscas calcáreas y calco arenosas, parcialmente silicificadas	Acuitardo
Cretácico superior	YERUA	Arenas y areniscas conglomerádicas	Acuífero
Cretácico inferior Jurásico superior	BASALTOS DE SERRA GERAL (MIEMBRO SERRA GERAL Y MIEMBRO SOLARI)	Basaltos toleíticos e intercalaciones clásticas parcialmente silicificadas	Basaltos: acuífero en fisuras a acuífugo. Areniscas: acuífero
Jurásico medio	BOTUCATU	Areniscas rojizas- finas, localmente- silicificadas	Acuífero
Triásico superior	PIRAMBOIA	<u>Superior:</u> areniscas finas a medianas <u>Inferior:</u> areniscas de grano fino con lentes arcillosos y arcilitas	Acuífero
Paleozoico inferior Precámbrico	BASAMENTO CRISTALINO	Rocas ígneas y metamórficas	Acuífugo

terminado con precisión debido a que varía notablemente en diferentes sectores de la comarca. En Entre Ríos aflora solamente en el sector NE en una delgada franja aledaña al río Uruguay.

En un corte geológico norte-sur entre Federación y Gualaguaychú, Montaña *et al.* (1998) señalan que el techo de la Formación Serra Geral se profundiza y su espesor disminuye hacia el sector sur. Por otra parte, muestran la existencia un alto estructural en Colón y Concepción del Uruguay. Los datos de las perforaciones en estas últimas localidades mostraron que los basaltos apoyan directamente sobre el basamento cristalino.

Las secciones clásticas intercaladas también se vinculan lateralmente con los basaltos y corresponden a areniscas cuarzosas finas y medianas de colores rojizos y amarillentos, con algunas intercalaciones psamíticas gruesas y medianas. Suelen asociarse con minerales arcillosos, de color blanco, friable y una arcilla rojiza con fragmentos líticos volcánicos y cemento silíceo muy consolidado. En algunas áreas se pre-

sentan con poca potencia (no más de 3 o 4 metros) como una arenisca fuertemente silicificada. La sedimentación corresponde a ambiente eólico con contribución subáerea restringida a cursos efímeros y estacionales (Fernández Garrasino 1995).

Estudio geofísico

La realización de estudios geoelectrónicos, a través de sondeos eléctricos verticales (SEV), para detectar contrastes en la resistividad eléctrica a profundidades del orden de 1000 m puede dar lugar a discusión. Si bien hay innumerables antecedentes en este tipo de aplicaciones, no se puede desconocer la existencia de otros métodos, como la magnetotelúrica, para la determinación de la profundidad a la que aparece el basamento cristalino, especialmente cuando se profundiza y supera los 1000 metros. Por lo tanto, si bien estaríamos al límite del uso del método geoelectrónico, los resultados obtenidos en estudios previos comparados con datos de perforaciones han

Cuadro 2: Datos de pozos(*)

Perforación	Gchu-1	CU-1	VE-1	CI-1	C-1	F-1	CH-1
Sitio	Gualeguaychú	Concepción del Uruguay	Villa Elisa	Colón	Concordia	Federación	Chajarí
Cota	69	20	45	19	38	43	--
TB	473	287	348	228	60	47	112
EB	255	364	634	658	912	825	554
TBC	978	710	No alcanzado >1030	780	No alcanzado >1170	1260	No alcanzado >811

(*) **Cota topográfica:** en metros sobre el nivel del mar; **TB:** techo del basalto en metros bajo boca de pozo; **EB:** espesor del basalto en metros; **TBC:** profundidad donde aparece el basamento cristalino en metros desde boca de pozo

permitido establecer correlaciones. Este estudio brinda información de base, importante a nivel local y que permitirá encarar en el futuro estudios electromagnéticos con una mayor densificación de sitios sondeados.

Sondeo Eléctrico Vertical (SEV)

El método de SEV con la configuración del tipo Schlumberger consiste en la inyección de corriente eléctrica continua en la tierra proveniente de una fuente artificial a través de un par de electrodos de hierro (AB) (Orellana 1972). Este circuito se completa con un miliamperímetro que mide el valor de corriente. A través de otro par de electrodos de cobre o impolarizables (MN) colineales con AB, se mide la diferencia de potencial eléctrico entre ambos. La distancia de separación de los electrodos MN debe ser pequeña respecto a la separación de los electrodos de corriente (AB) de tal manera que la relación voltaje/separación de los electrodos se pueda aproximar a un gradiente del potencial en el punto medio del arreglo de electrodos.

A partir de los valores medidos de corriente, de potencial eléctrico y del factor geométrico para cada disposición de electrodos se obtiene la respuesta de resistividad aparente r_a , que irá variando al aumentar la distancia entre electrodos (AB) y consecuentemente aumentando la profundidad de investigación. Por lo tanto para cada sitio de sondeo se obtiene una curva de resistividad aparente en función de la semidistancia entre electrodos de corriente (AB/2). La interpretación de las curvas se realiza mediante la inversión de los datos experimentales de r_a , hallando modelos de resistividad eléctrica unidimensionales (1D), o sea unidades horizontalmente estratificadas, cuya respuesta ajuste la curva experimental minimizando el error cuadrático medio.

Metodología de trabajo

Se realizaron un total de 14 sondeos eléctricos verticales

(SEV) en los alrededores de las localidades de Gualeguaychú, Aldea San Antonio, Concepción del Uruguay y San José de aproximadamente 6200 m de apertura máxima (Fig. 1, Cuadro 3). Las mediciones de voltaje se registraron con un multivoltímetro con *data-logger* que permite monitorear los registros cada segundo, lo cual permitió estudiar el error y sobre todo hacer una evaluación cuidadosa del mismo en las aberturas más grandes donde las mediciones son sustancialmente críticas. Se utilizaron electrodos impolarizables de Pb- PbCl₂ construidos en los laboratorios del Instituto de Geocronología y Geología Isotópica (INGEIS) con el propósito de bajar la diferencia de potencial natural del suelo lo más posible, si bien se inyectaron corrientes con intensidades del orden de los 3 A, la disminución de la diferencia de potencial y la estabilidad de la resistencia de contacto nos permitieron lograr mediciones de la respuesta del terreno de mejor calidad.

Se utilizaron imágenes satelitales, fotos aéreas y cartas topográficas para elegir tanto la posición como la orientación de los SEV en cada localidad, de manera tal que la elección de los perfiles satisfaga, lo más posible, las condiciones de homogeneidad lateral haciendo aplicable la teoría de capas estratificadas. En algunas localidades, se realizaron dos perfiles en la misma posición, en direcciones perpendiculares, para detectar posibles heterogeneidades bidimensionales (2D) profundas. La inversión de los datos experimentales se realizó con el programa IPIWIN (Bobachev *et al.* 2000).

Como regla general se realizaron tres SEV por localidad. En algunos casos se pudo encontrar un único modelo que represente todos los SEV del lugar dentro de una dispersión del 10%.

Si bien las condiciones experimentales permitieron mejorar notablemente la calidad de los datos, es sabido que los modelos que se obtienen por este método no son únicos ya que curvas SEV similares pueden dar lugar a modelos diferentes. En particular, la determinación del basamento cristalino (a profundidades mayores de 1000 m) estaría en el límite del uso del método geoelectrónico.

Cuadro 3: Ubicación geográfica y orientación de los SEV.

Sitio	Latitud	Longitud	Dirección
SEV 1	S33° 2.08'	O58° 22.51'	Norte
SEV 2	S33° 0.22'	O58° 24.47'	Noreste
SEV 3	S33° 3.77'	O58° 23.49'	Oeste
SEV 4	S33° 3.29'	O58° 42.10'	Norte
SEV 5	S33° 3.29'	O58° 42.10'	Noroeste
SEV 6	S33° 2.75'	O58° 41.50'	Noreste
SEV 7	S32° 36.10'	O58° 42.29'	Norte
SEV 8	S32° 35.62'	O58° 42.27'	Este
SEV 9	S32° 39.03'	O58° 42.03'	Norte
SEV 10	S32° 13.72'	O58° 19.34'	Este
SEV 11	S32° 12.57'	O58° 15.96'	Norte
SEV 12	S32° 11.73'	O58° 12.63'	Este
SEV 13	S32° 28,323'	O58° 16.809'	Norte
SEV 14	S32° 28,285'	O58° 16.539'	Este

AB = 6 km, excepto para SEV 10 donde AB = 3 km

Para mejorar la interpretación se utilizó la información provista por los antecedentes geológicos y geofísicos mencionados anteriormente, especialmente los trabajos realizados por Ainchil y Giusso (1996), Silva Busso (1999) y Zunino y Ainchil (2000), donde los SEV fueron realizados según el método Schlumberger con una apertura máxima AB entre 5000 y 7000 m, procurando detectar el techo del basamento cristalino a profundidades cercanas a los 1000-1200 metros. La interpretación de los modelos de resistividad eléctrica (1D) han permitido caracterizar los diferentes horizontes y correlacionar los mismos con las unidades estratigráficas involucradas con el acuífero termal:

- Formaciones suprabasálticas: Constituidas por varias capas o cortes geoelectricos atribuidas a secuencias de arenas,

arcillas u ambas. Se asignan resistividades características a litologías relacionadas. Para arcillas entre 12-18 ohm-m, limos entre 13-20 ohm-m, arenas limosas o arcillosas entre 21-40 ohm-m y areniscas 50 ohm-m.

- Coladas basálticas: Presentan contraste con la anterior debido a su elevada resistividad superior a los 80 ohm-m y alcanzando casi los 200 ohm-m. En algunos casos se observan resistividades bajas entre 20-60 ohm-m de acuerdo a su intensa fracturación que permite contener agua en las fisuras con diferente contenido de sales.

- Areniscas infrabasálticas: Se le atribuyeron resistividades del orden de 3-25 ohm-m con un fuerte contraste con la resistividad de los basaltos y del basamento cristalino. La detección de esta capa eléctricamente muy conductora permite asegurar la presencia de sedimentos infrabasálticos aunque no permite asegurar la presencia del acuífero termal.

Tanto las perforaciones como los estudios geofísicos previos han manifestado condiciones estructurales muy distintas aún en sitios ubicados a distancias relativamente cortas, como ocurre en algunos altos estructurales del basamento donde los basaltos se apoyan en forma discordante sobre esta estructura con ausencia de depósitos clásticos intercalados.

Resultados geofísicos

A continuación se muestran algunas de las curvas de campo con sus interpretaciones en resistividades eléctricas o análisis de anomalías.

En la figura 2 se observan los datos de campo de los alrededores de Ñandubayzal (SEV 1, 2, y 3) donde en el SEV 1 (el más cercano a la costa del río Uruguay) se observa un anormal crecimiento de la resistividad aparente para aberturas mayores de 3.000 metros. Este comportamiento puede estar sugiriendo un control estructural y discontinuidades laterales en los basaltos que estarían distorsionando la curva por tratarse de un efecto 2D o 3D en la estructura. Por lo tanto la interpre-

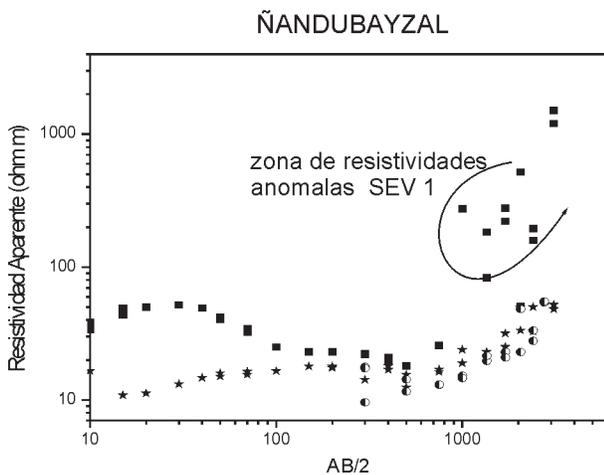


Figura 2: Datos de resistividad aparente en función de las semi-aberturas de los electrodos de corriente correspondientes al SEV 1, SEV 2 y SEV 3 (cuadrados, estrellas y círculos respectivamente). En el SEV 1 la resistividad aparente trepa a valores inusuales que sugieren la presencia de controles estructurales.

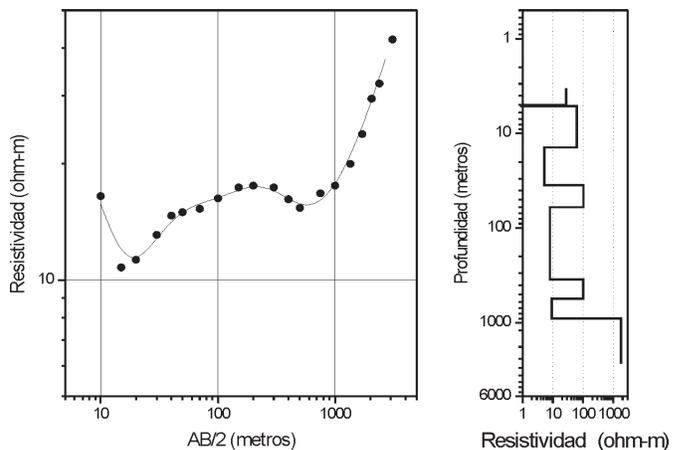


Figura 3: Datos medidos (●) en el SEV 2 junto a la respuesta del modelo propuesto (línea llena) en representación log-log. Y a la derecha el perfil de resistividad eléctrica con la profundidad correspondiente a las respuestas mostradas en representación log-log. El error en el ajuste de los modelos es de ~ 4.0%

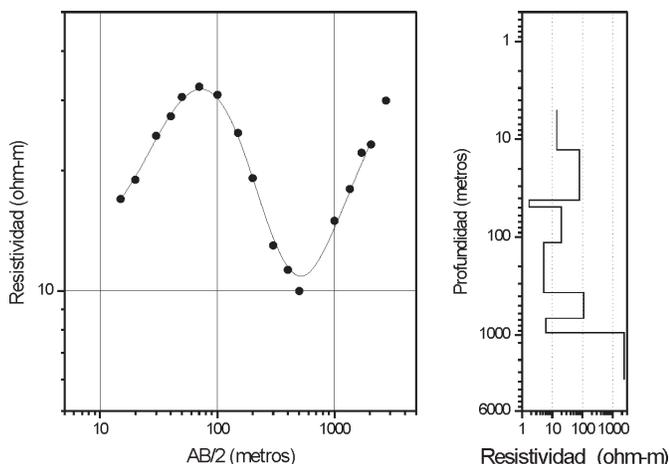


Figura 4: Datos medidos (·) en el SEV 6 junto a la respuesta del modelo propuesto (línea llena) en representación log-log. Y a la derecha el perfil de resistividad eléctrica con la profundidad correspondiente a las respuestas mostradas en representación log-log. El error en el ajuste de los modelos es de ~ 2%

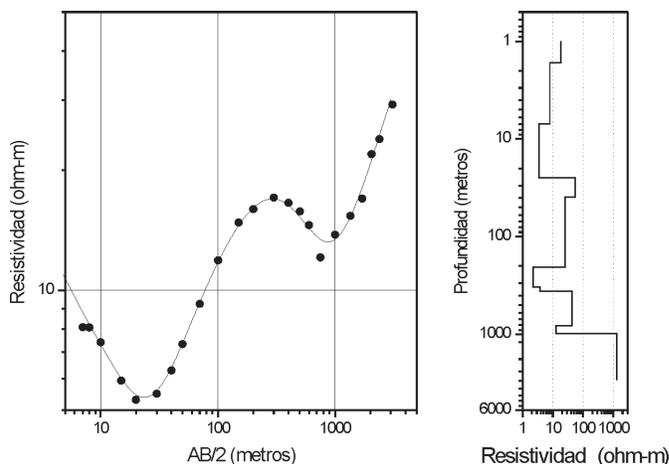


Figura 5: Datos medidos (·) en el SEV 9 junto a la respuesta del modelo propuesto (línea llena) en representación log-log. Y a la derecha el perfil de resistividad eléctrica con la profundidad correspondiente a las respuestas mostradas en representación log-log. El error en el ajuste de los modelos es de ~ 3.5%

tación de la profundidad del basamento en este SEV puede tener errores adicionales debido a la aplicación de una interpretación 1D en una estructura que no lo es. En la figura 3 se muestran el modelo y la respuesta ajustada a los datos experimentales para el SEV 2.

En la figura 4 se observa el ajuste de la curva de resistividad aparente para el SEV 6 y el modelo de resistividad eléctrica obtenido. Este modelo es representativo de los tres sitios correspondientes a los alrededores de Gualeguaychú, dado que la dispersión en los ajustes de los SEV 4, 5 y 6 es menor al 10%. Resultados equivalentes para el SEV 9, en Aldea San Antonio, se muestran en la figura 5, con dispersiones similares en los SEV 7 y 8. En todos los sitios precedentes los modelos presentan una capa conductora por encima del basamento

con valores de resistividad menores a la capa basáltica inmediata superior.

En las figuras 6 y 7 se presentan los resultados para Concepción del Uruguay y San José (SEV 10 y SEV 13 respectivamente), donde no se manifiesta la presencia de una capa conductora entre los basaltos y el basamento.

En el cuadro 4 se observan los datos del techo del basalto en metros (TB), el espesor promedio del basalto en metros (EB) y la profundidad promedio del basamento cristalino en metros (TBC) obtenidos de los SEV. A partir de estos resultados se puede concluir que la profundidad a la que aparece el basamento cristalino en la zona, según los estudios SEV, es en promedio de 900 m, observándose una leve tendencia de aumento de la profundidad hacia el norte hasta Concepción

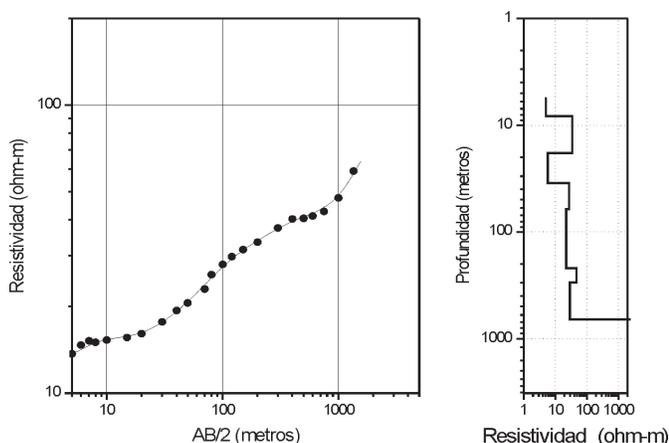


Figura 6: Datos medidos (·) en el SEV 10 junto a la respuesta del modelo propuesto (línea llena) en representación log-log. Y a la derecha el perfil de resistividad eléctrica con la profundidad correspondiente a las respuestas mostradas en representación log-log. El error en el ajuste de los modelos es de ~2.2%

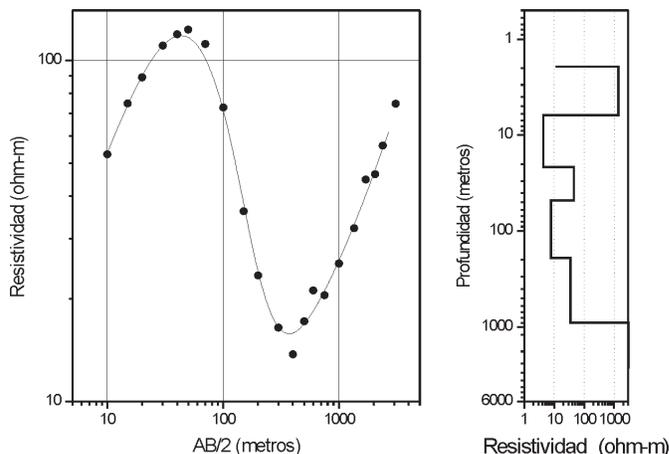


Figura 7: Datos medidos (·) en el SEV 13 junto a la respuesta del modelo propuesto (línea llena) en representación log-log. Y a la derecha el perfil de resistividad eléctrica con la profundidad correspondiente a las respuestas mostradas en representación log-log. El error en el ajuste de los modelos es de ~4.2%

Cuadro 4: Datos del techo del basalto en metros.

	SEV 2	SEV 3	SEV 4, 5, 6	SEV 7, 8, 9	SEV 10	SEV 11	SEV 12	SEV 13,14
T_B	300	370	430	400	280	300	220	290
E_B	130	100	240	370	500	500	660	360
T_{B_C}	830	850	950	1000	800-1000	800	880	630-670

(**T_B**), espesor promedio del basalto en metros (**E_B**) y profundidad promedio del basamento cristalino en metros (**T_{B_C}**) obtenidos de los SEV. En Aldea San Antonio y Gualeguaychú se asignó un valor promedio a los tres SEV.

del Uruguay y San José (SEV 10, 11 y SEV 12, 13 y 14) donde el basamento está más elevado. En estos últimos sitios los resultados no revelan la presencia de sedimentos infrabasálticos lo que sugiere la presencia de un alto estructural en la zona de Colón, donde el basamento se halló a 780 metros (Cuadro 2).

Se observa una marcada disminución del espesor del basalto hacia el sur (de 660 a 100 m), coincidente con la información de las perforaciones y lo señalado por Montañó *et al.* (1998) y Silva Busso (1999).

En la figura 8 se observa como varía la resistividad del basalto en los distintos sitios, donde la resistividad es más baja es de esperar que éste se encuentre fracturado y las intercalaciones con arcilla o arena y agua dominen la resistividad del conjunto, con lo cual aunque en Concepción del Uruguay y San José no hay indicios de la presencia de capa infrabasáltica, puede hallarse agua en las intercalaciones clásticas. Si bien la resistividad eléctrica del basalto sin alterar es extremadamente alta (~1000 ohm-m), la presencia de agua en fisuras, o en las capas clásticas intercaladas, modifica considerablemente los valores de resistividad eléctrica obtenidos a partir de los estudios geoelectrónicos.

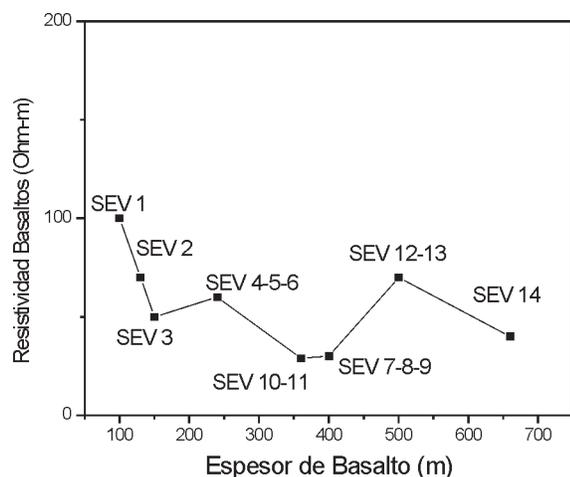


Figura 8: Se muestra la variación de la resistividad de los basaltos con el espesor. Estos valores alcanzan el máximo en Ñandubayzal donde tienen menos espesor y el mínimo en Aldea San Antonio y Concepción del Uruguay, mientras en San José se determinó el máximo espesor.

En la figura 9 se presenta un perfil sur-norte que contiene la interpretación de los resultados geofísicos. Se indica la profundidad del basamento cristalino, los espesores y profundidades de la capa infrabasáltica, basáltica y suprabasáltica.

Conclusiones

A partir de los resultados de los sondeos eléctricos verticales se ha interpretado que el basamento cristalino en el área considerada se encuentra a una profundidad promedio de 900 metros. La presencia de una leve tendencia de profundización hacia el norte se interrumpe en Concepción del Uruguay y San José (SEV 10,11 y SEV 12, 13 y 14) donde el basamento cristalino está más elevado y no se detectó una capa con bajos valores de resistividad asociada a los sedimentos que contienen al acuífero termal. Esta situación estructural es similar a la de Colón y difiere de la de Villa Elisa, donde se encontraron depósitos infrabasálticos hasta una profundidad de 1030 m, sin alcanzar el basamento. En los demás sitios (SEV 1-9) se determinó una capa conductora por debajo de los basaltos más resistivos, la cual podría alojar al acuífero termal.

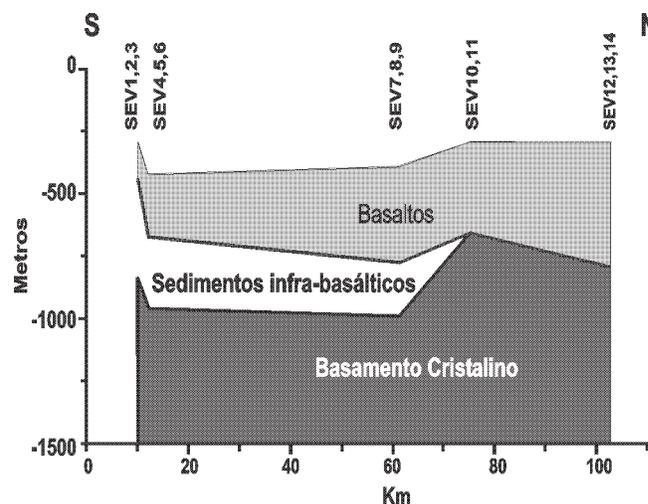


Figura 9: Esquema de los resultados de espesor y profundidad de la capa basáltica y del techo del basamento cristalino obtenido a partir de los SEV.

El espesor de la capa basáltica y la profundidad de su techo medidos en este estudio concuerdan con los valores publicados en los antecedentes. La resistividad eléctrica determinada para esta formación podría indicar la presencia de agua en fisuras o en las capas clásticas intercaladas (Miembro Solari).

Analizando todos los antecedentes y los resultados de esta investigación se concluyó que el factor determinante para la presencia de los sedimentos que alojan al Sistema Acuífero Guaraní en esta zona, es de tipo estructural y directamente vinculado con la profundidad del basamento cristalino.

El análisis de los SEV permitió determinar la geometría de los basaltos, los depósitos infrabasálticos y la profundidad del techo del basamento cristalino.

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- Ainchil, J. y Giusso, E. M., 1996. Perforación hidrotermal profunda en Villa Elisa (ER) el ajuste de la factibilidad geoelectrica y los criterios interpretativos. 1° Congreso Nacional de Hidrogeología. International Association of Hydrogeologist. Asociación Internacional de Hidrogeólogos, Grupo Argentino. Universidad Nacional del Sur. Departamento de Geología. Actas: 97-103, Bahía Blanca.
- Araujo, L. M., França, A. y Potter, P. E., 1999. Hydrogeology of the Mercosul aquifer system in the Paraná and Chaco-Paraná Basins, South America and comparison with the Navajo-Nugget aquifer system, USA. *Hydrogeology Journal*, 7(3): 317-339.
- Benítez, J. y Mársico, D. P., 2002. Contribución al conocimiento del subsuelo de Entre Ríos. La perforación Gualaguaychú-1. En: Cabaleri N., Cingolani, C.A., Linares, E., López de Luchi, M.G., Ostera, H.A. y Panarello, H.O. (eds.). 15° Congreso Geológico Argentino, Actas 2: 581-587, El Calafate.
- Bobachev, A., Modin, I.N. y Shevnin V., 1990-2000. Programa desarrollado por el Dept. of Geophysics. Geological Faculty. Moscow State University y Geoscan-M. Ltd.
- Campos, H.C.N.S., 1999. Mapa Hidrogeológico del Acuífero Guaraní. 1° Joint Word Congress on Groundwater. 11° ABAS – 5° ALHUSD, CD-Room: 1-15, Fortaleza.
- Chebli, G., Tofalo, O. y Turazzini, G., 1989. Mesopotamia. En: Chebli, G. y L. Spalletti (eds.) Cuencas Sedimentarias Argentinas. Universidad Nacional de Tucumán, Instituto Superior de Correlación Geológica, Serie Correlación Geológica 6: 79-100, Tucumán.
- Chebli, G. A., Mozetic, M. E., Rossello, E. A. y Buhler, M., 1999. Cuencas Sedimentarias de la Llanura Chacopampeana. Instituto de Geología y Recursos Minerales. Geología Argentina. Anales 29(20): 627-644, Buenos Aires.
- Código Argentino de Estratigrafía. Comité Argentino de Estratigrafía. Buenos Aires, 1992. Asociación Geológica Argentina. Publicación 20, 64 p.
- Dalla Salda, L., 1999. Cratón del río de la Plata. Geología Argentina, Instituto de Geología y Recursos Minerales, Anales 29(4): 97-106, Buenos Aires.
- Da Rosa Filho, E.F., Hindi, E.C. y Montaña Xavier, J., 2001. Effects of structural features on groundwater withdrawn from the Guarany Aquifer System – Estado Do Paraná, Brazil. International Conference on Hydrological Challenges in Transboundary Water Resources Management: 435-442, Koblenz.
- Diaz, E. L., Dalla Costa, O.A. y Sanguinetti, J.A., 2003. El Sistema Acuífero Guaraní. Los estudios, la explotación y Gestión en Entre Ríos. 3° Congreso Argentino de Hidrogeología, Memorias 1: 81-90.
- Favetto, A., Pomposiello, C., Bénédict, T. y Booker, J., 2004. Magnetotelluric model of the Chacoparenense sedimentary basin at 31.5S, Argentina. 17° International Workshop on Electromagnetic Induction in the Earth. Abstracts S-1 P-58: 77-78, Hyderabad.
- Fernández Garrasino, C., 1995. El "Paleodesierto de Botucatu-Solari" (Jurásico-Eocretácico de América del Sur). Significado Geológico y Paleoclimático. Boletín de Informaciones Petroleras. Tercer Época. Año 11, 43: 89-119, Buenos Aires.
- Fili, M., Tujchneider, O., Perez, M. y Paris, M., 1994. Investigaciones geohidrológicas en la provincia de Entre Ríos. En: Temas actuales de la Hidrología subterránea. Bocanegra y Rapaccini (Ed.). Consejo Federal de Inversiones y Universidad Nacional de Mar del Plata :299-313, Mar del Plata.
- Fili, M., da Rosa Filho, E.F., Auge, M., Montaña Xavier, J. y Tujchneider, O., 1998. El Acuífero Guaraní. Un recurso compartido por Argentina, Brasil, Paraguay y Uruguay (América del Sur). Instituto Tecnológico Geominero de España. Boletín Geológico y Minero 109(4): 389-394.
- GEF- Banco Mundial-OEA, 2001. Projeto Proteção Ambiental e Gerenciamento Sustentável Integrado do Sistema Aquífero. Guaraní. Argentina - Brasil - Paraguai – Uruguay. 236p.
- Gentili, C. y Rimoldi, H. 1979. Mesopotamia. Academia Nacional de Ciencias, Segundo Simposio Geología Regional Argentina, Academia Nacional de Ciencias, 1: 185-223, Córdoba.
- Herbst, R. 1971. Esquema estratigráfico de la provincia de Corrientes, República Argentina. Revista de la Asociación Geológica Argentina, 26(2): 221-243, Buenos Aires.
- Iriondo, M., 1980. El Cuaternario de Entre Ríos. Asociación de Ciencias Naturales del Litoral, Revista 11:125-141, Santa Fe.
- Milani, E., França, A. B. y Schneider, R., 1994. Bacia do Paraná. En: Estratigrafía das Bacias Sedimentares do Brasil. Feijó, F. (Ed.). Boletim de Geociencias Petrobras 8(1) 69-82, Rio de Janeiro.
- Montaña, J., Tujchneider, O., Auge, M., Fili, M., Paris, M., D'elia, M., Perez, M., Nagy, M.I., Collazo, P. y Decoud, P., 1998. Sistema Acuífero Guaraní. Capítulo argentino-uruguayo. Acuíferos regionales en América Latina. Centro de Publicaciones, Universidad Nacional del Litoral. 217p., Santa Fe.
- Orellana, E. 1972. Prospección geoelectrica en corriente continua. Paraninfo. 523 p., Madrid.
- Padula, E., 1972. Subsuelo de la Mesopotamia y regiones adyacentes. Geología Regional Argentina. 1° Simposio de Geología Regional Argentina. Academia Nacional de Ciencias: 213-235, Córdoba.
- Padula, E. y Mingramm, A., 1968. Estratigrafía, distribución y cuadro geotectónico-sedimentario del "Triásico" en el subsuelo de la llanura Chacoparanense. 3° Jornadas Geológicas Argentina, Actas 1: 291-331, Buenos Aires.
- Pesce, A., Rivara, A., Miranda, F. y Khachatryan, D., 2002a. Sistema Acuífero Guaraní: Una gran perspectiva de desarrollo geotérmico en el Noreste de Argentina. En: Cabaleri N., Cingolani, C.A., Linares, E., López de Luchi, M.G., Ostera, H.A. y Panarello, H.O. (eds.). 15° Congreso Geológico Argentino, Actas 2: 353-358, El Calafate.
- Pesce, A., Khachatryan, D., Miranda, F., Rivara, A. y Johannis, P., 2002b. Proyecto Termal Chajarí, Provincia de Entre Ríos, República Argentina. En: Cabaleri N., Cingolani, C.A., Linares, E., López de Luchi, M.G., Ostera, H.A. y Panarello, H.O. (eds.). 15° Congreso Geológico Argentino, 2: 347-352, El Calafate.
- Russo, A., Ferello, R.E. y Chebli, G., 1979. Cuenca Chacopampeana. En: Geología Regional Argentina. 2° Simposio de Geología Regional Argentina. Academia Nacional de Ciencias: 139-183, Córdoba.
- Sanford, R. y Lange, F., 1960. Basin study approach to oil evaluation of Paraná miogeosyncline, South Brazil. American Association of Petroleum Geologists, Bulletin 44(8): 1316-1370.
- Tujchneider, O., Pérez, M., Paris, M. y D'Elia, M., 2003. Sistema Acuífero Guaraní : Un recurso compartido por cuatro países. 3° Congreso Argentino de Hidrogeología, Memorias 1: 70-81, Rosario.
- Silva Busso, A. 1999. Contribución al Conocimiento de la Geología e Hidrogeología del Sistema Acuífero Termal de la Cuenca Chacoparanense Oriental Argentina. Tesis Doctoral Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires, (inédito).

- ta), Buenos Aires.
- Silva Busso, A. y Fernandez Garrasino, C. A., 2004. Presencia de las Formaciones Piramboiá y Botucatu (Triásico – Jurásico) en el subsuelo oriental de la provincia de Entre Ríos, Argentina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 59 (1): 141-151, Buenos Aires.
- Soares, P., 1981. Estratigrafía das Formações Jurássico-Cretáceas na Bacia do Paraná - Brasil. En: *Comité Sudamericano del Jurásico y Cretácico: Cuencas Sedimentarias del Jurásico y Cretácico de América del Sur*, 1: 271-304, Buenos Aires
- Sprechmann, P., Bossi, J. y Da Silva, J., 1981. Cuencas del Jurásico y Cretácico del Uruguay. En: Volkheimer, W. y Musacchio, E. (eds.), *Comité Sudamericano del Jurásico y Cretácico: Cuencas Sedimentarias del Jurásico y Cretácico de América del Sur*: 1: 239-270, Buenos Aires.
- White, I.C., 1908. Relatorio sobre as “Coal measures” e rochas asociadas do sul do Brasil. *Relatório Final da Comissãõ de Estudos das Minas de Carvão de Pedra do Brasil*. Imprensa Nacional, 1: 2-300, Río de Janeiro.
- YPF S.A., 1962. Perforación ERN (Nogoyá, provincia de Entre Ríos). Descripción de cuttings (informe inédito), Buenos Aires.
- Zunino, E. y Ainchill, J., 2000. Evaluación Geofísica del Acuífero Guaraní en la Argentina. 1^o Joint Word Congress on Groundwater. 11^o ABAS – 5^o ALHSUD. CD-Rom: 1-15, Fortaleza.

Recibido: 22/06/04

Aceptado: 01/12/04