

Definición del límite occidental del Sistema Acuífero Guaraní (Gran Chaco, Argentina): ¿técnico o convencional?

E. A. Rossello⁽¹⁾ y G. Veroslavsky⁽²⁾

(1) CONICET, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires, Pabellón II, Ciudad Universitaria (CP 1428) Buenos Aires, Argentina
ea_rossello@yahoo.com.ar

(2) Facultad de Ciencias, Universidad de la República – UDELAR. Iguá 4225 (CP 11400) Montevideo, Uruguay
gerardo@fcien.edu.uy

RESUMEN

Contrariamente con lo que ocurre con los confines orientales, septentrionales y australes del Sistema Acuífero Guaraní (SAG) que abarca importantes extensiones de Argentina, Brasil, Paraguay y Uruguay el límite occidental dentro del Gran Chaco, no tiene una expresión hidrogeológica contundente que pueda reconocerse tanto en superficie como en subsuelo. Por esta razón, la definición en este sector ofrece muy diversas alternativas dependientes de los factores e intereses que se tengan en cuenta. De este modo, algunos especialistas técnicos proponen localizaciones que involucran o excluyen otros extensos sectores del Gran Chaco Argentino que desde el punto de vista administrativo producen consecuencias económicas encontradas por su eventual manejo y aprovechamiento.

Las Lomadas de Otumpa, localizadas próximas al límite entre las provincias de Santiago del Estero y Chaco, son estribaciones topográficas muy suaves con alturas relativas de hasta 100 m con respecto a la monótona planicie circundante del Gran Chaco. Presentan una orientación regional de 200 km de longitud en dirección NNE, por un ancho variable de 20 a 80 km que expresa la presencia del Lineamiento Otumpa. Como las Lomadas de Otumpa tienen clara expresión superficial permiten establecer un límite geográfico a las secuencias portadoras del SAG a partir de: i) su notable expresión morfoestructural superficial y ii) la coincidencia aproximada del adelgazamiento y/o ausencia en el subsuelo de registros sedimentarios asociados.

Debido a que la definición de los límites del SAG tanto desde el punto de vista técnico como administrativo impacta en su evaluación, manejo, aprovechamiento y conservación, resulta muy interesante abocarse en su localización geohidrogeológica por encima de otros intereses.

Palabras clave: Gran Chaco (Argentina), límite occidental, Sistema Acuífero Guaraní

The definition of the western boundary of the Guaraní Aquifer System (Gran Chaco, Argentina): technical or conventional?

ABSTRACT

Unlike the eastern, northern and southern borders of the Guaraní aquifer system (GAS), which extends beneath considerable regions of Argentina, Brazil, Paraguay and Uruguay, the western boundary, within the Gran Chaco, has no clear hydrogeologic definition that can be recognized at either the surface or subsurface. For this reason, the precise location of the aquifer in this area is open to many different possibilities, depending upon the factors or interests involved. Thus technical specialists have proposed locations that include or exclude, according to their own criteria, large sections of the Argentine Gran Chaco, the management and use of which, from an administrative point of view, imply diverse economic consequences.

The Lomadas de Otumpa, located near the border between the Santiago del Estero and Chaco provinces, are gently sloping hills, rising to a height of no more than 110 m above the wide expanse of surrounding plains comprising the Gran Chaco. They trend NNE and are 200 km long and from 20 to 80 km in width, reflecting the presence of the regional Otumpa alignment. The Lomadas de Otumpa are clearly defined at the surface and thus they allow a geographical boundary to be imposed on the GAS sequences according to: i) their notable

structural features at the surface, and ii) the close matching of the thinning and/or absence of the associated sedimentary record underground.

Because the definition of the limits of the GAS has an influence on its evaluation, management, use and conservation, both at a technical and administrative level, it is of great importance to ascertain its hydrogeologic boundaries.

Key words: boundary, Gran Chaco (Argentina), Guaraní Aquifer System

ABRIDGED ENGLISH VERSION

Introduction and methods

Due to the transnational character of the Guaraní aquifer system (GAS), running beneath Argentina, Brazil, Paraguay and Uruguay, a knowledge of its physical characteristics and the factors controlling its hydrogeological behaviour are very important for its better management and protection. Unlike the eastern, northern and southern boundaries, where the limits of the GAS are well defined, at its western boundary, in the Gran Chaco of Argentina, there is no such clear definition of its limits, either at or beneath the surface. Thus the aim of our work here is to define the limits of the GAS in this western sector, a task that offers diverse alternatives depending upon both geological factors and the economic consequences for its eventual management and use.

Various technical specialists have proposed different conventional locations for the western boundary of the GAS, either including or excluding other extensive sectors of the Argentine Gran Chaco plain, which from an administrative point of view have different economic implications (Fig. 1). The inclusion of the eastern Bolivian foreland basins has been proposed on the basis of geomorphological continuity and some regional geological similarities with its neighbouring eastern regions. These are particularly associated with tectonic episodes and a geothermal anomaly located in the Paraguayan-Bolivian Chaco region (the Izozog arc), which shows a relatively similar evolution to that of the Pantanal region at the north end of the Paraná basin, where records of a high sedimentation rate and remobilization of cratonic sediments.

The definition of the limits of the GAS, both from a technical as well as administrative point of view impinges upon its correct assessment, management, use and conservation and thus it is extremely important to arrive at an objective recognition of its geohydrological limits over and above mere economic interests.

Results and Discussion

The Gran Chaco area is a vast region of plains with the phyto-geographical characteristics common to south-central South America, which in northern Argentina means forests, savannas of tall grasses and marshes in the humid eastern Chaco, and shrubs trees, cacti and hardy grasses in the semi-arid western Chaco. The sediments of the Gran Chaco region, in the vicinity of the Lomas de Otumpa hills, include a huge Pleistocene and Holocene cover where the remnants of the North Salado river alluvial cone are discernible. Most of the loess and alluvial deposits associated with the existing water systems are more modern units.

The volcanic flows of the Serra Geral formation and the intercalated continental sequences from the Solari formation are the oldest records (late-Jurassic to early-Cretaceous), the only outcrops of which known to date occur in the Argentine Mesopotamia (Fig. 2). At present there are no known sediments below the whole basaltic outcrops unmistakably similar to those in the eastern Entre Ríos province (wells in Chajarí, Federación, Villa Elisa, Concordia and Gualaguaychú). As far as the presence of this lithology in the Chaco province is concerned, the Pampa Bandera x-1001 oil-exploration wildcat reached probably Silurian deposits at 3,972 m but did not encounter the basalts of the Serra Geral formation. Thus this well confirmed the absence of volcanic flows towards the centre and western areas of Chaco province. But the information available, enhanced by some recent interpretations, indicates that the Serra Geral formation, and perhaps the synchronous clastic, continental intercalated Solari formation, are probably to be found in the subsoil of the eastern portion of the province, close to the right banks of the lower Paraguay and Paraná rivers.

The main protective unit of the most important reservoirs of the GAS is the overlying basalt set belonging to the Serra Geral formation. At the end of the Jurassic the genesis of important features of the Paraná faulting, together with the reactivation of old fractures, were mainly linked to the disruption of Gondwanaland and associated extensional fragmentation. As a consequence of this, the deep dislocation of the crust would have significantly controlled the emanation of the lavas of the Serra Geral and equivalent formations. In certain cases, the existence of cooling and tension fractures in folds associated with the brittle mechanical characteristics of the basalts might also be expected. In this way the early basalt flows are more fractured, whilst the later ones are less affected by the faulting, thus improving their protective qualities.

The Lomas de Otumpa are located in the centre of the Chacoparanense plain (Fig. 2) and were initially described by DEM and associated satellite optical imagery in a GIS. They are very gentle hills, some 110 m high, trending NNE-SSW for about 200 km and with a width varying between 20 and 80 km, which interrupt the uniformity of the otherwise flat relief (Fig. 4). The North Salado river exhibits a typical fan-drainage pattern affected by the uplift of the relief (Fig. 5). Continental silicified, quartzitic sedimentary rocks are exposed in poor and isolated areas arranged in subhorizontal levels in some quarry faces, where it is mined for use as ballast in roads (Fig. 3). The most important of these outcrops is to be found in Las Piedritas quarry (26° 50' S and 61° 30' W), representing 30 km² of outcrops and located about 45 km NW of the town of Las Breñas.

Two geological transects, supported by subsurface seismic information acquired during exploration for hydrocarbons, show deep structural expression across the Otumpa lineament and are interpreted as indicating regional dextral transpressional faulting. Thus the following transects are recognisable: i) Las Breñas, running through the basin of the same name in the Chaco Province; and ii) Telares, site of the so-called wildcat survey in the Santiago del Estero province. In both it is possible to recognize the control of these structures in the distribution of the Palaeozoic and Mesozoic sequences (Fig. 6).

In the Las Breñas transect (Fig. 6, A-B) the Otumpa lineament is associated with the faulting delimited by the west Las Breñas basin. It is interpreted as representing reactivation during the Andean wrench of the extensional hemi-graben faulting associated with the syntectonic deposition of the older units that make up its infill (Fig. 7). In the Telares transect the Otumpa lineament is associated with the transpressional structure that produced the uplifting, which led to the location of the exploratory Telares well, sunk to a final depth of 2,092 m (Fig. 6, C-D). In both cases, the structures expressed in the Otumpa lineament seem to control the western continuation of the deposition of the continental units directly beneath the GAS and therefore this feature has been suggested as forming its natural limit (Fig. 8).

The limits of the western boundary of the GAS within the extensive Gran Chaco plains, poorly characterized from scarce and very rare geological evidence, are difficult to define. On the other hand, the dynamics of the hydraulic features of the GAS are usually assumed to have their main source or recharge areas towards the eastern regions of the Paraná basin, within Brazilian territory. Therefore, the eventual western source areas located in the Andean foothills do not reveal any clear physical continuities or topographic gradients similar to the rest of the GAS.

This scenario requires a strategic decision that necessarily balances technical and conventional matters until further specific information is available. Meanwhile, the physical presence of the Lomas de Otumpa hills, associated with the deep eponymous lineament, provides a technical landmark for its western boundary with clear surface expression and also associated with the disappearance of the main geological sequences that underlie the GAS. In consequence, according to the geological evidence concerning both the surface and subsurface, it may well be asserted that the western boundary of the GAS is located approximately at the morphostructural lineament associated with the Lomas de Otumpa hills. Thus we propose an easily recognisable feature within the extensive plains of the Gran Chaco (Fig. 7) and in fact many researchers and general users now consider this feature to represent the western boundary of the GAS.

Introducción

Debido al carácter transnacional del Sistema Acuífero Guaraní (SAG) la definición de las características físicas y de los factores que controlan su comportamiento geohidrogeológico resultan muy importantes para su mejor manejo y protección (LEBAC, 2008a, 2008b; Sindico, 2011).

Contrariamente a lo que ocurre con los confines orientales, septentrionales y australes donde los límites del Sistema Acuífero Guaraní están bien definidos (PSAG, 2001; Hirata *et al.*, 2011), la frontera occidental dentro del Gran Chaco de Argentina no tiene una expresión geohidrogeológica contundente que pueda reconocerse tanto en superficie como en subsuelo. Por esta razón, el objetivo del presente trabajo es la definición de su límite en este sector, ya que ofrece muy diversas alternativas dependientes de los factores geológicos superficiales y del subsuelo y produ-

cen consecuencias económicas encontradas por su eventual manejo y aprovechamiento. Muchos autores adoptaron el criterio que aquí se desarrolla para la definición del límite occidental (LEBAC, 2008a; Santa Cruz, 2009).

El concepto inicial de "Sistema Acuífero Guarany" fue propuesto por Anton (1994, comunicación verbal, in Montaña *et al.* 1998). Con posterioridad, se propusieron nominaciones opcionales a partir de distintos conceptos definitorios: Acuífero Gigante del Mercosur, Acuífero Botucatu, Acuífero del Mercosur, Sistema acuífero del Mercosur, Sistema acuífero termal de la Cuenca Chacoparanense oriental de Argentina, Acuífero Guaraní, Sistema acuífero termal "Guaraní" (Araújo *et al.*, 1995; 1999; Fili *et al.*, 1998; Montaña *et al.*, 1998; Montaña y Collazo, 1998; Campos, 2000a, 2000b; Silva Busso, 1999; Pesce *et al.*, 2002a, 2002b; Silva Busso y Fernández Garrasino, 2004; Santa Cruz,

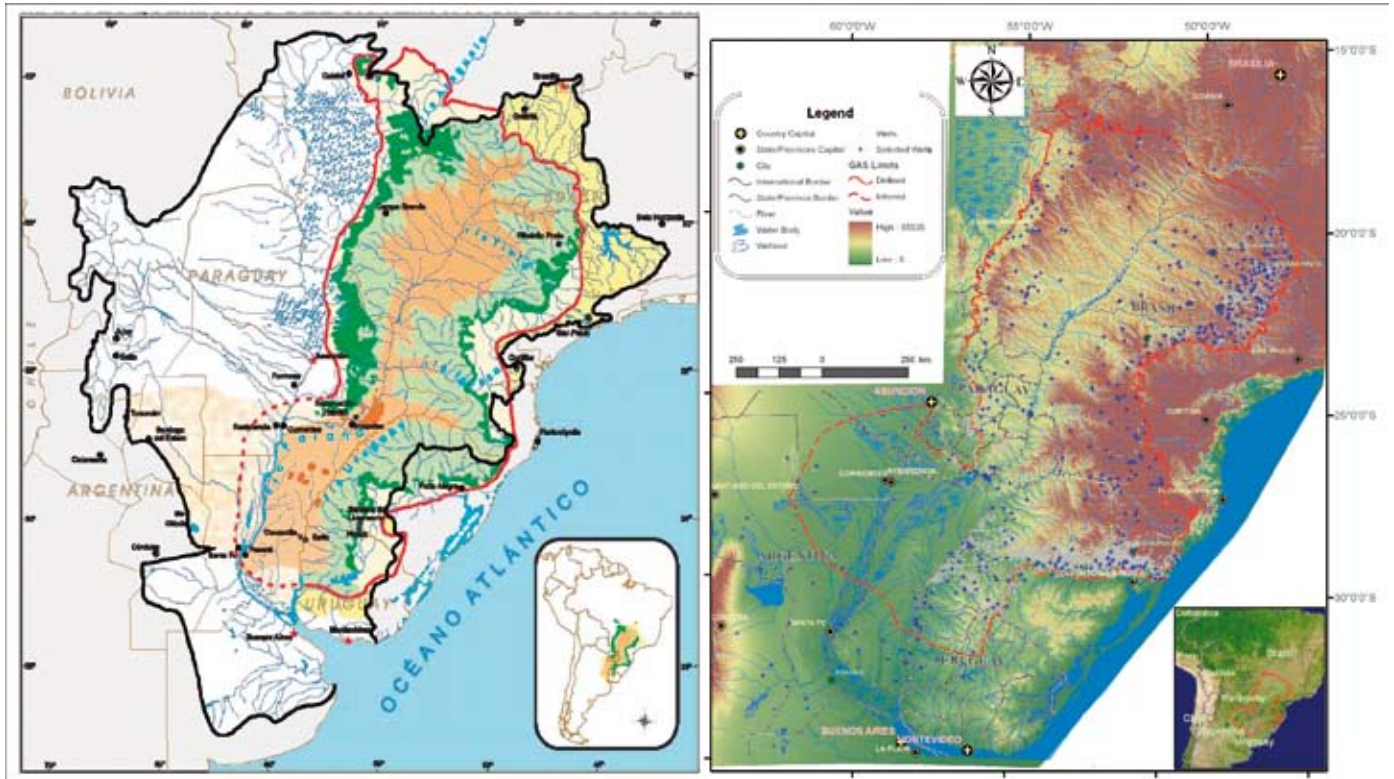


Figura 1. Ejemplos de diversas propuestas extremas del límite occidental del SAG. *Izquierda:* Una versión más extensa que incluye sectores del piedemonte andino de Argentina y Bolivia y partes de la Pampa bonaerense resultante del mapa esquemático del Sistema Acuífero Guaraní (PSAG, 2001), *Derecha:* Una versión más reducida que solo incluye algunos sectores de la Mesopotamia Argentina y de las provincias del Chaco y Formosa (LEBAC, 2008a).

Figure 1. Examples of some of the most extreme proposals for the western boundary of the SAG. *Left:* a wide version that includes the Andean piedmont areas of Argentina and Bolivia and parts of the Pampa in the province of Buenos Aires, deriving from the schematic map of the Guaraní aquifer system (PSAG, 2001). *Right:* a more confined version, including only parts of the Argentine Mesopotamia and the provinces of Chaco and Formosa (LEBAC, 2008a).

2009). Finalmente, se adoptó la nominación de Sistema Acuífero Guaraní (*vide* LEBAC, 2008b).

Diversos especialistas técnicos proponen localizaciones convencionales del límite occidental del SAG que involucran o excluyen otros extensos sectores del Gran Chaco Argentino que, desde el punto de vista administrativo, tienen diferentes impactos económicos sobre las regiones asociadas (Fig. 1). La inclusión de las cuencas de antepaís de la región oriental Bolivia fue propuesta de acuerdo con la continuidad geomorfológica y algunas similitudes geológicas regionales que guardan con sus vecinas comarcas orientales (Fernández-Garrasino, 2008). Particularmente, se asocian con los episodios tectónicos y de anomalía geotérmica localizados en la región chaqueña Paraguaya Boliviano (arco del Izozog) que poseen efectos evolutivos relativamente similares a la región del Pantanal emplazada en el extremo norte de la cuenca de Paraná, donde se registra una alta sedimentación y removilización de sedimentos de naturaleza cratónica.

Marco geológico del Gran Chaco y descripción de antecedentes

El Gran Chaco es una vasta región de planicies y características fitogeográficas propias del centro sur del continente Sudamericano que en el Norte Argentino se destaca por contener bosques, sabanas de pastos altos y pantanos grandes en el Chaco Oriental subhúmedo y árboles xerófitos, cactus y pastos resistentes en el Chaco Occidental semiárido (Iriundo, 1993).

En el territorio argentino, está contenido dentro de los registros más someros de la Cuenca Chacoparanense constituida por secuencias sedimentarias muy potentes que abarcan desde el Paleozoico inferior hasta el Cuaternario y los elementos magmáticos de la Formación Serra Geral (Chebli *et al.*, 1999). La delimitación y correlación de los depocentros que constituyen las cuencas Paraná y de la Llanura Chacoparanense (Fig. 2) ha planteado un gran desafío por la escasez de afloramientos, la importante cu-

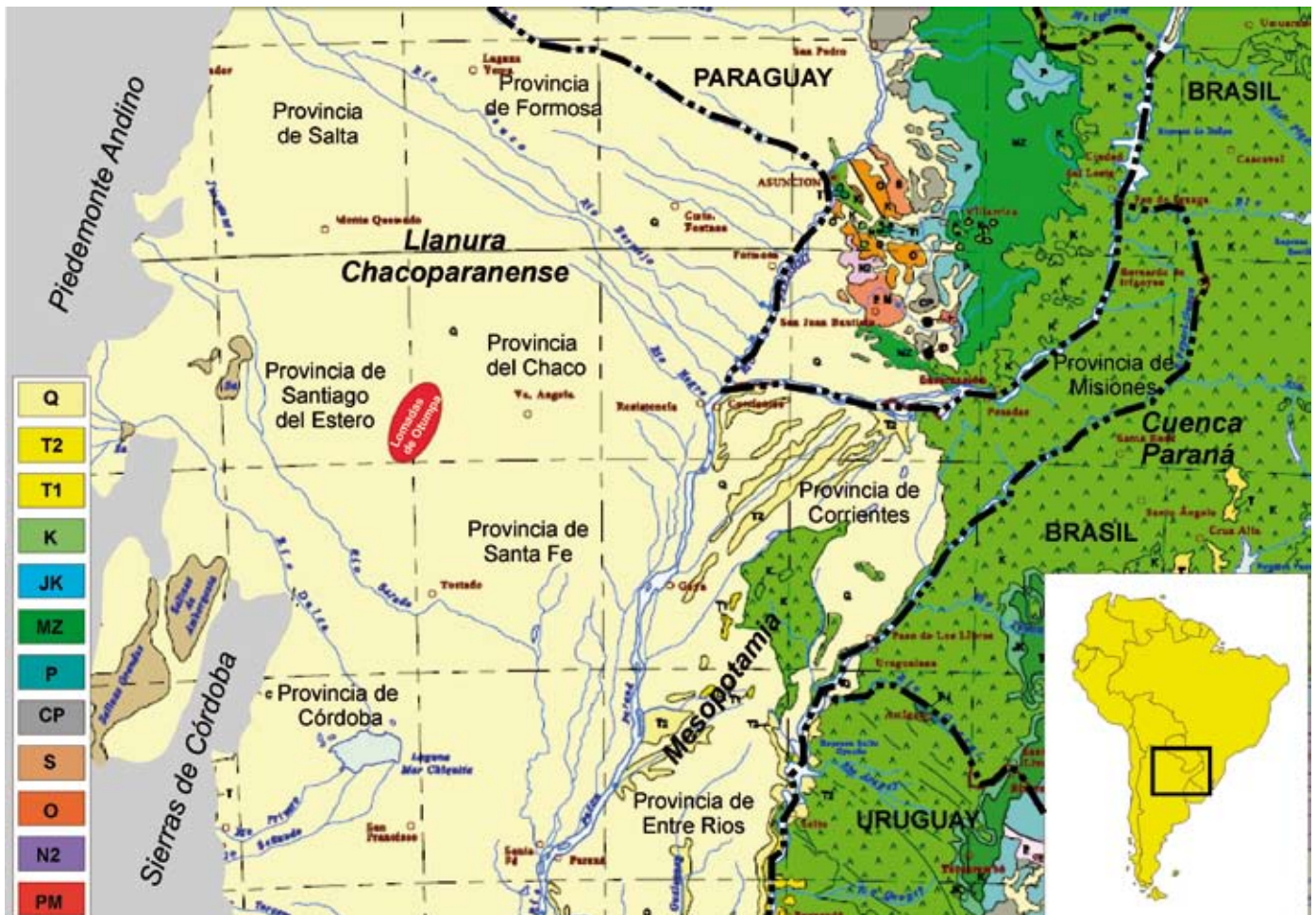


Figura 2. Rasgos geológicos regionales aflorantes de las Cuenas Paraná y Chacoparanense. La elipse roja indica la localización de las Lomadas de Otumpa. **PM:** Precámbrico Medio, **N2:** Neoproterozoico, **O:** Ordovícico, **S:** Silúrico, **CP:** Carbonífero-Pérmico, **P:** Pérmico, **MZ:** Mesozoico indiferenciado, **JK:** Jurásico-Cretácico, **K:** Cretácico, **T1:** Terciario Inferior, **T2:** Terciario Superior, **Q:** Cuaternario (tomado de Schobbenhaus & Bellizzi, 2001).

Figure 2. Regional outcropping geological features in the Paraná and Chacoparanense basins. The red ellipse indicates the location of the Lomadas de Otumpa. **PM:** Mid-Precambrian, **N2:** Neoproterozoic, **O:** Ordovician, **S:** Silurian, **CP:** Carboniferous-Permian, **P:** Permian, **MZ:** Indifferentiated Mesozoic, **JK:** Jurassic-Cretaceous, **K:** Cretaceous, **T1:** Lower-Tertiary, **T2:** Upper-Tertiary, **Q:** Quaternary (from Schobbenhaus & Bellizzi, 2001).

bierta moderna que posee y la dificultad en establecer parámetros de correlación homogéneos entre los geólogos de los cuatro países en los que se distribuyen (Argentina, Brasil, Paraguay y Uruguay). Al respecto, uno de los primeros esfuerzos en este sentido fue la aproximación de correlación litoestratigráfica regional realizada por França *et al.* (1995). Sin embargo, la caracterización morfológica y evolución de los depocentros que receptaron la sedimentación paleozoica y mesozoica aún mantienen importantes indefiniciones, controversias e incompatibilidades, justamente en la zona de transición entre los dos grandes ambientes tradicionalmente definidos: la Cuenca Paraná (en el sentido de Fulfaro *et al.* 1982; Zalán *et al.* 1990), al Este y las cuencas de la Llanura

Chacoparanense, al Oeste (en el sentido de Chebli *et al.* 1999), parcialmente separadas por el Alto de Asunción, considerado un alto fondo cuencial (Rossello *et al.*, 2006).

No obstante conocerse numerosos trabajos de síntesis que aluden a estas cuencas, no existe aún un marco físico de consenso que permita relacionar las diferentes unidades que se desarrollan desde el punto de vista litoestratigráfico y temporoespacial. Los principales problemas estratigráficos no solo son el resultado de trabajos locales que no han logrado compatibilizar las observaciones regionales en los diferentes depocentros sedimentarios, a veces dificultados por la escasa densidad de afloramientos y datos de subsuelo. Un aspecto que dificulta el armado de un

marco estratigráfico, es la complejidad estructural de algunas áreas, donde la conformación y reactivación de grandes estructuras generadas a partir de diversos episodios tectónicos modificaron a lo largo de la evolución de las cuencas sus depocentros, áreas de aportes, facies, arquitecturas y características petrofísicas.

A pesar del registro sedimentario potente que acumulan los depocentros de la llanura chacopampeana (Chebli *et al.*, 1999), la única unidad relativamente rocosa identificada en la superficie de la comarca estudiada de las Lomadas de Otumpa que podría representar el substrato pre-aluvial es la Formación Las Piedritas (Miró y Martos, 2002).

La definición de secciones pre – Formación Serra Geral inequívocas en la Mesopotamia argentina (Fig. 2), es una de las finalidades de las investigaciones geológicas y geofísicas, y de las revisiones de la información existente. En este sentido, resulta de gran interés el análisis de estructuras sedimentarias de paleoflujos, tanto direccionales como vectoriales, eventualmente presentes en secuencias de la Formación Misiones, expuestas tanto en Paraguay oriental, como en Paraguay austral, desde Asunción, hasta la margen derecha del río Paraná hacia el Sur del río Tebicuary.

Circunstancias similares se dan en partes centrales y orientales de la provincia de Corrientes (Fig. 2), con respecto a los afloramientos de la Formación Solari y de los todavía no observados asomos de acumulaciones clásticas infrabasálticas en la región (Herbst *et al.*, 1985). Según iguales propósitos, es necesario atender también a posibles áreas de emisión y rasgos de fluidalidad en los mantos lávicos de la Formación Serra Geral y análogas, presentes tanto en Corrientes como en Paraguay. Parte de los interrogantes a resolver son los comportamientos y disposiciones espaciales de las pendientes regionales y la existencia y grado de influencia de supuestos elementos de control tectosedimentario y paleogeográfico y sus significados respecto de variables hidrodinámicas.

Descripción e interpretación tectonoestratigráfica

Desde el punto de vista sedimentológico, la región del Gran Chaco, en los alrededores de las Lomadas de Otumpa, constituye una cubierta sedimentaria vinculada a eventos del Pleistoceno medio a superior y Holoceno, donde se identifican el cono aluvial del río Salado del Norte con remanentes de su antiguo sistema fluvial (Miró y Martos, 2002). Los depósitos loésicos más modernos y los sedimentos aluviales de los sistemas hídricos actuales constituyen las unidades de mayor desarrollo.

El cono aluvial del río Salado posee su ápice en las Sierras Subandinas de la provincia de Salta a partir del cual se distribuye sobre una amplia región del Chaco Occidental (provincias de Chaco, Santiago del Estero y Norte de Santa Fe), con unos 650 km de extensión, entre su ápice y el río Paraná (Castellanos, 1968; Miró y Martos, 2002, Peri y Rossello, 2010). El abanico aluvial quedaría comprendido entre los 60° 00' y 64° 00' de longitud Oeste y 25° 00'-29° 30' de latitud Sur, considerándose como límite oriental del antiguo abanico el cauce del río Negro en la provincia de Chaco ampliándose así el definido por Iriondo (1984).

Los derrames volcánicos de la Formación Serra Geral, y sus alternancias continentales pertenecientes a la Formación Solari, son los registros con expresión superficial más antiguos conocidos hasta la fecha en la Mesopotamia argentina (Fernández Garrasino, 1995). En la región, aún no se dio con afloramientos inequívocos de sedimentitas infrapuestas al conjunto basáltico, similares a las alumbradas en el subsuelo del oriente de Entre Ríos (pozos de Chajarí, Federación, Concordia, Villa Elisa y Gualeguaychú). La Mesopotamia argentina solo había permitido reconocer exposiciones de la unidad protectora del SAG, es decir, el conjunto basáltico de la Formación Serra Geral y sus intercalaciones clásticas coetáneas reunidas en la Formación Solari (Herbst *et al.* 1985). Ambas representaban las entidades aflorantes más antiguas de esa región. Los últimos levantamientos geológicos en la provincia de Misiones revelaron que varios asomos de areniscas con cualidades estratigráficas y sedimentológicas que las asemejan a la Formación Botucatu, deben ser consideradas como pertenecientes a la Formación Misiones (Marengo y Net 2004; Marengo *et al.* 2005), lo que adquiere significación como posibles zonas de recarga del acuífero.

La disposición estratigráfica que forma parte del subsuelo del Chaco paraguayo compuesta de efusivas eocretácicas apoyadas sobre las secuencias eólicas y fluviales de la Formación Berta atribuidas al Neojurásico permite considerarla equivalente a los conspicuos arreglos de la Cuenca Paraná definidos por conjuntos basálticos neojurásicos – eocretácicos suprayacentes a depósitos eólicos y fluviales pre – Neojurásico tardío (Fernández Garrasino, 2011, *com. verb.*). Estos están representados por los siguientes tres pares, constituidos de arriba hacia abajo, por: i) la Formación Alto Paraná – secciones superiores de la Formación Misiones (Paraguay oriental), ii) la Formación Serra Geral – Formación Botucatu (Brasil y Argentina) y iii) la Formación Arapey – Formación Tacuarembó – Miembro Superior (Uruguay). Asimismo, las partes inferiores de la Formación Berta podrían ser más antiguas que lo estimado hasta ahora, y resultar

correlacionables con registros fluviales basales de la Formación Misiones (Paraguay oriental), y también con depósitos similares de las Formaciones Piramboia (Brasil) y Tacuarembó Miembro Inferior (Argentina-Uruguay), todos asignables, total o parcialmente, al intervalo que va desde el Triásico al Juro-eocretácico. Salvo la Formación Berta por ahora, todas las unidades nombradas, son consideradas pertenecientes al Acuífero Guaraní; por lo tanto, las equivalencias sugeridas hacen aceptable la eventual presencia de reservorios de esa entidad hidrogeológica en el subsuelo del Chaco paraguayo.

En el oriente de la provincia de Formosa (Fig. 2), la presencia de basaltos de la Formación Serra Geral y de secuencias areniscosas subyacentes, puestas de manifiesto por el pozo Mariano Boedo (Fig. 2), prolonga hasta esa provincia el interés por los recursos hídricos e hidrotermales del SAG. Estos registros clásticos infrabasálticos también se caracterizan por

areniscas rojizas con matriz limosa y cemento carbonático, algo friables, con individuos de cuarzo subredondeados a redondeados y escasos litoclastos (Fig. 3). Estas acumulaciones de cuño continental resultarían litoestratigráficamente equivalentes a las Formaciones Misiones (Paraguay), Piramboia y Botucatu (Brasil) y Tacuarembó (Uruguay).

Con respecto a la presencia de estas litologías en la provincia del Chaco (Argentina), el pozo de exploración petrolera Pampa Bandera 1001, perforado por Pluspetrol en 1991 (a unos 55 km al NE de la población de Presidencia Roque Sáenz Peña); llegó a una profundidad final 3972 m en depósitos atribuidos al Silúrico pero no dio con el conjunto de basaltos neojurásicos – eocretácicos de la Formación Serra Geral. De este modo, reafirmó la ausencia de las volcanitas hacia el centro y occidente de la provincia. Pero la información disponible, enriquecida con algunas interpretaciones recientes (Fernández Garrasino, 2008), indican que el

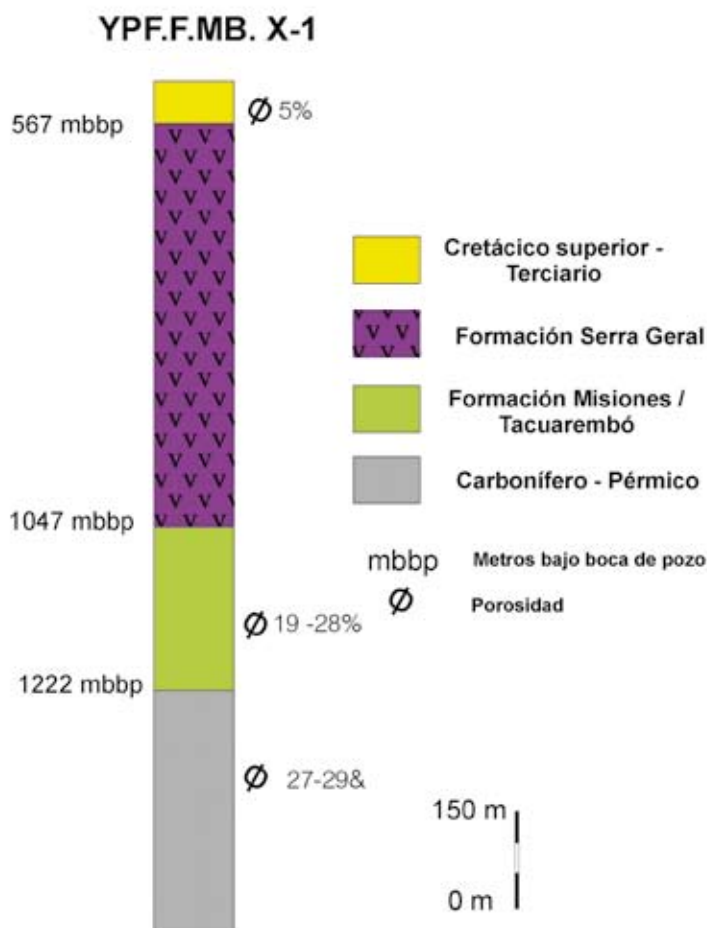


Figura 3. Perfil litológico del Pozo Mariano Boedo YPF-FMB-1 y detalle de las areniscas eólicas de la Formación Misiones / Tacuarembó entre 1112-1118 metros bajo boca de pozo-(tomado de LCV, 2008).

Figure 3. Lithological profile of the YPF Mariano Boedo-FMB-1 well and detailed photographs of the eolian sandstones of the Misiones/ Tacuarembó formations between 1,112 to 1,118 m (from LCV, 2008).

conjunto basáltico neojurásico-eocretácico de la Formación Serra Geral, y quizás los clásticos continentales sincrónicos intercalados de la Formación Solari, se hallarían todos en el subsuelo de la comarca oriental de la Provincia, vecina a las márgenes derechas del bajo río Paraguay y del Paraná.

El pozo Las Mochas (perforado por Shell en 1992), localizado en el ángulo NO de la provincia de Santa Fe y en cercanías de Villa Minetti y del límite con la provincia del Chaco no alumbró los basaltos de Serra Geral, pero atravesó una sección de 518 m de espesor (entre 440 y 958 m de profundidad) integrada principalmente por areniscas de posible origen eólico, con valores de porosidad de más de 20% y hasta 30%. Aun sin confirmación, tales areniscas podrían guardar cierta equivalencia con las unidades productoras hidrotermales aludidas del Este de la provincia de Entre Ríos, las formaciones Botucatu de Brasil, Tacuarembó de Uruguay y secciones superiores de la Formación Misiones de Paraguay. Este hallazgo en la parte más septentrional de la provincia de Santa Fe, atestigua a favor de la presunta existencia de las areniscas infrabasáltica del SAG en el subsuelo del oriente chaqueño. Por lo tanto, vendría en una comarca inicialmente prioritaria a los fines de la exploración hidrotermal en la provincia, a semejanza con lo que ocurre en el Este de la provincia de Entre Ríos y en el litoral occidental uruguayo.

La principal unidad protectora de reservorios más significativos del Acuífero Guaraní es el sobrepuesto conjunto basáltico de la Formación Serra Geral. A fines del Jurásico, la génesis de rasgos importantes del fallamiento actual de las regiones paranenses, así como las reactivaciones de antiguas fracturas, estuvieron principalmente vinculados con la disrupción gondwánica y la fragmentación distensiva asociada. Como secuela de ello, la dislocación de alcance profundo habría controlado de modo significativo la efusión de las lavas de Serra Geral y equivalentes (Neojurásico-Eocretácico). También, en determinados casos es esperable la existencia de diaclasas de enfriamiento y fracturas tensionales en fajas axiales de pliegues antiformales asociadas con las características mecánicas de los basaltos. De este modo, los basaltos iniciales se hallarán más fracturados, pero los mantos más modernos estarán menos afectados por el fallamiento, mejorando sus cualidades de protección.

Estas son todas alternativas que hacen al análisis de la eficacia de la cubierta protectora de los reservorios. Pero también es muy probable que, en el Noreste de la provincia de Entre Ríos y sureste de la provincia de Corrientes, próximo al río Uruguay, parte de las citadas producciones hidrotermales del subsuelo, también procedan de niveles fracturados

y secciones permeables poco potentes del conjunto volcánicoclástico de las formaciones Serra Geral-Solari, sobrepuesto a las areniscas acuíferas aludidas. En la zona termal de Salto, Concordia y alrededores los espesores de basaltos aumentan considerablemente de 1100 m a 1200 m localizados posiblemente a unos 2500 m de profundidad según relevamientos AMT-MT (Favetto *et al.*, 2005). Mientras que en Monte Caseros exhiben pocos cientos de metros y si están fracturados pueden aportar al sistema hidrotermal. Esta situación parece continuar hasta la meseta de Mercedes donde además las ventanas de afloramientos muestran controles estructurales dispuestos de modo NO-SE.

Estas observaciones sumadas a las consideradas en el párrafo anterior acerca de la fracturación, generarían dudas en cuanto a la eficacia protectora como sello impermeable del conjunto basáltico. A pesar de ello, durante la perforación de los últimos pozos termal del área entrerriana, luego de entubación y cementación frente a los niveles cenozoicos y cretácicos más jóvenes, no se advirtieron pérdidas de circulación de lodo de perforación (bentonita y agua) cuando se atravesaban los sucesivos derrames básicos. Tampoco se apreció una caída significativa de su densidad, o entrada de agua de formación y consiguiente ascenso de nivel en piletas, ni disminuciones del cronometraje que denunciaran terrenos demasiado permisivos al avance del trépano, e incluso el registro del diámetro de pozo no puso de manifiesto sensibles efectos de derrumbe de paredes. Además, este sistema artesiano uruguayo-mesopotámico del oriente entrerriano (termas de Chajarí, Federación y Concordia de Argentina, y de Arapey, Daymán y Guaviyú de Uruguay) vinculado con reservorios areniscos infrabasálticos mantiene sus buenas condiciones dinámicas de surgencia en boca de pozo, circunstancia que indicaría cierto grado de resguardo de presiones, conferible a la presencia de los mantos volcánicos suprayacentes.

Las lomadas de Otumpa

Las Lomadas de Otumpa se ubican en la parte central de la Llanura Chacoparanense (Fig. 2) y fueron descritas inicialmente a partir de un Modelo Digital de Elevaciones (MDE) e imágenes satelitales ópticas asociados en un Sistema de Información Geográfico (Rossello y Bordarampé, 2005; Rossello *et al.*, 2005, 2007). Son estratificaciones topográficas muy suaves de unos 200 km de longitud por un ancho variable de unos 20 a 80 km y alturas relativas con respecto a la gran planicie circundante de hasta 100 m con una orientación regional NNE que interrumpen la monotonía del relieve llano donde

el patrón de drenaje del río Salado del Norte exhibe diseños asociados y dependientes de las modificaciones de relieve que allí se reconocen (Fig. 4). Si bien la vegetación del monte chaqueño oblitera su reconocimiento desde la superficie, los procesamientos de cartografía digital logran poner en evidencia este relieve (Peri y Rossello, 2008, 2010).

Se aprecian litologías areniscosas cuarcíticas silicificadas en escasos y aislados sectores dispuestas en bancos subhorizontales aflorantes únicamente en algunos frentes de explotación de canteras donde se la aprovecha como material de construcción de carreteras. La cantera Las Piedritas (26° 50' S y 61° 30' O), es la localidad más importante representativa de unos 30 km² y ubicada a unos 45 km al NO de la localidad de Las Breñas (Fig. 5). Allí se reconocen (V.G. Peri, *en elaboración*) bancos areniscosos espesor promedio de los niveles inferiores (**Se**) alcanza como máximo

2 metros y está constituida por una arenisca de color gris amarillento de muy buena compactación y cohesividad y estratificación entrecruzada en artesa, con bancos de 10 a 20 centímetros de espesor, aunque predominan los de mayor espesor (20 cm). Sobre los planos de estratificación, se observan niveles de arcillas blanquecinas. Siguen transicionalmente unos 3 m de niveles areniscosos cuarcosos rojizos (**Ses**) totalmente silicificada y probablemente posea cemento hematítico, tamaño de grano fino a muy fino de buena selección muy abundante cementación silícea amorfa intersticial. Se observan numerosas microestructuras, relacionadas a esta cementación, desde granos reemplazados a abundantes geodas, en donde la precipitación interna siempre se observa amorfa. Por encima, se presentan niveles carbonáticos (**Cm**) que alcanza algunos metros de espesor blanquecinos amarillentos. En general, sus contactos son bastante

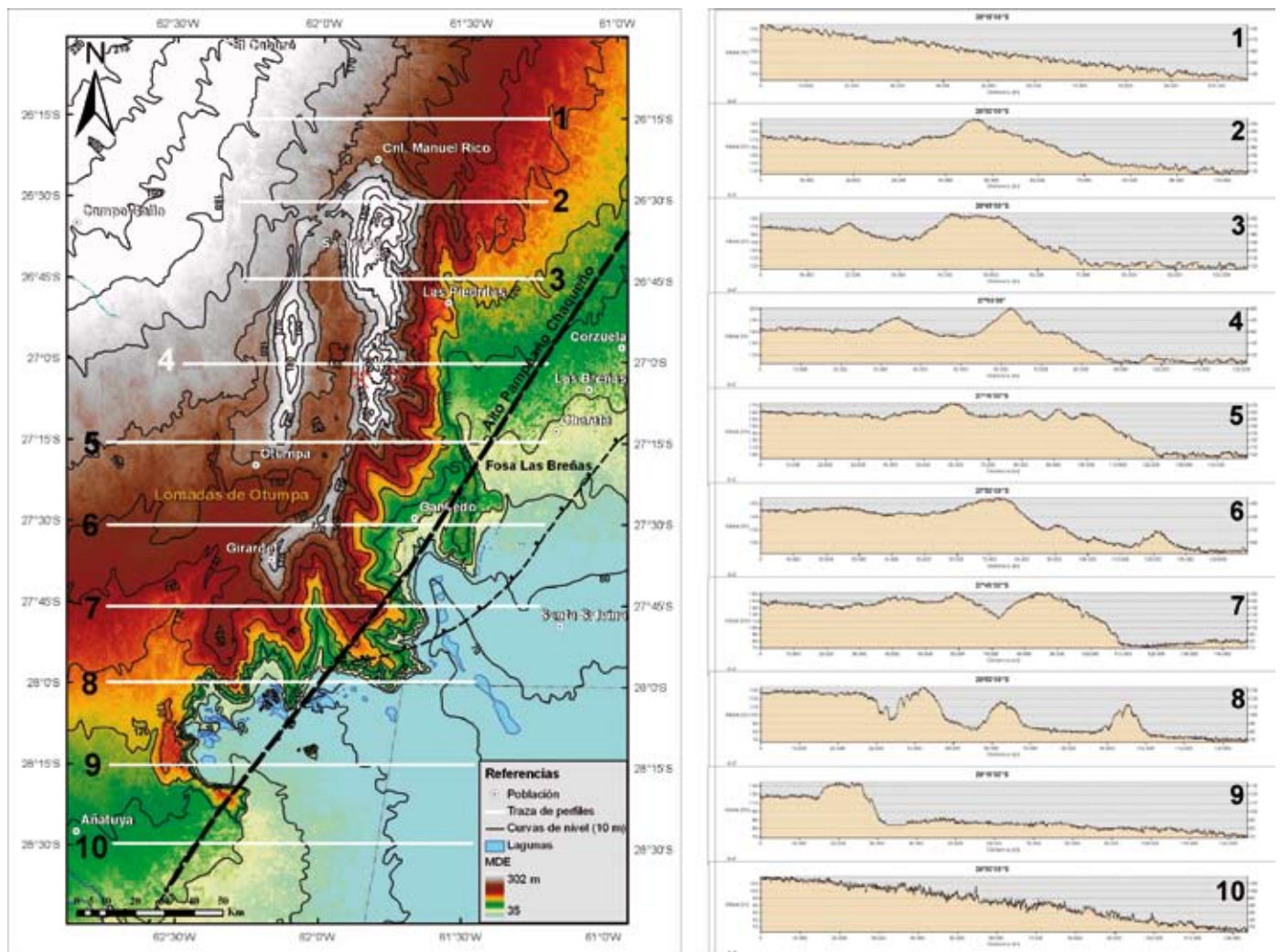


Figura 4. Modelo digital topográfico del Gran Chaco y secciones topográficas características (tomada de Rossello et al., 2007).
 Figure 4. Digital topographic model of the Gran Chaco and characteristic topographic sections (from Rossello et al., 2007).

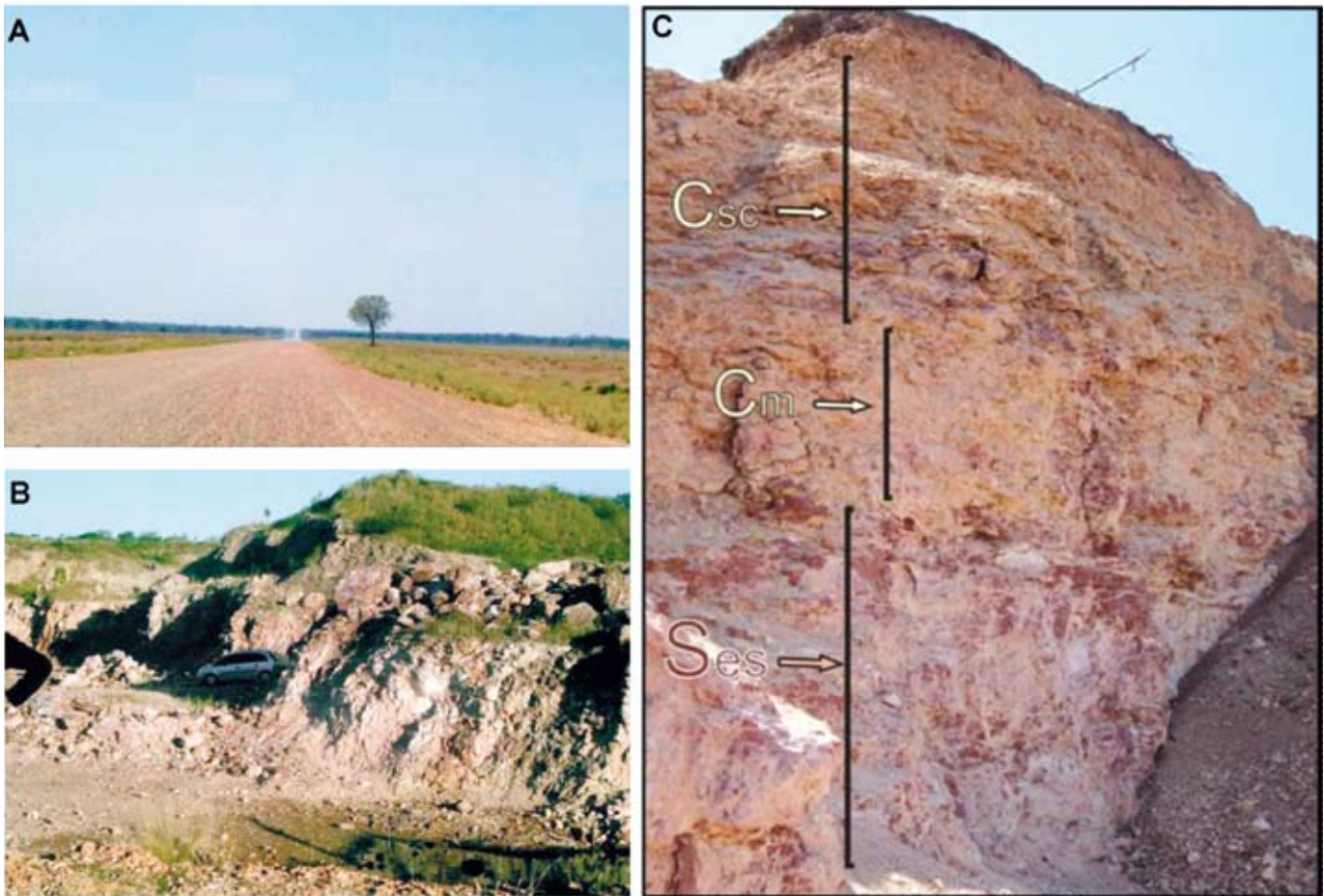


Figura 5. *Izquierda arriba:* Vista panorámica de las escasas estribaciones de las Lomadas de Otumpa que se aprecian solamente sobre el horizonte. *Izquierda abajo:* Vista de afloramientos rocosos de la Cantera Las Piedritas (Lomadas de Otumpa). *Derecha:* detalle de un afloramiento con los niveles característicos.

Figure 5. *Top left:* panoramic view on the skyline of the low foothills of the Lomadas de Otumpa. *Bottom left:* view of rocky outcrops of the Las Piedritas quarry. *Right:* detail of a characteristic level.

netos respecto a las unidades sub y sobreyacentes, pero en ciertos sectores, se observa transicionalmente su pasaje a una brecha (**Cs**) constituida por la misma litología que la unidad precedente.

Existen diversas interpretaciones respecto al origen de estas litologías, entre las que se destaca la correlación con las areniscas fluviales pliocenas de la Formación Ituzaingó (Iriando & Rodríguez, 1973, Miró y Martos, 2002) y otra con la Formación Tacuarembó de edad jurásica-cretácica (Coriale, 2006). Sin embargo, la edad y significado geológico de estos registros sedimentarios, desprovisto por el momento de material fosilífero adecuado, son aún inciertos, razón por la cual se llevan a cabo actualmente diversos estudios geológicos y geofísicos.

A partir de dos transectas geológicas apoyadas con información sísmica de subsuelo adquirida por la exploración de hidrocarburos se puede apreciar que el Lineamiento Otumpa tiene también una expresión en

profundidad, interpretandose como una reactivación transpresional dextral (Rossello *et al.*, 2007). De esta manera, se describen las siguientes transectas: **i)** Las Breñas, a través de la cuenca homónima en la provincia de Chaco y **ii)** Telares, conteniendo el pozo homónimo en la provincia de Santiago del Estero se pueden reconocer estructuras que se controlan la distribución de las secuencias paleozoicas y mesozoicas adyacentes (Fig. 6, AB).

En la transecta Las Breñas, el Lineamiento Otumpa se asocia con el fallamiento que limita por el occidente a la cuenca Las Breñas (Chebli *et al.*, 1999) que se puede interpretar como una reactivación transpresional Andina del fallamiento extensional sinsedimentario de tipo hemigraben asociado con la depositación de las unidades más antiguas que conforman su relleno (Fig. 7).

En la transecta Telares, el Lineamiento Otumpa se asocia a la estructura transpresional que produce el

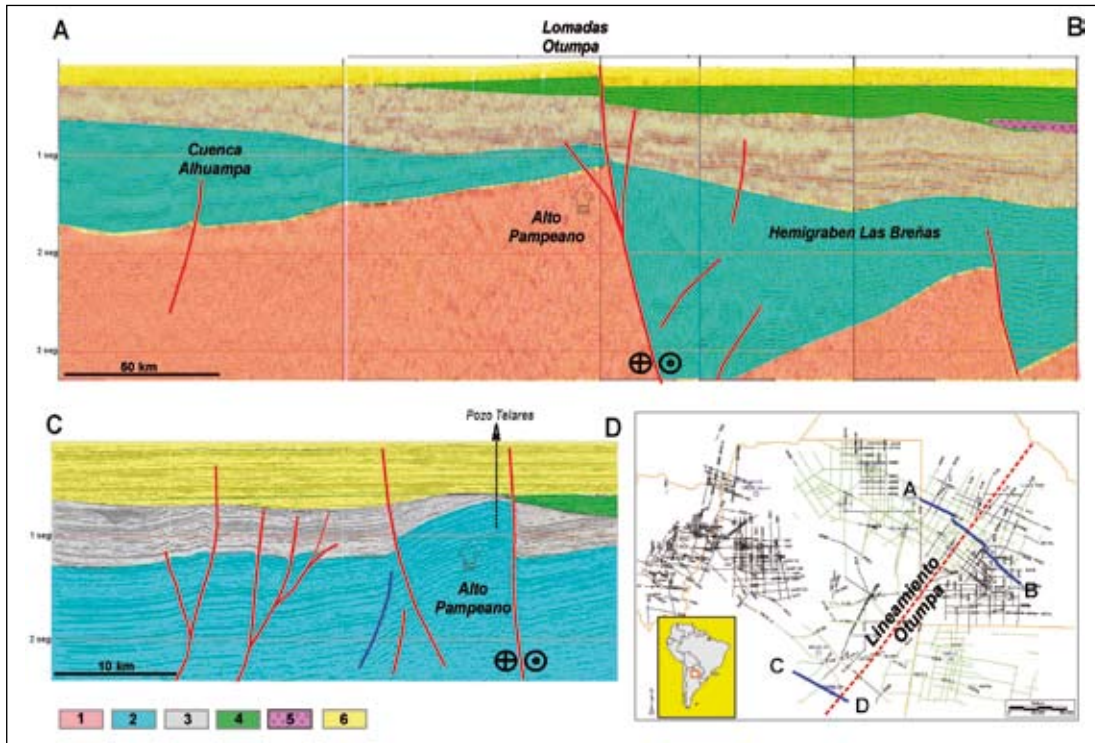


Figura 6. Secciones sísmicas regionales a través del Lineamiento Otumpa. *Arriba:* Las Breñas (A-B) a la latitud de la Cuenca Las Breñas, provincia de Chaco. *Abajo:* Telares (C-D) a la latitud del Pozo Telares, provincia de Santiago del Estero (véanse localizaciones regionales en la Figura 7). 1: Basamento, 2: Paleozoico inferior, 3: Paleozoico superior, 4: Mesozoico, 5: Volcanitas, 6: Cenozoico.
Figure 6. Regional seismic sections through the Otumpa lineament. *Top:* Las Breñas basin (A-B) at the latitude of the Cuenca Las Breñas basin, provincia de Chaco. *Below:* Telares transect (C-D) at the latitude of the well of the same name (cf. regional locations in Figure 7). 1: basement, 2: lower-Paleozoic, 3: upper-Paleozoic, 4: Mesozoic, 5: volcanic, 6: Cenozoic.

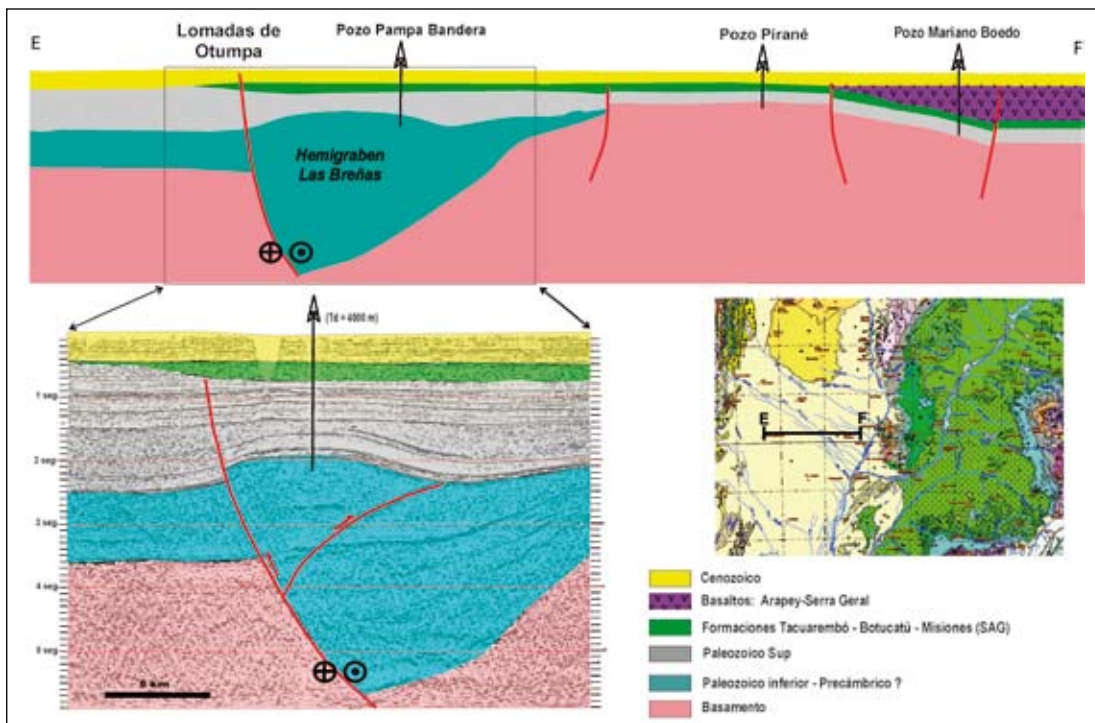


Figura 7. Transecta regional que incluye a los pozos Pampa Bandera, Pirané y Mariano Boedo.
Figure 7. Regional transect including the Pampa Bandera, Pirané and Mariano Boedo wells.

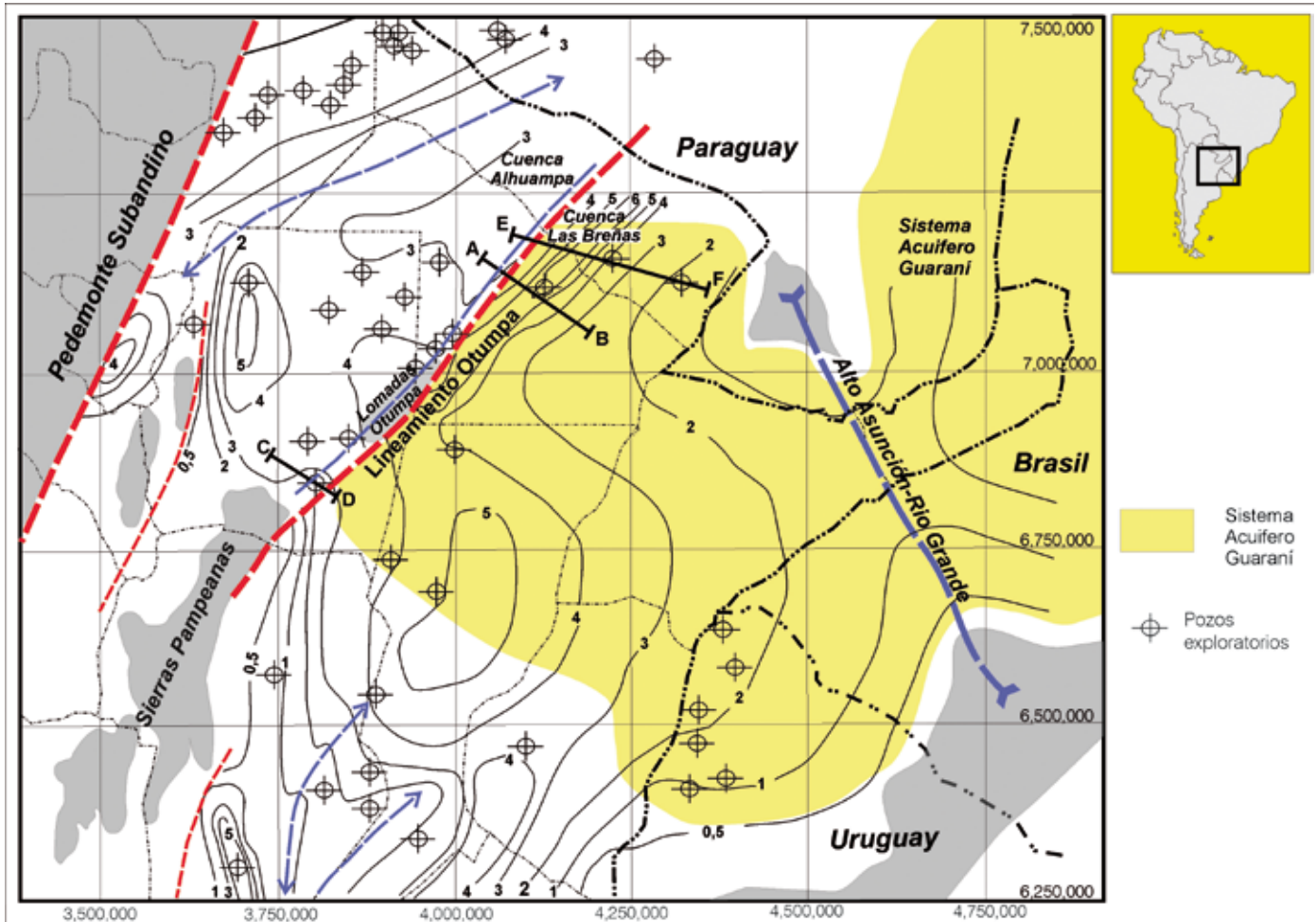


Figura 8. Esquema estructural de los depocentros del Gran Chaco y de sus principales rasgos tectónicos.
Figure 8. Structural scheme of the Gran Chaco depocenters and their main tectonic features.

levantamiento que motivó la localización del pozo exploratorio Telares que alcanzó la profundidad de 2.092 m (Fig. 6, C-D).

En ambos casos, las estructuras que se expresan en el Lineamiento Otumpa parecen controlar la continuación occidental de la depositación de las unidades continentales que sostienen al Sistema Acuífero Guaraní, por ello se sugiere este rasgo como un límite del mismo (Fig. 8).

Conclusiones

La definición de los límites del Sistema Acuífero Guaraní tanto desde el punto de vista técnico como administrativo impacta en su correcta evaluación, manejo, aprovechamiento y conservación. Por ello, resulta muy interesante abocarse en su localización geohidrogeológica por encima de otros intereses económicos.

Las características del límite occidental dentro de las planicies extensas del Gran Chaco pobremente caracterizado a partir de controles geológicos escasos y muy aislados dificultan su definición. Por otro lado, la dinámica hidráulica del SAG es generalmente asumida con sus áreas principales de aporte localizadas hacia sus porciones orientales de la Cuenca Paraná, dentro del territorio brasileño (LEBAC 2008a, 2008b). Por lo tanto, las eventuales áreas de aporte occidentales localizadas en el piedemonte Andino no mostrarían continuidades físicas ni gradientes topográficos adecuados relacionados con el resto del Acuífero Guaraní.

Este escenario obliga a la toma de una decisión estratégica que necesariamente equilibra aspectos técnicos y convencionales hasta que se pueda disponer de mayores datos concretos. Mientras tanto, la presencia física de las Lomadas de Otumpa que se asocian con el lineamiento homónimo en profundidad proporciona un hito técnico de su límite occidental con clara expresión superficial y del subsuelo que se asocia con la

desaparición de las principales secuencias geológicas que soportan al Sistema Acuífero Guaraní en el resto de su extensión.

Por ello y de acuerdo con la información geológica de superficie y subsuelo se considera que el límite occidental del Sistema Acuífero Guaraní puede localizarse aproximadamente sobre el lineamiento morfoestructural que se asocia a las Lomadas de Otumpa. De esta manera, se dispone de un rasgo morfoestructónicamente reconocible dentro de las extensas planicies del Gran Chaco que pudo haber controlado la disposición de las unidades sedimentarias que constituyen el soporte físico del Sistema Acuífero Guaraní (Fig. 7). Por esta razón, actualmente son los muchos investigadores y usuarios en general que están utilizando este rasgo como límite occidental.

Agradecimientos

Se agradece a los colegas del SAG con los cuales compartimos fructíferas discusiones, en especial a J.N. Santa Cruz, C.A. Fernández Garrasino y H. De Santa Ana de cuyos trabajos específicos se extrajeron importantes observaciones. La Lic. V.G. Peri contribuyó con información de campo y cartográfica sobre las Lomadas de Otumpa. También, deseamos dejar constancia de nuestro reconocimiento a los integrantes del comité técnico de la CONFERÊNCIA INTERNACIONAL A GESTÃO DO SISTEMA AQUÍFERO GUARANI, Um exemplo de co-opeção, realizada en San Pablo entre los días 21-23 de Septiembre de 2011 por habernos invitado a presentar el presente trabajo. Los árbitros E. Vázquez-Suñé y F. Rivera Urenda contribuyeron a mejorar la comprensión del texto con sus constructivas revisiones.

Referencias

Araújo, L.M., França, A.B. y Potter, P.E. 1995. Aquífero Gigante do Mercosul no Brasil, Argentina, Uruguai e Paraguai; *Mapas Hidrogeológicos das Formações Botucatu, Pirambóia, Rosário do Sul, Buena Vista, Misiones e Tacuarémbo*. UFPR-Petrobras, Curitiba, 16 pp.

Araújo, L.M., França, A.B. 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), 317-336.

Campos, H.C.N.S. 2000a. Modelación Conceptual y Matemática del Acuífero Guaraní, Cono Sur. *Acta Geológica Leopoldensia*, 23 (4), 3-50.

Campos, H.C.N.S. 2000b. Mapa Hidrogeológico do Aquífero Guaraní, escala 1:2.500.000. ISOMAPA - Consultoria e Projetos Ltda (São Paulo). *Acta Geológica Leopoldensia*, 23 (4).

Castellanos A. 1968. Desplazamientos naturales, en abanico, del río Salado del Norte en la llanura Chaco-Santafesina. Instituto de Fisiografía y Geología, *Universidad Nacional de Rosario, Publicaciones*, Rosario, 52, 19 pp.

Chebli, G., Mozetic, M.E., Rossello, E.A. y Bühler, M. 1999. Cuencas sedimentarias de la llanura chacopampeana. En: Caminos, R. (Ed.) *Geología Argentina*. Subsecretaría de Minería de la Nación, Servicio Geológico Minero Argentino, Instituto de Geología y Recursos Minerales, Anales, Buenos Aires, (29), 627-644.

Coriale, O. 2006. *Estudio de fuentes de agua subterránea con fines de provisión de agua potable y exploración hidrotermal*. Informe Técnico del Instituto Nacional del Agua, Buenos Aires, 104. Informe inédito.

Favetto, A., Pomposiello, C., Sainato, C., Dapeña, C. y Guida, N. 2005. Estudio geofísico aplicado a la evaluación del recurso geotermal en el sudeste de Entre Ríos. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 60 (1), 197-206.

Fernández Garrasino, C.A. 1995. El "Paleodesierto de Botucatu-Solari" (Jurásico-Eocretácico de América del Sur). Significado geológico y paleoclimático. *Boletín de Informaciones Petroleras* (Buenos Aires). Tercer Época, Año 11 (43), 89-119.

Fernández Garrasino, C.A. 2008. Borde Chacoparanense Occidental de Argentina (Provincias de Salta, Tucumán, Santiago del Estero, Catamarca, Córdoba, Santa Fe, Entre Ríos y Corrientes). Licitación SBCC/01/04 – 1/1018.1 *Proyecto para la Protección Ambiental y Desarrollo Sostenible del Sistema Acuífero Guaraní*, Informe Técnico inédito, Montevideo, 52 pp.

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.

França, A.B., Milani, E.J., Schneider, R.L., López Paulsen, O., López Pugliesi, J.M., Suárez S., R., de Santa Ana, H., Wiens, R., Ferreiro, O., Rossello, E.A., Bianucci, H.A., Flores, F.F.A., Vistalli, M.C., Fernández Seveso, F., Fuenzalida, R.P. y Muñoz, N. 1995. Phanerozoic correlation in Southern South America. In: Tankard, A.J., Suárez, R., Welsink, H.J. (eds.). *Petroleum basins of South America*. *American Association Petroleum Geologists* (Tulsa), Memoir, 62, 129-161.

Fulfaro, V.J., Saad, A.R., Santos, M.V. y Vianna, R.B. 1982. Compartimentação e Evolução Tectônica da Bacia do Paraná. *Revista Brasileira de Geociências*, 12, 590-611.

Herbst, R., Santa Cruz, J., Ppopolizio, E., Capurro, R. y Escobar, E. 1985. Mapa litoestratigráfico de la Provincia de Corrientes. Universidad Nacional del Nordeste. *D'Orbignyana*, 1 2, 1-50.

Hirata, R., Geisicki, A., Sracek, O., Bertolo, R.; Giannini, P.C., Aravena, R. 2011. Relation between sedimentary framework and hydrogeology in the Guaraní Aquifer System in São Paulo state, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 31 (4), 444-456.

Iriondo, M.H. y Rodríguez, E.D. 1973. Algunas características sedimentológicas de la Formación Ituzaingó entre La Paz y Pueblo Brugo (Entre Ríos). *5º Congreso Geológico Argentino*, Actas, Buenos Aires, 1, 317-33.

- Iriondo, M.H. 1984. The Quaternary of Northeastern Argentina. *Quaternary South American and Antarctic Peninsula*, A.A. Balkema Publication (Rotterdam), 2: 51-78.
- Iriondo, M.H. 1993. Geomorphology and late Quaternary of the Chaco (South America). *Geomorphology*, 7, 289-303.
- LCV 2008. Informe final sobre muestras de subsuelo y afloramiento de la Cuenca Chacoparanense, elaborado por Aguirre, C., Ferraresi, P., Ibáñez, S.B., Schelotto, M.L.R. *Proyecto para la Protección Ambiental y Desarrollo Sostenible del Sistema Acuífero Guaraní*, Buenos Aires, Informe Técnico inédito, 23 pp.
- LEBAC 2008a Mapa Hidrogeológico do Sistema Acuífero Guaraní. Coord.: Sinelli, O. Equipe: Chang, H.K., Gastmans, D., Paula e Silva, F., Correa, S.F., Pressinotti, M.M.N. *Proyecto para la Protección Ambiental y Desarrollo Sostenible del Sistema Acuífero Guaraní. Informe Técnico inédito*. Rio Claro, 54 pp., 8 mapas.
- LEBAC 2008b. Informe Final de Hidrogeología do Projeto Acuífero Guaraní. Coord.: Gastmans, D. y Chang, H.K. Equipe: Paula e Silva, F., Correa, S.F. *Proyecto para la Protección Ambiental y Desarrollo Sostenible del Sistema Acuífero Guaraní. Informe Técnico-Consórcio Guaraní*. Rio Claro, 172 pp.
- Marengo, H. y Net, L. 2004. Petrografía y diagénesis de las Areniscas Mesozoicas de San Ignacio, Misiones. Significado geológico. *10° Reunión Argentina de Sedimentología*, Resúmenes, Buenos Aires, 101.
- Marengo, H., Palma, Y., Tchilinguirian, P., Helms, F., Kruck, W y Roverano, D. 2005. Geología del área de San Ignacio, Provincia de Misiones. *16° Congreso Geológico Argentino*, Actas, La Plata, 1, 141-148.
- Miró, R.C. y Martos, D.E. 2002. Memoria de Hoja geológica de la provincia de Chaco. Escala 1: 500:000. *SEGEMAR*, Buenos Aires (Inédito), 8 pp.
- Montaño, J. y Collazo, P. 1998. Hidrogeoquímica del Sistema Acuífero Guaraní (Uruguay). *II Congreso Uruguayo de Geología*, Punta del Este, 395-400.
- Montaño, J., Tujnchneider, O., Auge, M., Fili, M., Paris, M., D'Elia, M., Pérez, M., Nagy, M.I., Collazo, P. y Decoud, P. 1998. Acuíferos regionales en América Latina. Sistema Acuífero Guaraní. Capítulo argentino-uruguayo. *Centro de Publicaciones de la Universidad Nacional del Litoral*, Santa Fe, 217.
- Peri, V.G. y Rossello, E.A. 2008. Influencias morfoestructurales e hidrográficas de las Lomadas de Otumpa (Santiago del Estero y Chaco, Argentina). *17° Congreso Geológico Argentino*, Actas, Jujuy, 1, 418-419.
- Peri, V.G y Rossello E.A. 2010. Anomalías neotectónicas del drenaje del río Salado sobre las Lomadas de Otumpa (Santiago del Estero y Chaco, Argentina) detectadas por procesamiento digital. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 66 (4), 636-648.
- 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*, El Calafate, Actas, 2, 353-358.
- Pesce, A., Khachatryan, D., Miranda, F., Rivara, A. y Johanis, 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*, El Calafate, Actas 2, 347-352.
- PSAG 2001. Mapa esquemático del Sistema Acuífero Guaraní del Proyecto Sistema Acuífero Guaraní (en: http://www.sgguarani.org/index/site/sistema_acuifero/sa001.php).
- Rossello, E.A. y Bordarampé, C.P. 2005. Las Lomadas de Otumpa: nuevas evidencias cartográficas de deformación neotectónica en el Gran Chaco (Santiago del Estero, Argentina). *16° Congreso Geológico Argentino*, La Plata. CD-room.
- Rossello E.A., Veroslavsky G., de Santa Ana H., Fulfaró V.J. y Fernández Garrasino, C.A. 2006. La dorsal Asunción - Río Grande: un alto fondo regional entre las cuencas Paraná (Brasil, Paraguay y Uruguay) y Chacoparanense (Argentina). *Revista Brasileira de Geociencias*, 36 (3), 535-549.
- Rossello, E.A., Bordarampé, C.P. y Peri, V.G. 2007. The Otumpa faulting (Gran Chaco plain, Argentina): the farthest megastucture due to the Central Andean flat slab subduction. *Subduction Zone Geodynamics Conference* (Montpellier). Mémoires Géosciences-Montpellier N.º 41, 62.
- Rossello, E.A., Mon, R., Bordarampé, C.P. y Gutiérrez, A. 2005. Evidencias topográficas de actividad neotectónica en la Llanura Chacoparanaense: consecuencias en la organización del drenaje de Mar Chiquita (Córdoba, Argentina). *10° Simposio Nacional de Estudios Tectónicos-4° International Symposium on Tectonics*. Boletim de Resumos Expandidos; Curitiba, Brasil, 205-208.
- Santa Cruz, J.N. 2009. Sistema Acuífero Guaraní: el conocimiento hidrogeológico para su uso sostenible. *Ciencia Hoy*, Buenos Aires, 19 (112), 9-21.
- Schobbenhaus, C. y Bellizzia, A. 2001. Mapa geológico de América del Sur, 1:5.000.000. *CGMW - CPRM - DNPM - UNESCO*, Brasilia.
- Silva Busso, A.A. 1999. *Contribución al Conocimiento de la Geología e Hidrogeología del Sistema Acuífero Termal de la Cuenca Chacoparanense Oriental, Argentina*. Tesis, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires, 2v. 351 pp.
- Silva Busso, A.A. y Fernández Garrasino, C.A. 2004. Presencia de las formaciones Piramboia 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.
- Sindico, F. 2011. The Guaraní Aquifer System and the International Law of transboundary aquifers. *International Community Law Review* (M. Nijhoff Publishers), 13, 255-272.
- Zalán, P.V., Wolff, S., Astolfi, M.M., Vieira I.S., Conceição, J.C., Appi, V.T., Neto, E.V., Cerqueira, J. y Marques, A. 1990. The Paraná Basin, Brazil. In: Leighton, M.W., Kolata, D.R., Oltz, D.F. y Eidel, J.J. (eds.). *Interior cratonic basins. American Association of Petroleum Geologists, Memoir*, 51, 681-708.

Recibido: diciembre 2011

Revisado: febrero 2012

Aceptado: marzo 2012

Publicado: julio 2012