

INFLUENCIA DE LOS LINEAMIENTOS ESTRUCTURALES SOBRE EL FLUJO DEL SISTEMA ACUÍFERO GUARANÍ EN LA PROVINCIA DE CORRIENTES

Andrés MIRA CARRIÓN¹, Gerardo VEROSLAVSKY², Luis VIVES¹ y Leticia RODRÍGUEZ³

¹ Instituto de Hidrología de Llanuras “Dr. Eduardo Usunoff”, Azul, Provincia Buenos Aires. E-mail: andresmira@faa.unicen.edu.ar

² Facultad de Ciencias, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay.

³ Centro de Estudios Hidro-ambientales, Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas. Universidad Nacional del Litoral, Santa Fe.

RESUMEN

Es conocida la influencia de la tectónica en el movimiento del flujo del agua subterránea, especialmente en acuíferos de gran extensión como el Sistema Acuífero Guaraní. En su porción sur, el flujo del Sistema Acuífero Guaraní presenta una gran incertidumbre debido a la ausencia de información geológica e hidrogeológica. En este trabajo se presenta un mapa de lineamientos de la zona de estudio (provincia de Corrientes y alrededores), desarrollado a partir de imágenes satelitales Landsat-ETM y del modelo digital de elevación SRTM, que permite analizar la influencia de la deformación tectónica sobre el Sistema Acuífero Guaraní a la luz de los últimos avances en el conocimiento geológico profundo de la zona de estudio. La metodología es de pruebas múltiples y de reproducibilidad de las mediciones. Se han diferenciado tres dominios morfoestructurales en función de la densidad de los lineamientos estructurales de cada área y de la orientación de los mismos. Desde el punto de vista hidrogeológico, es muy importante la delimitación de una de ellas, la zona sureste de Corrientes, porque tiene una mayor densidad de lineamientos con orientaciones NO-SE como reflejo de un mayor fracturamiento. Como resultado, se tendría un aumento en la permeabilidad equivalente de los basaltos que confinan al Sistema Acuífero Guaraní y una mayor conectividad del mismo con los acuíferos superficiales. Esto explicaría, en consonancia con recientes estudios hidroquímicos, las mezclas de aguas de recarga de lluvia con aguas salinas profundas ascendentes que han sido identificadas en esa zona.

Palabras clave: *Deformación tectónica, dominios morfoestructurales, hidrogeología, Landsat-ETM, Modelo digital de elevación*

ABSTRACT

Influence of structural lineaments on the Guaraní Aquifer System in the Corrientes Province

It is known the tectonic influence on the groundwater flow, especially in large aquifers like the Guaraní Aquifer System. In its southern portion, the groundwater flow has a significant uncertainty due to the lack of geological and hydrogeological information. In this paper, a map of lineaments in the Corrientes province (NE Argentina) and its surrounding area is shown. It was constructed from Landsat-ETM satellite images and the SRTM digital elevation model, which allowed us to analyse the tectonic influence in the Guaraní Aquifer System according to the new advances in the knowledge of the deep geological characteristics of the study area. The methodology consisted of multiple tests and measurement reproducibility. Three morpho-structural domains have been identified according to their areal density and lineament orientations. From the hydrogeological point of view, the south-eastern domain is very important because it has the greatest density in NW-SE lineaments, reflecting the higher degree of fracturing. As a result, confining basalts would have a higher equivalent permeability and there would be a higher connectivity between the shallow aquifers and the Guaraní Aquifer System. This may explain, according to the recent hydrochemical studies, the mixing processes between deep and old saline groundwater with precipitation recharge in this area.

Keywords: *Tectonic deformation, morpho-structural domains, hydrogeology, Landsat-ETM, Digital Elevation Model*

INTRODUCCIÓN

El Sistema Acuífero Guaraní es uno de los reservorios de agua transfronterizo más importantes del mundo, de ahí la importancia de su conocimiento para una gestión adecuada de los recursos hídricos (Foster *et al.* 2009). Se extiende sobre

1.120.000 km² en cuatro países: Brasil, Argentina, Paraguay y Uruguay. Es considerado como un acuífero continuo de rocas sedimentarias arenosas de las cuencas de Paraná y Chacoparanense depositadas durante el Mesozoico, desde el Triásico Temprano hasta el Cretácico Temprano, cubiertas por derrames basálticos.

El acuífero recibe recarga directa en las áreas de afloramiento, en sus bordes, y el flujo de agua subterránea sigue una dirección general de NNE a SSO, influenciado por las grandes estructuras tectónicas (Foster *et al.* 2009, Gastmans *et al.* 2012). Como se aprecia en la figura 1, en la zona norte (A), el flujo sigue una dirección pre-

dominante NO debido a la presencia del Arco de Ponta Grossa. En la zona centro del Sistema Acuífero Guaraní (B), el flujo sigue un patrón con sentido NE-SO. En la tercer zona (C), al suroeste del Sistema Acuífero Guaraní, la dirección principal de movimiento del agua subterránea sería en parte hacia el SSE, asociada a la zona de afloramiento en Paraguay, en parte E-O, asociada a la zona de afloramiento en Uruguay-Brasil, y en parte NO, asociada a la Dorsal Asunción-Río Grande.

Al margen de las grandes estructuras tectónicas que se reconocen en las cuencas de Paraná y Chacoparanense, en el Sistema Acuífero Guaraní se ha comprobado que la presencia de fracturas y fallas tienen una gran influencia en los patrones de circulación de flujos. Araújo *et al.* (1995) postularon la hipótesis de que la variación en el comportamiento del flujo subterráneo tiene su origen en la presencia de diques volcánicos que rellenan algunas de las zonas de fracturas de dirección NO. Estos diques se encuentran localizados principalmente en el flanco sur del Arco de Ponta Grossa y en el este de Paraguay. Rosa Filho *et al.* (2003), Portela Filho (2003), Ferreira *et al.* (2004) y Strugale *et al.* (2007) analizan la influencia del Arco de Ponta Grossa sobre el Sistema Acuífero Guaraní, diferenciando áreas compartimentadas por zonas de fallas de dirección NO, típicamente rellenas de diques doleríticos y, por otro lado, estructuras NE asociadas a antiguas fallas del basamento con expresión en superficie. Lastoria (2002) estimó una densidad de lineamientos de 0,12 km/km² en Matto Grosso do Sul (Brasil) con una dirección principal NNO y una secundaria NE.

En Brasil, Reginato y Strieder (2006) realizaron un estudio de los principales lineamientos y su relación con la productividad de perforaciones en Rio Grande do Sul, destacando las direcciones predominantes N30°y N300° mientras que, Machado y Faccini (2004) y Nanni *et al.* (2013), distinguieron tres zonas con distintas características tectónicas que influyen en el movimiento del agua del Sistema Acuífero Guaraní respecto del

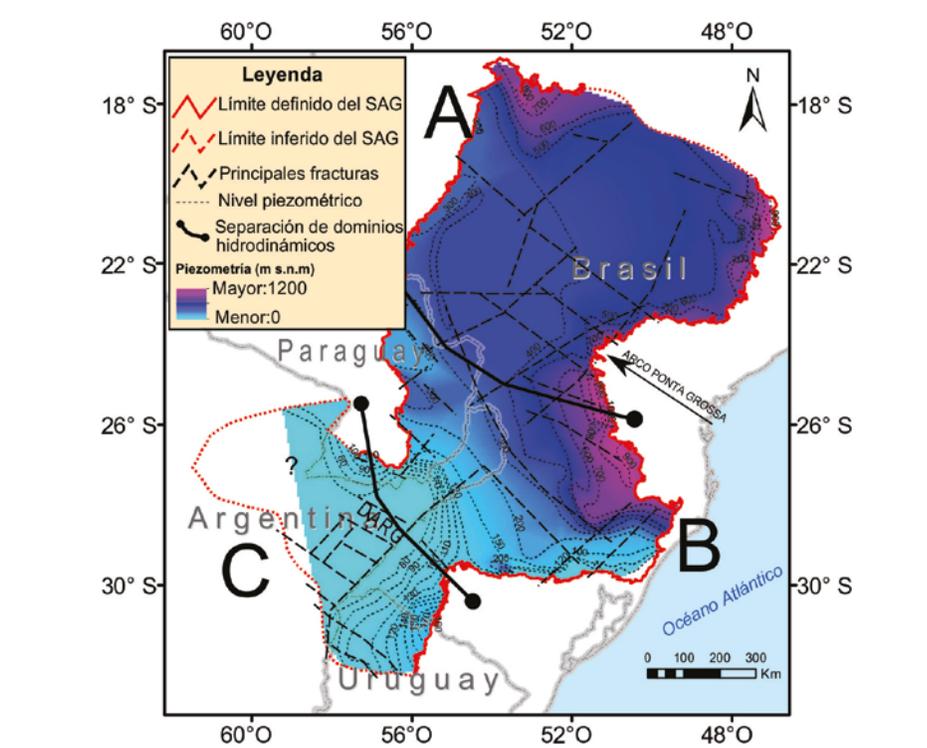


Figura 1: Mapa piezométrico del Sistema Acuífero Guaraní (SAG) (modificado de Mira (2012) y Nittmann (2014) que incluye las principales fracturas en la cuenca de Paraná (según Soares 2008). Se muestra la división en tres zonas según el comportamiento hidrodinámico.

acuífero basáltico Serra Geral suprayacente. En el estado de Paraná, Barros y Ferreira (2007) y Barros *et al.* (2011 y 2014) encuentran las mayores anomalías en los caudales de las perforaciones en explotación cuando están asociadas a la dirección NO, dirección que según Moce llin y Fonseca Ferreira (2009), es en la que se encuentran dispuestos una gran cantidad de diques volcánicos. Según Athayde (2013), las fracturas N-S y E-O tienen un desarrollo vertical superior a 1 km lo que genera una concentración de flujo en los acuíferos. Fernandes *et al.* (2010, 2011, 2012) analizaron las principales orientaciones de fracturas en el estado de San Pablo, destacando cinco familias: NNE, NE, NO, ONO y N-S. De estas, las principales son las NE ya través de ellas se producirían ascensos de agua del Sistema Acuífero Guaraní hacia el acuífero basáltico Serra Geral.

En Uruguay, de Santa Ana *et al.* (2001) describen las principales estructuras compresivas con orientación NO asociadas a la evolución pre-jurocretácica de la

Cuenca Norte. A escala regional, incluyendo toda la porción brasileña del Sistema Acuífero Guaraní, Soares (2008) hace un análisis estadístico de las grandes fracturas y la influencia en su hidrodinámica, destacando que las principales orientaciones son NE y NO, produciendo estas últimas un adelgazamiento del Sistema Acuífero Guaraní en la zona del Arco de Ponta Grossa. Esos lineamientos revelan la existencia de grandes bloques tectónicos que dificultan y modifican el flujo de agua subterránea entre cada uno de esos bloques cuando el salto de falla es superior al espesor del acuífero. Esta compartimentación produce celdas con diferentes tiempos de residencia y mineralización, lo que acarrea entre otras consecuencias, un distinto grado de salinización y el cierre de poros.

En la porción sur del Sistema Acuífero Guaraní, principalmente en la provincia de Corrientes, Argentina, existe una zona de descarga del acuífero, tanto a lo largo de tramos de los ríos Paraná y Uruguay, como en los grandes bañados de los Es-

teros del Iberá (Araújo *et al.* 1999, Campos 2000). Además, se han observado mezclas de aguas meteóricas con aguas salinas de elevado tiempo de residencia, relacionadas con un movimiento ascendente y descendente de agua (Manzano *et al.* 2013). No obstante, a pesar de los notables avances durante los últimos años en el estudio de las características geológicas e hidrogeológicas del Sistema Acuífero Guaraní (Gastmans *et al.* 2012, Rodríguez *et al.* 2013), la influencia de las fracturas y fallas sobre el patrón de circulación del flujo de agua, continúa siendo poco conocida en esa zona. Recientemente, Mira *et al.* (2015) aportaron al conocimiento de la configuración geológica profunda de Corrientes, proponiendo la ubicación de las grandes estructuras tectónicas y un basamento compartimentado en bloques con fosas y *horst* separados por grandes fracturas.

Habitualmente, esas discontinuidades a nivel de basamento crean lineamientos en la superficie (Mabee y Hardcastle 1997). Su estudio para estimar las características subsuperficiales del terreno ha sido utilizado con éxito en investigaciones hidrogeológicas de distinto alcance y escala (Lattman y Parizek 1964, Sander *et al.* 1997, Magowey Carr 1999, Moore *et al.* 2002). En este contexto, parece adecuado realizar un estudio de los lineamientos en la porción suroccidental del Sistema Acuífero Guaraní ya que podrían tener significación a nivel regional en este acuífero de grandes dimensiones e influencia, entre otros factores, en la conductividad hidráulica del sistema a esa escala de estudio. Este parámetro es de especial importancia a la hora de modelar numéricamente el flujo del agua subterránea.

En este trabajo se plantea definir las características de las lineaciones presentes en Corrientes y zonas adyacentes a partir de imágenes satelitales Landsat-ETM y del modelo digital de elevación del terreno SRTM. Se analiza la tendencia y distribución de los lineamientos en la zona de estudio usando diagramas de rosetas y mapas de densidad de lineamientos. Finalmente, se analizan las implicancias hidrogeológicas de los lineamientos sobre

el funcionamiento del flujo del Sistema Acuífero Guaraní tanto en la zona de estudio como a escala regional.

ÁREA DE ESTUDIO - CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS

La zona de estudio comprende fundamentalmente la provincia argentina de Corrientes y otras zonas aledañas como el norte de la provincia de Entre Ríos, el sur de Misiones y una franja de Brasil paralela al río Uruguay. Abarca un área de 135.216 km² caracterizada por una topografía sensiblemente plana entre las longitudes 55,40° y 59,90°O y las latitudes 27,16° y 31,08° S (Fig. 2). La cota más elevada es de 230 m s.n.m. en el límite con la provincia de Misiones, descendiendo de manera progresiva y continua hacia el oeste donde las cotas mínimas (20 m s.n.m.) coinciden con el trazado del río Paraná. Éste último, junto con el río Uruguay son los principales cauces que drenan las aguas de escorrentía superficial. Cabe destacar la presencia de abundantes cuerpos de agua superficial (bañados y esteros) en la mitad noroeste de Corrientes.

Geológicamente, la zona de estudio se encuentra ubicada en una región de transición entre las cuencas Chacoparanense y de Paraná. Ambas cuencas suman más de 1.400.000 km², y en algunos sectores, se encuentran rellenas con hasta 7.000 m de rocas ígneas y sedimentarias (Zalán *et al.* 1990). Sin embargo, en la zona de estudio apenas alcanzan los 4.000 m de espesor, con un promedio inferior a 2.000 m (Mira *et al.* 2015), incluyendo un registro sedimentario con depósitos desde el Paleozoico hasta la actualidad (Fig. 3). En ambas cuencas se presentan rasgos estratigráficos similares como respuesta a los cambios geodinámicos a nivel global que reflejarían su evolución bajo distintos ambientes tectónicos.

Desde el punto de vista litoestratigráfico, las unidades de superficie de la provincia de Corrientes fueron sintetizadas por Herbst y Santa Cruz (1985). Para el subsuelo, según Mira *et al.* (2015), los pri-

meros registros sedimentarios se remontan al Paleozoico inferior y se preservan en las fosas profundas de Corrientes y Curuzú. Si bien se desconoce la naturaleza de esas sedimentitas por no haber sido atravesadas en perforaciones, debido a su posición y geometría podrían relacionarse con la Formación Árbol Blanco (Mingramm 1965), Formación Pinaré (Mingramm 1965) y Formación Zapla (Mingramm y Russo 1972) conocidas en el subsuelo al norte del Alto Pampeano-Chaqueño (Chebli *et al.* 1999).

De igual modo Melo (1989) y Mira *et al.* (2015), propusieron la presencia de rocas sedimentarias devónicas en el subsuelo de la provincia de Corrientes, equivalentes a las que reúnen las formaciones Furnas (Bigarella *et al.* 1961) y Ponta Grossa (Petri 1948) de Brasil, las Formaciones Cerrezuelo, Cordobés y La Paloma (Boschi 1966) de Uruguay o las Formaciones Copo, Caburé y Rincón (Padula y Mingramm 1967) de la cuenca Chacoparanense en las provincias argentinas de Salta y Santiago del Estero.

El inicio de la sedimentación carbonífera está caracterizado por amplios registros sedimentarios de naturaleza glacial seguidos inmediatamente por un evento marino transgresivo. En Uruguay, las sedimentitas permocarboníferas depositadas bajo influencia glacial se denominan Formación San Gregorio (Preciozzi *et al.* 1985), mientras que sus equivalentes en Rio Grande do Sul, el denominado Grupo Itararé (Petri y Fulfaró 1988), son poco conocidas, confirmando su existencia al menos en varias perforaciones al sur de la localidad de Bagé. Esta sedimentación bajo influencia glacial se extendería hacia el subsuelo de Corrientes (Mira *et al.* 2015). Entre el Devónico y esa sedimentación basal glacial carbonífero-pérmica se reconoce una discordancia regional en amplias regiones de las cuencas de Paraná y Chacoparanense (López Gamundi y Rossello 1993, Milani 1997), y llega a ser transicional hacia Paraguay, en la región del Bajo de San Pedro (Fulfaró 1996).

Durante el Pérmico medio, se instala un extenso mar epicontinental que cubre los ámbitos chacoparanenses y paranenses y

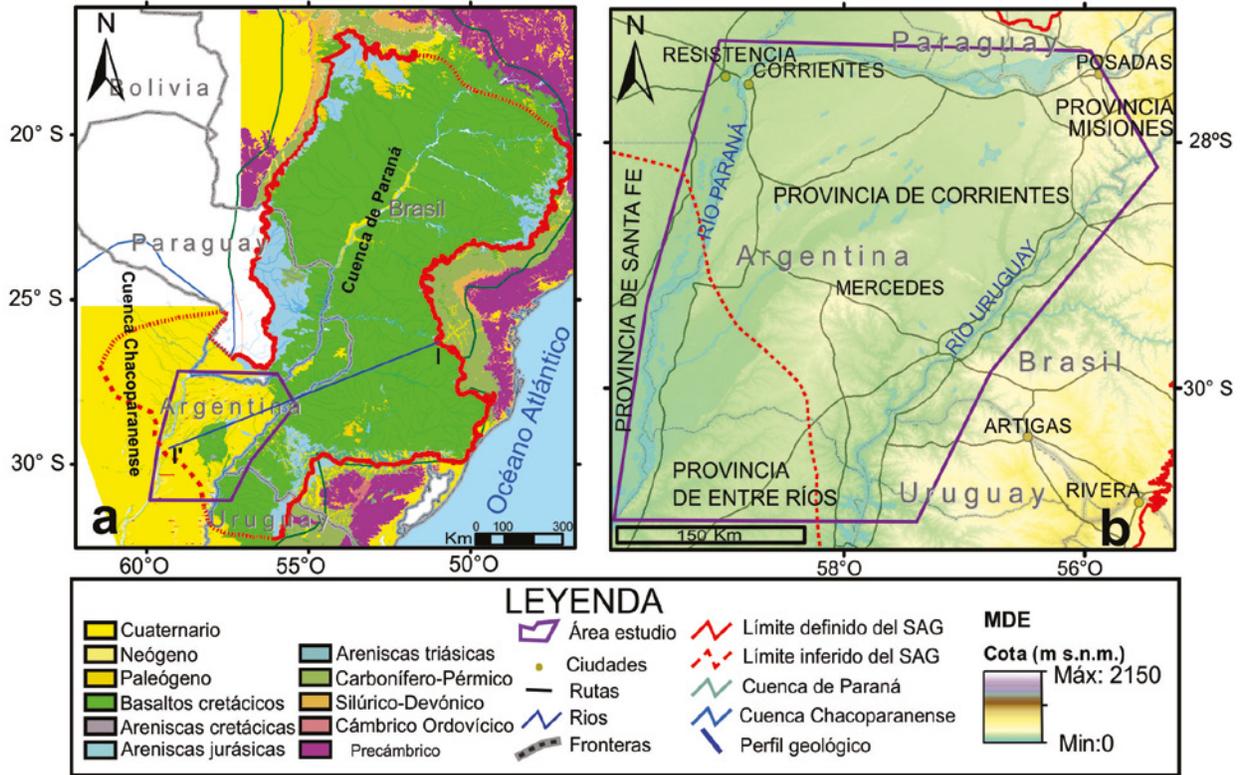


Figura 2: Mapa de ubicación del área de estudio (a) y modelo digital de elevación (b). A la izquierda se muestra un esquema geológico regional (modificado de Achilli *et al.* 1998, Bossi y Ferrando 2001, Schobbenhaus y Bellizzia 2001 y Almeida *et al.* 2004), incluyendo las principales litologías y la extensión de las cuencas de Paraná y Chacoparanense.

parte de otras cuencas gondwánicas occidentales. El denominado “Mar Palermo” en el ámbito de la Cuenca de Paraná, materializa ese momento de avance del mar sobre las áreas cratónicas gondwánicas, y está representado por distintas formaciones en los ámbitos chacoparanenses. En Corrientes, estaría presente al menos en el extremo oriental, con depósitos equivalentes a las Formaciones Fraile Muerto, Mangullo y Paso Aguilar (Elizalde 1970) y sus correlatos brasileños, las formaciones Palermo (Schenieder *et al.* 1974), Irati (Schenieder *et al.* 1974) y Teresina (Lavina 1998). Cabe recordar que el pozo Alegrete en Rio Grande do Sul, próximo a la provincia de Corrientes, muestra espesores muy importantes de estos registros. Mira *et al.* (2015) proponen que estos paquetes marinos pasarían transicionalmente hacia el noroeste, a la Formación Chacabuco (Padula y Mingramm 1969) en el subsuelo argentino.

El levantamiento generalizado de las áreas cratónicas como respuesta a la tec-

tónica compresiva desarrollada en la margen occidental de Gondwana hacia finales del Pérmico (Cobbold *et al.* 1986, Zalán *et al.* 1990, López Gamundi *et al.* 1994, Milani y Ramos 1998) sería en parte responsable de la continentalización de esos antiguos ámbitos marinos. Los depósitos transicionales y continentales de finales del Pérmico están representados por diversas formaciones, entre las que se destacan las Formaciones Rio do Rasto y Sanga do Cabral en Brasil, y sus litocorrelatos Formación Yaguarí y Buena Vista en territorio uruguayo y correntino (Acevedo *et al.* 1985).

En el Mesozoico, se instala una sedimentación continental coligada a climas áridos a desérticos que produjo importantes áreas de acumulación donde se preservaron depósitos asociados de tipo fluvial, eólico y, subordinadamente fluvio-lacustres, que constituyen las unidades del Sistema Acuífero Guaraní. En el área de estudio, han sido agrupadas como Formación Misiones (Putzer 1962) y se de-

sarrollan por encima de la discordancia permo-eotriásica y por debajo de los basaltos de la Formación Serra Geral (Wildner *et al.* 2007).

El límite superior del Sistema Acuífero Guaraní está dado por los derrames basálticos Serra Geral. Los basaltos están formados por distintas litologías: brecha basáltica, basalto vesicular y basalto porfídico, habiendo sido datado entre 137 y 127 Ma (Milani *et al.* 2007, Janasi *et al.* 2011). La intercalación de dunas eólicas con los primeros flujos volcánicos permitió la preservación de importantes paquetes de areniscas intercaladas en los basaltos, conjunto que se ha denominado Miembro Solari (Herbsty Santa Cruz 1985, Scherer 2002), que afloran de manera discontinua en la provincia de Corrientes como muestra de que en esta zona están presentes las coladas inferiores de basaltos.

Este magmatismo mesozoico es fruto de la ruptura de Gondwana que dio inicio a la apertura del océano Atlántico, que se

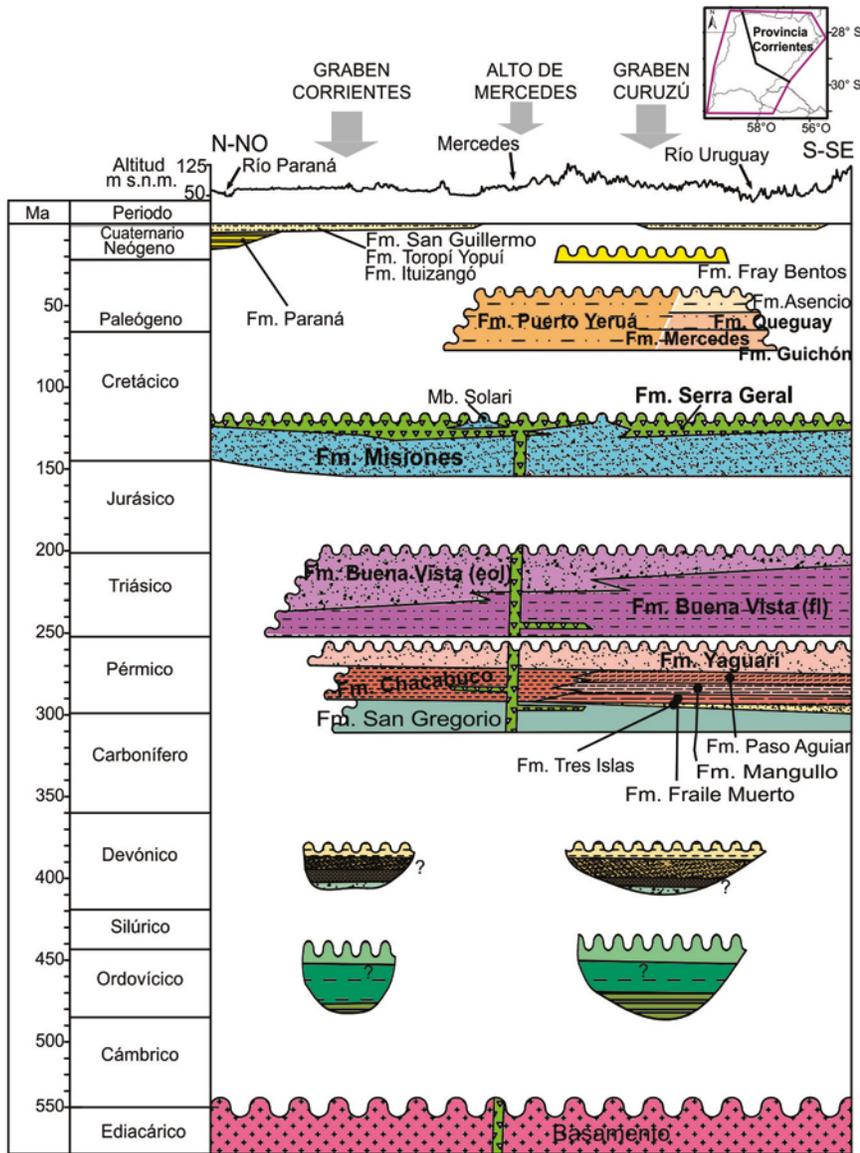


Figura 3: Columna estratigráfica propuesta para Corrientes según Mira *et al.* (2015).

habría iniciado a través de movimientos diferenciales en el interior de los núcleos cratónicos gondwánicos (la denominada “Reactivación Wealdeniana” de Almeida 1972). Como resultado, se produjo la reactivación de antiguas fallas con el consecuente levantamiento de bloques, arcos y la intensificación de la subsidencia en el interior de las cuencas de Paraná y Chacoparanense asociada a distintas fases de salida de un magma tholeiítico predominante en estas cuencas.

El primer evento depositacional que yace sobre los basaltos corresponde a las sedimentitas clásticas finicretácicas, de

origen fluvial y aluvial, con ocasionales intercalaciones de calcretes, y que de una forma general, se reúnen en la Formación Puerto Yerúa (Herbst y Santa Cruz 1985). A esta unidad le suceden los depósitos cenozoicos que ocupan buena parte del sector centro – oeste de Corrientes, con las Formaciones Fray Bentos (Bossi 1966), Paraná (Fernández Garrasino y Vrba 1999) e Ituzaingó (Iriando *et al.* 1998). Desde el Pleistoceno superior se disponen discordantemente los sedimentos lacustres de la Formación Toropí-Yopuí (Herbst y Santa Cruz 1985) de amplia distribución en Corrientes, los que se in-

terdigitan con sedimentos de la Formación Ituzaingó y presentan intercalaciones de paleocanales rellenos de grava. El Holoceno superior se caracteriza por depósitos de limos eólicos de escaso espesor que coronan el resto de los materiales. Desde un punto de vista estructural, las características tectónicas de la zona de estudio están condicionadas por varias estructuras principales que han sido recopiladas por Almeida (1981), Zalán *et al.* (1991), Zalán (2004) y Soares (2008). Además, estos autores señalaron la influencia que tiene el basamento en el desarrollo de esas estructuras que incluso deforman la secuencia estratigráfica completa de las cuencas de Paraná y Chacoparanense, tal y como ocurre con la gran estructuración NE asociada al desarrollo del *rift* central de la cuenca de Paraná. Mira *et al.* (2015) sugieren que esta estructura extensional de dirección NE, mostraría continuidad a lo largo de Misiones y Corrientes en Argentina (Fig. 4), y sería la responsable de la presencia de sedimentos precarboníferos Corrientes. Esta amplia estructura extensional está formada por altos y bajos estructurales de dirección NE, quedando interrumpida en el sector central de la provincia de Corrientes por el trazado de la otra gran estructura presente en la zona: la Dorsal Asunción-Río Grande.

Según Rossello *et al.* (2006), la Dorsal Asunción-Río Grande forma un gran anticlinal que conectaría el arco de Asunción con el de Río Grande. En la parte intermedia de esta dorsal, a lo largo de la provincia de Corrientes, no habría afloramientos de un basamento que constituiría su núcleo en Paraguay (al norte) y en Río Grande do Sul (al sur). Esto se debe al hundimiento relativo respecto a sus márgenes por las fallas paralelas al río Uruguay.

En Corrientes, otros rasgos tectónicos de menor envergadura son el Alto de Mercedes y las fosas tectónicas de Corrientes y Curuzú (Mira *et al.* 2015). Estas fosas de dirección NE, fueron afectadas por la tectónica asociada a la actuación de la Dorsal Asunción-Río Grande. La misma propició el desarrollo de estructuras y fallas de dirección NO, cuyo elemen-

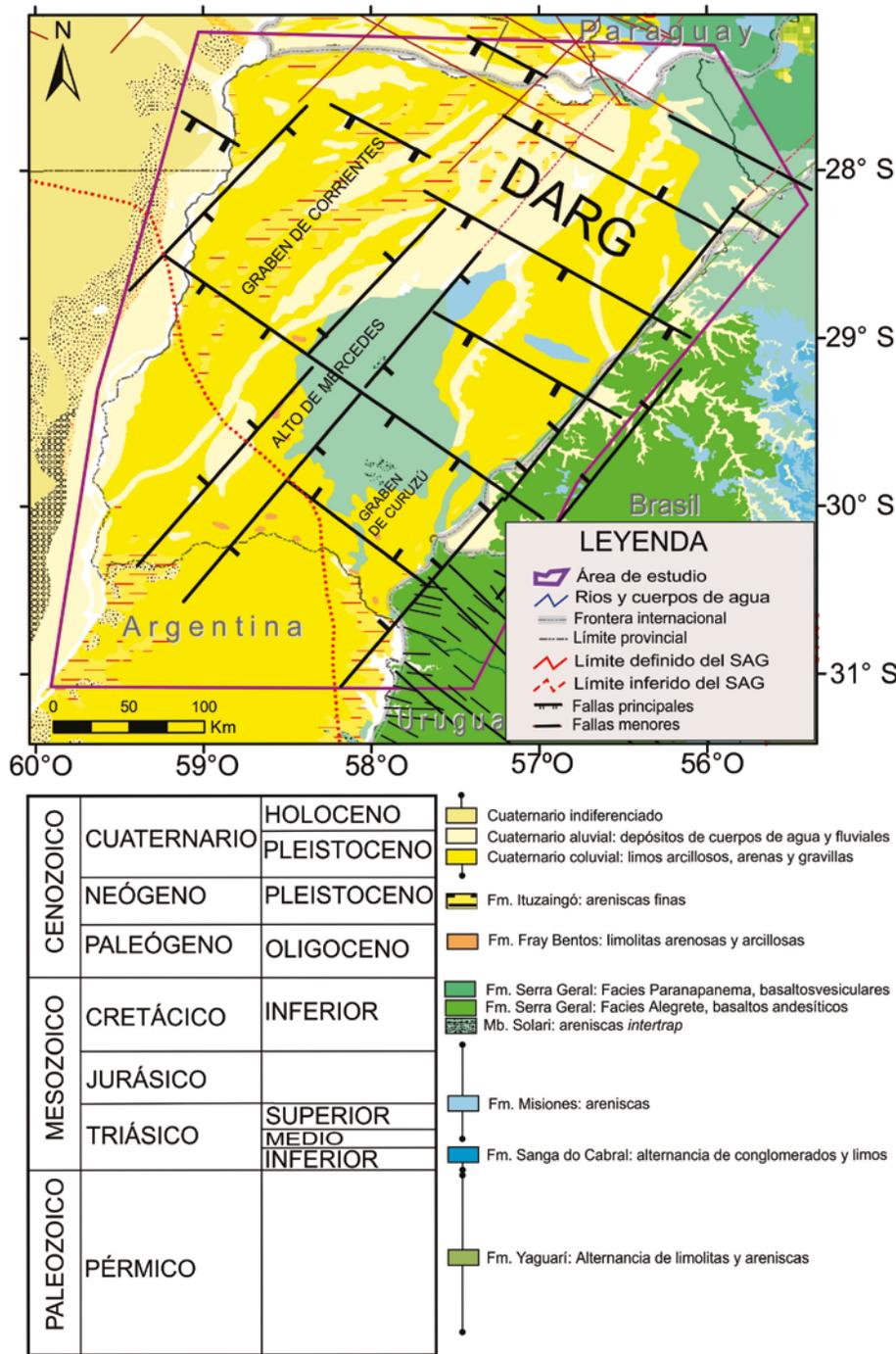


Figura 4: Mapa geológico y tectónico del área de estudio.

to más notorio es precisamente la traza de la Dorsal Asunción-Río Grande en el subsuelo correntino. Esta estructuración NO, coincidente con la traza de la dorsal, habría interrumpido la continuidad de las fosas Corrientes y Curuzú – Cuatiá hacia el NE, depocentros que esbozan luego su continuidad en el extremo NE de Co-

rrientes y el subsuelo de Misiones. Según Zalán *et al.* (1990), a nivel regional, las lineaciones tectónicas tanto en la cuenca Chacoparanense como en la de Paraná, siguen principalmente orientaciones NE y NO. La dirección NE es la misma que la que originó la cuenca de Paraná y Chacoparanense mientras que

la NO, responde a la apertura del océano Atlántico, por lo que las fracturas con esta dirección suelen estar rellenas de diques de diabasas. Sin embargo, a lo largo de la historia se han sucedido una serie de eventos tectónicos que produjeron hasta ocho fases de deformación que han dejado su impronta en las rocas de manera más o menos marcada (Riccomini 1995, Strieder *et al.* 2015, ver Fig. 5).

METODOLOGÍA

El trazado de lineamientos a partir de imágenes satelitales o de modelos digitales de elevación ha sido una herramienta utilizada con asiduidad en estudios hidrogeológicos, habiéndose probado la relación entre lineamientos y flujo de agua subterránea (Mabee *et al.* 1994, Fernandes y Rudolph 2001). De manera general, los lineamientos son más frecuentes en zonas muy tectonizadas, marcan zonas donde progresa la meteorización y en donde se produce un aumento de permeabilidad y porosidad del terreno. Además, los lineamientos pueden usarse para determinar los efectos de la anisotropía en la dirección del flujo del agua subterránea, fenómeno habitual en acuíferos fracturados. Según Fitts (2012), la orientación de los juegos de fracturas frecuentemente condiciona la anisotropía a gran escala en rocas cristalinas.

Una de las grandes dificultades con el análisis de los lineamientos es la reproducibilidad de los resultados ya que su localización y orientación difiere según el observador (Mollard 1957, Sander *et al.* 1997). Según Mabee *et al.* (1994, 2002) la identificación de lineamientos requiere de varios observadores y de múltiples pruebas. En este trabajo se propone una metodología que opta por utilizar variaciones de una imagen trazadas por el observador, con lo que se simplifica el análisis.

Para el trazado de las lineaciones se contó con imágenes Landsat7-ETM (Banda 8, Pancromática) y el Modelo Digital de Elevación (MDE o DEM por sus siglas en inglés) procedente de los datos de la Shuttle Radar Topography Mission (SRTM-

Ma	Era	Periodo/Época	Actividad orogénica	Fase tectónica	Deformación principal	Evento geológico e interpretación		
2.58	Cenozoico	Holoceno	Activación mesozoica	Fase deriva continental	Régimen extensional ONO-ESE	Orientación de deformación según equilibrio entre el <i>drifting</i> del Atlántico sur y la formación de los Andes, subducción de Placa de Nazca		
5.33		Pleistoceno						
23.03		Neógeno						
33.9		Paleógeno						
56.0								
65.5								
100.5	Mesozoico	Cretácico	Activación mesozoica	Fase rift III	NO (s1): relleno diques, lamproitas NO (s3)	Sistema transcurrente dextral		
145.5				Fase rift II	NO (s1): orientación diques. Arco Ponta Grossa NE (s3): N-S: tectónica en domos y cubetas			
163.5				Fase rift I	NE (s1): orientación de basaltos, diques. NO (s3): eje de mínimo esfuerzo			
174.1		Jurásico						
199.6								
37.0				Triásico	Continen-talización			
247.2								
251.0				Paleozoico	Estabilidad tectónica		Fase transgresión marina	Desarrollo cuencas Paraná y Chacoparanense
299.0		Pérmico						
359.2		Carbonífero						
416.0	Devónico							
443.7	Silúrico							
488.3	Ordovícico	Orogenia Brasiliana III; Transición						
542.0	Cámbrico							
	Proterozoico	Neoproterozoico						

Figura 5: Fases de deformación en las cuencas de Paraná y Chacoparanense y orientación principal de las estructuras deformacionales. Modificado de Carneiro *et al.* (2012) y Strieder *et al.* (2015).

USGS) que fue rectificado y mejorado por TecSult (2006). Esta imagen SRTM permite definir lineamientos morfoestructurales adoptando el principio de no-inferencia. El método utilizado para identificar las lineaciones fue el propuesto por Mabee *et al.* (1994). Básicamente, consiste en tres grandes procesos: (i) trazado de lineamientos en una imagen varias veces por un mismo observador o una vez por varios observadores; (ii) test de reproducibilidad de las observaciones, y (iii) análisis de la superposición de los trazados. En este trabajo, la metodología consistió en realizar varios tests de una imagen por un mismo observador. A partir del modelo digital de elevación, la estrategia seguida consistió en preparar varios mapas

con distintos filtros de sombreado y ángulo de iluminación. Se utilizaron cinco direcciones acimutales de iluminación: 0°, 45°, 90°, 135° y 180°, y un único ángulo de altura de iluminación: 45°. De esta manera, es posible mapear lineamientos ortogonales y estructuras secundarias formadas por la combinación de las direcciones acimutales y la altura de iluminación. Finalmente, sobre los lineamientos georreferenciados se realizaron los tests de reproducibilidad y de superposición de trazados para determinar qué lineamientos son coincidentes. En este trabajo se consideró que eran coincidentes cuando sus direcciones estaban desviadas ± 5° y la separación entre dos de ellos era inferior a 1 mm a la escala del mapa, según el

CUADRO 1: Número de lineaciones obtenidas.

Imagen	Nº lineaciones	Longitud media (km)
Landsat	318	17,41
DEM 0°	98	34,87
DEM 45°	91	32,86
DEM 90°	66	33,29
DEM 135°	67	35,53
DEM 180°	67	32,66
Resultado	118	31,28

Número de lineaciones trazadas a partir de cada imagen y de las lineaciones resultantes tras aplicar los criterios de concordancia.

criterio de Mabee *et al.* (1994).

RESULTADOS

Los mapas de lineamientos para cada una de las imágenes se muestran en la figura 6. Desde la imagen Landsat-ETM, el número de lineamientos trazados fue de 318, con una longitud promedio de 17,4 km. Para las imágenes procedentes del modelo digital de elevación se obtuvo una media de 78 lineaciones, con una longitud de 33,86 km (Cuadro 1).

Los seis mapas de lineamientos generados fueron superpuestos para poder compararlos aplicando los criterios de concordancia. En la figura 6 pueden observarse los resultados, con 118 lineaciones coincidentes, de longitud media 31,3 km, siendo el rango más repetido el comprendido entre 20 y 25 km de longitud (Fig. 6c). Se puede observar que algunos de los lineamientos de mayor jerarquía que fueron marcados en la figura 4, no se muestran aquí, para destacar el conjunto de lineamientos de menor envergadura que no fueron puestos de manifiesto en estudios anteriores.

El mapa de densidad de lineamientos representa habitualmente una medida cuantitativa de la longitud de los elementos lineales por unidad de área. Se comprueba que la densidad de lineamientos es mayor en la mitad sur de la zona de estudio, donde se alcanzan valores ligeramente por encima de 42 km/km². En cambio, la mitad norte presenta los registros mínimos con apenas 1,6 km/km² (Fig. 6a,b).

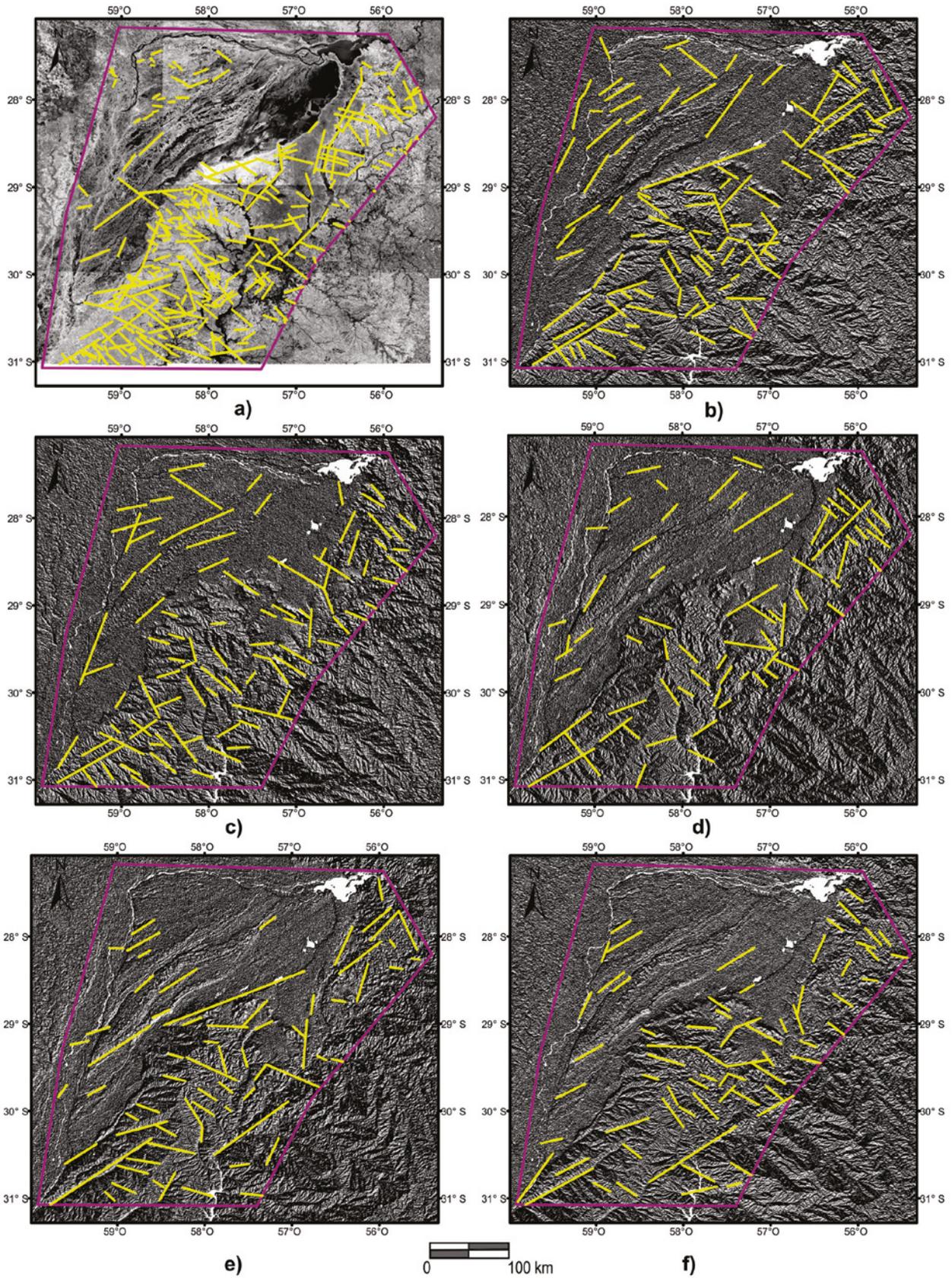


Figura 6: a) Lineamientos medidos en imagen Landsat-ETM; b-f) Lineamientos medidos en modelo digital de elevación con orientación de la iluminación desde la dirección acimutal 0° (b), 45° (c), 90° (d), 135° (e) y 180° (f).

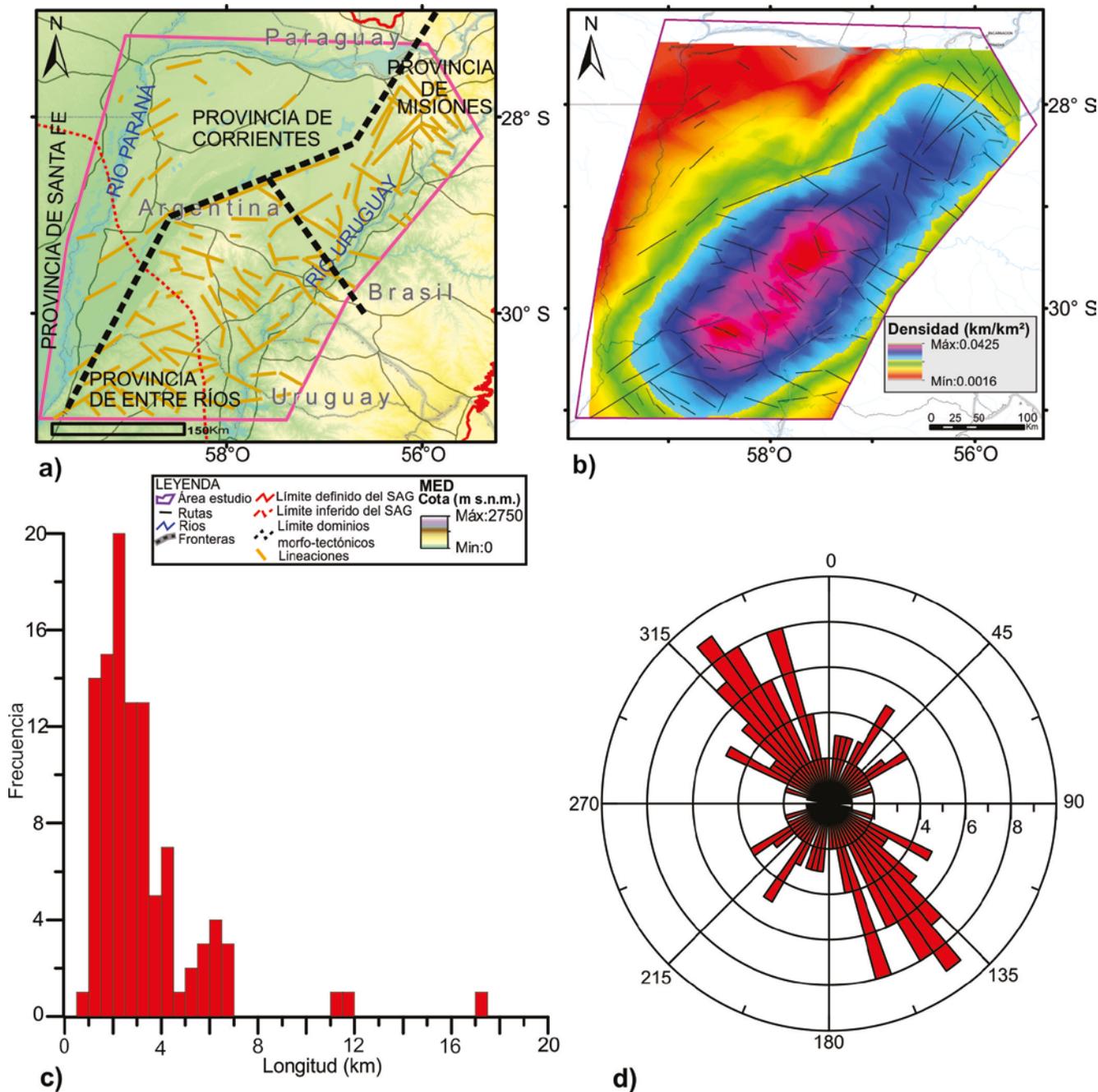


Figura 7: a) Mapa resultado de lineaciones medidas en la zona de estudio separando los tres dominios morfo-tectónicos de Corrientes; b) Mapa de densidad areal de lineaciones; c) Histograma de longitudes medidas en las lineaciones y; d) Diagrama de rosetas de la orientación de las lineaciones resultantes.

El análisis de las orientaciones a partir del diagrama de rosetas (Fig. 7c, d) permite comprobar que las orientaciones más frecuentes son N140° y N150° y, secundariamente, la dirección N35°. No obstante, se aprecia disparidad de las orientaciones de lineamientos más frecuentes si se compara la mitad noroeste respecto la mitad sureste del área estudiada. En el primer

caso, la dirección predominante es N30-35° mientras que, en el segundo caso es N140-150°.

DISCUSIÓN

Los lineamientos trazados muestran una muy buena correlación con la orientación de las fracturas y estructuración regional

de las cuencas Chacoparanense y Paraná. Esto implicaría que las fracturas trazadas en superficie podrían afectar a toda la serie sedimentaria, desde el basamento hasta al menos el Cretácico Superior, incluyendo las areniscas del Sistema Acuífero Guaraní.

El mapa de densidad de lineamientos sugiere un control geológico más eleva-

do donde los basaltos cretácicos afloran o se encuentran cerca de la superficie y menor, en las zonas donde predominan los sedimentos cenozoicos. El límite entre ambos dominios tectónicos lo marcaría una gran fractura de dirección NE - SO que sigue prácticamente el curso del río Corrientes, y sería la expresión en superficie del Alto de Mercedes, un relieve tectónico positivo que se sitúa a lo largo de Corrientes en esa dirección, y es interrumpido por la Dorsal Asunción-Río Grande.

Las lineaciones con dirección NE son las predominantes en la porción este de Corrientes, como resultado de la tectónica de cubetas y domos acaecida durante el Mesozoico y que tan ampliamente está representada al sur del río Uruguay. Gran parte de los afloramientos de las areniscas del Sistema Acuífero Guaraní en esa zona, como el Domo de Quaraí o el Domo de Boa Vista-Garupá, presentan dicha estructuración (Strieder *et al.* 2015).

En función de las lineaciones resultantes se puede hablar de tres dominios morfoestructurales: noroeste, noreste y suroeste. El dominio noroeste está delimitado septentrionalmente por el escarpe por el que discurre el río Corrientes y se caracteriza por una menor densidad de lineamientos y la prevalencia de lineaciones de dirección NE. El dominio noreste es donde teniendo una elevada densidad de lineamientos, coexisten las direcciones principales NO y NE. El dominio suroeste se caracteriza por la mayor densidad de lineamientos y gran parte de ellos con una dirección principal NO. Generalmente, se asume que las fracturas más permeables son aquellas cuya orientación es más cercana a la dirección del esfuerzo horizontal mayor (Bense *et al.* 2013).

Desde el punto de vista hidrogeológico, esta diferenciación en tres dominios morfoestructurales es importante ya que sirve como criterio para identificar, en donde escasean los afloramientos de areniscas del Sistema Acuífero Guaraní, las áreas donde coexisten flujos ascendentes desde el acuífero hacia los basaltos y de flujos descendentes de aguas de recarga donde aflora el Sistema Acuífero Guara-

ní, coincidiendo con aquellas áreas más tectonizadas, con orientaciones más favorables a la circulación del agua subterránea y con condiciones de carga hidráulica adecuadas. En este sentido, el mapa preliminar de la diferencia de potencial hidráulico entre el Sistema Acuífero Guaraní y el acuífero superficial (Nittmann 2014) muestra que en la parte oriental de la zona de estudio podrían producirse ascensos de agua desde el Sistema Acuífero Guaraní (Fig. 8).

La circulación de agua a través de los basaltos, ya sea por la intensa red de fracturas o a lo largo de las coladas de basalto, es un hecho conocido y comprobado que favorece los procesos de goteo y drenaje de los acuíferos infrayacentes. El tipo de recarga a través de los basaltos es relevante en otras áreas del Sistema Acuífero Guaraní. Por ejemplo, Rabelo y Wendland (2009) estiman que a través de los basaltos se produce un 15,7% del total de la recarga al Sistema Acuífero Guaraní en el Estado de San Paulo. Foster *et al.* (2009) partieron de la premisa que asigna un espesor aproximado de 100 m a los basaltos a través de los que potencialmente se recarga el Sistema Acuífero Guaraní.

Fernandes *et al.* (2010) y Wahnfried (2010), a partir de datos de ensayos de bombeo y resultados de análisis químicos e isotópicos realizados en pozos del Sistema Acuífero Guaraní y del Sistema Acuífero Serra Geral, sugieren que el patrón de circulación principal de las aguas en el segundo es horizontal a favor de coladas porosas y vertical a través de fracturas que afectan al relleno de la cuenca. Estos autores estiman que esa circulación de aguas se concentra en los primeros 50 m de espesor de los basaltos.

Mediante el estudio estructural regional de lineaciones y de fracturas a nivel de afloramiento, Fernandes *et al.* (2011, 2012) limitan los flujos horizontales de agua a los 55 m superficiales de basalto del Sistema Acuífero Serra Geral y los movimientos verticales, a los primeros 25 m de espesor. Fernandes *et al.* (2016) actualizan sus investigaciones y afirman que efectivamente el flujo de agua subterránea discurre a favor de fracturas verti-

cales, desviándose a partir de los 15 m de profundidad por coladas y fracturas horizontales. Sin embargo, en zonas con una fuerte meteorización y donde predominan coladas vesiculares e *intertraps* arenosos, podría ocurrir un flujo más profundo que incluso atravesase 100 m del paquete basáltico.

En este trabajo se adoptará el siguiente criterio para delimitar aquellas zonas donde se produciría recarga del Sistema Acuífero Guaraní a través de los basaltos (flujo descendente): zonas donde además de haber una relación de cargas hidráulicas adecuada, el espesor de basaltos sea menor a 100 m y la densidad de fracturación sea relevante. Ampliado a la totalidad del acuífero, este criterio permite zonificar la recarga tal como queda mostrado en la figura 9. Este sería un mapa base de especial importancia a la hora de considerar la modelización numérica del flujo de agua subterránea del Sistema Acuífero Guaraní.

Para el flujo de agua subterránea del Sistema Acuífero Guaraní, es relevante la existencia de estas zonas de fractura que también afectan a los basaltos y a los sedimentos paleozoicos. En la porción Argentina del Sistema Acuífero Guaraní, se supondría circulación del agua subterránea más rápida y sería el área proclive a la concentración de las líneas de flujo y a un eventual ascenso de flujos y mezcla de aguas de recarga y profundas, tal y como sugieren Rossello *et al.* (2006) o Nanni *et al.* (2013) para la vecina región de Río Grande do Sul y Manzano *et al.* (2013) para la zona de los esteros del Iberá en Corrientes (Fig. 10). Estos últimos autores lo postulan a partir de datos de composición química e isotópica de las aguas de perforaciones poco profundas, donde se tienen aguas cloruradas sódicas levemente salinas, que parecen ser mezcla de aguas del Sistema Acuífero Guaraní con aguas de otras procedencias. Recientes edades obtenidas para el agua de perforaciones situadas en las inmediaciones de la laguna Iberá, avalan esta afirmación. Las muestras extraídas en campañas conjuntas con la Agencia Internacional de la Energía Atómica arrojan valores de edad

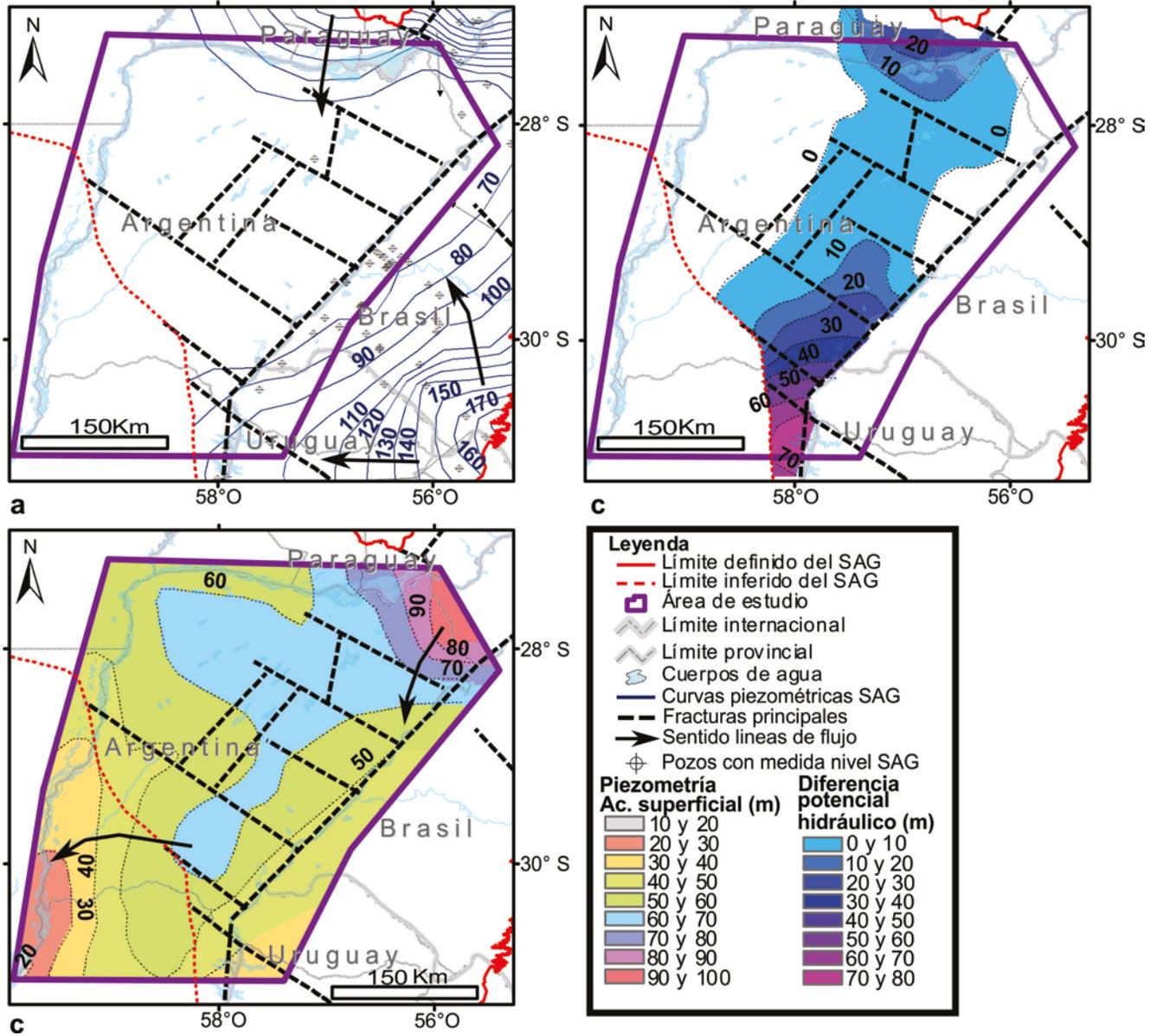


Figura 8: a) Mapa piezométrico del Sistema Acuífero Guaraní (SAG); b) Mapa piezométrico del acuífero superior; c) Diferencia de potencial hidráulico entre ambos. Modificado de Nittman (2014).

del agua (método 4He) superiores a 123 Ka (com. pers.).

A escala regional, (L. Araguas, com. pers.) la anisotropía del Sistema Acuífero Guaraní, fruto de la actividad tectónica, es uno de los principales factores a tener en cuenta a la hora de modelar el flujo subterráneo con éxito (Rodríguez *et al.* 2013). Esa anisotropía puede afectar tanto a las areniscas del Sistema Acuífero Guaraní como a los basaltos suprayacentes, donde las fracturas se comportan en ambos casos como sistemas conducto-barrera que favorecen o impiden el flu-

jo del agua (Caine *et al.* 1996). Las fallas en areniscas se comportan como zonas de alta permeabilidad sólo si hay rotación de granos mientras que en los basaltos, la permeabilidad dependerá del grado de conexión entre las fallas siendo muy permeables si están bien conectadas entre sí. Por el contrario, las fallas son sistemas barrera de baja permeabilidad cuando se producen fenómenos de cataclisis o recristalización en la línea de fractura (Bense *et al.* 2013). Evidentemente, estos sistemas conducto-barrera serán relevantes en aquellas zonas donde la densidad de

fracturas sea mayor. Las áreas más propicias identificadas en este trabajo para la existencia de esos sistemas, son los dominios morfoestructurales suroeste y noreste, dentro de Corrientes.

CONCLUSIONES

El mapa de lineamientos trazado permitió identificar tres dominios morfoestructurales: noroeste, noreste y suroeste, en la provincia de Corrientes, caracterizados por diferente densidad y dirección de lineamientos. Además, los lineamientos

trazados muestran una muy buena correlación con la orientación de las fracturas y estructuración regional de las cuencas Chacoparanense y Paraná. Esto implicaría que las fracturas trazadas en superficie afectarían a toda la serie sedimentaria desde el basamento hasta al menos, el Cretácico Superior, incluyendo las areniscas del Sistema Acuífero Guaraní. Este resultado es de relevancia para el análisis de aspectos hidrogeológicos tales como la identificación de zonas de recarga/descarga a nivel regional y local y direcciones de flujo.

La delimitación de zonas de recarga hacia el Sistema Acuífero Guaraní a través de los basaltos, y/o descarga de aguas del Sistema Acuífero Guaraní, fue posible combinando diferentes criterios: relación de cargas hidráulicas adecuada, espesor de basaltos menor a 100 m y densidad de fracturación relevante. En la parte oriental de la zona de estudio en la provincia de Corrientes, se encontró que podrían producirse ascensos de agua, desde el Sistema Acuífero Guaraní. Esta evidencia se apoya asimismo, en estudios hidroquímicos e isotópicos de otros autores en la zona. Además, en la porción Argentina del Sistema Acuífero Guaraní, se supondría una circulación del agua subterránea más rápida, siendo un área proclive a la concentración de las líneas de flujo y a un eventual ascenso de flujos y mezcla de aguas de recarga y profundas.

Este trabajo ha mostrado que tanto a escala regional como local, la anisotropía del Sistema Acuífero Guaraní, fruto de la actividad tectónica, puede resultar un factor principal a tener en cuenta a la hora plantear un modelo conceptual de funcionamiento del acuífero y por lo tanto, modelar el flujo subterráneo con éxito.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (ANPCyT) perteneciente al Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva de la República Argentina, por medio del proyecto PICT 2008/2071: Estudio del com-

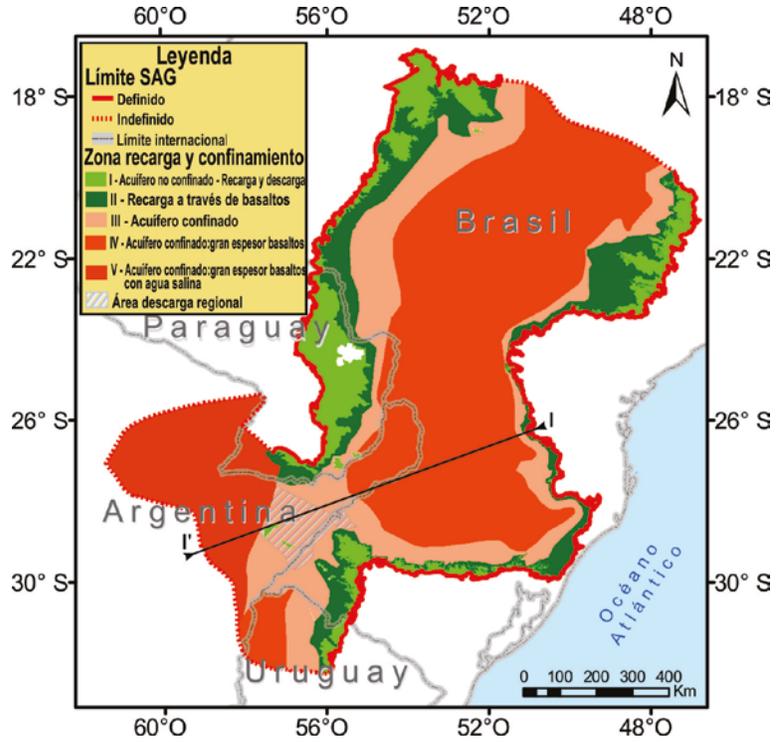


Figura 9: Zonificación de la recarga para el Sistema Acuífero Guaraní (SAG) en función del espesor de los basaltos que confinan el acuífero y de la densidad de lineamientos en la zona de Corrientes. Elaboración propia a partir de los datos de espesores de Foster *et al.* (2009) y Mira *et al.* (2015).

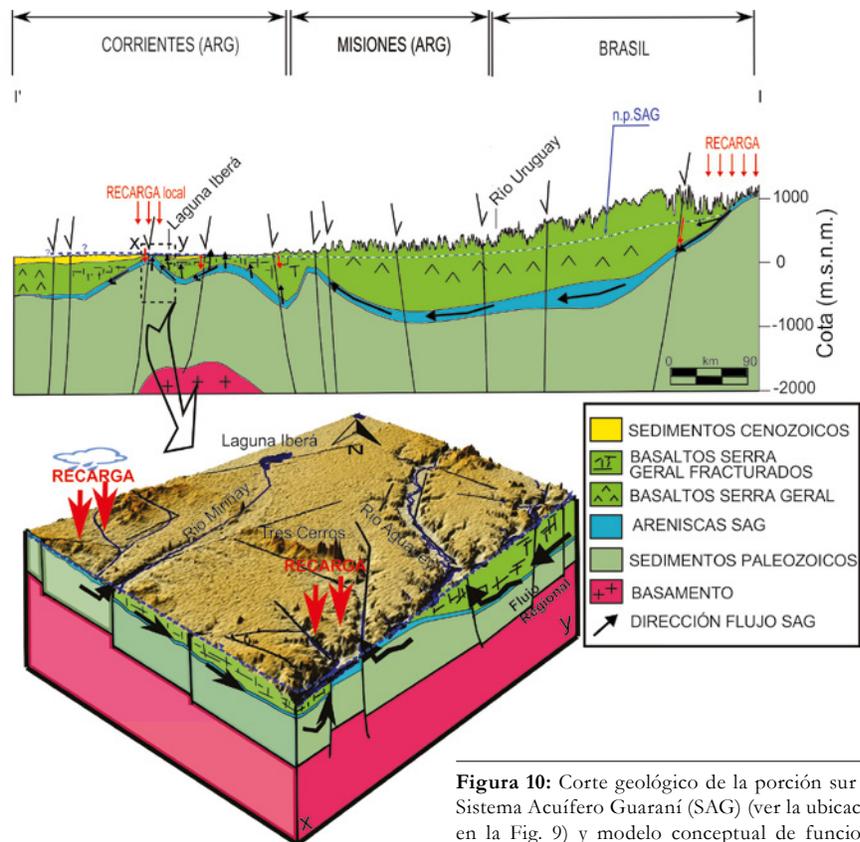


Figura 10: Corte geológico de la porción sur del Sistema Acuífero Guaraní (SAG) (ver la ubicación en la Fig. 9) y modelo conceptual de funcionamiento del SAG en la región de la Laguna Iberá (centro del Corrientes).

portamiento del Sistema Acuífero Guarani, con énfasis en el sector Argentino. También ha sido parcialmente financiado por recursos propios del Instituto de Hidrología de Llanuras "Dr. Eduardo Usunoff". Se agradece la contribución de los revisores cuyos comentarios han mejorado sustancialmente este manuscrito.

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- Acevedo, S., Lavina, E., Barberena, M., Ferrando, L. y Andreis, R. 1985. Evidencias de correlación entre a Formação Yaguari (Uruguai) e as Formações Rio do Rasto e Sanga do Cabral (Rio Grande do Sul- Brasil). *Pesquisas* 17: 112-121.
- Achilli, F., Anselmi, G., Ardolino, A., Blasco, G., Caminos, R., Cobos, J., Chipulina, M.A., DalMolín, C., Folguera, A., Franchi, M., Giai, S., Martínez, O., Miro, R., Panza, J.L., Ragona, D., Ramos, V., Rubiolo, D., Sepúlveda, E., Silve Nieto, D., Suriano, J. y Tchilinguirian, P. 1998. En: Lizuaín, A., Leanza, H. y Panza, J.L. (eds.), *Mapa geológico de la República Argentina*, 1:2.500.000, SEGEMAR, Buenos Aires.
- Almeida, F. 1972. Tectono-magmatic activation of the South American platform and associated mineralization. *IUGS, 24th International Geology Congress, Actas*: 339-346, Montreal.
- Almeida, F. 1981. Síntese sobre a tectônica da Bacia do Paraná. 3º Simposio Regional de Geología. *SBG-SP, Atas* 1:243-275, Curitiba.
- Almeida, M.E., Reis, N.J., Luzardo, R., Pinheiro, S.S. y Oliveira, M.A. 2004. Folha NA.19- Pico da Neblina. En: Schobbenhaus, C., Gonçalves, J.H., Santos, J.O.S., Abram, M.B., Leao Neto, R., Matos, G.M.M., Vidotti, R.M., Ramos, M.A.B. y de Jesus, J.D.A. (eds.), *Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo, Sistema de Informações. Programa Geologia do Brasil, CPRM. CD-ROM, Brasília*.
- Araújo, L.M., França, A.B. y Potter, P.E. 1995. Giant Mercosul aquifer of Brazil, Argentina, Uruguay and Paraguay: hydrogeologic maps of Botucatu, Pirambóia, Rosário do Sul, Buena Vista, Misiones and Tacuarembó Formations, UFPR/PETROBRÁS, 16p., Curitiba.
- 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-Nuggeta quifer system, USA. *Hydrogeology Journal* 7: 317-336.
- Athayde, G.B. 2013. *Compartimentação hidroestrutural do Sistema Acuífero Serra Geral (SASG) no Estado do Paraná, Brasil*. Tesis Doctoral, Universidad de Federal do Paraná (inédita), 155 p., Brasil.
- Barros, A. y Ferreira, F.J.F. 2007. *Compartimentação magnética-estrutural e conectividade dos sistemas aquíferos Serra Geral e Guarani na região central do estado do Paraná, sul do Brasil*. 10th International Congress of the Brazilian Geophysical Society, 5 p., Rio de Janeiro.
- Barros, A., Soares, A., Bittencourt, A. y Ferreira, F. 2011. *Compartimentação estrutural e conectividade hidráulica dos sistemas aquíferos Serra Geral e Guarani: caracterização hidrogeoquímica na região central do Estado do Paraná*. *Revista Brasileira de Geociências* 41: 319-333.
- Barros, A., Fonseca Ferreira, F.J., Bittencourt, A. y Salamuni, E. 2014. Connectivity and Magnetic-Structural compartmentalization of the Serra Geral and Guarani Aquifer Systems in central State of Parana (Parana Basin, Brazil). *Revista Brasileira de Geofísica* 32: 141-160.
- Bense, V., Gleeson, T., Loveless, S., Bour, O. y Scibek, J. 2013. Fault zone hydrogeology. *Earth-Science Reviews* 127: 171-192.
- Bigarella, J. J., Salamuni, R. y Marques Hijo, P. L. 1961. Consideraciones sobre la Formación Furnas. *Boletín Paranaense de Geografía* 4:5-53.
- Bossi, J. 1966. *Geología del Uruguay*. Departamento de Publicaciones, Universidad de la República, Colección Ciencias 2,419 p., Montevideo.
- Bossi, J. y Ferrando, L. 2001. *Carta geológica de Uruguay, Escala 1:500.000, Versión digital 2.0*. Facultad de Agronomía, Montevideo.
- Caine, J.S., Evans, J.P. y Forster, C.B. 1996. Fault zone architecture and permeability structure. *Geology* 24: 1025-1028.
- Campos, H.C.N.S. 2000. Modelación Conceptual y Matemática del Acuífero Guarani, Cono Sur. *Acta Geológica Leopoldinense* 23: 3-50.
- Carneiro, C., Marques de Almeida, F., Hasui, Y., Zalán, P. y Guimaraes, J. 2012. Estágios evolutivos do Brasil no Fanerozoico. En: Hasui, Y., Carneiro, C., Marques de Almeida, F. y Bartorelli, A. (eds.), *Geologia do Brasil*. Beca, 900 p., Sao Paulo.
- Chebli, G., Mozetic, M., Rossello, E. 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* 29: 627-644, Buenos Aires.
- Cobbold, P., Massabie, A. y Rossello, E. 1986. Hercynian Wrenching and Thusting in the Sierras Australes Foldbelt, Argentina. *Hercynica*: 135-148.
- de Santa Ana H., Rossello E.A., Fulfaro V.J. y Veroslavsky G. 2001. Evidencias de deformación compresiva permotriásica en la Cuenca Norte (Uruguay). 9º Congreso Latinoamericano de Geología -3º Congreso Uruguayo, *Actas CD-ROM*, Montevideo.
- Elizalde, G. 1970. *Carta Geológica del Uruguay*. Escala 1:100.000. Departamento de Publicaciones, Universidad de la República, *Boletín* 3, Montevideo.
- Fernandes, A.J. y Rudolph, D.L. 2001. The influence of Cenozoic tectonics on the Groundwater production capacity of fractured zones: A case study in Sao Paulo, Brazil. *Hydrogeology Journal* 9: 151-167.
- Fernandes, A.J., Maldaner, C.H. y Azevedo Sobrinho, J.M. 2010. Estratigrafía dos derrames de basaltos da Formação Serra Geral (Ribeirão Preto - SP) baseadana geología física, petrografía e geoquímica, *Geologia USP. Série Científica* 10:73-99.
- Fernandes, A.J., Maldaner, C.H. y Rouleau, A. 2011. Análise de fraturas nos basaltos de Formação Serra Geral (Ribeirão Preto, SP): aplicação para a elaboração de modelo hidrogeológico conceitual, *Geologia USP. Série Científica* 11:3-20.
- Fernandes, A.J., De Assis Negri, F., Azevedo Sobrinho, J.M. y Varnier, C. 2012. Análise de fraturas dos basaltos do Acuífero Serra Geral e o potencial de recarga regional do Sistema Acuífero Guarani. *Boletín Geológico y Minero* 123: 325-339.
- Fernandes, A.J., Maldaner, C. H., De Assis Negri, F., Rouleau, A. y Wahnfried, I.D. 2016. Aspects of a conceptual ground water flow model of the Serra Geral basalt aquifer (Sao Paulo, Brazil) from physical and structural geology data. *Hydrogeology Journal*: 1-14.

- Fernández Garrasino, C. y Vrba, A. 1999. Estructura del tope de la Formación Serra Geral (Neojurásico-Eocretácico) en la Mesopotamia argentina y adyacencias. 14° Congreso Geológico Argentino, Actas 1: 185-188, Salta.
- Ferreira, F.J.F., Portela Filho C.V., Rosa Filho E.F. y Rostirolla S.P. 2004. Connection of the Serra Geral and Guaraní aquifers systems across Ponta Grossa Arch (Paraná Basin, Brazil). *Internacional Congress of the International Association of Hydrogeologists (IAH)*, 33° International Congress of the Latin-American Association of Underground Hydrology for Development (ALHSUD), Abstract 7 (CD-ROM), Zacatecas, México.
- Fitts, C.R. 2012. *Groundwater Science*. Elsevier, 672 p., Amsterdam.
- Foster, S., Hirata, R., Vidal, A., Schmidt, G. y Garduño, H. 2009. The Guaraní Aquifer Initiative—Towards Realistic Groundwater Management in a Transboundary Context. *GW-Mate Sustainable Groundwater Management, Lessons for Practice, Case Profile Collection Num. 9*. http://siteresources.worldbank.org/INTWAT/Resources/GW-MATE_English_CP_09.pdf.
- Fulfaro, V.J. 1996. Geology of eastern Paraguay. En: Comin-Chiaromonti, P. y Gomes, C.B. (eds.) *Alkaline Magmatism in Central Eastern Paraguay. Relationships with Coeval Magmatism in Brazil*. Edusp-Fapesp: 17-30, Sao Paulo.
- Gastmans, D., Veroslavsky, G., Kiang Chang, H., Caetano-Chang, M.R. y Nogueira Presinotti, M.M. 2012. Modelo hidrogeológico conceptual del Sistema Acuífero Guaraní (SAG): una herramienta para la gestión. *Boletín Geológico y Minero* 123: 249-265.
- Herbst, R. y Santa Cruz, J. 1985. Mapa Litoestratigráfico de la Provincia de Corrientes *Revista d'Orbignyana – Corrientes* 2:1-51.
- Iriondo, M.H., Krohling, D. y Orfeo, O., 1998. Tropical realm (provinces of Corrientes and Misiones). En: Iriondo, M. (ed.) *Loess in Argentina: Temperate and Tropical*. Guía de campo 4, 27 p., Paraná.
- Janasi, V., Freitas, V. y Heaman, L. 2011. The onset of flood basalt volcanism, Northern Paraná Basin, Brazil: A precise U–Pb baddeleyite/zircon age for a Chapecó-type dacite. *Earth and Planetary Science Letters* 302:147-153.
- Lastoria, G. 2002. Hidrogeologia da Formação Serra Geral no Estado de Mato Grosso do Sul. Tese de Doutorado. Área de Concentração - Geociências e Meio Ambiente. Tesis Doctoral, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista (inérita), 133 p., Río Claro.
- Lattman, L. H. y Parizek, R. R. 1964. Relationship between fracture traces and the occurrence of ground water in carbonate rocks. *Journal Hydrology* 2: 73-91.
- Lavina, E.L. 1988. The Passa Dois Group. *International Gondwana Symposium Field excursion guide book*. Instituto de Geociências, 24-30, São Paulo.
- López Gamundi, O. y Rossello, E. 1993. Devonian-Carboniferous unconformity in Argentina and its relation to Eo-hercynian orogeny in southern South America. *Geology Rundschau* 82: 136-147.
- López Gamundi, O., Espejo, I., Conaghan, P. y Powell, C. 1994. Southern South America. En: Veevers, J.J. y Powell, C.McA. (eds.) *Permian-triassic Pangean Basins and Foldbelts along the Panthalassan Margin of Gondwanaland*, Memoir 184: 281-329, Boulder.
- Mabee, S.B. y Hardcastle, K.C. 1997. Analyzing outcrop-scale fracture features to supplement investigations of bedrock aquifers. *Hydrogeology Journal* 5: 21-36.
- Mabee, S.B., Hardeastle, K.C. y Wise, D.U. 1994. A method of collecting and analysing lineaments for regional-scale fractured-bedrock aquifer studies. *Groundwater* 32: 884-894.
- Mabee, S.B., Curry, Patrick J. y Hardcastle, K.C. 2002. Correlation of lineaments to ground water inflows in a bedrock tunnel. *Groundwater* 40: 37-43.
- Machado, J.L.F. y Faccini, U. F. 2004. Influência dos Falhamentos Regionais na Estruturação do Sistema Aquífero Guaraní no Estado do Rio Grande do Sul. 13° Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. Anais 13, CD-ROM:1-14, Cuiabá.
- Magowe, M. y Carr, J.R. 1999. Relationship between lineaments and ground water occurrence in western Botswana. *Groundwater* 37: 282-286.
- Manzano, M., Rodríguez, L., Vives, L., Ortega, L., Heredia, J., Mira, A., Nittman, J., Valladares, A., Araguás, L. y Aggarwaal, P. 2013. Caracterización hidroquímica e isotópica de las aguas subterráneas del hidrosistema Iberá (Corrientes, Argentina). En: González, N., Kruse, E., Trovatto, M. y Laurencena, P. (eds.) *Agua subterránea recurso estratégico*, Tomo 2, 1ª Edición, EDULP:43-50, La Plata.
- Melo, J.H.G. 1989. The Malvinokaffric Realm in the Devonian of Brazil. En: McMillan, N.J., Embry, A.F. y Glass, D.J. (eds.), *Devonian of the World*. Canadian Society of Petroleum Geologists, Memoir 14:669-703, Calgary.
- Milani, E. 1997. Evolução tectonoestratigráfica da Bacia do Parana e seu relacionamento com a geodinâmica fanerozoica do Gondwana Sul-Occidental. Tesis doctoral, Universidade do Rio Grande do Sul (inérita), 255 p., Porto Alegre.
- Milani, E.J. y Ramos, V.A. 1998. Orogenias paleozoicas no domínio sul-occidental do Gondwana e os ciclos de subsidência da Bacia do Paraná: *Revista Brasileira de Geociências* 28: 527-544.
- Milani, E., Gonçalves de Melo, J., Alves de Souza, P., Fernandes, L. y França, A. 2007. Bacia do Parana. *Boletín Geociências Petrobras* 15: 265-287.
- Mingramm, A. 1965. Abandono del pozo estratigráfico F. MB.1-Mariano Boedo (Formosa). YPF (inérito), Buenos Aires.
- Mingramm, A. y Russo, A. 1972. Sierras Subandinas y Chaco salteño. En: Leanza, A.F. (ed.), *Geología Regional Argentina*. Academia Nacional de Ciencias: 185-211, Córdoba.
- Mira, A. 2012. Modelo conceptual hidrogeológico del Sistema Acuífero Guaraní con énfasis en el sector Argentino. Tesis de Maestría. Universidad Politécnica de Cartagena (inérita), 244 p., Cartagena.
- Mira, A., Veroslavsky, G., Rossello, E., Vives y L. y Rodríguez, L. 2015. Subsurface geological modeling of Corrientes province (NE Argentina) and its relationships with the Guaraní Aquifer system function. *Journal of South American Earth Sciences* 62: 148-163.
- Mocellin, R. y Fonseca Ferreira, F. 2009. Conectividade e compartimentação dos sistemas aquíferos Serra Geral e Guaraní no sudoeste do estado do Paraná, Brasil. *Revista Brasileira de Geociências* 39: 567-579.
- Mollard, J. D. 1957. Aerial photograph said petroleum search. *Canadian Oil and Gas Industries* 10: 89-96.
- Moore, R.B., Schwarz, G.E., Clark, S.F. Jr., Walsh, G.J. y Degnan, J.R. 2002. Factors related to well yield in the fractured-bedrock aquifer of New Hampshire. *USGS Professional Paper* 1660, 51 p., Denver.

- Nanni, A.S., Roisenberg, A., de Hollanda, M.H., Casagrande Marimon, M.P., Viero, A.P. y Scheibe L.F. 2013. Fluoride in the Serra Geral Aquifer System: Source Evaluation Using Stable Isotopes and Principal Component Analysis. *Journal of Geological Research* ID 309638, 9 p., <http://dx.doi.org/10.1155/2013/309638>.
- Nittmann, J. 2014. Simulación del flujo y transporte de la edad del agua subterránea en el Sistema Acuífero Guaraní (SAG). Tesis doctoral, Universidad Nacional del Litoral (inédita), 139 p., Santa Fe.
- Padula, E. y Mingramm, A. 1967. Informe de terminación del pozo Cha. LB-x-2, Las Breñas, Chaco. YPF S.A., Buenos Aires.
- Padula, E. y Mingramm, A. 1969. Permian subsurface beds of the Chaco-Mesopotamian Region, Argentina, and their relatives in Brazil, Paraguay and Uruguay. *International Union of Geosciences Gondwana Stratigraphy Symposium*. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO), *Earth Sciences* 2: 1041-1051, París.
- Petri, S. 1948. Contribuição ao estudo do Devoniano paranaense. Departamento Nacional da Produção Mineral, Divisão de Geologia e Mineralogia. *Boletim* 129, 125 p., Rio de Janeiro.
- Petri, S. y Fulfaro, V.J. 1988. *Geologia Do Brasil*. EDUSP, 631 p., Sao Paulo.
- Portela Filho, C.V. 2003. Condicionamiento estructural-magnético do Sistema Aquífero Serra Geral na região central do Arco de Ponta Grossa e sua conectividade com o Sistema Aquífero Guaraní. *Boletim Paranaense de Geociências* 53:83-92.
- Preciozzi, F., Spoturno, J., Heinzen, W. y Rossi Kempa, P. 1985. Memoria explicativa de la Carta Geológica del Uruguay a la escala 1:500.000. Ministerio de Industria y Energía, Dirección Nacional de Minería y Geología, Montevideo.
- Putzer, H., 1962. *Geologie von Paraguay*. Beiträge zur Regionalen Geologie der Erde. Gebrüder Borntraeger, 182 p., Berlin.
- Rabelo, J.L. y Wendland, E. 2009. Assessment of groundwater recharge and water fluxes of the Guaraní Aquifer System, Brazil. *Hydrogeology Journal* 17: 1733–1748.
- Reginato, P.A.R. y Strieder, A.J. 2006. Caracterização Estrutural dos Aquíferos Fraturados da Formação Serra Geral na Região Nordeste do Estado do Rio Grande do Sul. *Revista Brasileira de Geociências* 36: 13-22.
- Riccomini, C. 1995. Tectonismo gerador e deformador dos depósitos sedimentares pós-gondvânicos da porção centro-oriental do Estado de São Paulo e áreas vizinhas. Tese de Livre Docência, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo (inédita), 100 p., São Paulo.
- Rodríguez, L., Vives, L. y Gómez, A. 2013. Conceptual and numerical modeling approach of the Guaraní Aquifer System. *Hydrology and Earth System Sciences* 17:295-314.
- Rosa Filho, E.F. Da., Hindi, E.C., Rostirolla, S.P., Ferreira, F.J.F. y Bittencourt, A.V.L. 2003. Sistema Aquífero Guaraní – Considerações Preliminares Sobre a Influência do Arco de Ponta Grossa no Fluxo das Águas Subterráneas. *Revista Águas Subterráneas* 17: 91-111.
- Rossello, E., Veroslavsky, G., Santa Ana, H., Fulfaro, V.J. y Fernández Garrasino, C. 2006. La dorsal Asunción-Río Grande: un alto fondo regional entre las cuencas Paraná (Brasil, Paraguay, Uruguay) y Chacoparanense (Argentina). *Revista Brasileira de Geociências* 36:181-196.
- Sander, P., Minor, T.B. y Chesley, M.M. 1997. Groundwater exploration based on lineament analysis and reproducibility tests. *Ground Water* 35: 888-894.
- Schenieder R.L., Mühlmann, H., Tommasi, E., Medeiros, R.A., Daemon, R.F. y Nogueira, A.A. 1974. Revisão estratigráfica da Bacia do Paraná. 28º Congresso Brasileiro De Geologia, Anais do Sociedade Brasileira de Geologia 1: 41-65, São Paulo.
- Scherer, C. 2002. Preservation of aeolian genetic units by lava flows in the Lower Cretaceous of the Paraná Basin, southern Brazil. *Sedimentology* 49: 97-116.
- Schobbenhaus, C. y Bellizzia, A. 2001. Mapa geológico de América del Sur 1:5.000.000. CGMW - CPRM e DNPM e UNESCO, Brasília.
- Soares, A.P. 2008. Variabilidade espacial no Sistema Aquífero Guaraní: controles estratigráficos e estruturais. Tesis doctoral, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (inédita), 179 p., Porto Alegre.
- Strieder, A.J., Heemann, R., Reginato, P.A.R., Acauan, R.B., de Amorim, V.A. y Remde, M.Z. 2015. Jurassic–cretaceous deformational phases in the Paraná intracratonic basin, southern Brazil. *Solid Earth Discuss* 7: 1263-1314.
- Strugale, M., Rostirolla, S.P., Mancini, F., Ferreira, F.J.F. y de Freitas, R.C. 2007. Structural framework and Mesozoic–Cenozoic evolution of Ponta Grossa Arch, Parana Basin, southern Brazil. *Journal of South American Earth Sciences* 24: 203-227.
- Tecsult 2006. Mapa Base del Proyecto para la Protección Ambiental y Desarrollo Sostenible del Sistema Acuífero Guaraní. Informe Final. Informe técnico.
- Wahnfried, I. 2010. Modelo conceitual de fluxo do Aquitarde Serra Geral e do Sistema Aquífero Guaraní na região de Ribeirão Preto, São Paulo. Tesis doctoral, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (inédita), 122 p., Porto Alegre.
- Wildner, W., Hartmann, L. y Lopes, R. 2007. Serra Geral magmatism in the Paraná Basin, a new stratigraphic proposal, chemical stratigraphy and geological structures. *Gramado. Problems in the Western Gondwana Geology, 1st Workshop - South America - Africa*, 1: 189-197.
- Zalán, P.V. 2004. Evolução fanerozoica das bacias sedimentares brasileiras. En: Mantesso-Neto, V., Bartorelli, A., Carneiro, C.D.R., de Brito-Neves, B.B. (eds.), *Geologia do Continente Sul-Americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. Beca Produções Culturais Ltda, 673 p., São Paulo.
- 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. En: Leighton, M.W., Kolata, D.R., Oltz, D.F. y Eidel, J.J. (eds.), *Interior cratonic basins*. American Association of Petroleum Geologist, *Memoir* 51: 681-708.
- Zalán, P.V., Wolff, S., Conceição, J.C.J., Astolfi, M.A.M., Vieira, I.S., Appi, V.T., Zanotto, O.A. y Marques, A. 1991. En: *Tectonics and sedimentations of the Paraná Basin*. Ulbrich, H. y Rocha-Campos, A.C. (eds.), *Gondwana Seven Proceedings, 7º International Gondwana Symposium*, Instituto Geociências Universidade do São Paulo, São Paulo.

Recibido: 3 de noviembre, 2015

Aceptado: 3 de julio, 2016