

DISTINCIÓN SISMOLÓGICA ENTRE EL MANTO ARQUEOZOICO Y EL PROTEROZOICO: LA RAÍZ DE LA LITOSFERA BAJO LA CUENCA DEL PARANÁ, AMÉRICA DEL SUR

SEISMOLOGICAL DISTINCTION BETWEEN ARCHEAN AND PROTEROZOIC MANTLE: THE LITHOSPHERIC ROOT BENEATH PARANÁ BASIN, SOUTH AMERICA

JAIME LEONARDO BAÉZ PRESSER¹

¹Diamond Geology Consultant, Asuncion, Paraguay. Correo electrónico: jaimleonardobp@gmail.com

Resumen: La Cuenca del Paraná, es una amplia cuenca sedimentaria situada en la porción centro-este de América del Sur que frecuentemente se considera se desarrolló durante parte de las eras Paleozoica y Mesozoica. Siendo que esta cuenca está constituida por rocas sedimentares e ígneas. A la Cuenca del Paraná corrientemente se la considera como una típica cuenca flexural de interior cratónico. Buscando saber si la Cuenca del Paraná yace sobre un manto Arqueozoico o Proterozoico se levantaron, con base a perfiles 1D-Vs (Presser, 2010a y d) y su derivado perfil de perturbación de la velocidad media $(V_{sv} + V_{sh})/2$ con respecto al modelo global 1D AK135, inferencias puntuales de interface litosfera-astenosfera o límite litosfera-astenosfera (LAB) en 210 puntos (repartidos de 2 en 2 grados y en algunos de 1 en 1 grado). Al contar con un número espaciado de puntos donde se definieron los LAB superiores a >193,5-195 Km (=profundidad LAB que denotaría edades >2500 Ma., estimado a partir de $z=0.04*t+93.6$ de Artemieva, 2006), se bosqueja un arreglo cratónico (=Archon). Configuración refinada se obtuvo al combinar los datos de LAB obtenidos junto con la tomografía sísmica Vs y Ps (publicados e inéditos), selectos datos de flujo de calor superficial (publicados), la actividad sísmica registrada regional; en combinación a las informaciones gravimétricas y magnetométricas (en escala continental). Trazado que delinee un gigante dominio cratónico de forma irregular y algo alargada en dirección NNE-SSW que se extiende entre Paraguay-Brasil-Argentina-Uruguay. Influencia tectónica Archon al que se entendió como siendo el Cratón Río de la Plata y al que se le sub dividió en 3, inferidas, potestades Archons: 1-Río de la Plata, 2- Paramat y, 3- Paranapanema. Al Archon Río de la Plata se le asignaron sub aéreas o dominios: Río Apa (LAB: ~195-223Km o = ~3100-2501Ma.), Río Paraná (LAB: ~195-201 o Km = ~2900-2501 Ma.) y Río Uruguay (LAB: ~196-213 o Km = ~2700-2510 Ma.). El Dominio Río Apa englobaría, parcialmente, las exposiciones del Alto de Río Apa donde trabajos publicados mostraron edades U-Pb del Proterozoico Inferior y que muestran edad TDM del Arqueozoico y dos registros en zircones con edades U-Pb de entre 3000 a 3028 Ma. =Terreno Archon en sus bordes encajados/soldados por fajas Proton/Tecton. El Dominio Río Apa muestra en profundidad una bien definida, en términos de Vs y Ps, blue-zone (150 a >250 Km) como sistemáticamente reconocido por debajo de los grandes cratones Arqueozoicos de ambiente peridotítico frío y depletado. Estudios sobre los diamantes de Capiibary/Paraguay-Oriental, (en/junto al Archon Río de la Plata, Dominio Río Apa), permitieron derivar un tiempo de residencia de 3.1 Ga. (3100 Ma.) en su matriz; un aposento de manto peridotítico (hazburgítico o lherzolítico) depletado (Smith et al., 2012). Los datos comentados para el Archon Río de la Plata, en su Dominio Río Apa junto al Paraguay, se harían extensivos y válidos para los Dominios Río Paraná y Río Uruguay, considerando el conjunto de informaciones geofísicas de aplicación y consideración en común. Así, del mismo modo se haría extensiva para los Archones Paramat (LAB: ~195-222Km o = ~3050-2501 Ma.) y Paranapanema (LAB: ~195-240Km o = ~3500-2501 Ma.); siendo que ambos se desconocen exposiciones del basamento por estar cubiertos por sedimentos de la Cuenca del Paraná.

Palabras clave: Cuenca del Paraná; litósfera; Cratón Río de la Plata; Dominio Río Apa.

Abstract: The Paraná Basin is a large sedimentary basin located in the central-eastern South America that we developed during part of the Paleozoic and Mesozoic eras. Since that, this basin consists of sedimentary and igneous rocks. Commonly, the Paraná Basin is regarded as a typical flexural inter-cratonic basin. Investigating whether Paraná Basin lies on Archean or Proterozoic mantle were rose, based on 1D-Vs profiles (Presser, 2010a y d) and its derivative profile of perturbation of the average velocity $(V_{sv}+V_{sh})/2$ relative to the global 1D AK135 model, inferences point of lithosphere-asthenosphere interface or lithosphere-asthenosphere

boundary (LAB) to 210 points (divided by 2 by 2 degrees and some of 1 by 1 degree). By having a number of spaced points above defined LAB >193.5 to 195km (=LAB depth to denote ages > 2500 Ma, estimated from $z=0.04*t+93.6$ of Artemieva, 2006), is drafting a cratonic agreement (= Archon). Refined configuration was reached by combining obtained LAB-data with seismic tomography Vs and Ps (published and unpublished), selected data from surface heat flow (unpublished), recorded regional seismic activity, in combination with the gravimetric and magnetometric data (continental scale). Track which outlined irregular and somewhat elongated in NNE-SSW direction a giant cratonic domain that extending between Paraguay-Brazil-Argentina-Uruguay. Archon tectonic influence which was understood as being the Rio de la Plata craton and which is sub divided into 3, inferred, powers Archons: 1-Rio de la Plata, 2 - Paramato and 3 - Paranapanema. At the Rio de la Plata Archon is assigned sub-air or domains: Rio Apa (LAB: ~195-223 Km or = ~3100-2501 Ma.), Rio Paraná (LAB: ~195 -201Km or = ~2900-2501 Ma.) and Rio Uruguay (LAB: ~196-213Km or = ~2700-2510 Ma.). Rio Apa-domain include, in part, exposures of the Alto de Rio Apa where published papers showed U-Pb ages of Lower Proterozoic age and show Archean TDM-age and two records of zircon U-Pb-ages from 3000 to 3028 Ma = Archon-Field at the edges fitted/welded by Proton/Tecton-belts. Rio Apa-domain shown in depth a well-defined, in terms of Vs and Ps, blue-zone (150 to > 250 km) as recognized consistently below major Achaeon cratons with peridotitic cold and depleted-setting. Studies on Capiibary diamond from eastern Paraguay, (at the Archon Rio de la Plata, Rio Apa domain) allowed to derive a residence time of 3.1 Ga (3100 Ma.) in her matrix, a space of depleted peridotitic mantle (hazburgitic or Iherzolititic) (Smith et al., 2012). The mentioned data for Archon Rio de la Plata, Rio Apa-domain in Paraguay, would be extended and valid for Rio Parana and Rio Uruguay-domains, considering all applicable geophysical information and consideration in common. So, just as would be extended for Paramato (LAB: ~195-222Km or = ~3050-2501 Ma.) and Paranapanema (LAB: ~195-240Km or = ~3500-2501 Ma.) Archons, both of which are unknown basement exposures since is covered by Paraná Basin sediments.

Keywords: *Paraná Basin; lithosphere; Rio de la Plata Craton; Rio Apa-domain.*

INTRODUCCIÓN

Eaton et al. (2009) definen al cratón como la región central de un continente que se ha mantenido estable en más de mil millones de años en la escala del tiempo. Esta referencia es también en relación a grandes dominios Arcaicos, como por ejemplo el cratón Kaapvaal en el Sur de Africa. Brito-Neves, (1995), comenta que en un cratón se presentan como condiciones necesarias: estabilidad relativa, antigüedad y transitoriedad, espesor litosférico privilegiado y bajo flujo termal. Según Morgan (1995) para que las anomalías térmicas litosféricas sean significativas para ventanas del diamante, ellas tienen que tener un diámetro mínimo de cerca de 400 km.

Llevando en consideración las edades que pueden ser reconocidas y agrupadas en los cratones, Janse (1994) los divide en tres mayores elementos:

1-Archon -rocas del basamento con edad del Arqueozoico, y que tienen como su último evento termal la edad de 2500 Ma.

2-Proton - rocas del basamento con edad del Proterozoico tardío a medio (2500-1000 Ma.), y

que tienen como su último evento termal la edad de 1000 Ma.

3-Tecton - rocas del basamento con edad del Proterozoico medio a inferior (<1000 Ma.), y que tienen como su último evento termal la edad del orden de los 800 Ma.

Clifford (1966) afirmaba que kimberlitas con tenores económicamente interesantes de diamantes siempre se encuentran asociados con núcleos tectónicamente estables de cratones donde la corteza posee edad del Arqueozoico (>2400 millones de años) (=Clifford's Rule) =Archones. El Clifford's Rule establece también que las exploraciones de diamantes deberían llevarse a cabo en estas áreas. Esta regla es clara para la mayoría de las grandes minas de diamante (*world class diamond mine*) en el mundo; no así la regla se presenta confusa para algunas grandes minas como es el caso de la lamproita Argyle en Australia y, no menos confuso para la lamproita de Bunker en la India o las minas en kimberlita junto a Orapa (Botsuana), entre otros; dominios donde la información tectónica se presta a debates.

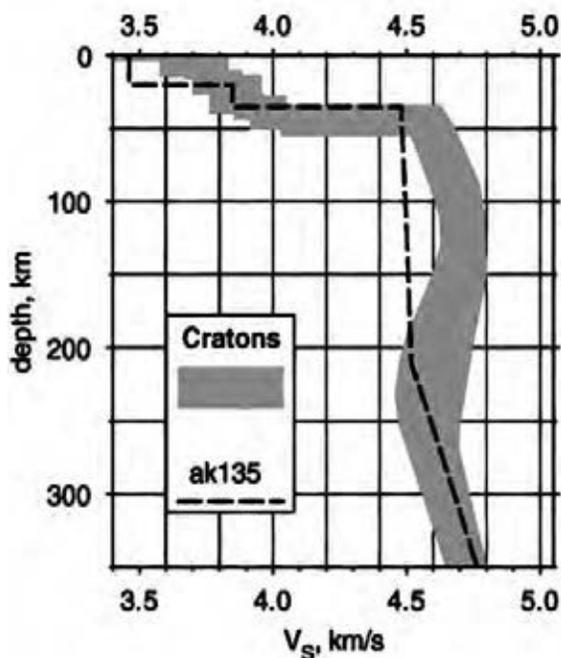


Fig.1. Resumen del perfil de velocidad isotrópica de las ondas S (shear-wave velocity = V_s) en perfil 1D por debajo de cratones como mostrado por Lebedev et al. (2009). Figura que pretende revelar los rangos de valores de V_s (en sombreado) para incluir preferentemente los mejores perfiles obtenidos por debajo de todos los lugares cratónicos que habrían estudiado.

O'Reilly & Griffin (2010) comentan que el manto litosférico cratónico (o SCLM) es fácil de definir, al menos en concepto; i.e. “*es la parte superior no convectiva del manto que yace por debajo de la corteza continental. Constituye la parte más baja de la placa del complejo de la litosfera que se mueve de una manera relativamente rígida en la más caliente y reológicamente más débil astenosfera. La litosfera no es convectiva y por lo tanto se caracteriza por geotermas conductoras. La intersección de la geoterma conductiva con el solidus saturado de líquido peridotítico puede marcar la división de la litosfera en una capa límite superior mecánica y una capa -frontera- inferior térmica, que, aunque débil, todavía mantiene una geoterma conductora*”. La presente interface litosfera-astenosfera o límite litosfera-astenosfera (LAB), también según los comentarios de O'Reilly & Griffin (op cit.) “*se produce en la intersección*

de la geoterma conductiva con la adiabática astenosfera a la temperatura potencial del manto de cerca de 1300 ° C. La composición de la SCLM, como se refleja en xenólitos del manto y la derivada de macizos expuestos, es compleja, ella muestra una depreciación inicial de los componentes basálticos (altos grados bajo cratones, y en menor grado por debajo de cortezas más jóvenes), y las sobreimpresiones geoquímicas posteriores (re-fertilización) por múltiples episodios de fusión y la infiltración de líquidos. Debajo de las zonas cratónica el manto litosférico es generalmente espeso (150-250 km) y refractario (es decir, rica en Mg y pobre en Ca, Al), por debajo de cinturones móviles jóvenes y zonas extensionales por lo general es más delgado y composítivamente más "fértil" (es decir, pobres en Mg y más ricas en Ca, Al, Fe, Ti y otros componentes "basálticos")”.

En la litosfera cratónica o SCLM, de acuerdo con Lebedev et al. (2009), las propiedades sísmicas reflejan su composición y su estado físico ofreciendo las condiciones básicas en la arquitectura de los procesos de su formación, y sobre las causas de su estabilidad. La litosfera, en sentido estricto, es una zona de límite mecánicos; donde el LAB coincide con la parte superior de una zona de disociación entre la litosfera y la astenosfera, que es marcada por un aumento de la velocidad de deformación; así una zona de baja velocidad sísmica de ondas S (secundarias o *secundae* = shear-wave velocity) (V_s) a veces se detecta por debajo de una zona de alta velocidad (Eaton et al., 2009). La litosfera sísmológica por debajo de regiones cratónicas habitualmente se caracteriza como una porción anómalamente alta de velocidad V_s ($=V_{sh} + V_{sv}$) desde la profundidad del Moho a 100-300 km (Lebedev et al., 2009; Eaton et al., 2009), su base siendo difícil identificar mediante ondas de superficie (Ondas de Love y Ondas de Rayleigh), debido a las propiedades técnicas de la integración (Eaton et al., 2009). El acceso a la distribución de las velocidades variaría de ruta a ruta; en algunos casos, velocidades V_s siendo más elevadas inmediatamente debajo del

Moho, disminuyendo gradualmente con la pro-

fundidad (Darbyshire & Eaton, 2010). La rúbrica sísmica de la litosfera subcratónica (o SCLM) muestra claramente en las imágenes tomográficas un manto de alta velocidad por debajo del cual las velocidades suelen relajarse gradualmente de nuevo con relación a la media mundial (Darbyshire & Eaton, op cit.); así entendiéndose que esta mudanza de comportamiento sísmico se da en la interfase litosfera-astenosfera. También se puede notar que velocidades V_s son sistemáticamente más elevadas en la litosfera de cratones que en la litosfera de cinturones móviles Proterozoicos (Lebedev y Trampert, 2010).

Queda claro que las velocidades altas V_s se asocian con una litosfera espesa, de raíz fría, re-

fractaria, y el grado de profundidad del manto de alta velocidad se estaría tomando, de cierta forma, como una aproximación del grosor de la litosfera (sismológica) cratónica.

En este trabajo se pretende, basado en la información V_s (perfiles 1D junto a la tomografía sísmica- V_s) y el apoyo de tomografía sísmica V_p (las ondas P -primarias o primae) sumado a otros datos geofísicos (gravimetría y magnetometría), disponibles en la literatura científica publicada y/o en medios on-line de generación de información, sustentados por la información geológica de diversos tipos, estimar la configuración entre el manto Arqueozoico y el Proterozoico o, más propiamente dicho; estimar la profundidad de la raíz de la litosfera (el LAB) bajo la La Cuenca Geológica

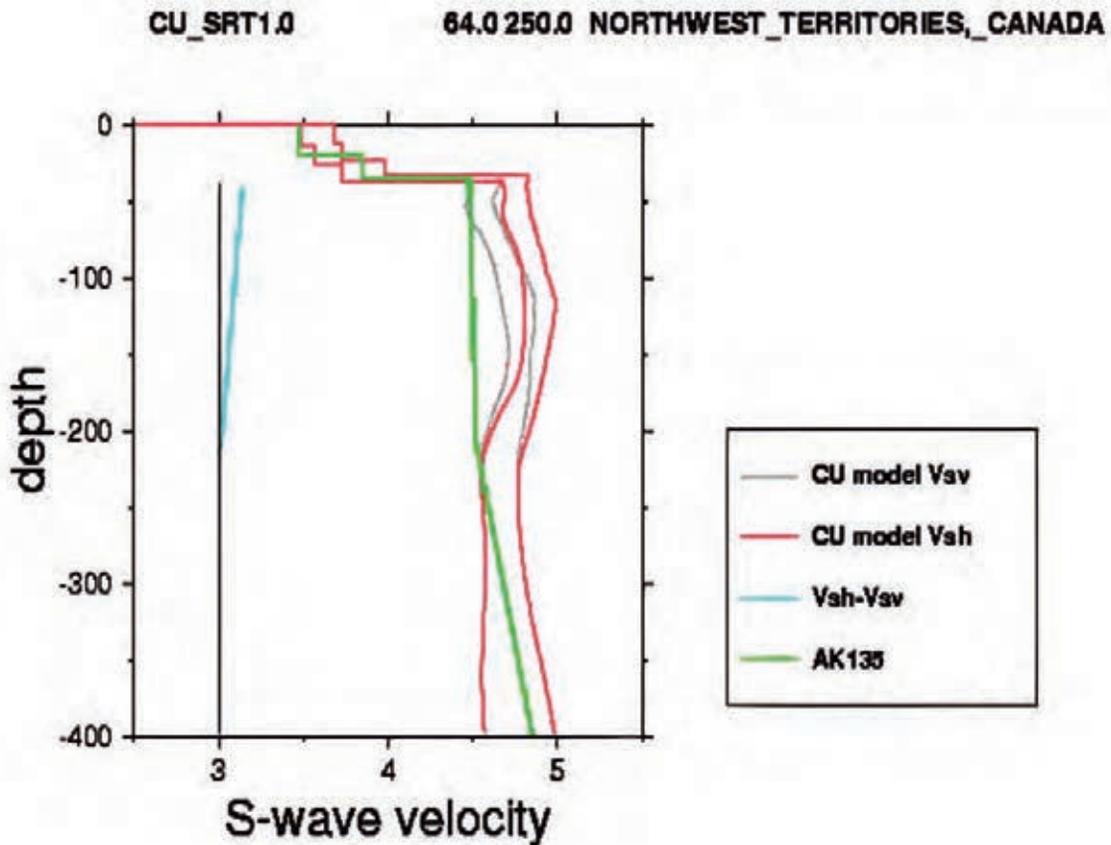


Fig. 2. Perfil de velocidad isotrópica de las V_s en perfil 1D por debajo de una región cratónica próximo a la mina de diamantes Panda en el cratón Slave de Canadá. Se puede observar el comportamiento de V_{sv} y V_{sh} en relación al Modelo Global de Referencia AK135. V_{sv} y V_{sh} se separan por debajo de los aproximadamente 45-50 Km y se vuelven a unir aproximadamente a los 215 Km, i.e. el espesor del manto litosférico subcontinental?. (Fuente: <http://ciei.colorado.edu/~nshapiro/MODEL/>).

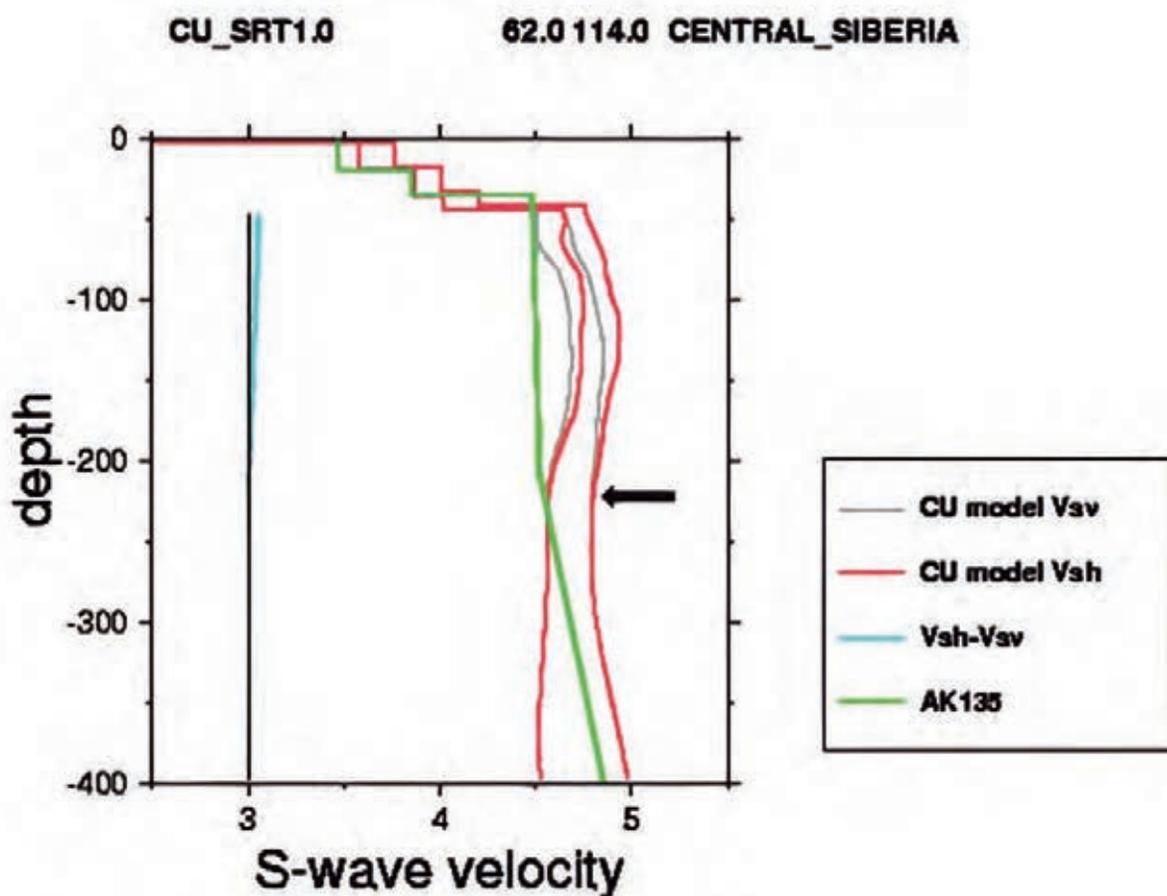


Fig. 3. Perfil de velocidad isotrópica de las Vs-1D por debajo de una región cratónica próximo a algunas de las ricas minas de diamantes en el cratón Siberiano (Rusia). Se muestra como las velocidades Vsv y Vsh después de los 150 Km se relajan gradualmente con relación a AK135. Obsérvese las varias definiciones (de disminución de la velocidad Vs), antes de alcanzar la línea recta vertical y bien expresiva (se señala por la flecha, por debajo de los 200 Km). Fuente: <http://ciei.colorado.edu/~nshapiro/MODEL/>.

Del Paraná, o simplemente Cuenca del Paraná.

LAB VISTO EN PERFILES 1D DE VS (=1D-VS): MÉTODO DE ESTIMACIÓN DEL LAB

Según Lebedev et al. (2009), la anisotropía sísmica de la litosfera en los cratones sería el reflejo de la estructura creada en el momento en que ellos experimentaron una fuerte deformación, durante su formación y estabilización y, comentan además que, la mayoría de los trabajos hablan de una anisotropía radial en el cratón que sería consecuencia de la fábrica horizontal orientada ($V_{sh} > V_{sv}$). SCLM donde un aumento de la velocidad

de Vs (>4.55 Km/S) entre el Moho y los 100 a 150 km de profundidad es visto como probablemente debido a las transformaciones de fases, en particular, la transición de la espinela-peridotita a granate-peridotita, propuestas a la que previamente se le atribuyo, dentro de este intervalo de profundidad, como la "discontinuidad" de Hales (Lebedev & Trampert, 2010); Fig.-1 según Lebedev et al. (2009).

La Fig.-2, corresponde a un perfil 1D-Vs (<http://ciei.colorado.edu/~nshapiro/MODEL/>). Esta figura muestra los corredores resultantes de valores aceptables de Vsv y Vsh, velocidad estimada a

partir del modelo de Monte-Carlo, procedimiento que es indicado del mismo modo en <http://ciei.colorado.edu/~nshapiro/MODEL/>. El perfil fue obtenido, a partir de la citada página, próximo a la mina de diamantes Ekati, junto al cratón Slave en Canadá. En la Fig.-2 se puede observar:

-Vs es de alta velocidad entre Moho y los 250 Km, igual a lo mostrado en sombreado en la Fig.-1, siendo que, esta alta velocidad se relaja gradualmente, de nuevo con relación a la media mundial (i.e. AK135 =Modelo Global de Referencia, de Kennett et al., (1995), citado en <http://ciei.colorado.edu/~nshapiro/MODEL/>). O como ya indicado más arriba, (Eaton et al., 2009), la litosfera sísmológica por debajo de regiones cratónicas habitualmente se caracteriza como una porción anómalamente alta de velocidad Vs desde la profundidad del Moho a 100-300 km. Esta Fig.-2 resalta que tanto Vsh como Vsv se abren en 2 brazos paralelos y de diferente velocidad.

-Los brazos paralelos de Vsh y Vsv por debajo de los 50 Km aproximadamente se separan, donde se ve que $Vsh > Vsv$ por unas decenas de kilómetros. Brazos, que luego se vuelven a unir y en este punto de unión se funden en una línea recta de velocidad (en este caso mostrado por debajo de los 200 Km) que puede ser visto groseramente como un patamar de la velocidad de Vs. Poco después la Vs se acelera rápida y constantemente a lo largo de la profundidad.

-La línea de referencia AK135 intercepta, luego de adquirir aceleración en velocidad, poco después de los 200 Km a Vs.

Eaton et al., (2009), véase también Darbyshire & Eaton, (2010), estimaron, en regiones cratónicas (Arqueozoicos/Paleoproterozoicos), el LAB a partir de perfiles 1D-VS, (se interpreta que toman la intersección de la línea VS con la línea AK135 como indicativo del LAB). Por su lado Presser (2010a y d), basado en el trabajo de Eaton et al.,

(2009), también a partir perfiles 1D-VS (Según CU_SRT1.0 (=Ray tomography) –Anisotropic, dado en <http://ciei.colorado.edu/~nshapiro/MODEL/>) presento un método simple de estimación del el LAB; i.e.: tomar como LAB el último punto de disminución de la velocidad (Km/seg.) Vsh (borde de mayor velocidad), específico luego de las varias definiciones, antes de alcanzar la línea recta que por debajo de la cual, nuevamente, Vs experimenta un aumento constante y progresivo de su velocidad. Esto se comprende mejor al observar las Figs.-2 y 3.

Presser (2010a y d) observo que los valores de las profundidades del LAB estimados, en regiones cratónicas y en los terrenos Proterozoicos, versus las edades (en millones de años) muestran una relación directamente proporcional; i.e., a mayor edad mayor profundidad (Fig.-4). Los datos ploteados se alinean perfectamente a lo largo de una recta (Fig.-4). Presser (op cit.) también indico que la recta trazada es compatible con la observación y ecuación-de-la-recta previamente definida por Artemieva (2006) i.e.: $z=0.04*t+93.6$ (Donde z es el espesor termal de la litósfera en km y t es la edad en Ma.).

Por lo arriba resaltado se revela la buena resolución como método de aproximar, probablemente con escaso rango de error, el LAB al emplear perfiles 1D-VS. Si llevando en consideración el hecho que espesores superiores a 193,5 Km representarían los de un SCLM Arqueozoico (o cratón), inferidos a partir de la ecuación-de-la-recta $z=0.04*t+93.6$ y que también puede ser deducido de lo indicado en la Fig.-4 (195 Km). De esta forma se podría, al contar con un número espaciado de puntos donde se definieron LAB superiores a 193,5-195 Km., trazar una configuración cratónica Arqueozoica en una región dada. Este procedimiento ya fue testado por Presser (2010a, b, c, d y e), ver también la observación similar realizada Darbyshire & Eaton (2010) para la región del cratón Superior en Canadá. Con todo, el cratón Sino-Korean, es uno de los cratones que rompe los esquemas sísmicos para la estimación del LAB y numerosos comentarios al respecto pueden ser

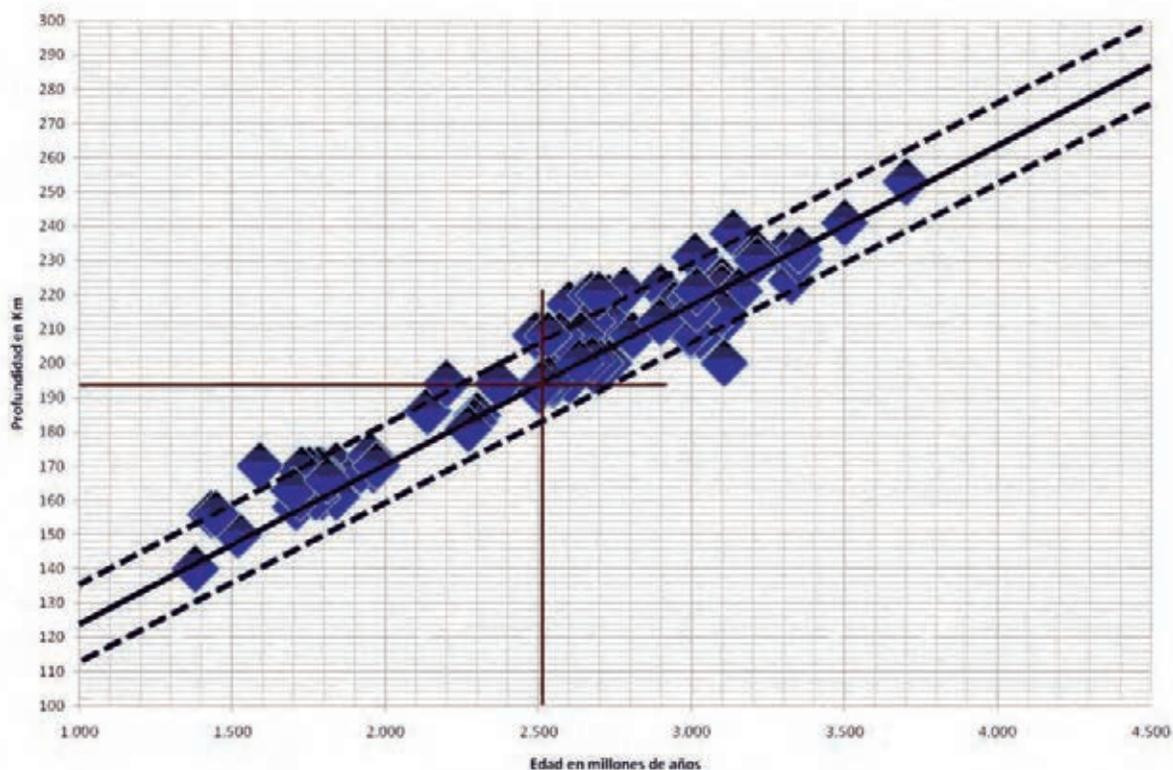


Fig. 4. Profundidad estimada de la raíz de los cratones (espesor litosférico o LAB) obtenidos a partir de 1D-Vs en versus edades (Ma.) como trazado por Presser (2010) y parcialmente modificado. Para esta estimación y simetría a lo largo de la recta se contemplaron selectas edades del interior de los Cratones-Archon (Numero de datos alrededor de 100, de las más diversas fuentes publicadas: Kalahari, Slave, Hearne, Labrador, Siberiano, Karelia, Sao Francisco, Guaporé, Guyanas, Kasai-Congo, Man, Wyoming, Norte de Australia, etc.) sumándose a los datos estimados porciones Archon/Proton (Bloque Rio Apá, W-Slave, S-Rio de la Plata, etc.). Esta simetría mostraría la efectividad de la estimación del espesor litosférico a partir de 1D-Vs y; del mismo una aproximación (inmediata) de la edad de cratonización en zona de plataforma-cratónica. La recta trazada es, aproximadamente, compatible con la ecuación-de-la-recta ya previamente definida por Artemieva (2006) i.e.: $z=0.04*t+93.6$ (Donde z es el espesor termal de la litósfera en km y t es la edad en Ma.). Sin embargo, del grafico puede deducirse que el espesor LAB Arquezoico es del orden mínimo de 195 Km. Las flechas indican los materiales más antiguos conocidos: zircón detrítico en Jack Hills, Western Australia. ($4,404 \pm 8$ Ma)(Wilde, et al.; 2001) y el Acasta Gneiss en el “Canadian Shield” Northwest Territories, Canadá (4.031 ± 0.003 Ga.)(Samuel, 1999); donde las líneas de trazo discontinuo (horizontal) junto indican el espesor inferido. De esto se deduce un LAB máximo para los cratones del mundo no alcanzaría los 300 Km.

pinzados en Chen & Zhang (2011).

ESCENARIO GEOTECTÓNICO DE LA CUENCA DEL PARANÁ

La Plataforma Sudamericana es considerada como totalmente formada en el evento Pan Africano (o Brasiliano de 900-490 Ma.) (Schobbenhaus et al., 1984; Hasui, 2010). Esta plataforma posee composición compleja, reflejo de la histo-

ria polisíclica de su basamento, desde el Paleoarcheozoico (ca. 3,5 Ga.) al Ordovícico Temprano (ca. 500-480 Ma.) (Schobbenhaus & Brito Neves, 2003); mega-estructura donde son reconocidos, en principio, 4 cratones: Amazônico, São Luís, São Francisco y Rio de la Plata (Brito-Neves & Cordani 1991; Brito-Neves et al. 1996; Janse 1985; Svisero 1994; Trompette 1994). Posteriormente también encuentran importancia la Provincia Bor-

borema (Schobbenhaus & Brito Neves, 2003; Medeiros et al., 2003) y el de cratón Paraná (Cordani et al., 1984) o Paranapanema (Quintas, 1995). Así como también el bloque Pampia, entre otros menores como puede leerse en, por ejemplo, Ramos et al. (2010).

La Cuenca del Paraná, es una amplia cuenca sedimentaria situada en la porción centro-este de América del Sur. Su área de ocurrencia alcanza principalmente el centro-sur de Brasil, desde el estado de Mato Grosso hasta el estado de Rio Grande do Sul, donde alcanza cerca de 75% de su distribución de área. A más del Brasil, ella también se distribuye por el noreste de la Argentina, en la porción este del Paraguay y en el norte de Uruguay. Es una depresión ovalada, con el eje mayor casi norte-sur, y posee un área de cerca de 1,5 millón de km². Ella se desarrolló durante parte de las eras Paleozoica y Mesozoica y su registro sedimentario comprende rocas depositadas del Pe-

ríodo Ordovícico al Cretácico, alcanzando un intervalo de tiempo entre 460 e 65 millones de años atrás. Su espesor máximo, superior a 7000 m en su porción central, es constituida por rocas sedimentares e ígneas. La Cuenca del Paraná es una típica cuenca flexural de interior cratónico (extracto de lo encontrado en http://pt.wikipedia.org/wiki/Bacia_do_Paran%C3%A1). La Fig.-5 bosqueja los límites de la Cuenca del Paraná y se indican las exposiciones más relevantes del basamento cristalino Arqueozoico-Proterozoico.

El cratón Rio de La Plata fue definido por Almeida et al. (1973) englobando la porción Uruguay y los alrededores de la Sierra de Tandil en la Argentina. Posteriormente, fue extendido rumbo al norte (Fragoso-Cesar & Soliani, 1984) para incluir, sucesivamente: las ventanas de Rivera, al oeste, y Acegúa, al este, localizados en el interior de la Cuenca Del Paraná, próximas a la frontera Uruguay-Brasil; en el este de Rio Grande do Sul

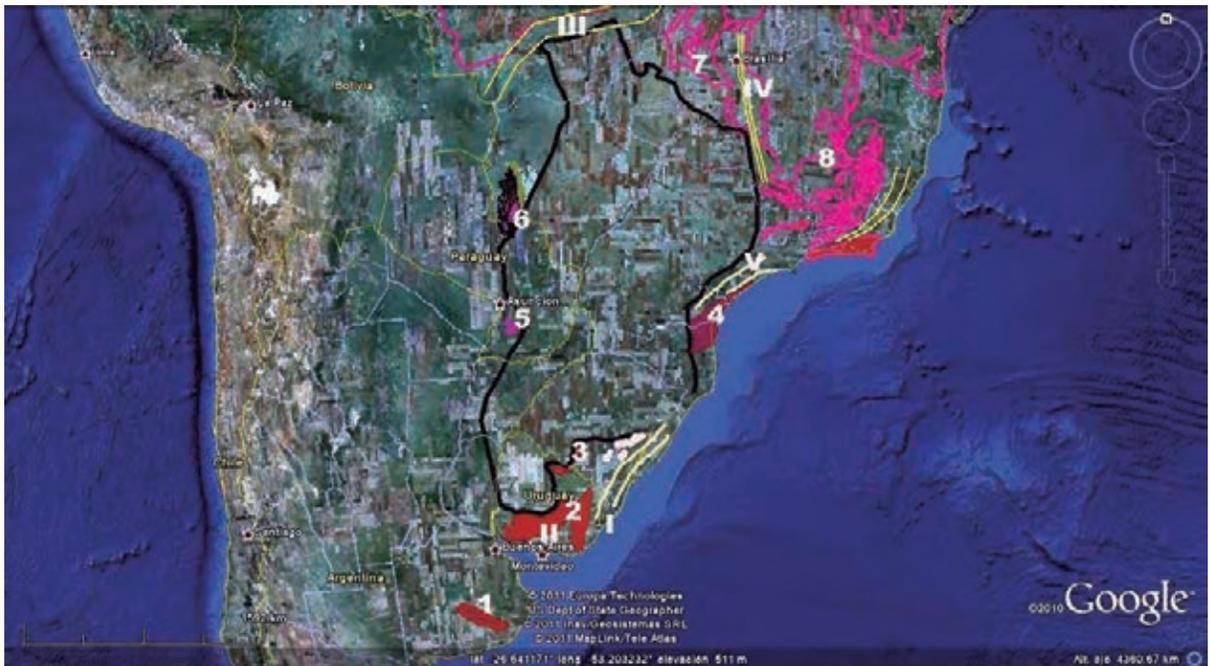


Fig. 5. Bosquejo aproximado de la Cuenca del Paraná (líneas de negro) y su relación con la exposición de las más relevantes rocas cristalinas del basamento Arqueozoico-Proterozoico (líneas/áreas llenas de púrpura o en violeta claro): 1-Sierra de Tandil , 2-Terreno Piedra Alta, Terreno Nico Pérez, Terreno Tijucas 3- Rivera, Acegúa, Taquarembó, Encruzilhada, São Gabriel; 4- Luis Alves, Curitiba, Paranaguá; 5- Alto de Caupucú; 6- Macizo Rio Apá; 7- Macizo de Goiás; 8-Craton São Francisco. Y los cinturones de: I- Dom Feliciano, II-Montevidéo- San José- Arroyo Grande; III-Paraguai-Araguaia; IV-Brasilia; V-Riviera. Mayores comentarios ver el texto.

el bloque Taquarembó, y los bloques Encruzilhada y São Gabriel; y finalmente, en el norte, el bloque cratónico llamado de Luís Alves (Trompette, 1994). Fig.-5. Como indicado anteriormente, al respecto trabajos de síntesis son encontrados, por ejemplo, en Ramos et al. (2010), Hasui (2010), entre otros. Fig.-5.

El llamado Cráton Rio de La Plata de “Almeida et al”, está bien representado en Uruguay (Dalla Salda et al., 1988; Hallinan et al., 1993; Trompette, 1994, Fragozo Cesar & Machado, 1997; Cingolani et al., 1997), siendo contornado al ESE por el cinturón Dom Feliciano (Basei, 1985; Trompette, 1994; Chemale et al., 1997); y sin límites a WNW entonces cubierto por las rocas sedimentarias de la Cuenca del Paraná (Trompette, 1994). Aquí el cráton consiste de una amplia asociación de Terrenos del Arqueozoico/Proterozoico, soldados por fajas móviles mas nuevas. Los terrenos del Arqueozoico/Proterozoico Inferior (>2 Ga.) incluyen complejos de rocas granitoides con islas de diversas litologías de rocas metamórficas conocidos como Terrenos de Piedra Alta (Cingolani et al. 1997) o también como Terreno Tijucas (Fragoso Cesar & Machado, 1997, ver asimismo Chemale, et al., 1997) y el Terreno Nico Pérez (cf. Hallinan et al., 1993). Entre los terrenos antiguos se conocen tres mayores fajas móviles: Faja San José, Faja Montevideo y Faja Arroyo Grande (Cingolani et al., 1997). En la parte norte do Uruguay y en el Brasil ocurren dos ventanas del basamento antiguo compuesto por rocas ígneas y metamórficas, Rivera y Acegúa (2272±33 Ma.) (Soliani, 1986). En Rio Grande do Sul se tiene el bloque Taquarembó, consistiendo mayormente de rocas metamórficas Transamazónicas 1980 a 2370 Ma., y las de edad Pb/Pb 2541±167-169 Ma., indicando la existencia de un pequeño núcleo Arqueozoico (Trompette, 1994). Juntándose a ellos, entre los estados de Santa Catarina y Paraná, son encontrados tres mayores dominios tectónicos (Basei et al., 1992): Luis Alves (2.3-3.1 Ga.), Curitiba (2.3-2.8 Ga.) y Paranaguá (~1.97 Ga.) (Basei et al., 1997; Siga Jr. et al., 1997; Harara et al., 1997). Dominios entre los cuales se conocen terre-

nos de “fajas móviles” del Proterozoico como la Faja Ribeira (Cordani et al., 1984; Brito-Neves & Cordani, 1991; Quintas 1995) con edades de 1.08-2.2 Ga., que están compuestas por rochas metamórficas de diversas litologías y meta-volcánicas, siendo polisíclicos y estuvieron reactivados en la orogénesis Brasiliana como mostrado por las intrusiones granitoides (Guimarães, 1995) y los del cinturón Dom Feliciano, que cabalga sobre a margen sur del bloque Luís Alves (Mantovani et al., 1987; Basei, 1985; Basei et al., 1997). Porción tectónica sintetizada en los trabajos publicados en en Vizzi et al. (2003), Hasui (2010), entre otros. Aquí también, tanto para este bloque Luís Alves como para los de Curitiba y Paranaguá, como comentado en el caso de Uruguay, se puede pensar como que se tratan de pedazos del basamento con raíces Arqueozoicas que están soldados por “fajas” de terrenos Proterozoicos. Fig.-5.

En el Sur, el cráton Rio de la Plata de “Almeida et al” reaparece en la Argentina en las Sierras de Tandil, donde habría sido probablemente alzado por fallas. Este basamento del ciclo Transamazónico (2200 Ma., Echeveste et al., 1997) está expuesto por alrededor de 200 km a través de numerosas pequeñas islas, que raramente exceden los 50 km² de extensión. Compuesta de rocas metamórficas de diversas litologías próximo a la ciudad de Tandil (Trompette, 1994). Complejo del basamento afectados por series tecto-metamórficas y/o eventos magnéticos, mayormente radiométricamente definidos, oscilando entre 2150 (Echeveste et al., 1997) y 1520-1700 Ma. (Trompette, 1994; Echeveste et al., 1997.) con la última orogénesis (?) alrededor de 900 Ma. (Trompette 1994). Fig.-5.

El fragmento del basamento expuesto en la región de Asunción (Paraguay) correspondería a la porción W del cráton Rio de La Plata de “Almeida et al” (p/ex. Cordani et al., 1984; Trompette, 1994). Aquí ocurre el llamado Alto de Caapucú (cf. Proyecto PAR 83/005, 1986), constituido por rocas cristalinas metamórficas e ígneas de diversas litologías (Kanzler 1987; Cubas et al., 1997). El Precámbrico Sur de Paraguay, que indica una evolución geotectónica en el que un fragmento



Fig. 6. El Alto (o Macizo) Rio Apá. Dicho de manera simplificada, en este macizo se han reconocido: 1-Complejo de rocas metamórficas (I-gneis máficos y migmatitas, rodeados al oeste, por (II-) granitos gnéissicos. Donde, ambas unidades gnéissicas están cortadas por cuerpos irregulares de (III-) granitos.); 2-Complejo de rocas meta-sedimentarias y meta-ígneas (Unidad Centurión); 3-Grupo Itapucumí (calcáreos equivalentes, en parte, a los del Grupo 7) –Paraguay. Y en Brasil: 4- Complejo Rio Apá; 5-Grupo Alto Tererê; 6-Grupo Amoguijá (a-Suite Intrusiva Alumiador y b-Suite Volcánica Serra da Bocaina); 7-Grupos Cuibá, Corumbá y Jacadigo – Formação Urucum 8-Faja de Deformación Paraguai. Mayores comentarios son dados en el texto. Base de la cartografía Geológica es conforme encontrado en Hutchinson (1979) y Lacerda Filho, et al. (2006). Para la posición estratigráfica de las unidades recurrir al texto.

continental de alto-grado Paleo-proterozoico (zircones dieron edades ($207\text{Pb}/206\text{Pb}$) de 2023 ± 12 a 2028 ± 10 Ma.; registrándose además en sus núcleos de alrededor de 2650 Ma.; como también nucleó migmatítico de que acusó edad TDM de 2700 Ma., Cordani et al., 2001) fue intensamente re-trabajado durante la orogénesis Neo-proterozoica del Ciclo Brasileño (Cordani et al., op cit.). Aquí también, como comentado con relación a los terrenos del Uruguay y los terrenos de Rio Grande do Sul, Santa Catarina y Paraná, los dominios del cratón Rio de la Plata poseen pedazos de bloques Arqueozoicos “envueltos/soldados” por fajas Proterozoicas; y en sus límites registran eventos tecto-termales del Brasileño. Rochas sedimentarias de la Cuenca del Paraná delimitan tanto al norte como al este las rocas del Alto de Caapucú.

Al norte, en la región fronteriza con el Brasil

ocurre el llamado Alto de Rio Apa (cf. Proyecto PAR 83/005, 1986), Precámbrico Norte de Paraguay, constituido por rocas cristalinas metamórficas e ígneas de diversas litologías. Al Alto de Rio Apa se acostumbra, mayormente, a verlo vinculado al Cratón Amazónico (Presser, 2005a y b; Cordani et al., 2005; Lacerda Filho, et al., 2006; Godoy et al., 2009; entre otros) o como un bloque cratónico independiente del Cratón Amazónico (Presser, 2008 y 2010b, c y e). Con todo, Cordani et al. (2010) consideran al Alto de Rio Apa o Macizo Rio Apa como un fragmento cratónico situado entre el estado de Mato Grosso do Sul de Brasil y el norte del Paraguay-Oriental; macizo que comprende rocas metamórficas de medio grado del Paleo-mesoproterozoico, intruidas por rocas granitoides, y se encuentran cubiertas por las deposiciones de los Grupos Neoproterozoicos Corumbá

e Itapucumí. Siendo que su porción al este está bordeado por la parte sur del Cinturón Paraguai y más al sur por los sedimentos de la Cuenca del Paraná y algunas islas de sedimentos del Grupo Itapucumí (Cordani et al., 2010). El Macizo Rio Apa cuando abordado desde el punto de vista de la Geología del Brasil, el es percibido como formado por las rocas del Complejo Rio Apa, del Grupo Alto Tererê y del Grupo Amoguijá (con la Suite Intrusiva Alumiador y la Suite Volcánica Serra da Bocaina). Al este y el oeste ocurren las rocas meta-vulcano-sedimentarias de la Faja de Deformación Paraguai constituidas en la región por los grupos Cuiabá, Corumbá y Jacadigo – Formação Urucum (Godoy et al., 2009; Lacerda Filho, et al., 2006; Cordani et al., 2010). Ahora bien, en territorio del Paraguay, se considera que el trabajo de Hutchinson (1979), mismo que hayan trabajos posteriores (por ejemplo Wiens, 1996), nordea, adecuadamente, la geología del basamento cristalino del Alto de Rio Apa (Fig.-6):

1-Complejo de rocas metamórficas (CRM), con tres unidades: I-gneis máficos

y migmatitas, rodeados al oeste, por (II-) granitos gnéissicos. Donde, ambas unidades gnéissicas están cortadas por cuerpos irregulares de (III-) granitos.

2-Complejo de rocas meta-sedimentarias y meta-ígneas, que están bordeando en el oeste a CRM. Meta-vulcano-sedimentos, que fueron reunidas por bajo la denominación de Unidad Centurión. Para el conjunto meta-vulcano-sedimentario se estimaron espesores de varios miles de metros (alrededor de 6000). El citado autor, expone aun, que rocas granitoides expuestas en masas de algunos kilómetros, aflorando kilómetros más al sur cortan a las rocas de la Unidad Centurión. Cordani et al. (2010), aparentemente basado en el trabajo de Lacerda Filho, et al. (2006), sugiere que este Complejo de rocas meta-sedimentarias y meta-ígneas serian equivalentes al Grupo Amolar vinculado al orógeno Mesoproterozoico Sunsás. Otros comentarios a este respecto ver además en Godoy et al. (2009)

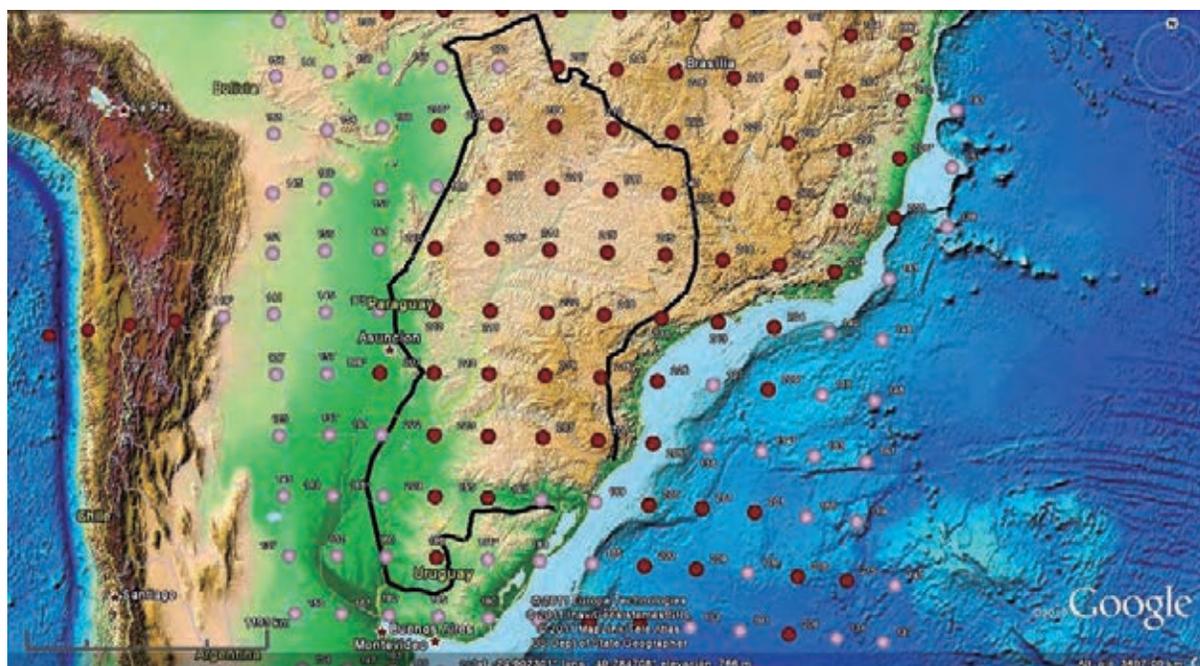


Fig. 7. Bosquejo aproximado de la Cuenca del Paraná (líneas de negro) y alrededores, donde los puntos llenos indican valores calculados de LAB (en Km) a partir de en perfiles 1D-Vs (Presser, 2010a y b) para una malla de 2 en 2 grados. Puntos oscuros representan LAB >195 Km y claros aquellos cuyos valores son menores al mismo.

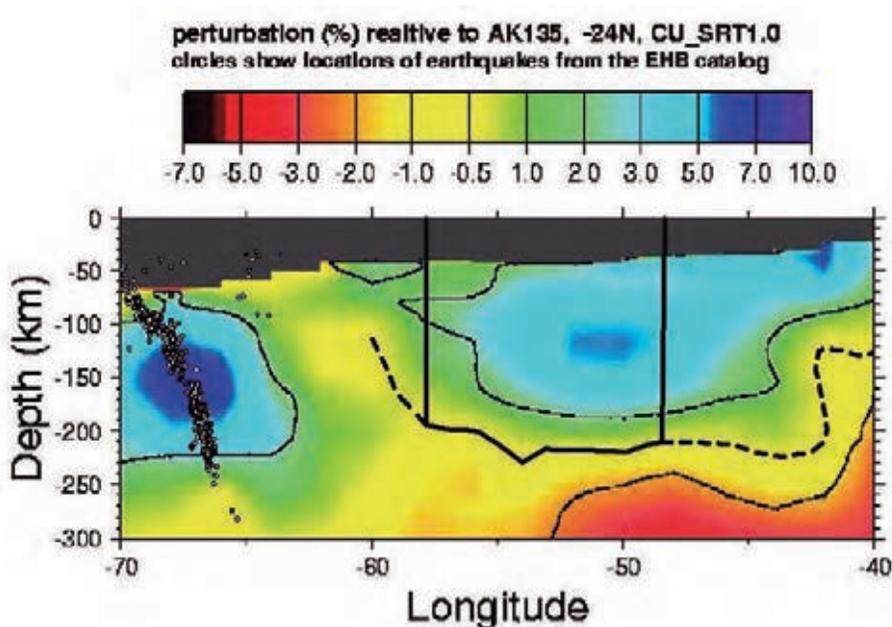


Fig. 8. Perfil vertical a lo largo de la latitud -24 que reproducen colores que muestran la perturbación de la velocidad media $(V_{sv} + V_{sh})/2$ con respecto al modelo global 1D AK135 (Según CU_SRT1.0 (Ray tomography –Anisotropic, extraído de <http://ciei.colorado.edu/~nshapiro/MODEL/>). Se observó que los valores de LAB obtenidos en 1D-Vs coincidían sistemáticamente con valores de $(V_{sv}+V_{sh})/2$ en -0,5%, del rango de perturbación (-7 a +10); por esta razón se tomó este valor, como indicado por la línea de trazado continuo (=área cratónica según 1D-Vs, a partir de las Fig.-11 y cuyos atribuidos límites E-W son indicados por las líneas verticales) a discontinuo (a la derecha como a la izquierda del trazado continuo), como indicativo del LAB. En el borde W la distribución sísmica junto a la Cordillera de los Andes (pequeños cuadros); ya la línea llena horizontal-subhorizontal es indicativa del espesor de la corteza (20 a 70 Km).

y Presser (2010c).

De todos modos, para el Macizo Rio Apa (Paraguay-Brasil) los trabajos de Sato (1998), Lacerda Filho, et al. (2006) y Cordani et al. (2010) contribuyen en las informaciones geocronológicas que son sintetizadas a seguir:

Complejo Rio Apa: en su parte situada al norte presenta edades U-Pb (zircón) de 1950 Ma.; donde orthogneisses del tipo Caracol presenta edades U-Pb entre 1774 a 1700 Ma.- y edad TDM (o edades Sm-Nd) de 2570 (JV-1D, Biotita-gneis, en Lacerda Filho, et al.; 2006) a 1930 Ma.

Grupo Alto Tererê: presenta edad U-Pb (zircón) de 1752 Ma. y TDM entre 2228-2226 Ma.

Grupo Amoguijá: con las Suite Alumiador con edad U-Pb de alrededor de

1850 Ma. y TDM de 2530 a 1870 Ma. Y la Suite Serra da Bocaina que presenta edad U-Pb (zircón) 1794 Ma. y TDM de 2340 a 1960 Ma. (Fig.-6).

De acuerdo con lo que es leído en Lacerda Filho, et al. (2006), posterior a la generación del Arco Magmático Amoguijá, posiblemente relacionado a la acomodación y colapso de ese arco, ocurrió un magmatismo tolehítico intra-placa continental, representado por los cuerpos intrusivos de la Serra da Alegria (gabro y anortosita), del Morro do Triunfo (gabros) y por los enjambres de diques y sills básicos. Donde una datación U-Pb (SHRIMP realizada en zircón) de la roca anortositica del cuerpo Serra da Alegria proporcionó edad Paleoproterozoica de 1791-1788 Ma. y edades TDM: 2640 a 2238 Ma. A mas de todo esto, dos edades Arqueozoicas U-Pb obtenidas en zircones: 3028

Ma. (Serra da Bocaina, JV-04, interpretado como xenocrystal incorporado, por Lacerda Filho, et al., 2006) y 3000 Ma. (Zircón detrítico en diamigrita glaciogenica de la formación Puga, al Sur del Cinturón Paraguai, en el Brasil; Babinski et al., 2008). Datos geocronológicos que hacen suponer la presencia de una fuente Arqueozoica; este contenido ya es insinuado por las edades Sm-Nd que más atrás ya fueron comentadas. Alto de Rio Apa que también, como comentado con relación a otros terrenos del cratón Rio de la Plata poseen pedazos de bloques “Arqueozoicos” “envueltos/soldados” por fajas Proterozoicas.

Estas características donde masas del basamento Arqueozoico son invadidas o intruidas por rocas del Paleo-proterozoico al Eo-proterozoico pueden ser observados también en los cratones de São Francisco (Texeira, 1992), Amazônico (Tassinari, 1996), como también en cratones de otras partes do mundo (ex. Kaminsky et al., 1995; Helmstaedt & Gurney, 1995; White et al., 1995; Darbyshire & Eaton, 2010; entre otros). Esto es; pedazos de

Terrenos Arhcon quedan entre ellos soldados/encajados por fajas Proton y Tecton (terrenos Proteozoicos, que en parte, se habrían generado (edad TDM) de rocas de los terrenos Archon).

LA RAÍZ DE LA LITOSFERA BAJO LA CUENCA DEL PARANÁ

En la Fig.-7 se presentan los valores de LAB que fueron calculados a partir de (Vs), en perfiles 1D-Vs, como propuesto por Presser (2010a y d) y que ya fueron comentados en el ítem anterior, junto a la Cuenca del Paraná y alrededores para una malla de 2 en 2 grados.

Así mismo, datos Vs en perfiles verticales a lo largo de la longitud o de la latitud que reproducen colores que muestran la perturbación de la velocidad media Vs con respecto al modelo global 1D AK135 (Según CU_SRT1.0 (Ray tomography –Anisotropic) pueden ser derivados en <http://ciei.colorado.edu/~nshapiro/MODEL/> (= $(V_{sv} + V_{sh})/2$). Estos datos, así mismo, fueron practica-dos de 2 en 2 grados para la Cuenca del Paraná y

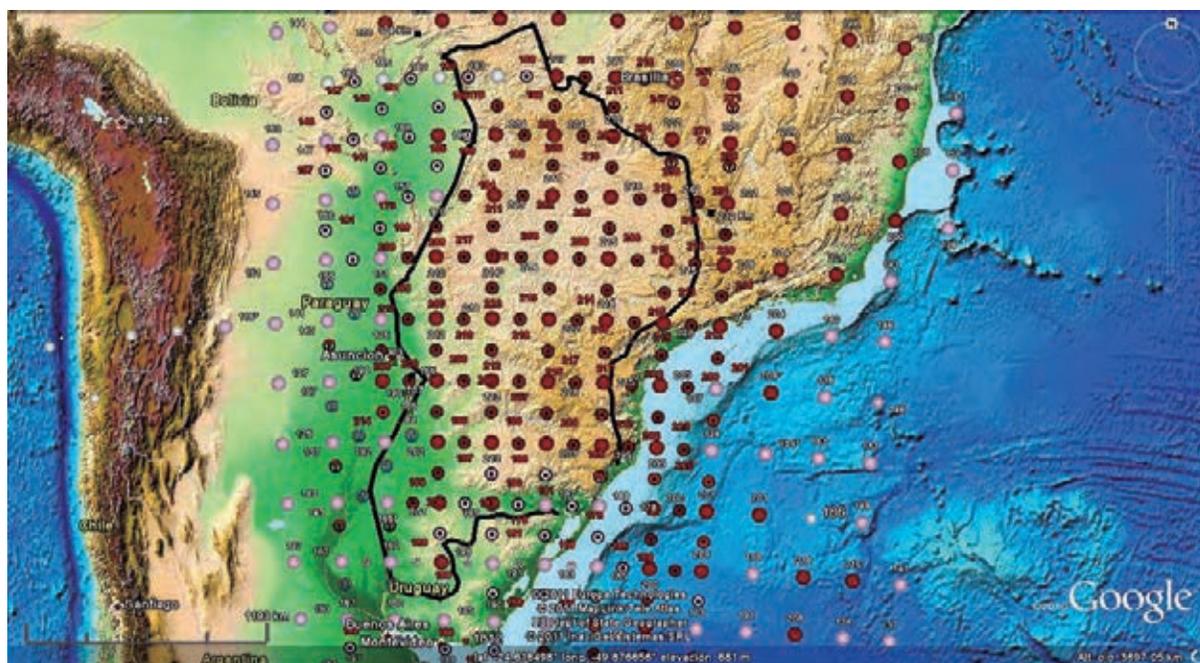


Fig. 9. Bosquejo aproximado de la Cuenca del Paraná (líneas de oscura gruesa) y alrededores, en ella indicándose el calculado de LAB según método indicado en la Fig.-7 y nuevos valores en puntos obtenidos a partir de los perfiles $(V_{sv} + V_{sh})/2$ con respecto al modelo global 1D AK135 (Según CU_SRT1.0 (Ray tomography –Anisotropic, que pueden ser obtenidos en <http://ciei.colorado.edu/~nshapiro/MODEL/>), procedimiento indicado en la Fig.-8. Simbología como en la Fig.-7.

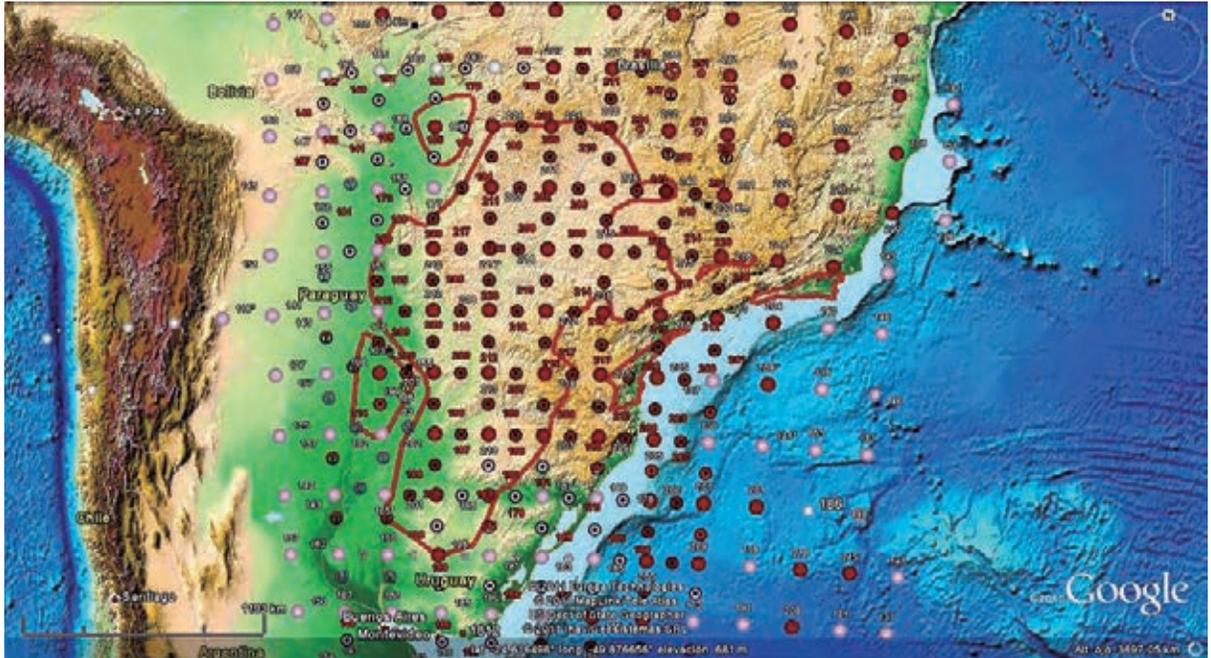


Fig. 10. Configuración aproximada del cratón (bosquejado en línea gruesa), junto a la Cuenca del Paraná y alrededores trazada con base a los datos de LAB, como mostrado en las Fig.-9; a partir de la configuración previa dada por Presser (2010).

alrededores. Con cuanto que se pudo observar que los valores de LAB obtenidos en 1D-Vs coincidían sistemáticamente con valores de $(V_{sv}+V_{sh})/2$ en $-0,5\%$, del rango de perturbación del -7 a $+10\%$ (indicado por <http://ciei.colorado.edu/~nshapiro/MODEL/>), mas estimaciones del LAB pudieron ser inferidas. A modo de ejemplo de este procedimiento se da la porción de latitud -24 , entre -70 a -40 de longitud, en la Fig. 8. Así con esto en mano, se pudo obtener, para numerosos otros puntos, distintos nuevos valores de LAB, con una proximidad de 1 en 1 grado; hecho que ayudo a configurar una malla más densa de puntos. Esta nueva malla se muestra en la Fig.-9. Entretanto estos datos obtenidos a partir de $(V_{sv} + V_{sh})/2$ puede resultar inaplicables para algunos puntos y siendo así se los obvia en la Fig.-9.

De esta forma los datos que fueron calculados a partir de 1D-Vs y $(V_{sv} + V_{sh})/2$ espaciados en 210 puntos (de los cuales ~ 120 espaciados de 2 en 2 grados y entre ellos ~ 90 puntos de 1 en 1 grado) permitieron inferir un amplio LAB en/bajo a la Cuenca del Paraná y alrededores. Valores de LAB,

presentados en la malla de la Fig.-9, accedieron derivar una probable configuración cratónica, junto a la Cuenca del Paraná y alrededores, como previamente ya trazada en Presser (1998, 2005, 2008, 2010a, b, c d y e) y los trabajos de Cordani et al. (1984) y Quintas (1995). Esta, nueva más pulida configuración cratónica junto a la Cuenca del Paraná y alrededores, es mostrada en la Fig.-10. Disposición cratónica afinada con base a la información gravimétrica continental (http://topex.ucsd.edu/WWW_html/mar_grav.html, Fig.-11), información del campo magnético total continental (EMAG2 disponible en: <http://www.gettech.com/downloads/WDMAM.htm>, Fig.-12), distribución sísmica continental (datos extraídos de; <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/>, Fig.13), una colección de seleccionados datos de flujo de calor superficial continental (construidos a partir de datos disponibles en: <http://www.und.nodak.edu/org/ihfc/index.html> y referencias indicadas en esta página. Fig.-14) y de la cartografía geológica publicada e inédita.

Dado que el Vs con alta velocidad entre 100

a > 193,5-195 Km implicaría un manto frío, i.e. cratónico; para el mayor refinamiento de la información del flujo de calor superficial, los datos fueron seleccionados con ayuda de un mapa de tomografía sísmica Vs para 200 Km (de Rocha, 2008). Este procedimiento es por cuanto que las Vs serían sensibles a la temperatura (por ejemplo, Xu et al., 2007; Lebedev & Trampert, 2010; entre otros), y además, se considera que el espesor de 200 Km refleja claramente un ambiente Arqueozoico (193,5 Km = 2501 Ma., deducido a partir de la fórmula $z=0.04*t+93.6$ ya comentada en el ítem II o 195 Km según lo indicado en la Fig.-4). La selección se hizo necesaria dada la observación de Artemieva (2006) que indica sobre el bajo porcentaje de confiabilidad de las informaciones del flujo de calor superficial levantadas para América de Sur (i.e. apenas el 20%). Así se seleccionaron, tan solo, temperaturas menores a 45°C situadas por encima de la información de tomografía Vs +0,30% (blue-zone) como cratónicas y temperaturas mayores a 45°C situadas encima de la informa-

ción de tomografía Vs menor a 0,30% a negativas como no cratónicas (Fig.- 14).

Trabajos de tomografía sísmica, que muestran excelente correspondencia de los blue-zone profundos (Vs y Vp, fundamentalmente entre los 150 a 300 Km; entendido como indicativo del rango de la ventana del diamante y al mismo tiempo de un manto peridotítico frío (Vs) y depletado (Vp)) con raíces cratónicas del Arqueozoico fueron fomentados a partir de trabajos en el cratón de Kaapvaal (por ejemplo, James & Fouch, 2002; Fishwick, 2009) y que se extendieron al cratón de Yakutia (Priestley & Debayle, 2003), el cratón Slave (Snyder et al. 2004), entre otros. La Fig-15 muestra el comportamiento de tomografía sísmica Vs y Vp entre los 150, 200 y 250 Km por debajo de una buena porción de la configuración cratónica (Fig.-10) junto a la Cuenca del Paraná y alrededores; tomándose para ello las informaciones disponibles en Rocha (2008) y Rocha et al. (2011). Otro conjunto de informaciones tomográficas también pueden ser encontradas en Escalante (2002), Ro-

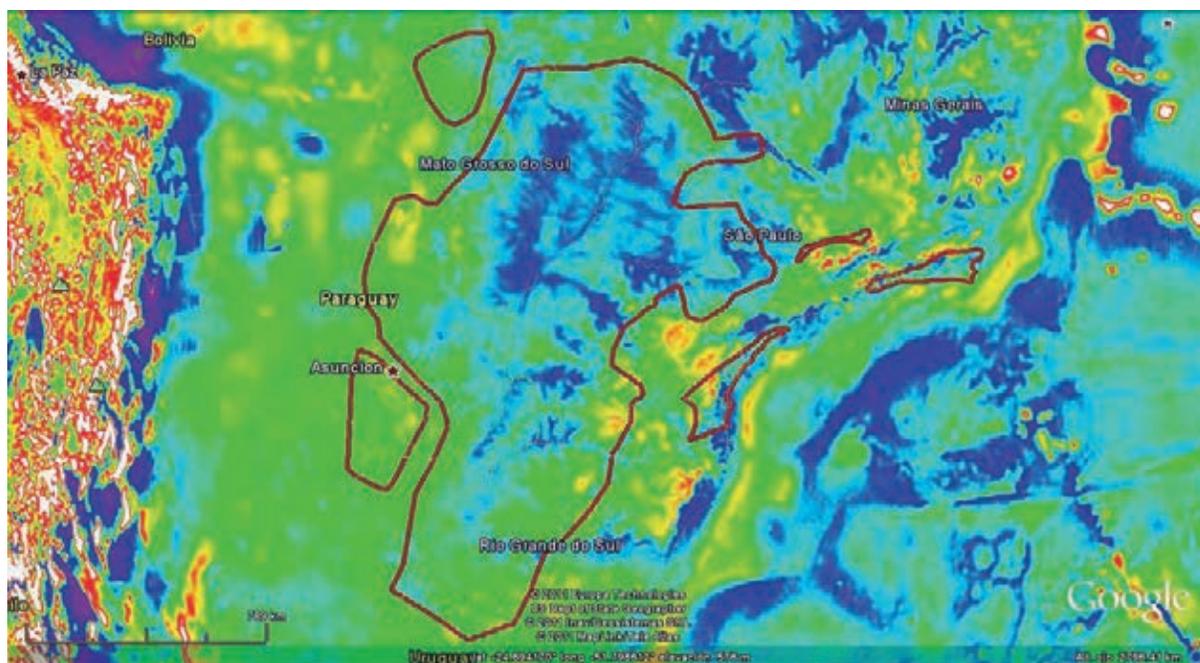


Fig. 11. El cratón, junto a la Cuenca del Paraná y alrededores como en la Fig.-10, en un mapa de gravimetría de satélite (Free-air-anomalies). Altos gravimétricos en verde-amarillo (=0 mgal) a rojo-rojo blancuzco y valores negativos gravimétricos en verde-celeste a azul-violeta (Fuente: EGM2008 http://earth-info.nga.mil/GandG/wgs84/gravitymod/egm2008/anomalies_dov.html).

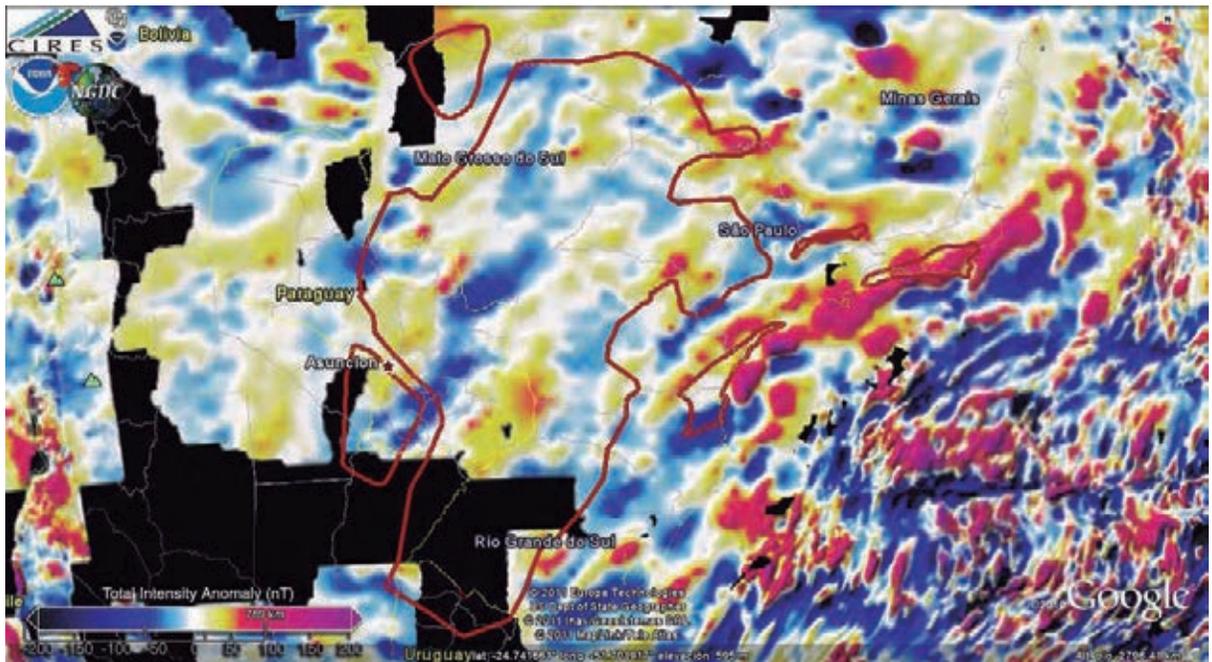


Fig. 12. El cratón, junto a la Cuenca del Paraná y alrededores como en la Fig.-10, en un mapa de campo magnético total (EMAG2: <http://geomag.org/models/emag2.html>).

cha (2003), Schimmel et al. (2003), Heintz, et al. (2005), entre otros. La presencia de blue-zone profunda puede ser claramente observada por debajo de una buena porción de la bosquejada probable configuración cratónica (Fig.-10) junto a la Cuenca del Paraná y alrededores, sobre todo en la región comprendida entre el Paraguay-Brasil-Argentina (Fig.-15).

A todo mas, junto al Alto de Rio Apa fueron lanzadas las edades U-Pb y las edades Sm-Nd Arqueozoicas (comentadas en el ítem anterior), sobre un mapa de tomografía Vs a 200 Km; observándose que todas las edades Sm-Nd y la edad de 3028 Ma. (JV-04, medida junto a la Serra da Bocaina) se sitúan en/junto a la blue-zone (>0,3%) (Fig.-16). Tan solo la edad de 3000 Ma. se posiciona en una porción, próxima, más lenta de Vs. A la coincidencia de estas edades (TDM o U-Pb) Arqueozoicas con el blue-zone a los 200 Km, se lo ve como claramente indicativo de que un SCLM Arqueozoico subyace al basamento expuesto junto a una importante porción del Alto de Rio Apa. LAB en 208 Km fue estimado a partir de $(V_{sv}+V_{sh})/2$ para

la coordenada situada junto a los citados valores geocronológicos (Fig.-10), donde 208 Km deducidos de la formula $z=0.04*t+93.6$ representa 2860 Ma.; o calculado en la Fig.-4 =2800 Ma. La edad de 3000 Ma., como ya comentado, fue levantada (Babinski et al., 2008) en de sedimentos y por lo mismo se piensa que sufrió un transporte desde su fuente original que se piensa haya sido la del Alto de Rio Apa; i.e. un SCLM Arqueozoico.

Todavía por otro lado, la Región Oriental del Paraguay desde 1960 en adelante viene siendo cada vez más reconocida la presencia de diamantes junto a fuentes primarias como en ambientes secundarios (Presser, 2011); mostrando con esto, de forma indirecta, un probable manto subyacente con un espesor mínimo en torno de los 150 Km (o un basamento de edad mínima de formación de ~1410 Ma.). De todas formas, las ocurrencias de diamantes se dan sobre la probable configuración cratónica bosquejada en la Fig.-10. En este camino, los primeros estudios sobre los diamantes de Capiibary/Paraguay, (en/junto a la probable configuración cratónica de Figs.-10 a 15), realiza-

dos por Smith et al. (2012), permitieron inferir un tiempo de residencia de 3.1 Ga. (3100 Ma.) de este mineral en su matriz; un aposento de manto peridotítico (hazburgítico o lherzolítico) depletado. Considerando la fórmula $z=0.04*t+93.6$ (ver ítem II) se puede inferir a partir de 3100 Ma. un espesor de LAB de ~218-222 Km y por lo mismo próximo a los valores estimados para esta región con base a $1D-Vs$ y $(Vsv+Vsh)/2$ (ver Fig.-10 y 11)

De esta forma, las Figs.-10 a 15 mostrarían un gigante dominio cratónico de alrededor de ~1610 X 835 Km (en sus bordes de mayor largo y ancho) con forma irregular y algo alargada en dirección NNE-SSW. Esto en parte coincidente por lo ya apuntado, para la misma gran área, por Presser (2010b, c y e); dominio tectónico al que se entendió como siendo el Cratón Rio de la Plata. Terreno Archon aparentemente continuo y en sus bordes encajados/soldados por fajas Proton y Tecton.

Presser (2010b c y e) al Cratón Rio de la Plata sub dividió en 3, inferidas, potestades Archons: 1-Rio de la Plata, 2- Paramato y, 3- Paranapanema

(Fig.-17).

El área regional ocupada por el Archon Paranapanema es aproximadamente equivalente a las inferencias de domino cratónico ya levantadas en Cordani et al., (1984); Quintas, (1995); Mantovani et al, (2005) (Fig.-17); ver también discusiones en Rocha, (2008) y Rocha et al. (2011).

El área regional ocupada por el Archon Rio de la Plata es parcialmente coincidente con parte del concepto original de Craton Rio de la Plata de “Almeida et al” y modificaciones conceptuales posteriores (ver comentarios del ítem III) al englobar (Fig.-10 a 15) las porciones de Rivera, Acegua y Tacuarembó. Sin embargo, la configuración Archon de la Fig.-10 a 15 excluye al bloque Archon Luis Alves (Fig.-17). Ver también otras discusiones mencionadas en Rocha (2008) y en Rocha et al. (2011).

Al área regional ocupada por el Archon Paramato, Presser (2010b, c y c) interpreto como pareciendo ser un belt formado en el Arqueozoico (?), a partir de la colisión entre los Archons Rio de la

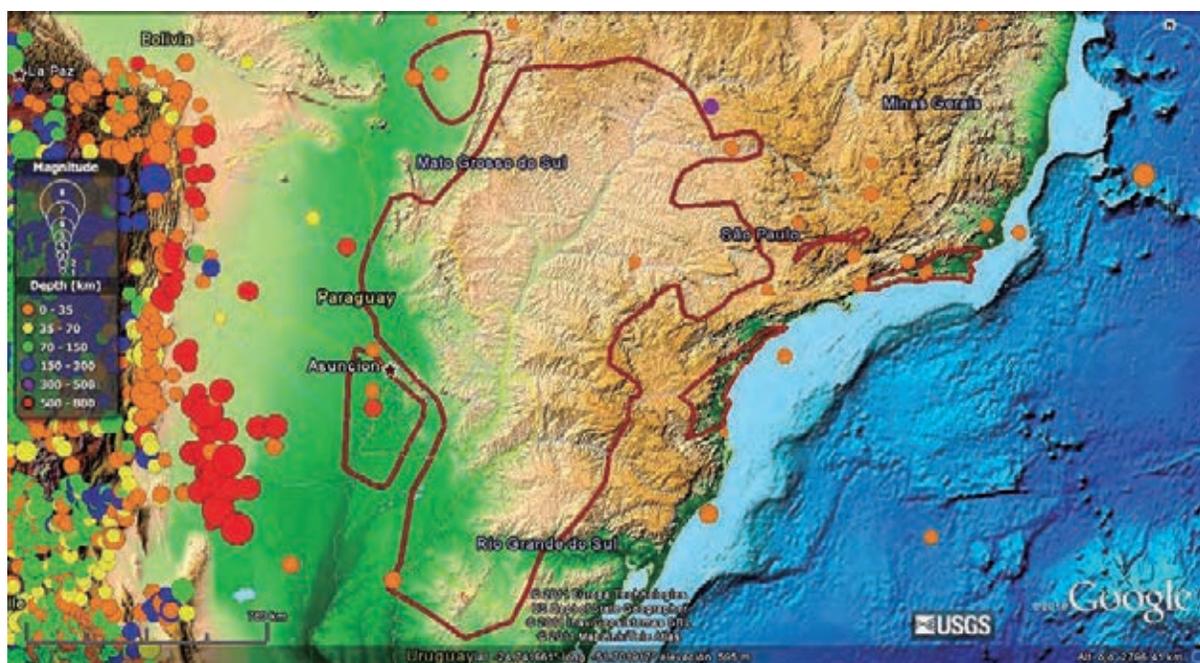


Fig. 13. El cratón, junto a la Cuenca del Paraná y alrededores como en la Fig.-10, en relación a los principales sismos (región de la Cordillera del los Andes al oeste) registrados por la USGS (<http://earthquake.usgs.gov/earthquakes>) a lo largo de décadas. Resulta clara la condición a-sísmica del cratón bosquejado en la Fig.-10, Observándose apenas alguna actividad sísmica en sus bordes.

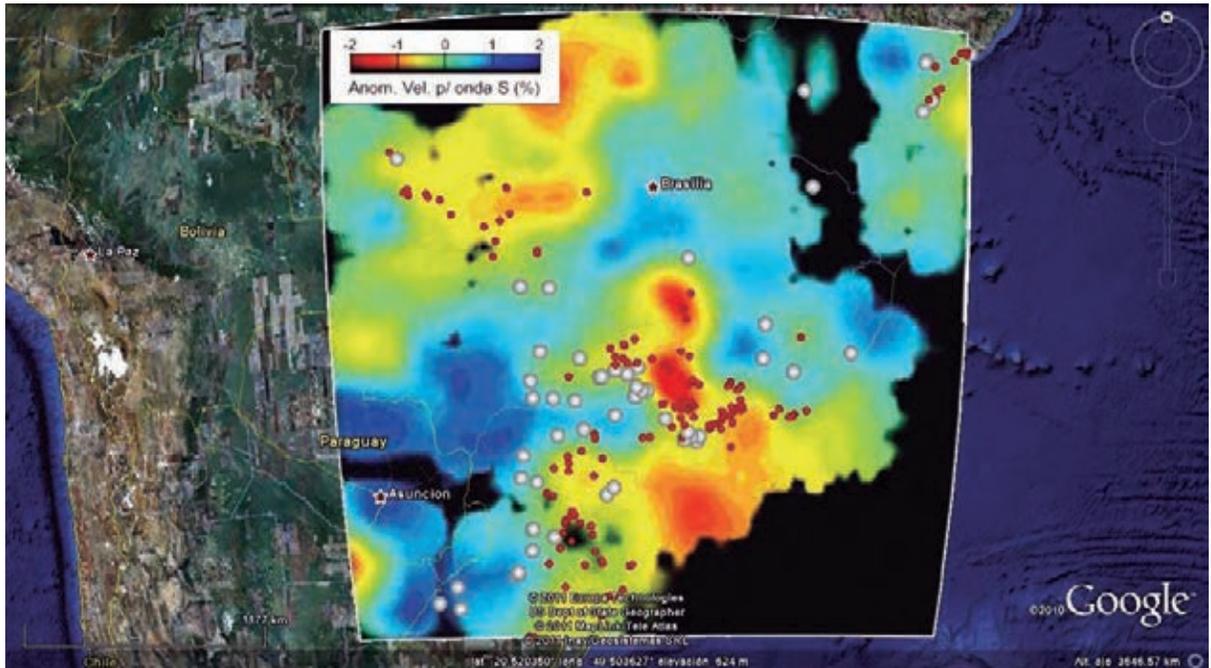


Fig. 14. Junto a la Cuenca del Paraná y alrededores bien seleccionados flujos de calor frío cratónico (<40) a próximo al cratónico (40-45) (ambos en círculos claros grandes); caliente o no cratónico (>45-50) a muy caliente (>50) (ambos en círculos oscuros pequeños); colocados en un mapa de tomografía sísmica de las ondas S para 200 Km (Tomografía sísmicas de Rocha, 2008), esto por cuanto que las Vs son sensibles a la temperatura. Como se puede ver los valores seleccionados cratónicos se hicieron coincidir con la zona de alta velocidad (blue -zone) y valores no cratónicos con zonas de baja velocidad.

Plata y Paranapanema. Ello descifrado a partir de 1D-Vs y de la tomografía sísmica (V_p y V_s).

En la configuración del Archon Rio de la Plata Presser (2010b. c y e) asigno sub-aéreas regionales (Fig.-17): Rio Apa, Rio Paraná y Rio Uruguay; los que en adelante serán referidos como dominios. Siguiendo este principio, el Dominio Rio Apa englobaría, parcialmente, las exposiciones del Alto de Rio Apa y se prolongaría por todo el dominio SCLM Arqueozoico inferido del Paraguay Oriental (y una porción del Occidental) y la parte del sur del Brasil (Estados de Paraná-Mato Grosso do Sul). El Dominio Rio Paraná se extendería por parte de la Argentina (Provincias de Misiones y fracción norte de Corrientes) y la parte del sureste del Brasil (Estados de Paraná, Santa Catarina y el norte de Rio Grande do Sul). Ya por su vez el Dominio Rio Uruguay englobaría la porción norte del Uruguay y la porción contigua en Brasil (suroeste del estado de Rio Grande do Sul) (Fig.-17).

Por otro lado, valores de LAB estimado en la

región del Pantanal de Mato Grosso sugieren un pequeño (aparentemente de ~240 Km X 220 Km, Fig.-10) aislado bloque cratónico relativamente espeso (185 a 198 Km de profundidad) y por ello se infiere una edad de formación Arqueozoica a Paleo-proterozoica. Este pequeño-bloque se sitúa al norte del Alto del Rio Apa y a ambos los separa terrenos delgados de entre 140 a <190 Km (i.e. Proterozoicos). Estos datos de LAB entre/los alrededores del cinturón Neoproterozoico Alto Paraguai-Jacadigo-Paraguai estarían lejos de sustentar la continuidad del cratón Amazonico rumbo al Macizo del Rio Apa.

Al norte, junto al Archon Paranapanema, se sitúa el Arco Magmatico de Goias y más al este la Faixa Brasilia. Entre la Faixa Brasilia y el Craton Sao Francisco la definición $(V_{sv}+V_{sh})/2$ es confusa; como también lo es junto al área de Socorro-Guaxupe, por lo que los datos de la geología (Medeiros et al., 2003) fueron útiles para apuntalar los límites entre Paranapanema-Sao Francisco.

Al este entre el Archon Luis Alves y los Archons Paramato – Paranapanema es bien conocida la Faixa Riviera, para la que se atribuye un piso de formación de 2200 Ma (Cordani et al., 1984; 2001; 2011; Medeiros et al., 2003, entre otros). Área que si bien definida por la geología; es también bien definido en términos de $1D-Vs$ o $(Vsv+Vsh)/2$ un LAB profundo a muy profundo, como típico de dominios del Arqueozoico. No así la tomografía sísmica (Vp y Vs) que definen áreas de baja

velocidad y la marcada presencia de valores de flujo de calor no cratónico y algunos valores cratónicos (Fig.-14) son fuertes indicadores de faja móvil o ambiente no Archon; aunque también podría deberse a los efectos dejados por una pluma de manto fósil como estimado por VanDecar et al. (1995) para las proximidades de la Faixa Riviera o ser debido a la instalación de un mega-complejo ígneo junto al cratón, como ocurrió en el cratón de Kaapvaal cuando se instaló el magmatismo de

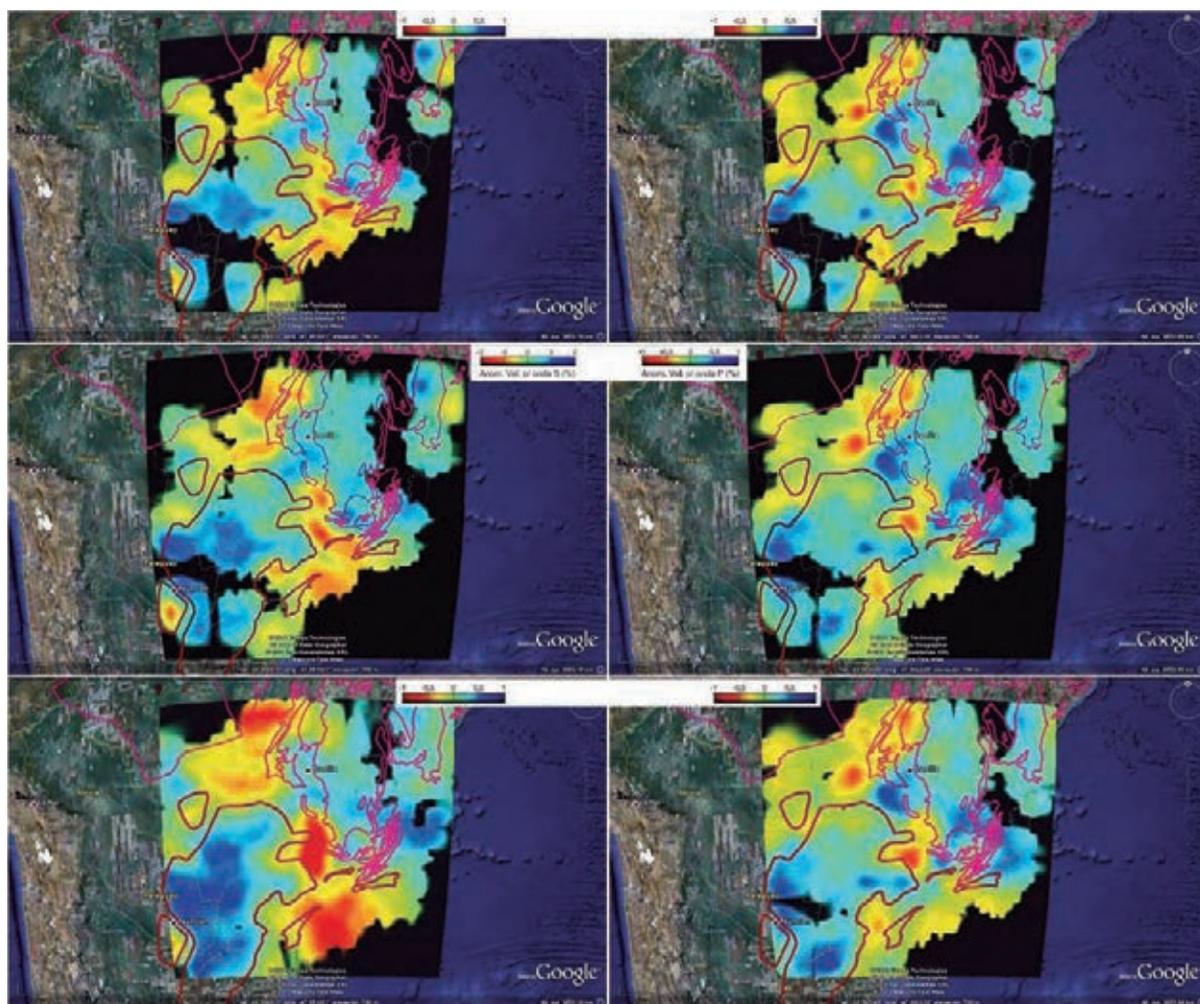


Fig. 15. El cratón, junto a la Cuenca del Paraná y alrededores como en la Fig.-10, en una base de tomografía sísmica Vs (izquierda) y Ps (derecha) donde se puede claramente observar la coincidencia del dominio Arqueozoico con zonas de alta velocidad (blue-zone). Kilómetros de profundidad desde arriba abajo: 150 (valor que correspondería al inicio del campo de estabilidad del diamante), 200 (profundidad aproximada del dominio Arqueozoico de blue-zone =35%) y 250 (valor como indicativo de referencia del LAB de la mayoría de los cratones en el mundo como indicado en la Fig.-4). Blue-zone en Vp es generalmente interpretado como siendo debido a un manto-depletado. Datos de tomografía sísmica pertenecientes a Rocha (2008) y Rocha et al. (2011).

de Caapucú podría tratarse de un pequeño bloque cratónico/micro-placa Arqueozoico/Paleoproterozoico (de ~300 Km X 250 Km, Fig.-10 a 13, 15 y 17). Al bloque Archon Rio de la Plata como este Alto de Caapucú los separaría una aparente delgada faja donde se ubica el rift de Asuncion (Degraff & Orué, 1984 y Degraff, 1985); este un belt donde se concentra marcadamente el magmatismo alcalino Mesozoico a Cenozoico (Bitschene, 1987; Presser, 1992; 1998; Comin-Chiaromonti, & Gomes, 1995; entre otros)(Fig.-18). La presencia de nefelinitas Mesozoicas en el perímetro E (por ejemplo en Estancia Guavira-y, Comin-Chiaromonti et al., 1997) y de numerosas nefelinitas/fonolitas (extremamente alcalinas) Cenozoicas en el perímetro NNW (Asunción y alrededores, Bitschene, 1987; Bitschene & Presser 1988, DeMarchi et al., 1988; entre otros) (Fig.-18) serian indicativos de un SCLM poco profundo. Se piensa que entre el Alto de Caapucú y Rio de La Plata se abría posicionado un cinturón móvil que se habría formado, por la colisión entre ambas comentadas masas, entre el 1800 a 500 Ma. atrás. El flanco E-SE de

este belt coincide con bastante aproximación con los límites de la Cuenca del Paraná. La configuración de valores LAB dados en las Figs. 10 a 15 pondrían en duda la frecuente idea de que en Alto de Caapucú sea el W del cratón Rio de La Plata.

CONCLUSIÓN

Perfiles 1D-Vs y su derivado perfil de perturbación de la velocidad media $(V_{sv} + V_{sh})/2$ con respecto al modelo global 1D AK135, permiten inferir en 210 puntuales LAB en/bajo a la Cuenca del Paraná y alrededores. Al contar con un número espaciado de puntos donde se definieron LAB superiores a $>193,5$ (=profundidad LAB que denotaría edades >2500 Ma., estimado a partir de $z=0.04*t+93.6$), se trazo un arreglo cratónico (=Archon). Una configuración adecuada se obtuvo al combinar los datos de LAB obtenidos junto con la tomografía sísmica Vs -selectos datos de flujo de calor superficial; la actividad sísmica registrada en ese entorno; en combinación a las informaciones gravimétricas y magnetométricas (en escala regional). Trazado que delinee un gigante dominio

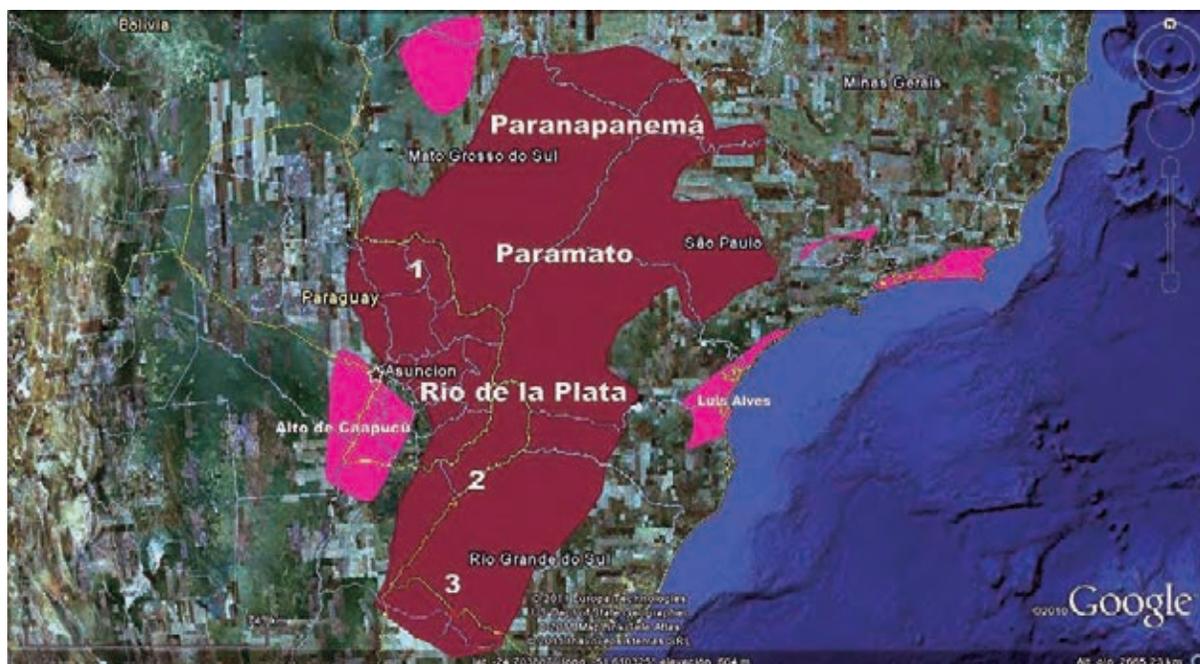


Fig. 17. La Configuración estimada del cratón (sombreado oscuro), junto a la Cuenca del Paraná y sus potestades Archon: Rio de la Plata, Paramato y Paranapanemá. El Archon Rio de la plata, se sub dividió aun en 3 dominios: Rio Apá (1), Rio Paraná (2) y Rio Uruguay (3).



Fig. 18. El Alto de Caapucú. El fragmento del basamento expuesto en la región de Asunción (Paraguay) que corrientemente es visto como la porción W del cratón Rio de La Plata, de acuerdo a la configuración de 1D-Vs o $(V_{sv}+V_{sh})/2$ y los datos aportados por la geología (ver en el texto el ítem III) y la tomografía sísmica (Fig.-15), se piensa que el podría tratarse de un pequeño bloque cratónico/micro-placa Arqueozoico/Paleoproterozoico (aparentemente de 300 Km X 250 Km, Fig.-10 a 13, 15, 17). Al bloque Archon Rio de la Plata de este Alto de Caapucú los separaría una aparente delgada faja donde se ubica el rift de Asunción; este un belt (indicado por las flechas) donde se concentra marcadamente el magmatismo alcalino Mesozoico a Cenozoico (indicado por los cuadrados pequeños). La presencia de nefelinitas Mesozoicas en el perímetro E (por ejemplo en Estancia Guavira) y de numerosas nefelinitas/fonolitas (extremadamente alcalinas) Cenozoicas en el perímetro NNW (Asunción y alrededores) (indicadas por los círculos llenos) serian indicativas de un SCLM poco profundo.

cratónico de ~1610 X 835 Km (en sus bordes de mayor largo y ancho) con forma irregular y algo alargada en dirección NNE-SSW que se extiende entre Paraguay-Brasil-Argentina-Uruguay. Influencia tectónica Archon al que se entendió como siendo el Cratón Rio de la Plata. Ver ítem IV

En la configuración del Archon Rio de la Plata se asignaron sub aéreas o dominios: Rio Apa, Rio Paraná y Rio Uruguay. El Dominio Rio Apa englobaría, parcialmente, las exposiciones del Alto de Rio Apa donde trabajos publicados mostraron edades U-Pb del Proterozoico Inferior y que muestran edad TDM del Arqueozoico; siendo que existen dos registros de edad U-Pb en zircones (1 xenocristal y 1 cristal incorporado en sedimento diamictítico) de entre 3000 a 3028 Ma. =Terreno Archon en sus bordes encajados/soldados por fajas Proton y Tecton (ítem III). El Dominio Rio

Apa muestra en profundidad una bien definida, en términos de Vs y Ps, blue-zone (150 a >250 Km) como sistemáticamente reconocido por debajo de los grandes cratones Arqueozoicos tal a Kaapvaal, Slave, Yakutia, entre otros. Los primeros estudios sobre los diamantes de Capiibary/Paraguay, (en/junto a la inferida configuración cratónica del Archon Rio de la Plata, Dominio Rio Apa; área con su basamento que se encuentra sepultado por los sedimentos de la Cuenca de Paraná), permitieron derivar un tiempo de residencia de 3.1 Ga. (3100 Ma.) en su matriz; un aposento de manto peridotítico (hazburgítico o lherzólítico) depletado (tipo de manto también sugerido por la interpretación Vp). Deducido del tiempo de residencia en el manto de 3100 Ma. de los diamantes de Capiibary se concluye que su entorno cratónico tendría un espesor de LAB de ~218-223 Km y por lo mismo

próximo a los valores estimados para esta región con base a $1D-Vs$ y $(Vsv+Vsh)/2$; i.e. $\sim 195-223$ Km = $\sim 3100-2510$ Ma.? (Ítem IV).

Los datos comentados más arriba para el Archon Rio de la Plata, en su Dominio Rio Apa junto al Paraguay, se harían extensivos y validos para los Dominios Rio Paraná ($\sim 195-201$ Km = $\sim 2900-2600$ Ma.) y Rio Uruguay ($\sim 196-213$ Km = $\sim 2700-2510$ Ma.), considerando el conjunto de informaciones geofísicas comentadas en el ítem IV. Por lo mismo apuntado, también extensiva para los Archones Paramato ($\sim 195-222$ Km = $\sim 3050-2510$ Ma.) y Paranapanema ($\sim 195-240$ Km = $\sim 3500-2510$ Ma.); siendo que ambos se desconocen exposiciones del basamento por estar cubiertos por sedimentos de la Cuenca del Paraná.

Se interpreta que el manto litosférico subcontinental (SCLM) por debajo de terrenos Archons (de 145-150 a 300 Km) y por debajo de los terrenos (Paleo) Protons (de 145-150 a <195 Km), junto a la Cuenca del Paraná y alrededores, se constituyen en las "ventanas del diamante". Sin embargo los Archones, en la Cuenca del Paraná y alrededores, por su mayor espesor serian mucho más atractivos que los Protons para posicionar minas de diamante de clase mundial; i.e. Clifford's Rule.

REFERENCIAS

- Almeida, F.F.M. ; Amaral, G. Cordani, U.G. & Kawashita, K. 1973. The Precambrian evolution of the South America cratonic margin south of the Amazon river. In: NAIR & STEHLI (eds), The ocean basins and Plenum, 1: 411-446.
- Artemieva, I.M., (2006). Global $1^\circ \times 1^\circ$ thermal model TC1 for the continental lithosphere: Implications for lithosphere secular evolution Tectonophysics, 416, 245-277.
- Babinski, M.; Boggiani, P. C.; Trindade, R.I.F. & Fanning, C. M., (2008). U-Pb SHRIMP ages on detrital zircons from glaciogenic diamictites of the Puga Formation, Southern Paraguay Belt, Brazil. 33rd International Geological Congress, AMS-07 Crustal evolution of the cratonic nuclei of South America: Oslo, CD-ROM.
- Basei, M.A.S., (1985). O cinturao Dom Feliciano em Santa Catarina. Sao Paulo, 195p. Tese de Doutorado, IGc - USP.
- Basei, M.A.S.; Siga Júnior, O.; Machiavelli, A. & Mancini, F., (1992). Evolução tectonica dos terrenos entre os Cinturões Ribeira e Dom Feliciano (PR - SC). Rev. Bras. Geoc., 22 (2): 216-221.
- Basei, M.A.S.; Siga Jr., O.; Reis Neto, J.M.; Harara, O.M.; Passarelli, C.R. & Machiavelli, A., (1997). Geochronological map of the Precambrian terrains of Paraná and Santa Catarina States, southern Brazil: Tectonic implications. In: South-Amer. Simp. on Isot. Geol., Extend. Abstr., 44-46. Brazil.
- Bitschene, P.R., (1987). Mesozoischer und Känozoischer anorogener Magmatismus in Ostparaguay: arbeiten zur geologie und petrologie zweier Alkaliprovinsen. Ph.D Dissertation, Heidelberg University, 317 p. (no publicado).
- Bitschene, P.R. & Presser, J.L.B., (1989). The Asunción Alkaline Province (Eastern Paraguay): Geologic Setting and Petrogenetic Aspects. Zbl. Geol. Palaont., Teil 5/6: 959-971.
- Bizzi, L.B.; Schobbenhaus, C.; Vidotti, R. M. & Gonçalves, J. H. (eds.), (2003). Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil. 5 CPRM, Brasília.
- Bowring, S. A., (1999). Priscoan (4.00-4.03 Ga) orthogneisses from northwestern Canada. Mineralogy and Petrology, Volume 134, Issue 1, pp. 3-16.
- Brito-Neves, B. B. (1995). Crátos e faixas móveis. Bol. IG-USP, Sér. Didát. Sao Paulo, SP., 7: 1-87
- Brito-Neves, B.B. & Cordani, U., (1991). Tectonic evolution of South America during the Late Proterozoic. Precam. Research., 53: 23-40.
- Brito-Neves, B. B.; Winge, M. & Carneiro, M.A., (1996). Orogeneses precedendo e tafrogeneses sucedendo Rodímia na América do Sul. Bol. IG-USP, Sér. Cient. 27: 1-40.

- Chemale Jr., F.; Babinski, M.; Van Schmus, W.R.; Wildner, W. & Lima, E.F., (1997). U-Pb and Sm-Nd isotopic studies of Neoproterozoic to early Paleozoic belts in southern Brazil. In: South-Amer. Simp. on Iso1. Geol., Extend. Abstr., Brazil.
- Chen, L. & Zhang, H., (2011). International Conference on Craton Formation and Destruction. Beijing, China. Abril 25-29 del 2011. Abstract, 200 p.
- Clifford, T.N., (1966). Tecto-metallogenetic units and metallogenetic provinces of Africa. *Earth Planet. Sci. Lett.* 1, 421-434.
- Cingolani, C.; Varela, R.; Dalla Salda, L. Bossi, J.; Campal, N.; Ferrando, L. Pineyro, D. & Schipilov, A., (1997). Rb-Sr geochronology from the Rio de La Plata craton of Uruguay. In: South-Amer. Simp. on Iso1. Geol., Extend. Abstr., Brazil.
- Comin-Chiaramonti, P., Cundari, A., Piccirillo, E.M., Gomes, C.B., Castorina, F., Censi, P., Demin, A., Marzoli, A., Speziale, S. & Velázquez, V.F., (1997). Potassic and sodic igneous rocks from Eastern Paraguay: their origin from the lithospheric mantle and genetic relationships with the associated Paraná flood tholeiites. *Journal of Petrology* 38, 495-528.
- Comin-Chiaramonti, P., & Gomes, C.B., (1995). Alkaline magmatism in Central-Eastern Paraguay, relationships with coeval magmatism in Brazil. São Paulo, Edusp/Fapesp, 464pp.
- Cordani, U.G., Brito Neves, B.B., Fuck, R.A., Porto, R., Thomaz Filho, A. & Cunha, F.M.B., (1984). Estudo preliminar de integração do Precambriano com os eventos tectônicos das bacias sedimentares brasileiras. – Bol. Técnico CENPES – Petrobrás 70p.
- Cordani, U. G.; Cubas, N.; Sato, K.; Nutman, A. P.; Gonzales, M. E. & Presser, J. L. B., (2001). Geochronological constraints for the evolution of the metamorphic complex near the Tebicuary River, Southern Precambrian Region of Paraguay. In: III SSAGI, 2001, Pucon - Chile. III Simposio Sudamericano de Geología Isotópica, 2001.
- Cordani, U.G.; Tassinari, C.C.G. & Reis Rolim, D., (2005). The Basement of the Rio Apa Craton in Mato Grosso do Sul (Brazil) and Northern Paraguay: a geochronological correlation with the tectonic provinces of the south-western Amazonian Craton. Proceedings of the 12th Gondwana Conference, Abstracts, Mendoza, p. 113.
- Cordani, U. G., Tassinari, C. C. G., Teixeira, W. & Coutinho, J. M. V., (2008), The basement of the Rio Apa Craton in Mato Grosso do Sul (Brazil) and northern Paraguay: Tectonic implications and correlations, 33rd International Geological Congress, AMS-07 Crustal evolution of the cratonic nuclei of South America: Oslo, CD-ROM.
- Cubas, N., Garcete, A., Meinhold, K.D., Benitez, J.C., Figueredo, L., Gonzales, M.E., Burgardt, K.P. & Höhndorf, A., (1997). Mapa Geológico de la República del Paraguay – Escala 1 : 100 000, Hoja Villa Florida. MOCP, Asunción, 71p.
- Dalla Salda, L.; Bossi, J. & Cingolani, C., (1988). The Rio de La Plata cratonic region of Southwestern Gondwanaland. *Episodes*, 11 (4): 263-269.
- Darbyshire, F. & Eaton, D.W., (2010). The lithospheric root beneath Hudson Bay, Canada from Rayleigh wave dispersion: No clear seismological distinction between Archean and Proterozoic mantle. *Lithos* 120, 144–159.
- DeGraff, J.M., (1985). Late Mesozoic crustal extension and rifting on the western edge of the Paraná Basin, Paraguay. *Geological Society of America, Abstracts with Programs* 17, p. 560.
- DeGraff, J.M. & Orué, D., (1984). Proyecto tectónico del Paraguay Suroriental: informe de progreso al termino del trabajo de campo (2da. etapa). Asunción: MDN-DIM, Relatório Interno, 12p.
- DeMarchi G., Comin-Chiaramonti P. De Vito P.,

- Sinigoï S. & Castillo A.M.C., (1988). Lherzolite-dunitite xenoliths from Eastern Paraguay: petrological constraints to mantle metasomatism. In: Piccirillo E.M. & Melfi A.J. (Eds.) *The Mesozoic Flood Volcanism from the Paraná Basin (Brazil). Petrogenetic and geophysical aspects.* Iag-Usp, São Paulo, Brazil (1988), 207-227.
- Eaton, D.W., Darbyshire, F., Evans, R.L., Grütter, H., Jones, A.G., & Yuan, X., (2009). The elusive lithosphere–asthenosphere boundary (LAB) beneath cratons. *Lithos* 109, 1–22.
- Echeveste, H.; Ribot, A.; Texeira, W.; Fernández, R.; Girardi, V.A.V.; Piccirillo, E.M.; Bellieni, G. & Jacumin, (1997). Preliminary Rb/Sr geochronology of calc-alkaline dykes from the Tandilia system, Buenos Aires Province, Argentina. In: *South-Amer. Simp. on Isot. Geol., Extend. Abstr.*, 107109. Brazil.
- Engler, T., (1991). *Petrographische und geochronologische Arbeiten in Ostteil des Rio Tebicuary-Kratons in Südöst Paraguay.* Diplom. Diss., Univ. Heidelberg, 154p.
- Escalante, C., (2002) *Tomografia sísmica do manto superior sob o Sudeste e Centro Oeste do Brasil.* Dissert. de Mestrado, IAG/USP, São Paulo, Brasil.
- Fishwick, S., (2010). Surface wave tomography: Imaging of the lithosphere–asthenosphere boundary beneath central and southern Africa?. *Lithos* 120, 63–73.
- Fragoso-Cesar, A.R.S.F. & Sollani, E., (1984). Compartimentação tectônica do cráton Rio de La Plata. *Anais XXXIII Congr. Brasil. Geol. Rio de Janeiro, Brasil*, 5: 2426-2434.
- Fragoso-Cesar, A.R.S. & Machado, R., (1997). Neoproterozoic terranes of the Gaúcho shield (Southern Brazil and Uruguay). In: *South-Amer. Simp. on Isot. Geol., Extend. Abstr.*, 65-67. Brazil.
- Godoy, A. M.; Manzano, J. C.; Araújo L. M. B. de & Silva, J. A. da (2009). Contexto Geológico E Estrutural Do Maciço Rio Apa, Sul Do Cráton Amazônico – M São Paulo, UNESP, Geociências, v. 28, n. 4, p. 485-499, 2009
- Guimaraes, G.B., (1995). *Ocomplexo granítico Cunhaporanga na região de Joaquim Murinho, Pirai do Sul (Pr): Caracterização Faciológica das rochas granitoides.* Diss. Mestrado. IGc/USP 144p.
- Gurney, J.J. & Zweistra, P., (1995). The interpretation of the major element compositions of the mantle minerals in diamond exploration. *J. of Geochem. Exploration*, 53: 293-309.
- Hallinan, S.E.; Mantovani, M.S.M.; Shukowsky, W. & Braggion, L. Jr. (1993). Estrutura do Escudo Sul-Brasileiro: uma revisão através de dados gravimétricos e magnetométricos. *Rev. Brasil. Geoc.*, 23 (3): 201-214.
- Harara, O.M.; Basei, M.A.S. & Siga Júnior, O., (1997). Geochronological and geochemical date on the transition zone between Luis Alves and Atuba 238 Complexes, south Brazil. In: *South-Amer. Simp. on Isot. Geol., Extend. Abstr.*, 134-136. Brazil.
- Hasui, Y., (2010). A grande colisão pré-cambriana do sudeste Brasileiro e a estruturação regional. São Paulo, UNESP, Geociências, v. 29, n. 2, p. 141-169,
- Heintz, M., Debayle, E. & Vauchez, A., (2005). Upper mantle structure of the South American continent and neighboring oceans from surface wave tomography. *Tectonophysics* 406: 115–139.
- Helmstaedt, H.H & Gurney, J.J., (1995). Geotectonic controls of primary diamond deposits: implications for area selection. *J. of Geochemical Exploration*, 53: 125-144.
- Hutchinson, M., (1979). *Geology of the Apa High.* The Anschutz Co. Informe Interno. Paraguay.
- James, D.E., & Fouch, M.J., (2002). Formation and Evolution of Archaean Cratons: Insights from Southern Africa. In *The Early Earth: Physical, Chemical and Biological Development*, edited by C. Ebinger, C.M.R. Fowler, and C.J. Hawkesworth, pp. 1-26, Geological Society, London.
- James, D.J. & the Kaapvaal Working Group,

- (2011). Formation and Evolution of Cratons: Lessons from Southern Africa. Abstract of International Conference On Craton Formation And Destruction, Beijing China.
- Janse, A.J.A., (1985). Kimberlites -where and when. In: GLOVER & HARRIS (eds), Kimberlite occurrence and origin: Geol. Dep. and Univ. Ext., University of Western Australia Publication, 8:19-61
- Janse, A.J.A., (1994). Is Clifford's rule still valid? Affirmative examples from around the world. In: Meyer, H.O.A., Leonardos, O. (Eds.), Diamonds: Characterization, Genesis and Exploration. Dept. Nacional da Prod. Mineral., Brazilia, pp. 215–235.
- Janse, A.J.A., (1995). A history of diamond sources in Africa: Part I. Gems and Gemology, 228-255.
- Kaminsky, F.V.; Feldman, A.A.; Varlamov, V.A.; Boyko, A.N.; Olofinsky, L.N.; Shofman, I.L. & Vaganov, V.I., (1995). Prognostication of primary diamond deposits. J. of Geochemical Exploration, 53: 167-182.
- Kanzler, A., (1987). The Southern Precambrian in Paraguay – Geological Inventory and Age Relations. – Zbl. Geol.Paläont. Teil I, 7/8 : 753-765.
- Lacerda Filho, J.W.; Brito, R.S.C.; Silva, M.G.; Oliveira, C.C. De, Moreton, L.C., Martins, E.G., Lopes, R.C., Lima, T.M., Larizzatti, J.H. & Valente, C.R., (2006). Geologia e Recursos Minerais do Estado de Mato Grosso do Sul. Programa Integração, Atualização e Difusão de Dados de Geologia do Brasil. Convênio CPRM/SICME - MS, MME, 121 p.
- Lebedev, S.; Boonen, J. & Trampert, J., (2009). Seismic structure of Precambrian lithosphere: New constraints from broad-band surface-wave dispersion. Lithos 109, 96–111.
- Lebedev, S. & Trampert, J., (2010). S-Velocity Structure of Cratons, from Broad-Band Surface-Wave Dispersion IRIS Core Proposal 2010 | Volume II Lithosphere Lithosphere/Athenosphere Boundary | I I -151.
- Lohse, B., (1990). Petrographische und geochronologische Erkenntnisse über den Westteil des Tebicuary-Kratons in Südost Paraguay. Diplom. Diss., Univ. Heidelberg, 103 p.
- Mallmann, G.; Chemale Jr., F.; Armstrong, R. & Kawashita, K., (2003). Sm-Nd and U-Pb Shrimp Zircon Studies Of The Nico Pérez Terrane, Reworked Rio De La Plata Craton, Uruguay. Short Papers – IV South American Symposium on Isotope Geology. p. 207-210.
- Mantovani, M.S.M.; Hawkesworth, C.J. & Baisei, M.A.S., (1987). Nd and Pb isotope studies bearing on the crustal evolution of southeastern Brazil. Rev. Brasil. Geocienc. , 17: 263-268.
- Mantovani, M.S.M., Quintas, M.C.L., Shukowsky, W. & de Brito Neves, B.B., (2005). Delimitation of the Paranapanema Proterozoic block: a geophysical contribution, Episodes, 28(1), 18–22.
- Medeiros Delgado, I.; Dalton de Souza, J.; da Silva, L.C.; da Silveira Filho, N.C.; dos Santos, R.A.; Pedreira, A.J.; Torres Guimarães, J.; de Aquino Angelim, L.A.; Vasconcelos, M.A.; Paiva Gomes, I.; de Lacerda Filho, J-V.; Rodrigues Valente, C.; Mazzini Perrotta, M.; & Heineck, C.A., (2003). Geotectônica do Escudo Atlântico Geotectonics of the Atlantic Shield. In: L. A. Bizzi, C. Schobbenhaus, R. M. Vidotti e J. H. Gonçalves (Eds.) Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil CPRM, Brasília, (2003), pp. 227-332.
- Morgan, P., (1995). Diamond exploration from the bottom up: regional geophysical signatures of lithosphere conditions favorable for diamond exploration. J. of Geochemical Exploration, 53: 145-165.
- O'Reilly, S.Y. & Griffin, W.L., (2010). The continental lithosphere–asthenosphere boundary: Can we sample it?. Lithos 120, 1–13.
- Presser, J.L.B., (1992). Geologia da Folha 5569-111 La Colmena, Paraguai Oriental. Sao Paulo, 205p. Diss. de Mestrado, IG-USP.

- Presser, J.L.B., (1998). Feições Mineralógicas de rochas lamprofíricas Mesozoicas da Província Alcalina Central, Paraguai Oriental. São Paulo, 355p, Tese de Doutorado, IG-USP. São Paulo-Brasil,
- Presser, J.L.B., (2005). Diamantes junto al Complejo del Rio Apa (Bloque cratónico Rio Apa), Dpto. de Concepción (Paraguay) frontera con el estado de Mato Grosso do Sul (Brasil). IV Simposio Brasileiro de Geologia do Diamante, II South American Symposium on Diamond Geology.
- Presser, J.L.B., (2005). Perspectivas en relación al diamante en el Paraguay Oriental. IV Simposio Brasileiro de Geologia do Diamante, II South American Symposium on Diamond Geology.
- Presser, J.L.B., (2008). Looking for diamond-bearing kimberlites to make world class diamond mines from South America: the Rio Apa Cratonic Block. IV Simposio de Vulcanismo e Ambientes Associados. Foz do Iguaçu – PR, 2008.
- Presser, J.L.B., (2010a). Trazado del límite litosfera-astenosfera bajo Cratones a partir de datos S-wave en perfiles 1D. Simpósio Brasileiro de Geologia do Diamante (5. : 2010 : Tibagi, PR) Anais/ V Simpósio Brasileiro de Geologia do Diamante. – Curitiba: Tibagi: Sociedade Brasileira de Geologia, Núcleo – PR, 2010. 101 p. : il., tabs. p-82.
- Presser, J.L.B., (2010b). Blancos para fuentes primarias de diamantes con potencial económico entre Paraguay, Brasil, Argentina y Uruguay (región de la Cuenca del Paraná). Simpósio Brasileiro de Geologia do Diamante (5. : 2010 : Tibagi, PR) Anais/ V Simpósio Brasileiro de Geologia do Diamante. – Curitiba: Tibagi: Sociedade Brasileira de Geologia, Núcleo – PR, 2010. 101 p. : il., tabs. p-83.
- Presser, J.L.B., (2010c). Paraguay Un País Con Diamantes. Boletín del Museo Nacional de Historia Natural del Paraguay, n-17-(2010)-en edición.
- Presser, J.L.B., (2010d). Trazado del límite litosfera-astenosfera bajo Cratones a partir de datos S-wave en perfiles 1D. Bmnhnpy, n-17-(2010)-en edición.
- Presser, J.L.B., (2010e). Blancos para fuentes primarias de diamantes con potencial económico entre Paraguay, Brasil, Argentina y Uruguay (región de la Cuenca del Paraná). Bmnhnpy, n-17-(2010)-en edición.
- Priestley, K. & Debayle, E., (2003). Seismic evidence for a moderately thick lithosphere beneath the Siberian Platform. *GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS*, VOL. 30, NO. 3, 11-18.
- Proyecto PAR 83/005, (1986). Mapa Geológico del Paraguay (1 mapa 1: e texto explicativo). Realizagao por Palmieri & Fúlfaro, Asunción Paraguay. Gov. Rep. del Paraguay/ONU.
- Quintas, M. C. L., (1995). O embasamento da Bacia do Paraná: reconstrução geofísica de seu arcabouço. São Paulo: USP. Instituto Astronômico e Geofísico, 1995. 213 p. Tese (Doutorado).
- Ramos, V. A.; Vujovitch, G.; Martinob, R. & Otamendic, J., (2010) Pampia: A large cratonic block missing in the Rodinia supercontinent. *Journal of Geodynamics* 50 243–255
- Rocha, M. P., (2003) Ampliação da Tomografia Sísmica do Manto Superior no Sudeste e Centro-Oeste do Brasil com ondas P. Dissert. de Mestrado, IAG/USP, São Paulo, Brasil.
- Rocha, M.P., (2008). Tomografia sísmica com ondas P e S para o estudo do manto superior no Brasil. Tesis, IAG-USP, São Paulo-Brasil.
- Rocha, M.P.; Schimmel, M. & Assumpção M., (2011). Upper-mantle seismic structure beneath SE and Central Brazil from P- and S-wave regional traveltimes tomography. *Geophys. J. Int.* 184, 268–286
- Sato, K., (1998). Evolução Crustal Da Plataforma Sul Americana, Com Base Na Geoquímica

- Isotópica Sm-Nd. São Paulo: USP. Instituto de Geociências. 321 p. Tese (Doutorado).
- Schimmel, M.; Assumpcao, M. & VanDecar, J., (2003). Upper mantle seismic velocity structure beneath SE Brazil from P- and S_v-wave travel time inversions, *J. geophys. Res.*, 108(B4), 2191.
- Schobbenhaus, C. & Bley de Brito Neves B., (2003). A Geologia do Brasil no Contexto da Plataforma Sul-Americana *Geology of Brazil in the Context of the South American Platform*. In *Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil* L. A. Bizzi, C. Schobbenhaus, R. M. Vidotti e J. H. Gonçalves (eds.) CPRM, Brasília, 2003. pp. 5-54
- Schobbenhaus, C.; Campos, D.A.; Derze, G.R. & Asmus, H.E., (1984). *Geologia do Brasil*. Texto explicativo do mapa geológico do Brasil e da area oceanica adjacente incluindo depósitos minerais. Dep. Nac. Prodg. Mineral (DNPM), Brasilia, 501 p.
- Siga Junior., O.; Basei, M.A.S.; Reis Neto, J.M.; Harara, O.M.; Passarelli, C.R.; Prazeres, H.; Weber, W. & Machiavelli, A., (1997). Ages and tectonic setting of alkaline-peralkaline granitoids of Paraná and Santa Catarina States, southern Brazil. In: *South-Amer. Simp. on Isot. Geol., Extend. Abstr.*, 301-303. Brazil.
- Smith C.B.; Bulanova, G.P. & Presser, J.L.B., (2012) *Diamonds From Capiibary, Paraguay*. 10th International Kimberlite Conference Extended Abstract No. 10IKC-36
- Snyder, D.B.; Rondenay, S.; Bostock, M.G. & Lockhardt, G.D., (2004). Mapping the mantle lithosphere for diamond potential using teleseismic method. *Lithos* 77, 859–872.
- Sollani Jr, E., (1986). Os dados geocronológicos do escudo Sul-Rio-Grandense e suas implicações de ordem geotectônica. São Paulo 396 p. Tese de Doutorado. IGc - USP.
- Swicero, D.P., (1994). Distribution and origin of diamond in Brazil: an overview. In: *International Symposium on the physics and chemistry of the Upper Mantle (ISUM)*. São Paulo, CPRM/FAPESP. p. 257-287.
- Tassinari, C.C.G., (1996). O mapa geocronológico do cráton Amazonico no Brazil: Revisao dos dados isotópicos. São Paulo, 248p. Tese de Livre-Docente, IGc. USP.
- Texeira, W., (1992). Contribuição ao conhecimento geocronológico do cráton do São Francisco: Avaliação de dados isotópicos em rochas ígneas e metamórficas Implicações na evolução crustal Pré-Cambriana. São Paulo, 172p. Tese de Livre-Docente, IGc - USP.
- Trompette, R., (1994). *Geology of Western Gondwana 2.000-500 Ma. The PanAfrican Brazilian Amalgamation of South America and Adjacent Africa*. Rotterdam, Balkema. 366p.
- VanDecar, J.; James, D. & Assumpção, M., (1995) Seismic evidence for a fossil mantle plume beneath South America and implications for plate driving forces. *Nature*, 378, 25-31.
- White, S.H.; de Boer, H. & Smith, C.B., (1995). Structural controls of kimberlite and lamproite emplacement. *J. of Geochemical Exploration*, 53: 245-264.
- Wiens, F., (1986). Zur lithostratigraphischen und strukturellen entwickung des Rio Apa Hochlandes, Nordost Paraguay. Ph.D. Thesis, Clausthal University, 280p.
- Wilde S.A., Valley J.W., Peck, W.H. & Graham, C.M., (2001). Evidence from detrital zircons for the existence of continental crust and oceans on the Earth 4.4 Gyr ago. *Nature*, v. 409, 175-178.
- Xu, W.; Lithgow-Bertelloni, C; Stixrude, L. & Ritsema, J., (2008). The effect of bulk composition and temperature on mantle seismic structure. *Earth and Planetary Science Letters* 275, 70–79.