



## DIAMANTES DE CAPIIBARY, DPTO. SAN PEDRO, PARAGUAY

JAIME L. BÁEZ PRESSER\*<sup>1</sup>, GALINA P. BULANOVA<sup>2</sup> & CHRISTOPHER B. SMITH<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Diamonds Consulting Geologist, Asuncion, Paraguay. Correspondencia al autor: \*jaimoleonardobp@gmail.com

<sup>2</sup>School of Earth Sciences, University of Bristol, United Kingdom. Correo electrónico: chris\_b\_smith@btopenworld.com

**Resumen.-** Aquí se presenta el estudio de diamantes aluviales colectados en los alrededores de la ciudad de Capiibary (Dpto. de San Pedro, Paraguay). En ellos se describe su morfología externa, estructura interna, sus inclusiones minerales y el contenido de nitrógeno y su estado de agregación. La ocurrencia de diamantes en Capiibary se encuentra en la porción sur-occidental del departamento de San Pedro, a unos 150 km al este-noreste de Asunción. Diamantes han sido recuperados de sedimentos de corriente por los trabajadores artesanales ("garimpos") y, otros a través de la actividad de exploración de una empresa minera. La plataforma de América del Sur en el Paraguay-Oriental, forma parte de la Cuenca del Paraná, sucesión de sedimentos del Paleozoico al Mesozoico, que están coronadas por los flujos de basalto toleíticos del Cretácico inferior (*Trapp* del Paraná). La aparición de diamantes en Capiibary se encuentra dentro del área de afloramiento de la Formación Misiones, una secuencia de sedimentos eólicos del Jurásico-Cretácico cortados por diques toleíticos Mesozoicos. Tomografía sísmica sugiere que la secuencia sedimentaria en Capiibary está sustentada por una litosfera cratónica gruesa fría y empobrecida, que se entiende como siendo el Craton Río de la Plata. Más de una docena y media de diamantes de Capiibary se han estudiado; ellos siendo de tamaño típicamente de entre 1 a ~2 mm, principalmente de coloración marrón pálido o incoloro, y entre ellos se observó 1 amarillo, 1 gris y 1 verde oliva. La mayoría de los cristales son octaedros o formas de transición de octaedro-dodecaedro parcialmente reabsorbido. Se observaron también dos dodecaedros y un cristal con forma pseudo-hemimórfica. Algunos cristales muestran grietas (rajaduras rómbicas), por el desgaste durante el transporte fluvial o ?marino. Sin embargo, otras características de desgaste, como bordes con deterioro o puntos rotos están ausentes. Manchas verdes de daños por radiación son comunes, como a menudo visto en diamantes de zonas intemperizadas o aquellos observados en zonas de aluvión. Manchas marrones de radiación se observaron en un cristal, este fenómeno es tomado como producido por calentamiento resultante del metamorfismo de bajo grado. La combinación de características observadas en los diamantes, tales como grietas rómbicas y manchas de radiación, especialmente aquellos marrones "metamorfosados", pueden sugerir que algunos de los cristales se habrían reciclado a partir de sedimentos pretéritos enterrados contiguos, tales como la Formación Misiones. Sin embargo, la ausencia de evidencia de fuerte abrasión podría sugerir que los diamantes de Capiibary no han sufrido transporte de larga distancia desde su fuente primaria de kimberlita o lamproita. Bajo la luz ultravioleta los diamantes presentan luminiscencia azul o en ocasiones amarilla ello el reflejo de la presencia probable de los centros de N3. Cátodoluminiscencia en imágenes de las placas pulidas de los diamantes a lo largo de planos cristalográficos dodecaédricos muestran un crecimiento con zonificación interna regular octaédrica. Inclusiones minerales encontradas hasta la fecha en los diamantes de Capiibary son enteramente de olivinos altamente forsteríticos (Fo<sub>92-94</sub>). Este alto contenido de forsterita es indicativo de que ellos se habrían formado a partir de manto litosférico Arcaico de composición harzburgítica o lherzolitica empobrecida. Las inclusiones de olivino muestran morfología impuesta por el hospedante diamante, que, junto con la ausencia de cualquier grieta que lo rodee, implica un origen singenético para las referidas inclusiones. Espectroscopia de infrarrojos ("FTIR") muestran fuertes picos de hidrógeno para muchos de los cristales. Deconvolución espectral muestra un contenido de N típicamente alrededor de 200-300 ppm, con agregación IaA-IaB de en el que el componente de IaB es generalmente predominante. Las plaquetas a menudo están bien desarrolladas. En común con diamantes frecuentemente colectados en una litosfera peridotítica empobrecida de edad Arcaica, se asume una edad de 3,2 Ga, para que se pueda utilizar en los ensayos de interrelaciones de tiempo/temperatura/estado de agregación nitrógeno. Teniendo en cuenta la edad predominante de los intrusivos de rocas ígneas alcalinas del Cretácico en Paraguay y de kimberlitas en el vecino país de Brasil, un tiempo de residencia del manto de 3,1 Ga se ha previsto en estas interrelaciones, produciendo temperaturas de formación de diamante alrededor de 1140-1170°C que serían razonables para diamantes derivados de un manto litosférico peridotítico.

**Palabras clave:** *Diamantes de Capiibary, Paraguay, Región oriental, Cratón del Río de La Plata, Inclusiones minerales, Espectroscopia de infrarrojos "FTIR".*

**Abstract.-** Here we present the first study of alluvial diamonds from the Capiibary occurrence (Dpto. de San Pedro, Paraguay) describing their external morphology, internal structure, mineral inclusions and nitrogen content and aggregation. The Capiibary diamond occurrence is located in the south-western portion of the Department of San Pedro, approximately 150 km east-northeast of Asuncion. The diamonds have been recovered from stream sediments by artisan

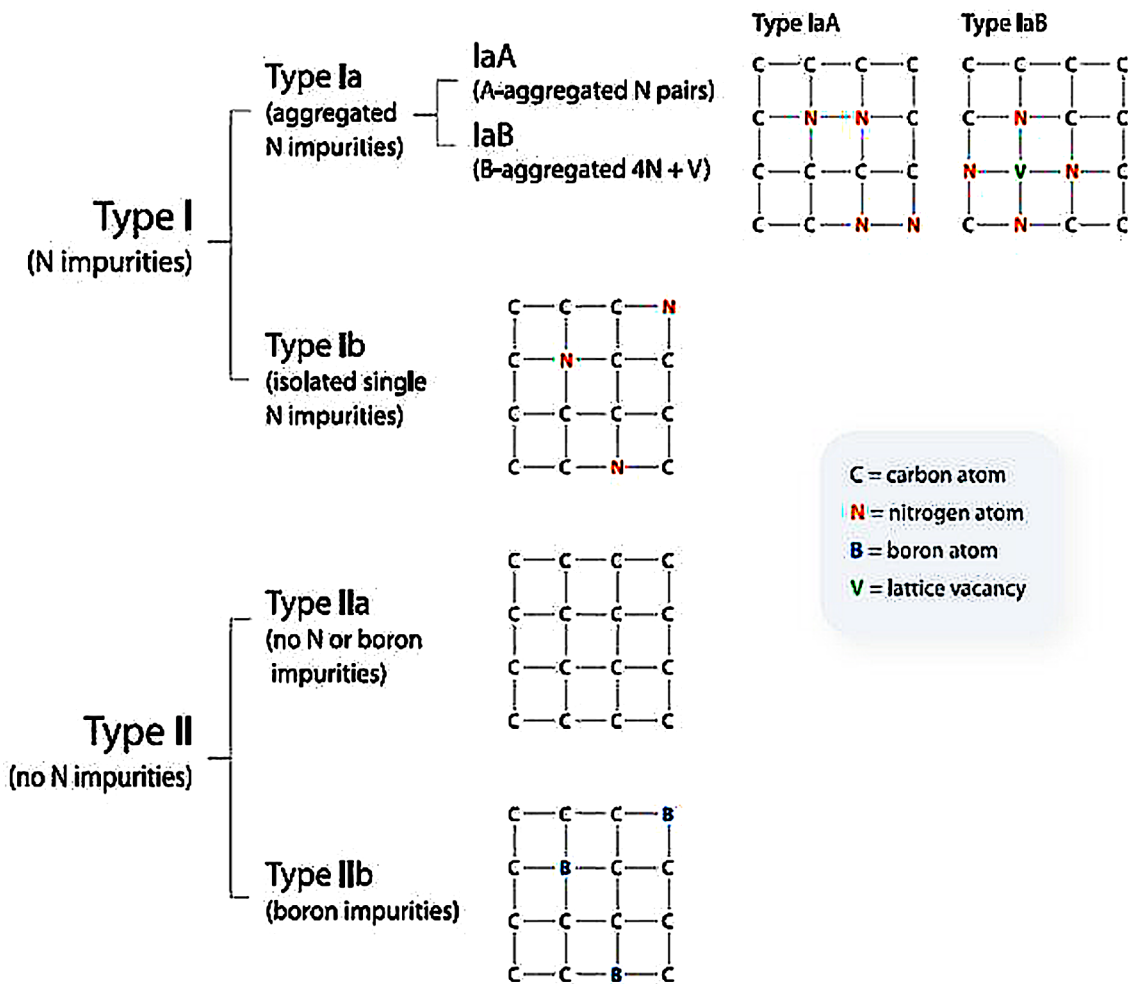
workers (“garimperos”) and through of the activity of a exploring a mining company. The South American platform of Eastern-Paraguay here forms part of the Parana Basin succession of Palaeozoic to Mesozoic sediments capped by the early Cretaceous Parana basalt flows (Paraná Trapp). The Capiibary diamond occurrence itself is within the outcrop area of the Misiones Formation, a sequence of Jurassic-Cretaceous aeolian sediments cut by Mesozoic tholeiitic dykes. Seismic tomography suggests that the sedimentary sequence at Capiibary is underlain by a thick cool and depleted cratonic lithosphere, it is understood as being the Rio de la Plata Craton. About a dozen and a half Capiibary diamonds we have studied are typically ~1 mm size, pale brown or colourless, with 1 yellow, 1 grey and 1 olive-green stone recorded. Most stones are octahedra or partially resorbed octahedral-dodecahedral transition forms. Two dodecahedra and one pseudo-hemimorphic form, were also noted. A small proportion of the stones show rhombic cracks, usually a result of wear during fluvial or marine transportation. However, there is an absence of other wear features such as abraded edges or broken points. Green radiation damage spots are common, as often seen on weathering zone or alluvial stones. Brown radiation spots were observed on one stone, indicative of heating resulting from low grade metamorphism. This combination of rhombic cracks and radiation spots, especially the brown metamorphosed ones, may suggest some of the stones have been recycled from a former sedimentary host such as the local Misiones Formation. But the absence of evidence of strong abrasion may suggest that the Capiibary stones have not suffered long distance transport from their primary kimberlite or lamproite source. Under ultraviolet light the diamonds luminescence blue or occasionally yellow reflecting the probable presence of N3 centres. Cathode luminescence imagery of polished plates made from the diamonds by polishing along dodecahedral crystallographic planes show regular internal octahedral growth zonation. Mineral inclusions recovered to date from Capiibary diamonds are entirely of highly forsteritic olivines (Fo<sub>92-94</sub>). Such a high forsterite content is indicative of an Archean harzburgitic or depleted lherzolite lithospheric mantle origin. The olivine inclusions show morphology imposed by the diamond host, which, together with absence of any surrounding cracks, implies a syngenetic origin for them. Fourier transform infra red spectroscopy (“FTIR”) show strong hydrogen peaks for many of the stones. Spectral deconvolution yielded N contents typically around 200-300 ppm, with IaA-IaB aggregation in which the IaB component generally predominates. Platelets are often well developed. In common with the Archean ages frequently recorded for diamonds from depleted peridotitic lithosphere, an assumed age of 3.2 Ga can be used in trials of time/temperature/nitrogen aggregation relationships. Given the dominant Cretaceous age of alkaline intrusives in Paraguay and kimberlites in adjacent Brazil, a mantle residence time of 3.1 Ga has been fitted to these relationships, yielding diamond formation temperatures of around 1140-1170°C which would be reasonable for diamonds of lithospheric peridotitic mantle derivation.

**Key words:** *Capiibary diamonds, Paraguay, Eastern-region, Cratón del Río de La Plata, Mineral inclusions, Fourier transform infrared spectroscopy (“FTIR”).*

El diamante se compone de un solo elemento: el carbono (C). Los átomos de C están dispuestos en un patrón regular repetido (el reticulado atómico del diamante, o simplemente retículo) que es único entre los minerales. Sin embargo, los átomos de elementos como el nitrógeno (N) y el boro (B) pueden sustituir algunos de los átomos de C en el retículo, como también otras impurezas pueden ser incorporadas. La clasificación de los tipos de diamantes (sistema de) se divide en categorías basadas únicamente en la presencia o ausencia de N (que es impureza más común en el diamante) y de trazas de impurezas de B; y las formas en las que ellos están dispuestos en el retículo (Fig. 1). Diamantes Tipo-I se definen como

aquellos que contiene suficiente N para poder medirse mediante espectroscopia de absorción de infrarrojos, ellos concentrando N de decenas a millares de ppm (Breeding & Shigley, 2009; Cavallaro, 2008). Mientras que, diamantes del Tipo-II se definen como aquellos que no contienen suficiente N para ser detectados por el espectrómetro de infrarrojos, característicamente <30 ppm de N (ver además Massi, 2006; Hutchison, 1997). Se trata de manera general de categorías que se subdividen sobre la base de la naturaleza de las impurezas que están presentes (Breeding & Shigley, 2009).

Como excelentemente comentado en Breeding & Shigley (2009) (ver del mismo modo Massi, 2006), diamantes Tipo-I se



**Figura 1.** En la clasificación del tipo de diamante se basa en la presencia o ausencia de nitrógeno y de las impurezas de boro y sus configuraciones en la celda (retículo) del diamante. Estos diagramas esquemáticos ilustran la manera en que átomos de nitrógeno y de boro sustituyen a átomos de carbono (C) en la red. Los diagramas son mostrados como simplificadas representaciones bidimensionales tetraédricamente de enlaces de átomos de C (cuatro enlaces por átomo de C) que forman la estructura tridimensional del cristal de diamante. Diamantes Tipo-Ia contienen impurezas de nitrógeno, en forma de: agregados A (IaA) -que consisten de un par de átomos de nitrógeno y agregados B (IaB) -que se componen de cuatro átomos de nitrógeno alrededor de una vacante (V). Diamantes Tipo-Ib con un aislado átomo de nitrógeno. Tipo-IIa diamantes que contienen impurezas no medibles de nitrógeno, y diamantes del Tipo-IIb que tienen impurezas de boro). Como encontrado en Breeding & Shigley (2009).

dividen en diamantes Tipo-Ia y Tipo-Ib. Ambos subgrupos contienen N, pero los átomos de N en cada caso están dispuestos de forma diferente (Fig. 1). En diamantes del Tipo-Ib, con un solo átomo de N que ha sustituido a átomos de C en el retículo y ellos están aislados uno de otro, es decir, por lo general no se forman en posiciones

reticulares adyacentes. En contraste, diamantes de Tipo-Ia contienen átomos de N que están en estrecha proximidad entre sí, en una de dos configuraciones espectroscópicamente detectables. La configuración más común, diamantes Tipo-Ia, implica dos átomos adyacentes de N entre sí en el retículo. Aunque estos dos átomos ocupan

sitios vecinos, cada par está aislado de otros átomos de N en el retículo. Estas impurezas de N son comúnmente conocidas como agregados A (o centros-A), y los diamantes que los contienen se denominan Tipo-IaA. La otra configuración implica cuatro átomos de N que simétricamente rodean una vacante (la vacante A es un sitio del retículo normalmente ocupado por átomo de C; el que no está ocupado por cualquier átomo). Esta agrupación compleja se forma cuando dos centros de A se combinan. Estas impurezas de N que se agrupan se denominan agregados B (o centros-B), y los diamantes asociados son de Tipo IaB.

Diamantes de Tipo-II se dividen en sub-Tipos-IIa y IIb (Fig. 1). Diamantes Tipo-IIa contienen N no fácilmente medible o impurezas de B. Diamantes naturales de Tipo-IIb no contienen impurezas de N medibles mediante espectroscopia de absorción de infrarrojos; en su lugar, contienen impurezas de B que se cree que son aislados átomos individuales que reemplazan a C en la estructura del diamante (Breeding & Shigley,

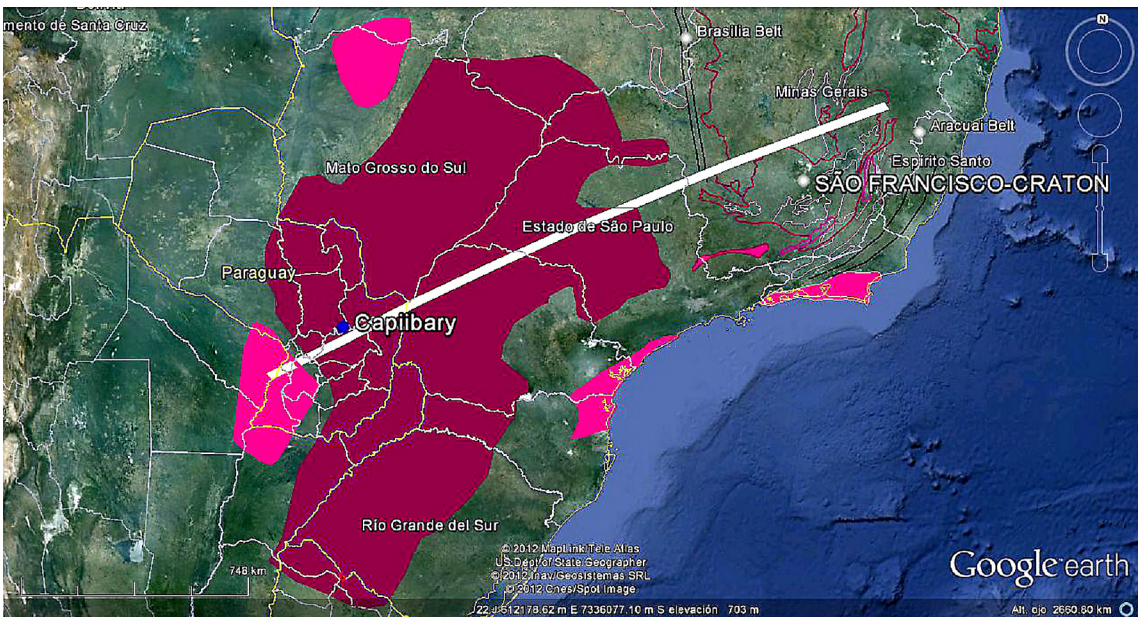
2009).

Diamantes han sido encontrados en Paraguay (Presser *et al.*, 2013) desde la década de 1960 pero ningún estudio analítico de ellos ha sido realizado previamente. Aquí se presenta el estudio, amplio, de diamantes aluviales (basado en alrededor de docena y media de cristales de entre 1 a 2 mm) colectados de los alrededores de la ciudad de Capiibary (Dpto. de San Pedro, Paraguay) por garimperos. En ellos se describe su morfología externa, estructura interna, sus inclusiones minerales, el contenido de nitrógeno y su estado de agregación -como pionera y resumidamente presentado por Smith *et al.* (2012).

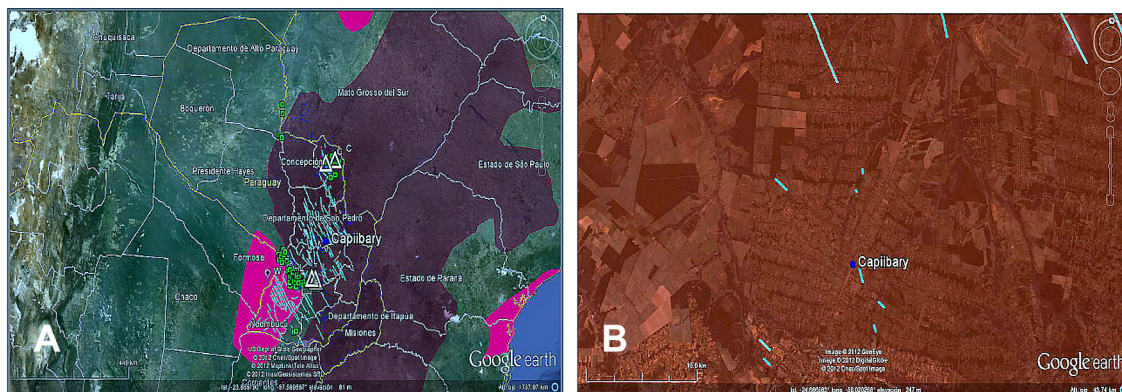
## MATERIALES Y MÉTODOS

### Muestras y métodos de análisis

Alrededor de docena y media de diamantes se contemplaron para ser estudiados. Los diamantes siendo recuperados por garimperos Modesto Quiñones Rojas; quien los extrajo de los sedimento de corriente del



**Figura 2.** Cratón Rio de la Plata (área amplia de sombreado oscuro -violeta) entre Paraguay, Brasil, Argentina y Uruguay (Presser, 2011) y encima la localización de la ocurrencia los diamante de Capiibary. Se trazo el rumbo del perfil (línea clara gruesa W-W') de las secciones mostradas en las Fig. 4 A y B. Areas de sombreado claro (rosa) corresponden a terrenos Arqueozoico/Proterozoico Inferior (Presser, 2011).



**Figura 3.** El Craton Rio de la Plata en el Paraguay (como en la Fig. 2) con relación a la ocurrencia de diamantes de Capiibary -las intrusiones de rocas alcalinas del Mesozoico al Terciario (A); y en B, bosquejo de la geología de la localidad de Capiibary y sus vecindades. El este de Paraguay, forma parte de la Cuenca del Paraná, sucesión de sedimentos del Paleozoico al Mesozoico, coronados por los flujos de basalto toleíticos del Cretácico inferior (*Trapp* del Paraná); conjunto estratigráfico que se encuentra cubriendo el basamento cratonico Rio de la Plata (Presser, 2011). La aparición de diamantes en Capiibary se encuentra dentro del área de afloramiento de la Formación Misiones (toda el área en B corresponde a la Fm. Misiones), una secuencia de sedimentos eólicos del Jurásico-Cretácico cortados por diques toleíticos Mesozoicos (líneas delgadas NW-SE en la figura A y en B). Se encuentra a unos 230 km al sur del complejo de carbonatita Chirigué (triángulo con letra C, en A) del Cretácico temprano y alrededor de 115 km al norte del campo de rocas volcánicas alcalinas Ybytyruzu para algunas de las cuales ha sugerido tratarse de lamproitas y rocas de una afinidad lamproítica y que han dado los diamantes en diques y en afloramientos meteorizados y suelos adyacentes (triángulo con letra L, en A). Rocas alcalinas =cuadros pequeños (en A).

lecho de tres arroyos distintos del distrito de la ciudad de Capiibary (Fig. 2).

Los diamantes fueron examinados bajo un microscopio binocular, morfológicamente descritos, fotografiados, y se tomaron nota de las inclusiones minerales aparentes.

Los cristales de diamantes se examinaron bajo una lámpara de luz ultravioleta de longitud de onda larga, perteneciente a la Universidad de Bristol, para categorizar la fluorescencia fue utilizado un instrumento óptico de *Leningrad Optical Mechanical Enterprise instrument OE-18A*. La fuente de luz siendo una lámpara de Hg cuarzo equipado con un filtro de longitud de onda 265 nm. Se tomaron nota de las características observadas.

Los cristales se pulieron a lo largo de planos {110} para exponer inclusiones minerales para sus análisis y para preparar placas pulidas para los estudios de catodoluminiscencia (CL) de la estructura interna y para las mediciones por Fourier Transform Infrared Microscopy (FTIR)(espectroscopia de infrarrojos).

Imágenes CL fueron tomadas con un microscopio electrónico de barrido JSM-35 ( $I = 3 \text{ nA}$ ,  $U = 20 \text{ kV}$ ) en la Universidad de Bristol. Los espectros infrarrojos de los diamantes pulidos se realizaron en la Universidad de Bristol utilizando un microscopio Spectratech de infrarrojos acoplado a un espectrómetro *Nicolet Nexus Fourier transform infrared spectrometer*. Todos los espectros se registraron a  $4 \text{ cm}^{-1}$  de resolución utilizando luz IR no polarizada generada por una fuente Global, KBr divisor de haz y nitrógeno líquido de un refrigerado detector MCT. Las líneas de base de los espectros se estimaron visualmente y ellos restados utilizando el software Nicolet OMNIC. La concentración del nitrógeno y su agregación se determinaron por el procedimiento descrito por Mendelssohn & Milledge (1995) y luego ajustados usando el método de Taran *et al.* (2006).

La composición de las inclusiones se identificaron mediante análisis por sonda electrónica en la Universidad de Bristol, una Jeol 155 6400, instrumento

utilizando una corriente de haz de 20 nA a un voltaje de 20 kV y con un haz de tamaño de punto de ~1 micra en la superficie.

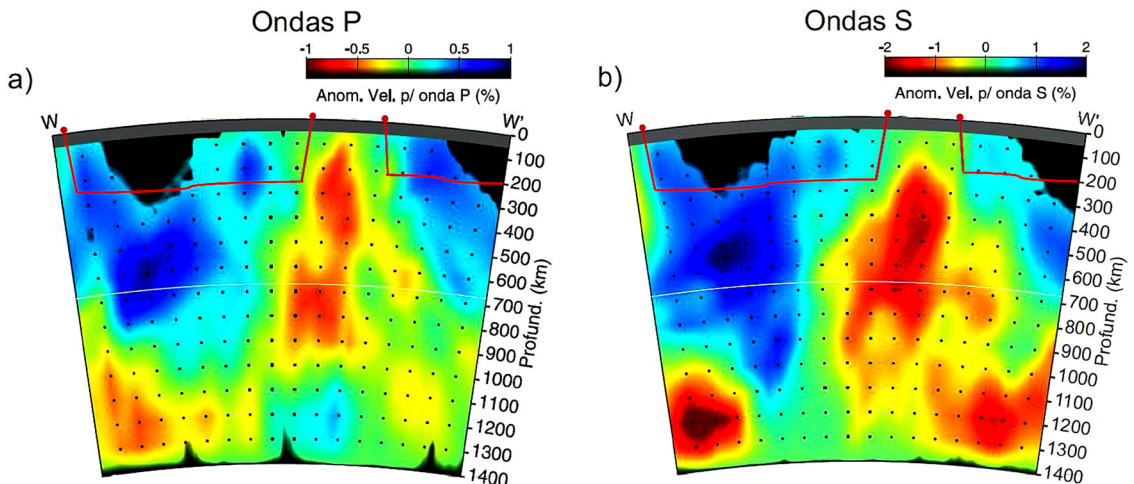
### Contexto geológico

La localidad de Capiibary (Fig. 2) se encuentra en la porción sur-occidental del departamento de San Pedro, a unos 150 km al este-noreste de Asunción. En esta zona diamantes fueron recuperados de sedimentos de corriente por los trabajadores artesanales (“garimperos”) y otros a través de la actividad de exploración de una empresa minera.

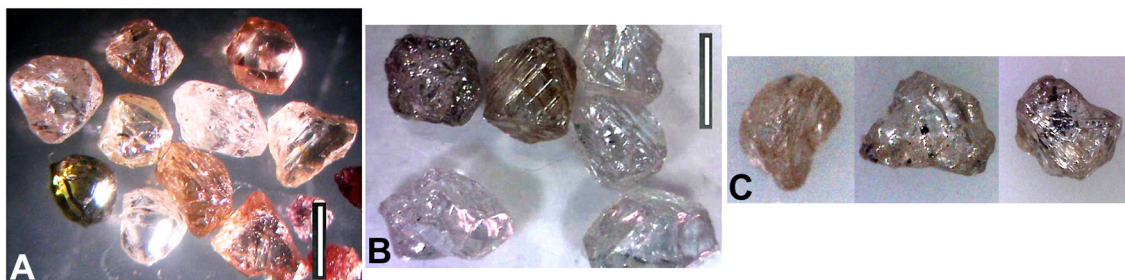
La plataforma de América del Sur en el Este de Paraguay, forma parte de la Cuenca del Paraná, sucesión de sedimentos del Paleozoico al Mesozoico, que están coronadas por los flujos de basalto toleíticos del Cretácico inferior (*Trapp del Paraná*). La aparición de diamantes en Capiibary se encuentra dentro del área de afloramiento de la Formación Misiones, una secuencia de sedimentos eólicos del Jurásico-Cretácico cortados por diques toleíticos Mesozoicos (~139 Ma. Gibson *et al.*, 2006) (Fig. 2 y 3). La localidad se encuentra a unos 230 km al

sur de los complejos alcalinos con carbonatita de Chiriguelo y Sarambi del Cretácico temprano (Gomes *et al.*, 1996; Gibson *et al.*, 2006) y alrededor de 115 km al norte del campo de rocas volcánicas alcalinas Ybytyruzu del Cretácico (Bitschene, 1987; Presser, 1998) para algunas de las cuales se ha sugerido tratarse de lamproitas (Presser, 1998; Presser, & Vladykin, 1999; Presser, *et al.* 2000; Vladykin *et al.*, 2000) a rocas de una afinidad lamproítica (Bitschene, 1987) y que han dado diamante en dique (Rex Diamond Mining Corporation, 2003); en afloramientos meteorizados y suelos adyacentes. Véanse las Fig. 3A y B.

Tomografía sísmica en vuelta de la Cuenca del Paraná, que se inicia con los trabajos de Escalante (2002), Rocha, (2003), Rocha, (2008) y que es sintetizado en Rocha *et al.* (2010) -evidenciaron la probable presencia de una espesa fría (S-wave) y empobrecida (o *depletada*) (P-wave) estructura cratónica en el Paraguay-Oriental. Presser (2011 y referencias) valiéndose de información sísmica (S-wave) en formato 1D y con apoyo



**Figura 4.** Tomografía sísmica (S-wave –a y P-wave en –b) según la línea W-W’ de la Fig. 2 entre el SE- Paraguay y el Craton Sao Francisco en el Brasil-E (datos de Rocha, *et al.*, 2011). Se trazan las inferidas configuraciones de los cratones Rio Apa y Sao Francisco. El Craton Rio de la Plata y el de Sao Francisco se posicionan encima de una espesa zona de alta velocidad (*blue-zone*). La litosfera sísmica por debajo de regiones cratónicas habitualmente se caracteriza como una porción anormalmente alta de velocidad desde la profundidad del Moho a 100-300 km (Lebedev, *et al.*, 2009; Eaton, *et al.*, 2009). En las figuras a y b se bosquejan los límites cratónico Rio Apa (como en la Fig. 2) y un valor aproximado de su raíz como indicado en Presser (2011).



**Figura 5.** Diamantes de Capiibary que fueron colectados por garimperos (1963-2011) en los arroyos Retama, Saiyú y Teby-pirí. Línea vertical en A (10 cristales) y B =1mm. Los cristales mostrados en C de entre 1 a 2 mm; notar aquí la presencia de inclusiones opacas de ambos cristales de la derecha. Generalidades en la Tabla 1.

de la tomografía sísmica aportada por Rocha *et al.* (2010) configura el basamento cratónico de la Cuenca del Paraná, reproducida en la Fig. 2. Presser (2011) a esta litosfera cratónica gruesa fría y empobrecida (Fig. 4) refirió como siendo el Cratón Río de la Plata y al mismo atribuyó una probable edad Arqueozoica.

## RESULTADOS

### Morfología de los diamantes

Más de una docena y media de diamantes de Capiibary se han estudiado; siendo de tamaño típicamente de entre 1 a ~2 mm, principalmente de coloración marrón pálido o incoloro, y entre ellos se observó 1 amarillo, 1 gris y 1 verde oliva (Fig. 5). La mayoría de los cristales son octaedros o formas de transición de octaedro-dodecaedro parcialmente reabsorbido. Se observaron también dos dodecaedros y un cristal con forma pseudo-hemimórfica (forma por lo general asociada con la derivación reciente de xenólitos del manto). Generalidades en la Tabla 1.

Algunos cristales muestran grietas (rajaduras rómbicas) (Fig. 6), por el desgaste durante el transporte fluvial o marino. Sin embargo, otras características de desgaste, como bordes con abrasión o puntos rotos están ausentes. Manchas verdes de daños por radiación son comunes, como a menudo visto en diamantes de zonas intemperizadas o aquellos observados

en zonas o de aluvión. Manchas marrones de radiación (Fig. 6) se observaron en un cristal, este fenómeno es tomado como producido por calentamiento resultante del metamorfismo de bajo grado. Generalidades en la Tabla 1.

La combinación de características observadas en los diamantes, tales como grietas rómbicas y manchas de radiación, especialmente aquellos marrones “metamorfosados”, pueden sugerir que algunos de los cristales se habrían reciclado a partir de sedimentos pretéritos (ver Ítem Ambiente Geológico) enterrados (que habrían sufrido efectos termales). Sin embargo, la ausencia de evidencia de fuerte desgaste en los bordes de los cristales podría sugerir que los diamantes de Capiibary no han sufrido transporte de larga distancia desde su fuente primaria kimberlítica o lamproítica.

### Ultravioleta & catodoluminiscencia

La influencia de los diversos procesos durante el desarrollo de un cristal de diamante es claramente visible en secciones pulidas (de los mismos) cuando observados en imágenes de cátodo-luminiscencia (CL) (Mendelssohn & Milledge, 1995).

Distintas imágenes de varios ejemplos de diamantes pulidos revelan la morfología interna; los detalles de su formación que pueden estar complicadas por el crecimiento y varias etapas de reabsorción y períodos de deformación plástica (Bulanova, 1995; Taylor & Anand, 2006; Spetsius & Taylor, 2008). La CL ha demostra-

do ser una herramienta valiosa petrográfica y ha sido utilizado por muchos investigadores para poner en claro la historia de crecimiento de los diamantes (Taylor & Anand, 2006 y sus referencias).

Las propiedades luminiscentes se revelan cuando una muestra emite radiación no térmica después de la excitación por alguna forma de energía, especialmente por electrones de alta energía a partir de un tubo de rayos catódicos, produciendo de ese modo imágenes luminiscentes. La mayoría de la CL se produce "cerca de la superficie" en la máxima profundidad de penetración del haz en la muestra (~1 mm). La intensidad del espectro emitido depende de la profundidad a la cual la CL se genera, es decir, de la energía inicial del haz, y la medida en que la absorción interna tiene lugar antes de la emisión en la superficie (Taylor & Anand, 2006).

Las impurezas y daños por radiación son ambos activadores extrínsecos de CL que contribuyen a la variación de las propiedades luminiscentes de diamantes o de cualquier otro mineral. Con los defectos estructurales y con la concentración de impurezas activadoras, generalmente la intensidad de CL aumenta. El diamante natural es raramente puro, y por lo tanto, generalmente muestra un cierto grado de CL debido a la presencia de impurezas, en particular nitrógeno. Con el reconocimiento de que el diamante puede tener zonación compleja basada en su distribución de nitrógeno se dio inicio a la aplicación de la CL para investigar la

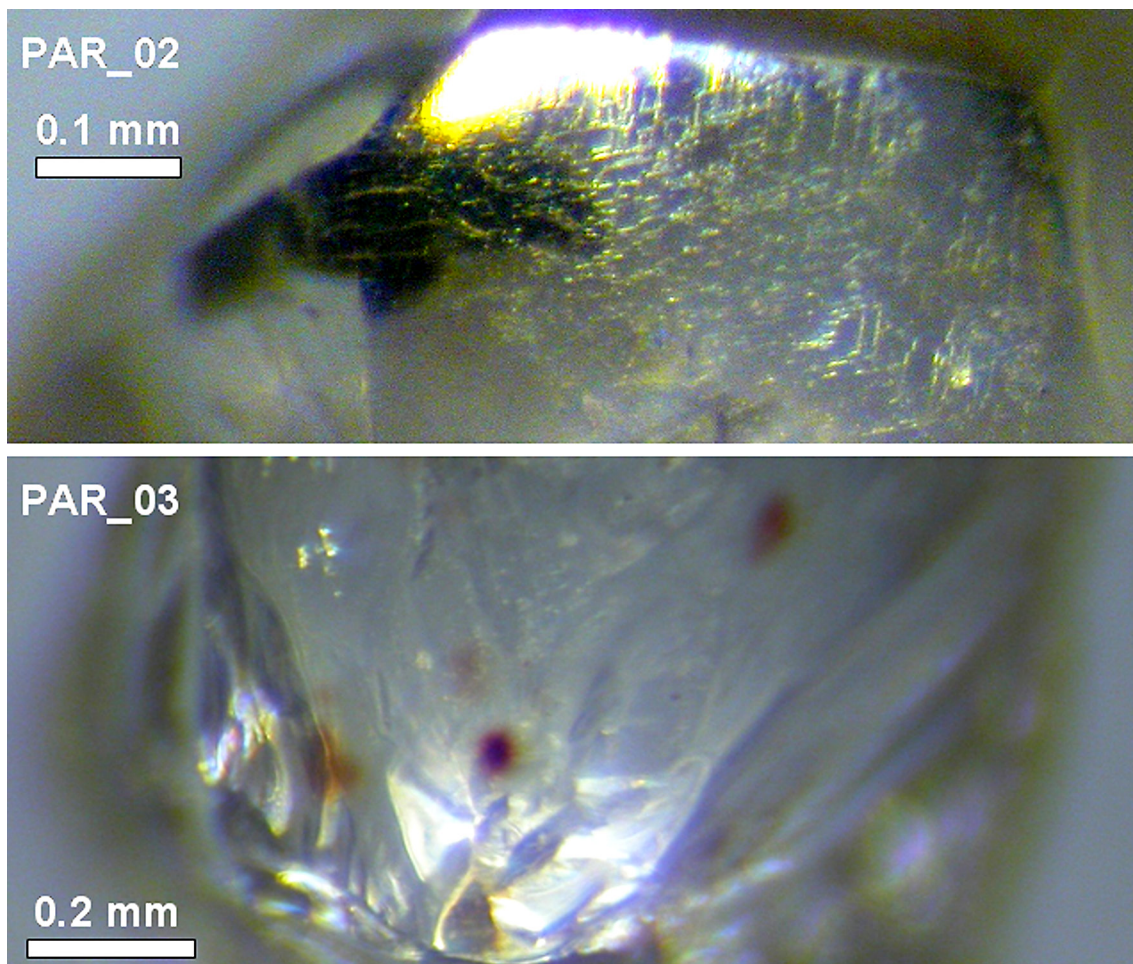
estructura interna del diamante (e.g., Bulanova, 1995 y referencias como también; Taylor & Anand, 2006 y sus referencias).

Al pulir diamantes, por ejemplo para revelar las inclusiones minerales en la superficie de los mismos, es que se puede determinar las edades relativas de formación de las inclusiones minerales presentes. De esta manera, siendo posible rastrear la naturaleza del ambiente químico y mineralógico durante los diversos intervalos de tiempo del crecimiento del diamante. En el caso de que un diamante haya crecido con una velocidad constante siempre en el mismo ambiente químico, mostraría un crecimiento en estratos y así la investigación de las zonas de CL en los diamantes sería algo similar al examen de los "anillos de crecimiento de los árboles", ya que reflejan el crecimiento progresivo y eventos asociados al mismo según consta en los sucesivos anillos. Estos patrones de CL son referidos comúnmente como la "estratigrafía" de un diamante (Taylor & Anand, 2006 y referencias). Las diferentes etapas de crecimiento del diamante suelen ir acompañadas de cambios marcados en la zonación que se pueden identificar fácilmente mediante imágenes de CL confeccionados en cristales seccionados y pulidos (Bulanova, 1995; Spetsius & Taylor, 2008; entre otros). La variación en la intensidad de la señal como una función de diferentes formas de defectos de nitrógeno y formas de sustitución es actualmente no bien entendida, por lo tanto, la aplicación de CL a la morfología interna del diamante es en

**Tabla 1.** Base de datos de diamantes de Capiibary.

Localidad	Paraguay (Capiibary)	Paraguay (Capiibary)	Paraguay (Capiibary)	Paraguay (Capiibary)	Paraguay (Capiibary)	Paraguay (Capiibary)	Paraguay (Capiibary)	Paraguay (Capiibary)	Paraguay (Capiibary)	Paraguay (Capiibary)
D#	PAR_01	PAR_02	PAR_03	PAR_04	PAR_05	PAR_06	PAR_07	PAR_08	PAR_09	PAR_10
Color	Marrón	Marrón	Amarillo	Incoloro	Incoloro	Marrón	Incoloro	Marrón	Marrón	Verde oliva
Forma	Lamina intercrecidas Octaedro; sí agregación	Dodecaedro	Agregado octa-dodec.	Reabsorbido fracturado agregado octa.	Agregado octa-dodec	Fracturado, Fragmento (? Macia) octa-dodec	Dodecaedro roto	Fragmento roto Reabsorbido de Octa	Agregado roto de Octa	Octa-dodec reabsorbido
Características de superficie	Reforzado en capas	Brillante, con rajaduras róbicas	Brillante, marrón, radiation spots	Brillante	Brillante	Brillante, rajaduras róbicas		Brillante como si abrilantado, trígono, zona de radiación verde	Reforzado en capas, Brillante	Intensos puntos de radiación verde, superficie ondulada (beaten pewter effect)
Fracturas	Nada	Alrededor de inclusiones	1 pequeña alrededor de la inclusión	Interno & externo	Interno & externo	Interno & externo	Nada	Nada	Nada	Nada
UV	De color amarillo brillante, con el punto azul en el interior	Azul, en el interior inhomogéneo, amarillo	Amarillo brillante	Azul brillante	Azul claro, no homogéneo	Azul brillante	Azul brillante	Opaco, lechoso amarillo por dentro y por fuera azul	Azul	Azul débil
Tamaño (mm)	1	1	1.3	1.9	1.5	1.4	1.4	1.5	1.6	1
Estructura interna CL-pol. Ds	Octaedro	Sectorial - octaedro	Homogéneo	Inter-crecido	Octaedro	Octa - dodec.	blocky - Octa	blocky	Oct fragm; pl def.	Octaedro





**Figura 6.** Grietas rómbicas, una característica que muestra que el cristal sufrió abrasión, observado en el diamante PAR-02, mientras que PAR-03 muestra manchas marrones de radiación. Generalidades en la Tabla 1.

gran parte cuantitativo. Centros de luminiscencia también pueden formarse en respuesta al daño por radiación y deformación. Mediante la CL planos de deslizamiento son visibles en los diamantes que han sido objeto de deformación plástica, mientras que las pruebas de deformación frágil y subsiguiente reconocimiento es observado generalmente como regiones brechadas en los cristales afectados (Bulanova, 1995; Hutchison, 1997; Taylor & Anand, 2006; Spetsius & Taylor, 2008).

Los diamantes de Capiibary, al ser examinados bajo la luz ultravioleta presentan luminiscencia azul o en ocasiones amarilla ello reflejo, probablemente, de la presencia de los

centros de N3 (Tabla 1). A su vez, CL en las placas pulidas de los diamantes a lo largo de planos cristalográficos dodecaédricos ilustran un crecimiento con zonificación interna regular octaédrica. Así por ejemplo el PARA\_02 –pauta un crecimiento sectorial – octaédrico, donde se observa claramente que el núcleo denota crecimiento sectorial cubo-octaédrico rodeado de zonificación regular octaédrica/octaédrico-sectorial seguida por reabsorción final. En el centro se observa una inclusión de olivino que actuaría como una semilla de nucleación. El tipo de estructura interna en otros cristales son sintetizados en la Tabla 1; y que también son expuestos en las fotos de la Fig. 7 A y B.

### Inclusiones minerales

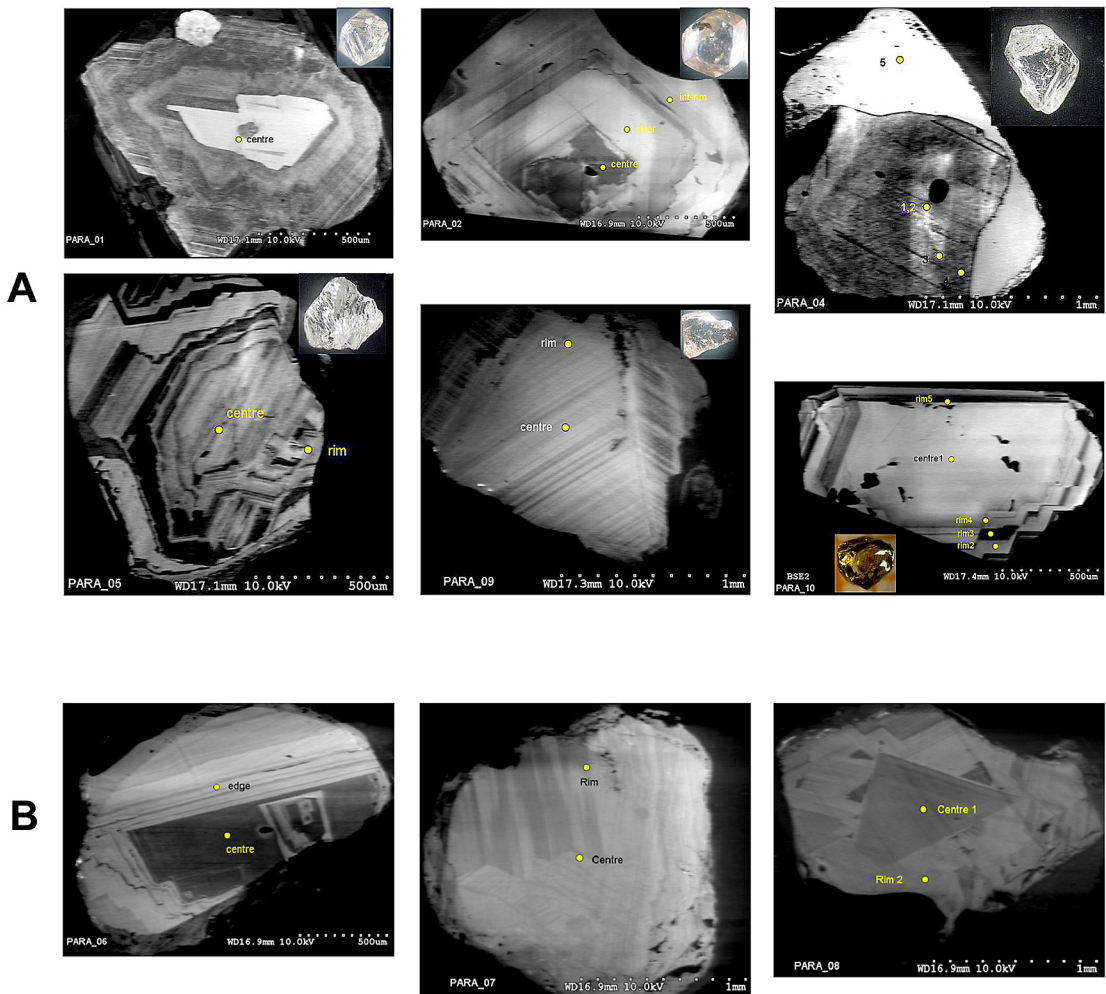
Inclusiones minerales encontradas hasta la fecha en los diamantes de Capiibary son enteramente de olivinos altamente forsteríticos ( $\text{Fo}_{92-94}$ ). Los análisis de microsonda electrónica en los olivinos se dan en la Tabla 2 y son mostrados en la Fig.-8. Este alto contenido de forsterita es indicativo de que ellos se habrían formado a partir de manto litosférico Arcaico de composición harzburgítica o lherzolítica-empobrecida (Boyd,

1989; Nowick *et al.*, 2007; Pearson & Nowell, 2002; Pearson & Wittig, 2008).

Las inclusiones de olivino muestran morfología impuesta por el hospedante diamante, que, junto con la ausencia de cualquier grieta que lo rodee, implica un origen singenético para las referidas inclusiones.

### Espectroscopia de infrarrojos

Para determinar el tipo de un diamante, se debe



**Figura 7.** Imagen de catodoluminiscencia de la sección central de los cristales de diamantes a través del sector dodecaedro en PARA\_01 (con crecimiento octaédrico), PARA\_02 (con crecimiento sectorial - octaédrico), PARA\_04 (intercrecimiento), PARA\_05 (con crecimiento octaédrico), PARA\_09 (con crecimiento octaédrico Fragma; pl def) y PARA\_10 (con crecimiento octaédrico) (A), así como PARA\_06 (con crecimiento octaédrico-dodecaedrico), PARA\_07 (con crecimiento bloque - octaédrico) y PARA\_08 (con crecimiento en bloque) (B). Los puntos amarillos en las fotos marcan los sitios donde se realizaron los análisis de FTIR.

**Tabla 2.** Análisis de microsonda electrónica en los olivinos de los diamantes de Capiibary.

<b>Diam #</b>	<b>Par-02</b>	<b>Par-03-incl.1</b>	<b>Par-03-incl.2</b>	<b>Par-04</b>	<b>Par-06</b>
SiO <sub>2</sub>	42.02	41.42	41.67	41.11	42.10
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.03	0.01	0.01	0.04	0.03
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.07	0.02	0.00	0.05	0.09
FeO	6.25	7.04	6.94	7.53	5.99
MnO	0.09	0.09	0.09	0.09	0.07
MgO	51.05	50.85	51.07	50.40	51.38
CaO	0.01	0.00	0.01	0.05	0.03
Na <sub>2</sub> O	0.00	0.02	0.01	0.03	0.00
K <sub>2</sub> O	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00
NiO	0.37	0.42	0.36	0.38	0.32
<b>Total</b>	<b>99.90</b>	<b>99.88</b>	<b>100.15</b>	<b>99.70</b>	<b>100.01</b>
<b>Mg#</b>	<b>0.936</b>	<b>0.928</b>	<b>0.928</b>	<b>0.923</b>	<b>0.939</b>
<b>Paragénesis</b>	<b>Harz</b>	<b>Lherz /harz</b>	<b>Lherz/harz</b>	<b>Lherz/ harz</b>	<b>Harz</b>

poseer la capacidad de poder detectar y medir las impurezas contenidas en los diamantes. El método más común es *Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR)*. Respecto al *FTIR*, Breeding & Shigley (2009) escriben:

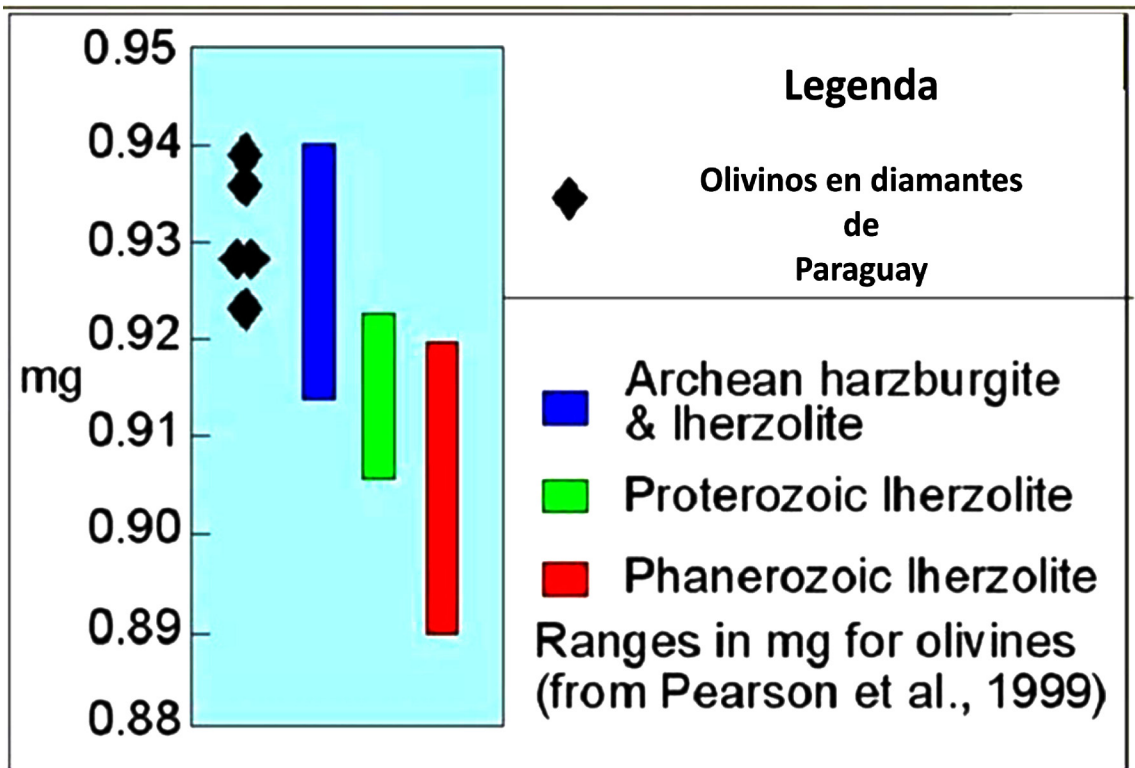
*“En términos sencillos, el análisis FTIR implica el envío de una haz de radiación infrarroja (IR) a través de un diamante y medir cuánto de él es absorbido (y en qué longitudes de onda). Las interacciones entre las configuraciones de las impurezas del nitrógeno (N) y boro (B) y los átomos de carbono (C) alrededor causan rasgos distintivos en la región IR del*

*espectro electromagnético, es decir, cada tipo de relación con el tipo N (Tipo-Ia y Tipo-Ib) y la impureza de B provoca una absorción específica y única en la banda o en las bandas. Los retículos de diamantes en sí producen también rasgos característicos de absorción, de modo que la espectroscopia FTIR puede identificar una muestra de diamante, y al mismo tiempo, revelar los tipos y cantidades de impurezas presentes. Para realizar y discutir la detección de impurezas utilizando FTIR, lo primero que se debe describir son los detalles del espectro FTIR en los diamantes (Fig. 6, pag. 103 en el*

trabajo de los citados autores). *Considerando que el nanómetro (nm) se da a menudo como unidades de longitud de onda en el rango ultra violeta y en el espectro visible electromagnético, la gama de IR se describe usualmente en términos de los números de onda ( $\text{cm}^{-1}$ , para convertir entre unidades:  $10^7 / [\text{longitud de onda en nm}] = [\text{número de onda en } \text{cm}^{-1}]$ ). Los diamantes muestran características importantes de absorción en el rango IR medio (aproximadamente  $4000\text{-}400 \text{ cm}^{-1}$ ). Para el diamante, esta gama se divide en tres zonas conocidas como las regiones- fonón I, II y III -basado en cómo los enlaces químicos, entre los átomos de carbono (y cualquier impureza) dentro del retículo del diamante, vibre cuando se exponen a la energía de IR'' ( $0 - 1500 \text{ cm}^{-1}$ ,  $1500 - 2700 \text{ cm}^{-1}$  y  $2700 - 3900 \text{ cm}^{-1}$  en Massi, 2008; ver también Taylor*

& Anand, 2006; Spetsius & Taylor, 2008). La Fig.-7, pag. 104 en el trabajo de Breeding & Shigley (2009) muestra estas regiones, tanto para diamantes Tipo-I como los del Tipo-II.

En Taylor & Anand (2006) se comenta que el uso de FTIR permite detectar las variaciones en los estados de agregación del N. Donde los diamantes tipo Ib dominan por medio de simple sustitución individual (C-centro) de los defectos; tipo de diamante presentes en los cubo-octaédricos de origen sintético. En la naturaleza, defectos de C-centro son comunes en los diamantes derivados de rocas metamórficas de ultra alta presión. Estos defectos se circunscriben principalmente a sobre-crecimientos fibrosos (capas) y a cristales con hábito cúbico. Existe relativa escasez de diamantes naturales de tipo Ib en depósitos derivados de kimberlitas y esto



**Figura 8.** Los diamantes de Capiibary poseen enteramente olivinos altamente forsteríticos ( $\text{Fo}_{92-94}$ ). En la figura se puede claramente notar como las olivinas de Capiibary ocupan un rango coincidente con olivinos harzburgíticos a lherzolíticos (depletados) Archeozoicos. Este alto contenido de forsterita es indicativo de que ellos se habrían formado a partir de manto litosférico Arcaico de composición harzburgítica o lherzolítica empobrecida (Boyd, 1989; Nowick *et al.*, 2007; Pearson & Nowell, 2002; Pearson & Wittig, 2008).

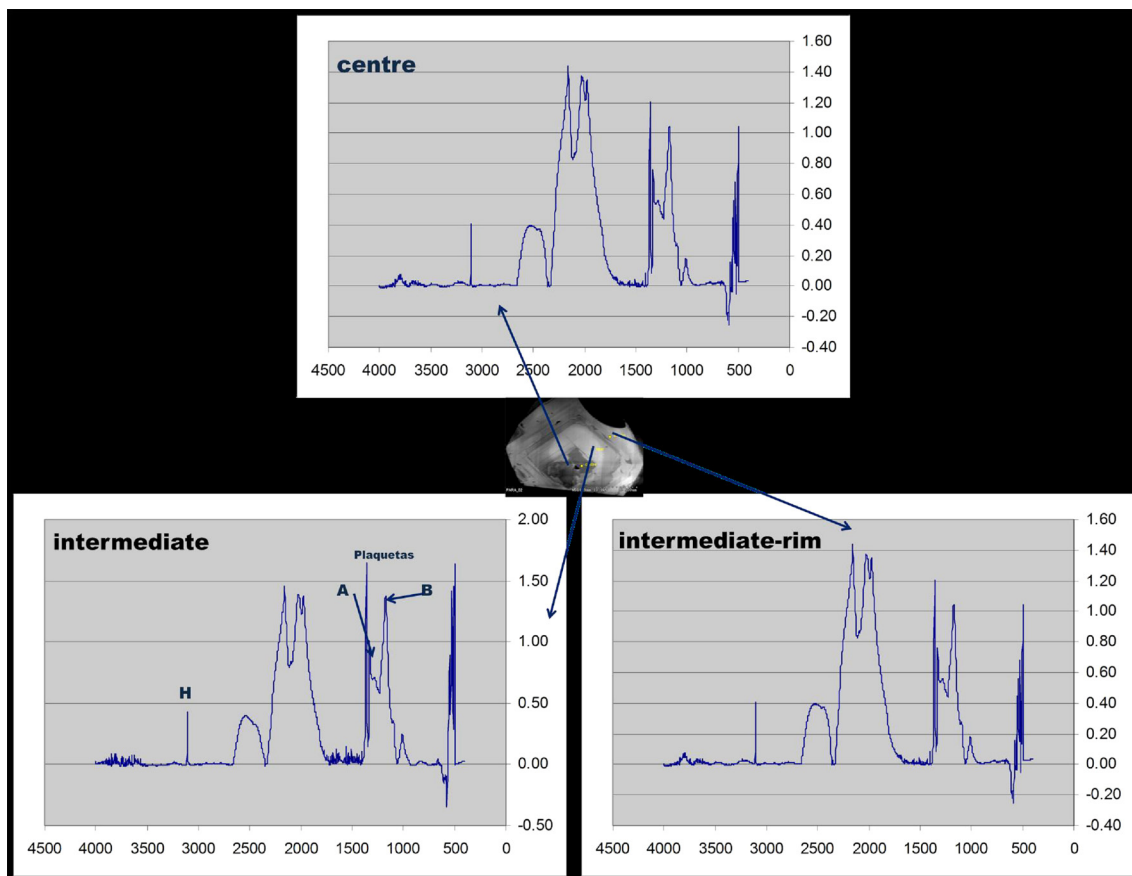


Figura 9. Espectro infrarrojo típico de los diamantes, Tipo-I, de Capiibary, *centre -intermédiaire a rim*, en PAR\_02.

se debería a la necesidad de una baja energía de activación para sustituir los individuales defectos-C a defectos de nitrógeno en (forma de) agregados. El agregado de nitrógeno se cree que es un proceso cinético, que se amplifica en virtud del aumento de las temperaturas. Por lo tanto, la preservación de los puntos de defectos Ib en cualquier diamante requiere una región de fuente fría y/o un intervalo de residencia corto antes de su emplazamiento en la superficie. Con el tiempo de residencia prolongado en el manto y/o a mayores temperaturas del manto a las estimadas para los del tipo Ib, la sustitución simple de los átomos de N progresivamente agrega y desarrolla defectos de tipo Ia pareados (i.e. aumenta el grado de agregación). Defectos de nitrógeno-par (A-defectos), es decir, dos átomos de nitrógeno en sitios de la red adyacentes,

definen diamantes del tipo IaA. De esta forma, la agregación resulta en cuatro átomos de nitrógeno dispuesto en coordinación tetraédrica con un sitio vacante de carbono en el centro (B-defectos), así produciendo diamantes de tipo IaB. En un alto grado de agregación, plaquetas sólidas de nitrógeno (?) se exsolucionan del diamante a lo largo de los planos  $\{111\}$ . La presencia de nitrógeno en diamante da lugar a espectros de absorción característica en el infrarrojo (IR) a lo largo de la región de longitud de onda  $1400-1000\text{ cm}^{-1}$ . Centros de tipos C, A y B generan picos de absorción a longitudes de onda específicas para cada defecto, de modo que el grado de agregación puede ser determinado (por ejemplo, Mendelssohn & Milledge, 1995). De acuerdo con Breeding & Shigley (2009) concentraciones variables de los agregados de

A y B, junto con la sustitución única de N crea un continuum de intensidades de picos en esta región ("plaquetas"). Así también, ver otros comentarios en el Ítem Introducción.

Taylor *et al.* (1990, 1995; Comentado en Taylor & Anand, 2006) y Taylor & Milledge (1995) han utilizado el grado de agregación del nitrógeno en el diamante en un intento por circunscribir el tiempo de residencia del diamante en el manto (presumiendo una temperatura dada) o deduciendo la temperatura, suponiendo un tiempo de residencia dado. A este respecto, se puntualiza que el grado de agregación del N aumenta con el tiempo (y la temperatura) según

este simple esquema: (grado de agregación menor) Ib→IaA (defecto A) →IaB (defecto B) →Ia (grado de agregación mayor).

En los diamantes de Capiibary, la FTIR muestra fuertes picos de hidrógeno para muchos de los cristales (Fig. 9, Tabla 3); siendo que en ellos la deconvolución espectral pauta un contenido de N típicamente alrededor de 200-300 ppm, con agregados IaA-IaB en el que el componente de IaB generalmente es predominante (i.e. alto grado de agregación)(Tabla 3). Las plaquetas a menudo están bien desarrolladas, por ejemplo, Fig. 8 (PAR\_02, mostrado en la Fig. 7). La Fig. 10 muestra las características del diamante Tipo-II (PAR\_04, mostrado en la Fig. 7).

**Tabla 3.** Diamantes de Capiibary - contenido de N, su estado de agregación y la presencia de H a partir de FTIR.

Diamante	N ppm	%IaB	H pico
Par-01 centro	48	56	V. alto
Par-02 centro	325	89	V. alto
Par-02 intermedio	391	90	V. alto
Par-02 int-borde	197	84	V. alto
Par-04 centro	Tipo II	0	Traza
Par-04 borde	Tipo II	0	Traza
Par-05 centre	63	83	Alto
Par-05 bode	244	42	Alto
Par-06 centro	194	57	Alto
Par-06 borde	206	57	nd
Par-07 centro	825	52	nd
Par-07 borde	810	52	nd
Par-08 centro	226	49	Bajo
Par-08 borde	306	56	Bajo
Par-09 centro	659	70	Traza
Par-09 borde	328	56	Bajo
Par-10 centro	187	49	Bajo
Par-10 borde 4	209	60	Bajo
Par-10 borde 5	213	52	Alto

En común con diamantes frecuentemente colectados en una litosfera peridotítica empobrecida de edad Arcaica se asume una edad de 3,2 Ga (o 3200 Ma.) para que se pueda utilizar en los ensayos de interrelaciones de tiempo/temperatura/estado de agregación de nitrógeno. Teniendo en cuenta la edad predominante de los intrusivos de rocas ígneas alcalinas del Cretácico en Paraguay y de kimberlitas en el vecino país de Brasil, un tiempo de residencia del manto de 3,1 Ga (o 3100 Ma.) se ha previsto en estas interrelaciones (Fig. 11), produciendo temperaturas de formación de diamante alrededor de 1140-1170°C que serían razonables para diamantes derivados de un manto lithosférico peridotítico.

## DISCUSIÓN

Las estructuras de zonificación dentro de los diamantes de Capiibary, observadas en conjunto o individualmente (Fig. 7), donde la mayoría muestran simple crecimiento regular octaédrico (i.e., zonificación interna regular octaédrica, octaedro-dodecaedro, sectorial-octaedro, *blocky*-octaédrico, principalmente), denotarían características primarias de crecimiento predominantemente similares a los descritos en diamantes provenientes de un manto lithosférico (Bulanova, 1995; Bulanova *et al.*, 1995; Bulanova *et al.*, 1998; Spetsius & Taylor 2008; otros).

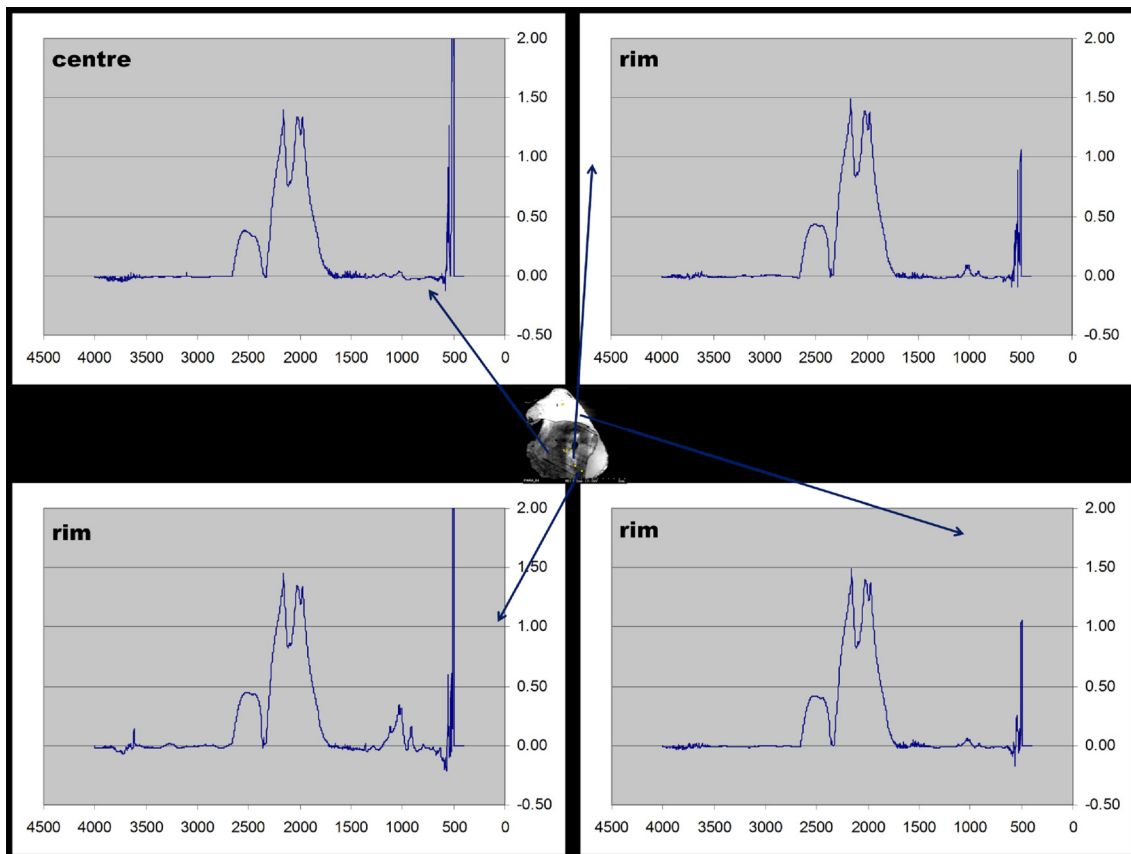


Figura 10. Espectro infrarrojo típico del diamante, Tipo-II, de Capiibary, *centre -intermédiaire a rim*, en PAR\_04.

En los diamantes estudiados de Capiibary no se reconocieron estructuras internas propias de diamantes sublitosféricos tales como estructuras-complejas, estructuras de evento-múltiples, estructuras frecuentemente-policéntricas, etc. similares a las descritas en los diamantes de Juina (Brasil) por Araújo *et al.* (2012); Hutchinson (1997); Hayman *et al.* (2005); otros.

En los diamantes que fueron analizados cuatro de ellos han permitido el análisis de sus inclusiones minerales, -olivinos que son muy ricos en moléculas de forsterita ( $\text{Fo}_{92-94}$ ) (los que muestran morfología impuesta por el hospedante diamante, y que, junto con la ausencia de cualquier grieta que lo rodee, queda indicado un origen singenético). Estas inclusiones sugieren, como indicado en la Fig. 8, origen a partir de un manto litosférico Arcaico de composición

harzburgítica o lherzolitica-empobrecida, (al respecto ver Nowick *et al.*, 2007 y los trabajos ya citados en el Ítem Inclusión Mineral). Pertinentemente indicado por Taylor & Anand (2006), el uso de *FTIR* permite detectar las variaciones en los estados de agregación del N.

En los diamantes de Capiibary, la *FTIR* muestra fuertes picos de hidrógeno y permite al realizar la deconvolución espectral observar un contenido de N típicamente alrededor de 200-300 ppm, con agregados IaA-IaB en el que el componente de IaB generalmente es predominante (i.e. alto grado de agregación). Grado de agregación del N indicativo de un tiempo de permanencia considerable en el manto litosférico, como se deduce de las premisas de Taylor *et al.* (1990, 1995; Comentado en Taylor & Anand, 2006) y Taylor & Milledge (1995).

Llevando en consideración las indicaciones sugeridas por el estudio de la estructura interna, tipo de inclusión mineral encontrado y las variaciones en los estados de agregación del N en los diamantes de Capiibary, en común con diamantes frecuentemente colectados en una litosfera peridotítica empobrecida de edad Arcaica, fue asumida una edad de 3,2 Ga, para que se pueda utilizar en los ensayos de interrelaciones de tiempo/temperatura/estado de agregación de nitrógeno.

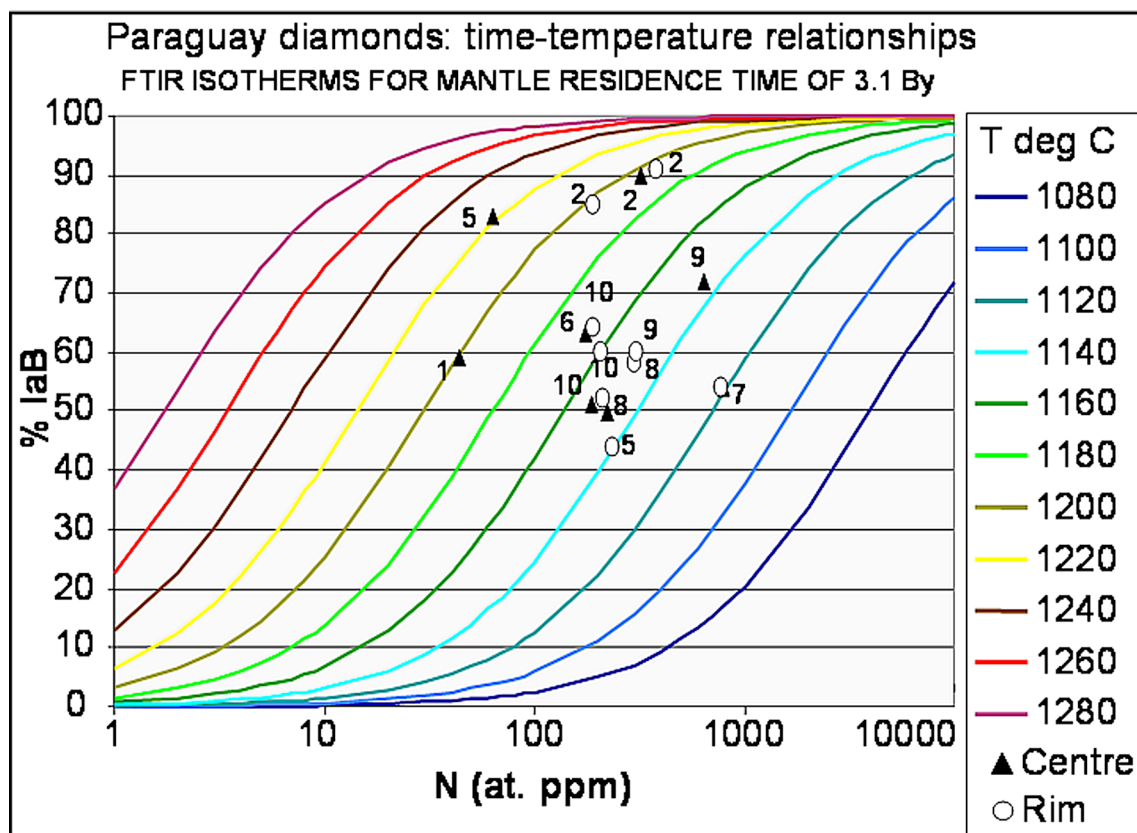
Luego, teniendo en cuenta la edad predominante de los intrusivos de rocas ígneas alcalinas Cretácicas en Paraguay y de kimberlitas en el Brasil, un tiempo de residencia del manto de 3,1 Ga se ha previsto en estas interrelaciones, produciendo temperaturas de formación de diamante alrededor de 1140-1170°C, como es mostrado en la Fig. 11. Temperaturas que serían razonables

para diamantes derivados de un manto litosférico peridotítico.

La tomografía sísmica (Rocha *et al.*, 2010 y referencias) y los datos sísmicos en perfiles 1D- $V_s$  (Presser, 2011), sugieren que la secuencia sedimentaria perteneciente a la Cuenca del Paraná en Capiibary está sustentada por una litosfera cratónica gruesa fría y empobrecida (como mostrados en la Fig. 4). Litosfera cratónica que Presser (2011) entiende como siendo el Craton Río de la Plata y al que atribuyo una probable edad Arqueozoica.

Así se puede notar como los datos discutidos relevantes a las interpretaciones sobre los diamantes de Capiibary se hacen consistentemente armónicos.

Finalmente cabe mencionar que junto a este ambiente cratónico, de probable edad Arqueozoica, en el Paraguay-Oriental y, mas



**Figura 11.** Interrelaciones de tiempo-temperatura para los diamantes de Capiibary en el manto, para una residencia de tiempo asumida de de 3,1 billones de años. Nos. 1-10 son número de muestras de diamantes de Capiibary.



específicamente en los alrededores de la ciudad de Capiibary (Fig. 1 a 3), garimperos separaron del lecho de arroyos que bañan a sedimentos de la Formación Misiones (ver Ítem Ambiente Geológico) diamantes. Diamantes que como ya comentado fueron estudiados en este trabajo; y en ellos la combinación de características observadas, tales como grietas rómbicas y manchas de radiación, especialmente aquellos marrones “metamorfosados”, pueden sugerir que algunos de los cristales se habrían reciclado a partir de, los anteriormente mencionados, sedimentos pretéritos enterrados (que habrían sufrido efectos termales). Sin embargo, la ausencia de evidencia de fuerte desgaste en los bordes de los cristales podría sugerir que estos diamantes no han sufrido transporte de larga distancia desde su fuente primaria kimberlítica o lamproítica.

### CONCLUSIONES

A partir de sus características de abrasión y manchas de radiación se concluye que los diamantes aluviales de Capiibary, al menos en parte, pueden sugerir que algunos de los cristales se habrían reciclado a partir de sedimentos pretéritos enterrados (que habrían sufrido efectos termales), a pesar de todo, la falta de características fuertes de desgaste sugieren que la distancia de transporte no fueron muy largas y así todavía se deduce que la distancia de viaje desde la fuente kimberlítica o lamproítica principal debió ser muy corta. En cuatro de los diamantes aluviales de Capiibary estudiados los altos valores de forsterita de las inclusiones de olivino sugieren un origen a partir de un manto litosférico (harzburgítico -mayormente, o lherzolítico -menormente) empobrecido, que estaría en consonancia con la evidencia de tomografía sísmica de un manto cratonico frío y empobrecido por debajo de la litosfera del Paraguay-Oriental. Las relaciones de tiempo y temperatura determinados a partir de las características de agregación de nitrógeno encajarían dentro del rango normal de temperaturas de formación del diamante en un manto litosférico, si una edad Arcaica se asume para la

raíz (del manto litosférico). Por tanto, es posible que lamprofidos ultramáficos, kimberlitas, o lamproítas puedan estar asociadas con las rocas volcánicas alcalinas generalizadas en el sudeste de Paraguay (Presser, 1998) y así ellas tratarse de las posibles hospedantes primarias volcánicas de los diamantes de Capiibary.

### REFERENCIAS

- Araújo, D.P., G.P. Bulanova, M.J. Walter, S.C. Kohn, C.B. Smith, J.C. Gaspar & Wang. 2012. Juina-5 kimberlite (Brazil): a source of unique lower mantle diamonds. 10<sup>th</sup> International Kimberlite Conference Extended Abstract No. 10IKC-36. 10IKC-198.
- 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.
- Breeding, C.M. & J.E. Shigley. 2009. The “Type” Classification System Of Diamonds And Its Importance In Gemology. *Gems & Gemology*, 45(2): 96-111.
- Boyd, F.R. 1989. Compositional distinction between oceanic and cratonic lithosphere. *Earth and Planetary Science Letters*, 96: 15-26.
- Bulanova, G.P. 1995. The formation of diamond. *Journal of Geochemical Exploration*, 53: 1-23.
- Bulanova, G.P. & H.I. Milledge. 1995. Origin and history of growth of macrodiamonds from Yakutian kimberlites. 6th Int. Kimb. Conf, Novosibirsk, Extended Abstract, 77-79.
- Bulanova, G.P., W.L. Griffin & C.G. Ryan. 1998. Nucleation environment of diamonds from Yakutian kimberlites. *Mineralogical Magazine*, 62(3): 409-419.
- Cavallaro, T. R. 2008. Caracterização Física, Mineralógica e Gemológica De Diamantes Coloridos Da Coleção Do Museu De

- Geociências. Disert. Msc., IG-USP, Sao Paulo, 142 p.
- Eaton, D.W., F. Darbyshire, R.L. Evans, H. Grütter, A.G. Jones & X. Yuan. 2009. The elusive lithosphere–asthenosphere boundary (LAB) beneath cratons. *Lithos*, 109: 1-22.
- Escalante, C. 2002. Tomografía sísmica do manto superior sob o sudeste e centro oeste do Brasil. MSc. Tesis. IAG/USP, São Paulo, Brasil.
- Gibson, S.A., R.N. Thompson & J.A. Day. 2006. Timescales and mechanisms of plume–lithosphere interactions:  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  geochronology and geochemistry of alkaline igneous rocks from the Paraná–Etendeka large igneous province. *Earth and Planetary Science Letters*, 251: 1-17.
- Gomes, C.B., P. Comin-Chiaramonti, V.F. Velazquez & D. Orué. 1996. Alkaline magmatism in Paraguay: a review, pp. 31-56, *in*: Comin-Chiaramonti, P. & C.B. Gomes (eds) Alkaline magmatism in central-eastern Paraguay. Relationships with coeval magmatism in Brazil. Edusp/Fapesp, Sao Paulo.
- Hayman, P.C., M.G. Kopylova & F.V. Kaminsky. 2005. Lower mantle diamonds from Rio Soriso (Juina area, Mato Grosso, Brazil). *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 149(4): 430-445.
- Hutchison, M.T. 1997. Constitution of the deep transition zone and lower mantle shown by diamonds and their inclusions. PhD Thesis, University of Edinburgh.
- Lebedev, S., J. Boonen & J. Trampert. 2009. Seismic structure of Precambrian lithosphere: New constraints from broad-band surface-wave dispersion. *Lithos*, 109: 96-111.
- Massi, L. 2006. Étude des défauts dans les diamants bruns et les diamants riches en hydrogène. Ph.D. Thesis. Université de Nantes, Faculté des Sciences et des Techniques, Nantes, France, 63 p.
- Mendelssohn, M.J. & H.J. Milledge. 1995. Geologically significant information from routine analysis of the mid-infrared spectra of diamonds. *International Geology Review* 37: 95-110.
- Mendelssohn, M.J. & H.J. Milledge. 1995. Morphological characteristics of diamond populations in relation to temperature-dependent growth and dissolution rates. *International Geology Review*, 37: 285-312.
- Nowick, T.E, R.O. Moore, J.J. Gurney & M.C. Baumgartner. 2007. Diamonds and associated heavy minerals in kimberlite: a review of key concepts and applications. *Developments in Sedimentology*, 58: 1235-1267.
- Pearson, D.G., & G.M. Nowell. 2002. The continental lithospheric mantle: characteristics and significance as a mantle reservoir. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 360(1800): 2383-2410.
- Pearson, D. G. & N. Wittig. 2008. Formation of Archaean continental lithosphere and its diamonds: the root of the problem. *Journal of the Geological Society*, 165: 1-20.
- Presser, J.L.B., 1998. Mineralogical facies of Mesozoic lamprophyric rocks of Central Alkaline Province, Eastern Paraguay. Ph.D. Thesis, IG-USP, Sao Paulo.
- Presser, J.L.B. 2011. Distinción Sismológica entre el manto Arqueozoico y el Proterozoico: la raíz de la litosfera bajo la Cuenca del Paraná, América del Sur. *Reportes Científicos de la Facen*, 2(1): 45-72.
- Presser, J.L.B. & N.V. Vladykin. 1999. Consideraciones sobre los Lamproitos del Campo Ybytyruzú, Dpto. Del Guairá, Paraguay Oriental. *Jornadas Científicas sobre la Geología del Paraguay*, 1999. Dpto. Geología/FACEN/UNA. & Drec. Recursos Minerales/SME/MOPC.
- Presser, J.L.B., N.V. Vladykin & W. Iwanuch. 2000. Lamproites of the Ybytyruzú Field,

- Guairá Department, Eastern Paraguay. Abstract of the 31st International Geological Congress. Rio de Janeiro: SBG, 2000. p. 1-1.
- Presser, J.L.B., M. Molinas Gini, O. Franco González, J.M. Céspedes Allende & J. Cantero Cantero. 2013. Paraguay: una nación diamantífera. *Boletín del Museo Nacional de Historia Natural del Paraguay*, 17(1): 5-19.
- Rex Diamond Mining Corporation. 2003. Diamond discoveries in Paraguay - New finds in Mauritania - Joint Venture with Jindal in India - Resumption of operations in South-Africa. <http://www.rexmining.com/>.
- 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, Sao Paulo-Brasil.
- Rocha, M.P., M. Schimmel & M. Assumpcao. 2011. Upper-mantle seismic structure beneath SE and Central Brazil from P- and S-wave regional traveltimes tomography. *Geophysics Journal International*, 184, 268-286.
- Smith, C.B., G.P. Bulanova & J.L.B. Presser. 2012. Diamonds From Capiibary, Paraguay. 10<sup>th</sup> International Kimberlite Conference Extended Abstract No. 10IKC-36.
- Spetsius, Z.V., & L.A. Taylor. 2008. Diamonds of Yakutia: Photographic Evidence for their Origin. *Tranquility Base Press Lenoir City, Tennessee USA*. 288p.
- Stachel, T. & J.W. Harris. 2008. 'The origin of cratonic diamonds - constraints from mineral inclusions'. *Ore Geology Reviews*, 34(1-2): 5-32.
- Taran, M.N., V.M. Kvastnitsa, K. Langer & K.O. Ilchenko. 2006. Infrared spectroscopy study of nitrogen centres in microdiamonds from Ukraine Neogene placers. *European Journal of Mineralogy*, 18:71-81.
- Taylor, L.A., & M. Anand. 2004. Diamonds: time capsules from the Siberian Mantle, *Chemie der Erde* 64: 1-74.
- Vladykin, N.V., J.L.B. Presser & W. Iwanuch. 2000. Find lamproite rocks groups in Paraguay. *Anales de XIX Seminario de Geoquímica de Rochas Magmáticas*, Moscú: Instituto de Geoquímica y Química Analítica Vernadskiy. p. 36-36.