

APLICACIÓN DE MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO PARA LA CARACTERIZACIÓN DE LOS DIAMANTES DE LA REGIÓN DE SANTA ELENA UAIRÉN.

José A. Newman F.^{a,b*}; Daniela Texeira C. de Newman^{a,b}; Antonio L. Gandini^a; Newton Sousa G.^a

^aUniversidad Federal de Ouro Preto; Ouro Preto-Minas Gerais, Brasil.

^bUniversidad Federal de Espirito Santo; Vitoria-Espirito Santo, Brasil

*Autor de correspondencia: newman@degeo.ufop.br

Recibido: Agosto 2008. Aprobado: Julio 2009.

Publicado en línea: Agosto 2009.

RESUMEN

La caracterización mineralógica consistió en el estudio de 458 cristales de diamantes entre las variedades gemológica e industrial, provenientes de la región de Santa Elena de Uairén, específicamente de los placeres aluvionales localizados en los ríos Icabará y Uaiparú. En este trabajo se realizaron análisis mineralógicos donde las muestras fueron estudiadas a partir de las propiedades físicas, el peso promedio de los cristales fue entre 0,2 y 1,0 quilates. A partir de análisis de Microscopia Electrónica de Barrido, aplicando la técnica Espectroscopia de Energía Dispersiva (EDS) se consiguió reconocer figuras superficiales como *trigons*, *cuadrons*, crecimiento en bloque, crecimiento laminar, estrías, surcos y colinas que permitieron establecer la evolución morfológica, partiendo del octaedro primitivo y pasando por fenómenos de disolución originando formas de transición.

Palabras claves: Diamante, Santa Elena de Uairén, Grupo Roraima

SCANNING ELECTRON MICROSCOPY APPLICATION FOR MORPHOLOGIC CHARACTERIZATION OF DIAMONDS OF THE REGION OF SANTA ELENA UAIRÉN

ABSTRACT

Mineral characterization consisted on the study of 458 diamond samples representative of gem-grade and industrial-grade varieties, obtained from alluvial (placer) diamond exploration located in the Icabaru and Uaiparu Rivers, Santa Elena de Uairén. Mineral analyses were predominantly focused on physical properties and average weight (0.2 and 1.0 ct). Some surface shapes such as trigons, quadrilateral, block and film growth, groove and hillocks were determined through Scanning Electron Microscopy (SEM) and Energy Dispersive Spectrometer technique (EDS). Morphological evolution could be established from the octahedral primitive through dissolution transactional.

Keywords: diamond, Santa Elena de Uairén, Group Roraima

INTRODUCCIÓN

La morfología del diamante es una de las características más notables de este mineral, constituye una de las evidencias de los procesos físico-químicos que actúan sobre el mismo durante la cristalización y también durante el transporte por el magma kimberlítico o lamproítico [1]. Las relaciones entre la morfología externa de los cristales de diamante incluyendo las facciones de superficie y las condiciones de formación han sido objeto de estudios por más de dos siglos. Kukhareno [2] reconoció la influencia de los procesos de crecimiento y disolución en los diamantes como oscilaciones en las condiciones dinámicas presentes en el

manto y/o en la corteza terrestre, cuyo sentido se debe a la relación crecimiento–disolución en función del equilibrio físico–químico característico para determinados procesos. Con base en la morfología, los diamantes pueden ser divididos en dos grupos principales: formas primarias (formas originales) y formas secundarias (formas derivadas). Las formas primarias resultaran del crecimiento del diamante en el manto por ejemplo: octaedros con textura laminar, octaedros agrupados, evidencian una cristalización rápida a partir de un medio supersaturado en carbono; octaedros regulares: con bajo grado de supersaturación en carbono; formas combinadas: proceso lento de cristalización bajo

condiciones saturadas de carbono. Los hábitos secundarios son resultantes de procesos de reabsorción o corrosión de las formas primarias, generando nuevas formas, [3].

El diamante cristaliza en el sistema isométrico del grupo espacial $Fd\bar{3}m$ ($a=3.57\text{Å}$). Las formas mas comunes resultantes de la cristalización son: *i*) octaedro {111}, *ii*) cubo {100}, *iii*) formas combinadas (octaedro+dodecaedro+cubo) o *iv*) geminaciones según la rotación en torno de un eje de simetría. Otras formas son el rombododecaedro {110}, icositetraedro (24 fases trapezoidales), trioctaedro (24 fases triangulares) y hexaocatedro (48 fases). Todas estas formas se caracterizan por superficies planas, con desarrollo de estructuras escalonadas positivas en la fase octaédrica y aristas rectilíneas [2]. Un número significativo de diamantes exhiben morfología externa redondeada (*rounded diamonds*), cuyo desarrollo posiblemente esta relacionado a los procesos de disolución química del cristal ocurridos simultáneamente con los procesos de formación del diamante y/o posteriores a esta, como por ejemplo la modificación de las superficies planas de crecimiento de las fases cúbicas, octaédricas o dodecaédricas para formas intermediarias a estables de disolución, con pérdida de la simetría de los planos de crecimiento a través de la modificación progresiva de la morfología externa, iniciando de la borda para el centro de la fase. Otras evidencias de este fenómeno estarían relacionadas con formación de facciones en la superficie de los diamantes, originadas en procesos de disolución química [4].

MATERIALES Y METODOS

Este estudio consistió en el análisis de 458 cristales de diamante entre las variedades gemológica e industrial, de la región de Santa Elena de Uairén, específicamente de los placeres aluvionales de las márgenes de los ríos Icabarú, Uaiparú, El Mosquito y Surucun. Los análisis fueron realizados en el Laboratorio de Microscopia

Electrónica y Análisis de imágenes del Departamento de Geología, *Escola de Minas*, Universidad de Ouro Preto (MICROLAB/DEGEO/EM/UFOP). Para el análisis de la morfología y de las microestructuras de superficie (relieve de los cristales), fue utilizado el Microscopio Electrónico de Barrido modelo JEOL JSM 5510, del MICROLAB/DEGEO/EM/UFOP.

Orlov [5] presenta detalladamente la evolución de la morfología externa de los diamantes, corroborando los estudios de Kukharenko [4] para el origen de los diamantes de aspecto redondeado y con aristas curvas. Siguiendo la nomenclatura utilizada por Kukharenko [4] y Orlov [5] quien empleo el sufijo *id* para designar las formas cristalográficas de crecimiento que sufrieron los efectos de la disolución (en mayor o menor grado): *dodecahedroid*, *octahedroid*, *cuboid*, *tetrahedroid* y formas indeterminadas o geminaciones que presentan morfología externa redondeada.

La principal característica de las formas derivadas por reabsorción es el grado variable de la curvatura de las aristas y fases, cuyo desgaste por corrosión modifica lentamente el octaedro inicial de crecimiento de fases rectilíneas [6]. La corrosión comienza en las aristas y prosigue lentamente, desarrollándose por las superficies dodecaédricas de fases y aristas curvas, que a veces pueden consumir por total la fase octaédrica. Estos efectos que ocurren debido a disolución, originan dodecaedros de fases aristas curvas que pueden ser equidimensionales (euhédricos o proporcionados) o inequidimensionales (desproporcionados) y, dependiendo del hábito, pueden ser aplanados o alargados.

Cuando la forma inicial es cúbica, los procesos de disolución actúan sobre las aristas, provocando modificaciones lentas, transformándolo en un cubo piramidal redondeado. Las formas de diamantes achatados (aplanados) y alargados son debido a la corrosión de fragmentos (producto de la exfoliación perfecta del diamante).

Los diamantes que no poseen la morfología o hábito cristalino definido son denominados como cristales irregulares, siendo interpretados como el resultado o producto de disolución diferenciada de cristales desproporcionados. El diamante que cristaliza en forma policristalina constituye agregados de cristales individuales en dimensiones de orden de 10 a 200 micrómetros, los diamantes policristalinos son clasificados en las categorías: framesita, stewartita, carbonado, boro y ballas [7].

Las texturas encontradas en las fases de los diamantes, según varios estudios previos [5,8] señalan que estas pueden tener dos líneas diferentes de interpretación la primera que plantea que estas son originadas en las fases primarias de la cristalización del diamante (octaédricas o cúbicas); y la segunda que son originadas en las fases de transición octaédrica-dodecaédrica, cúbica-dodecaédrica y en la dodecaédrica.

La disolución y corrosión pueden ser entendidas como efectos similares, pero son realmente distintas: la disolución está relacionada al desgaste de vértices, aristas y fases del cristal, originando morfologías diferentes y la corrosión está específicamente relacionada a la impresión de texturas en las superficies, provocada por agentes externos. Estos dos procesos pueden ocurrir al mismo tiempo en una determinada muestra de diamante [8].

La reabsorción de los diamantes ocurre principalmente debido al aumento de fO_2 , causando redondeamiento, impresiones de figuras de disolución en la superficie del cristal, y/o consumo total del cristal. Este proceso puede ocurrir en el manto o durante o transporte a la superficie, cuando el diamante entra en contacto con los fluidos transportadores, cuyo contenido de volátiles aunado a las condiciones altamente oxidantes causan su reabsorción y corrosión [8].

En condiciones oxidantes (corrosivas), los procesos de disolución pueden ser divididos en aquellas que ocurren bajo temperaturas bajas, $< 950^\circ\text{C}$, y altas [9]. La

reabsorción a temperaturas elevadas ocasiona la impresión de figuras de superficie y el desgaste de las aristas de cristales cúbicos e octaédricos. La reabsorción a alta temperatura puede ocurrir en el magma, entre 80 y 100 km de profundidad, por acción de CO_2 y vapor antes de la cristalización de la matriz.

Diamantes inclusos en xenolitos son preservados de la reabsorción [10]. Aquellos parcialmente expuestos pueden ser en parte reabsorbidos y corroídos y son denominados pseudo-hemimorfos. Texturas como figuras de corrosión negativas fueron consideradas típicas de reabsorción a altas temperaturas y hexágonos esculturas de corrosión, superficies químicamente pulidas e *frosting* grosso también necesitarían de temperaturas mayores a 950°C (condiciones no oxidantes).

En temperaturas mas bajas (no oxidantes), texturas como figuras de corrosión positivas son formadas, aunque, esas texturas no son comunes, demostrando la rareza de procesos de reabsorción a bajas temperaturas. Además de las condiciones del magma favorables o no a reabsorción durante el transporte, dos factores son relevantes en este proceso: 1) la profundidad en que el diamante es liberado del xenolito y 2) el tamaño del diamante. En este sentido, un cristal grande tendría más oportunidades de alcanzar la superficie (en la forma reabsorbida) si lo comparamos a uno menor tamaño si fueran liberados en la misma profundidad debido a la relación entre área superficial y volumen [9]. En general, la proporción de diamantes reabsorbidos aumenta con la disminución del tamaño de los cristales en una población de una determinada región. Evdokimov *et al.* [11] reconocieron que más de un proceso de crecimiento y disolución pueden ocurrir en un mismo cristal, exhibiendo exactamente las mismas facciones de superficie, de esta forma estructuras del tipo *hillocks*, *trigons*, y *lamination lines*, no pueden ser consideradas separadamente como facciones típicas de disolución y/o crecimiento.

Múltiples facciones de regeneración son establecidas en los cristales redondeados, es evidente que sucesivos

procesos de crecimiento y regeneración en los diamantes ocurren en condiciones diferenciadas en el magma. De una forma general depuse del proceso de regeneración, un próximo proceso de disolución podrá ocurrir y la superficie del cristal presentará una estructura compleja con *hillock* e textura *shagreen* paralelas a facciones de disolución.

Fluctuaciones en los parámetros termodinámicos son los responsables por la larga historia de formación/disolución de los diamantes en el manto superior [12]. Asumiendo que peridotitas y eclogitas son rocas cogenéticas con el diamante, las primeras oscilaciones de presión son responsable por la transición de sistema diamante-fluido (proveniente del manto) a través del punto de equilibrio entre áreas de súper saturación y no-saturadas en carbono.

Basado en la secuencia de eventos magmáticos propuesta por Robinson [8] y McCandless [10] se clasifica la naturaleza de la exfoliación como primaria o secundaria. Exfoliaciones del tipo “primario” presentan figuras de superficie típicas para los procesos que ocurren en el interior de la tierra (*trigons*, *hillocks*, *lamination lines*).

Aunque sea difícil la clasificación en cuanto a la naturaleza de las *etch figures* (figuras de grabación), no restan dudas que estas fueron producidas por los procesos que ocurren en el manto y/o durante la ascensión de los diamantes a la subsuperficie a través de la roca magmática huésped. Exfoliaciones “secundarias” son relacionadas al transporte sedimentar en superficie, presentando aspecto liso o planos de exfoliación sin cualquier tipo de *etch figures*.

RESULTADOS Y DISCUSION

En este estudio fueron adoptados los criterios que dividen la morfología del diamante en formas primarias o simples donde se pudieron observar que los porcentajes de frecuencia para la región a partir de las muestras estudiadas son 19% rombodecaedros, 11% octaedros, 3% trioctaedros y 1% cubos, para las formas secundarias

(resultantes de la reabsorción) la frecuencia fue de 5% rombodecaedro-octaedro, 4% octaedro-rombodecaedro, 3% cubo-octaedro, 2% cubo-octaedro-rombodecaedro, los cristales de hábito intermedio entre el octaedro de facetas y aristas planas y el rombodecaedro de facetas y aristas curvas muestran, en grados variables, la secuencia completa de transición entre el octaedro y el rombodecaedro. Esta transición de forma es ocasionada por la reabsorción de los cristales por el magma kimberlítico y/o lamproítico. También fueron observadas formas combinadas o policristalinas para los cuales se determinó una frecuencia de 10% geminados irregulares, 6% geminados de contacto, 6% agregados cristalinos, 10% cristales irregulares y 1% *ballas*, los agregados cristalinos son definidos por asociaciones de dos a tres cristales y la existencia de 19% fragmentos producidos por exfoliación, con pérdida de masa que varía desde 10 a 60% de la forma original, es uno de los aspectos más importantes observados en los diamantes la región es la una gran cantidad de cristales con algún tipo de exfoliación, ver Fig. 1.

Se observaron detalles que muestran que en la región se distinguen diferentes aspectos como los son estrías de deformación plástica, también pueden presentar corrosiones puntuales denominadas de *trigons* las más comunes y *cuadrons* los cuales se presentan con menos frecuencia, lo cual constituyen texturas superficiales formadas por depresiones triangulares equiláteras de profundidades variables, ver Fig. 2.

También fue posible identificar otras texturas de superficies tales como texturas *shagreen*, depresiones piramidales, estructuras de grados escalonadas, canal de inclusión, canales de corrosión e *hillocks* que pueden ser alargados, finos y gruesos.

El inicio de los procesos tectónico magmáticos de formación de kimberlitas resulta en grandes oscilaciones en los parámetros termodinámicos, con un primero proceso de elevación de la presión en el manto superior.

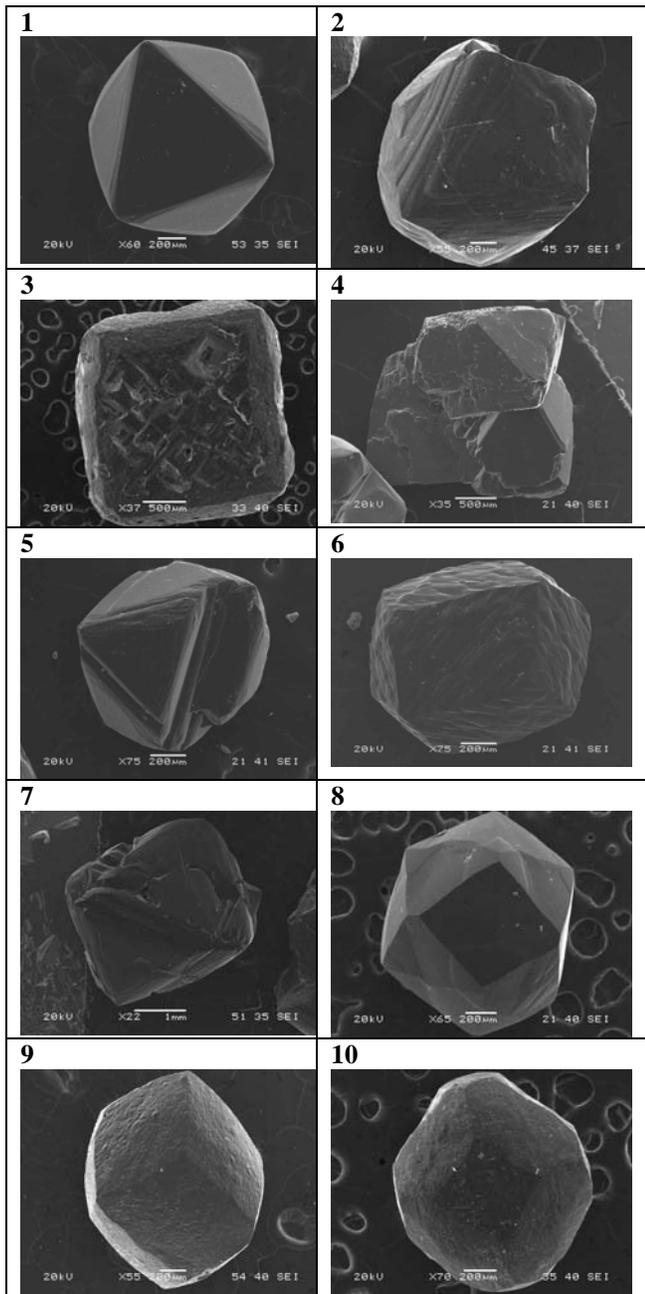


Figura 1. Fotomicrografías de cristales de diamante donde se puede observar algunas variedades morfológicas características: 1 Octaedro, 2 Trioctaedro, 3 Cubo, 4 geminado policristalino, 5 transición octaedro-rombododecaedro, 6 Rombododecaedro, 7 Octaedro con simetría preservada mostrando canales de corrosión, 8 combinación entre cubo y cubo piramidal, 9 Dodecahedro, 10 forma combinada entre cubo y octaedro.

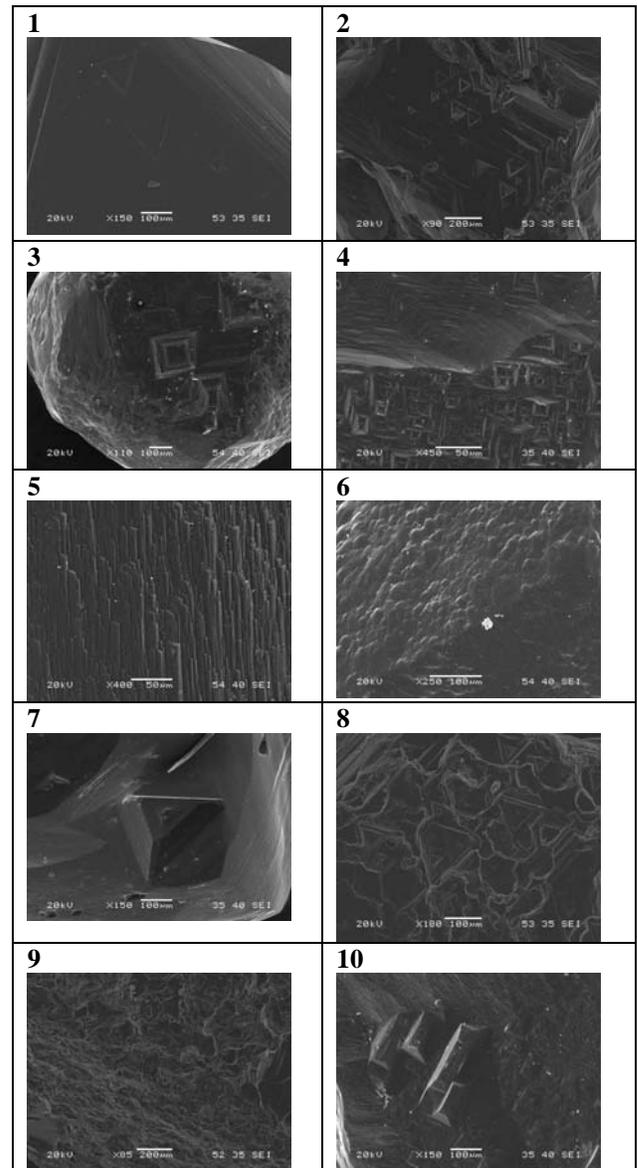


Figura 2. Fotomicrografías donde se puede observar algunas micro-estructuras de superficie características de los diamantes de la región. 1 y 2 triángos en relieve negativo; 3 *cuadros*, 4 *cuadros*, 5 superficies escalonadas en proceso inicial de disolución; 6 *hillocks* "colinas" (superficies onduladas), 7 triángulos positivos; 8 triángulos negativos; 9 *shagreenb*, 10 figuras hexagonales positivas.

Las oscilaciones de la presión resultan en la mudanza de la composición del fluido y del campo de tensiones de las rocas hospederas. En tales ambientes, los cristales de

diamante son disueltos, probablemente al mismo tiempo en el fluido magmático bajo influencia de la temperatura. Estos procesos, actuando en el diamante, modifican la morfología original resultando formas con fases y aristas curvas, cristales parcialmente reabsorbidos y geminaciones complejas, entre otras [11].

La diversidad de formas cristalográficas observadas puede estar relacionada con la presencia de diferentes fuentes primarias abasteciendo los depósitos detríticos, aunque este tipo de análisis puede ser considerado insuficiente para determinar tal posibilidad. La morfología del diamante no varía únicamente entre especímenes oriundos de áreas diferentes, también puede ocurrir entre individuos de una misma fuente, esto en lo referente a las rocas kimberlíticas o lamproitias, ya que, los diamantes pudieron ser sometidos a fenómenos de disolución con intensidad variable, debido a que la intensidad de la reabsorción del diamante depende del tamaño del cristal y de otros factores como lo son presión, temperatura y agentes oxidantes O_2 y CO_2 , durante la cristalización o durante el transporte a través de kimberlitas o lamproitos, de la misma forma puede ocurrir durante eventos metamórficos [13]. Figura 3.

Se debe resaltar que posterior al *emplacement* de la intrusión kimberlítica o lamproítica, en cuanto, no ocurra metamorfismo, las propiedades físicas del diamante no son afectadas ya que las condiciones físico/químicas del medio ambiente responsables por los procesos de intemperismo y erosivos que desintegran las rocas hospederas no alteran las propiedades físicas del diamante, es evidente que las condiciones mecánicas del transporte en medio acuoso son las causantes de fracturas en los cristales, sin evidencias de disolución lo que explica el elevado porcentaje de fragmentos, producto de la exfoliación, en depósitos detríticos.

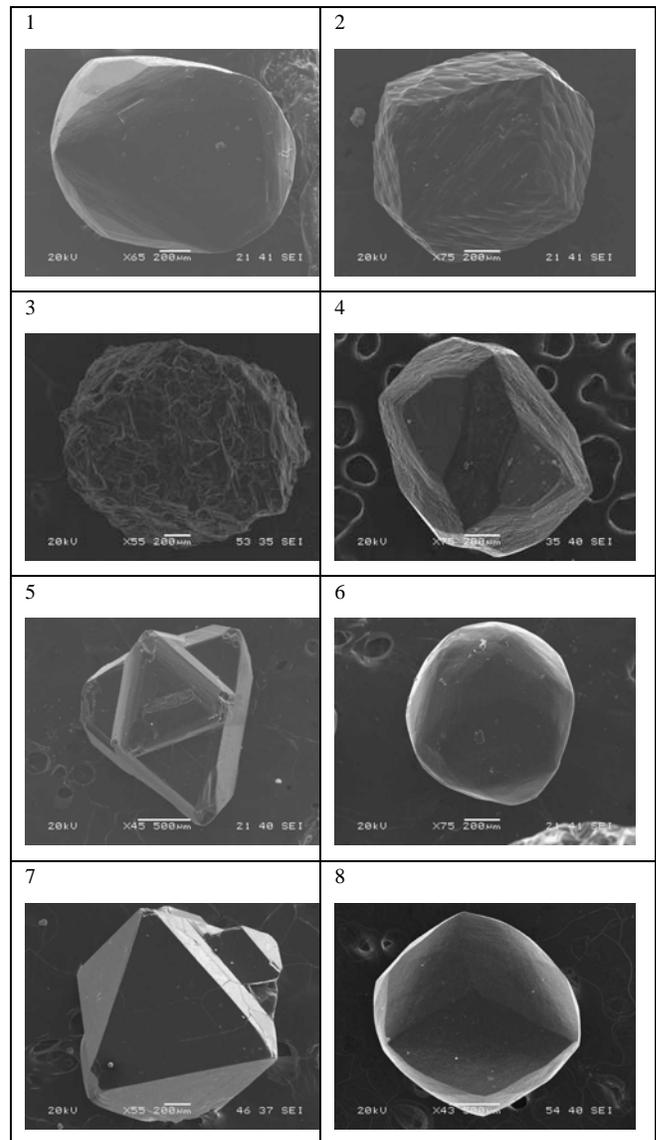


Figura 3. Fotomicrografías de cristales de diamante donde se puede observar algunas variedades morfológicas características: 1 Rombododecaedro de fases lisas y aristas onduladas, 2 Rombododecaedro, 3 forma irregular, 4 Rombododecaedro octaedro, 5 Macla, 6 Bola, 7 Macla, 8 Rombododecaedro de fases lisas e aristas onduladas por la disolución.

Los octaedros, cubos, formas combinadas y geminados de contacto, debido a la exfoliación perfecta, pueden ser fracturados internamente en las aristas y vértices ocasionando fragmentación por impacto durante el transporte [14]. Lo mismo ocurre con cristales con defectos estructurales e inclusiones minerales. Sumado a esto, la forma redondeada de los cristales rombododecaédricos beneficia su transporte, debido a

que sufren menos fricción, predominando en depósitos secundarios. De esta forma las características morfológicas descritas para la región de Santa Elena de Uairén puede ser comparada con la de otros depósitos estudiadas por otros investigadores, donde fueron observados porcentajes altos de rombododecaedros y de fragmentos (producto de la exfoliación), para los cuales se sugiere un transporte prolongado.

CONCLUSIONES

Este estudio permitió discriminar agrupaciones que muestras características propias de ambientes diferenciados, lo que indica que en la región existe una distribución polimodal de individuos, en cuanto a morfología y figuras de superficie, que indica la posibilidad de que los diamantes sean provenientes de varias fuentes primarias, siendo que en las características superficiales de los cristales se reconocieron figuras que específicamente presentaron grados variables de curvatura y diversos patrones de microestructuras que son el resultado de la disolución provocada por agentes oxidantes, en varios grados diferenciados de intensidad. Sumando a esto las modificaciones morfológicas sufridas por algunos diamantes, se deduce que estos pasaron por un largo tiempo de residencia mantélica (tiempo de permanencia en el manto terrestre) presentando mas de un proceso de crecimiento y disolución, con significativo desvío de la cinética de equilibrio entre los factores que controlan estas relaciones en el manto.

REFERENCIAS

- [1] Meyer, H.O.A. (1985). "Genesis of diamond. A mantle saga". *American Mineralogist*, 70:344-355.
- [2] Kukharenko, A.A. (1954). On rounded diamond crystals. *Uchem. Zap. Leningrad Gos. Univ.*, 178(4), 55p.
- [3] Harris, J.W. (1987). Recent physical, chemical and isotopic research of diamond. In: *Mantle Xenoliths,*

Edited by P. H. Nixon, John Wiley & Sons, pp. 477-500.

- [4] Orlov, Yu. L. (1977). The mineralogy of diamond. *Izdatel'stva Nanka*. Translated from *Russian Geology and Geophysics by WILEY, J. & SONS*. New York. 235p.
- [5] Orlov, Yu. L. (1966). "Evidence that the rounding of diamond is caused by dissolution process". *Min. Sbor. Louvsk. Univ.*, 20:129-130.
- [6] Moore, M. & Lang, A.R. (1974). "On the origin of the rounded rhombic dodecahedral habit of natural diamond". *Journal of Crystal Growth*, 26:133-139.
- [7] Haralyi, N.L.E., Hasui, Y., Morales, N. (1991). O diamante pré-cambriano da Serra do Espinhaço, MG. *Gemas e rochas ornamentais, DNPMPCRM*, vol. 4-A, p. 117-138.
- [8] Robinson, D.E., Scott, J.A., Van Niekerk, A., Anderson, V.G. (1989). The sequence of events reflected in the diamonds of some southern African kimberlites. *Geol. Soc. Australia. Sp. Publ.*, 14(2): 990-1000.
- [9] Sutherland 1982). Sutherland, D.G. (1982). "The transport and sorting of diamonds by fluvial and marine processes". *Economic Geology*, 77(7):1613-1620.
- [10] McCandless, T.E., Waldman, M.A. & Gurney, J.J. (1994). Macrodiamonds and microdiamonds from Murfreesboro lamproites, Arkansas: morphology, inclusions and carbon isotope geochemistry. In: *CPRM/ Núcleo Brasília, Fifth 223 international kimberlite conference*, Araxá, Brazil. 2:78-97.
- [11] Evdokimov, M.D., Ladygina, M.Y., Nesterov, A.R. (2001). Morphology of diamonds as a possible indicator of their genesis. *N. Jb. Miner. Abh.*, 176(2):153-177.
- [12] Bulanova, G.P. (1995). "The formation of diamond". *Journal of Geochemical Exploration*, 53:1-23.
- [13] Mendelsohn M.J. & Milledge, H.J. (1995). "Morphological characteristics of diamond

populations in relation to temperature-dependent growth and dissolution rates". *International Geology Review*. Vol. 37: p.285-312.

[14] Robinson, D.N. (1980). *Surface textures and other features of diamonds*. Tese doutorado, Natal, África do Sul, 221 p.