

Espectroscopía Raman de sílice natural en las impactitas: caso de estudio del cráter Chicxulub (México)

Mikhail Ostrooumov

Departamento de Geología y Mineralogía, Instituto de Investigaciones Metalúrgicas, UMSNH

Resumen

Las muestras naturales de sílice provenientes de las impactitas del cráter Chicxulub (México) fueron estudiadas por microespectroscopía Raman. Esta sofisticada técnica analítica muestra que las rocas del cráter Chicxulub han experimentado un metamorfismo del choque. Las impactitas contienen tres modificaciones polimorfas de sílice: el cuarzo- α y dos variedades de alta presión - coesita y cuarzo desordenado que representan diversos grados de cristalinidad. Se han observado los cambios sistemáticos en las frecuencias y media-anchura (Γ) de las líneas Raman, están provocadas por un aumento de las irregularidades en las longitudes y los ángulos de los enlaces Si-O-Si bajo el efecto del impacto. Por lo tanto, la espectroscopía Raman puede ser empleada para medir la cristalinidad del cuarzo desordenado. La media anchura y la frecuencia de la línea característica del enlace Si-O-Si (modo espectroscópico A_1) son los parámetros más apropiados para estimar el grado de cristalinidad del cuarzo. Para el cuarzo cristalino esta línea tiene una frecuencia de 464 cm^{-1} (media-anchura 5 cm^{-1}), mientras tanto el cuarzo altamente desordenado se caracteriza por el desplazamiento hacia los números de onda más bajos hacia 455 cm^{-1} (media-anchura 30 cm^{-1}). Su perfil espectral Raman depende fuertemente del grado de

desorden en la red cristalina por el evento de impacto.

Palabras clave: espectroscopía Raman, impactite Chicxulub, cuarzo desordenado.

Abstract

Raman spectroscopy of natural silica in impactite: case study from Chicxulub crater (México).

A series of natural silica impactite samples from Chicxulub (Mexico) was investigated by Raman microprobe (RMP) analysis. The data yield evidence for high pressure shock metamorphism in the rock. The impactite contains three polymorphs of silica: the original α -quartz, and two high-pressure varieties – coesite and disordered quartz representing various degrees of crystallinity. We found systematic changes in frequencies and half-widths of the Raman bands, caused by increasing irregularities of bond-lengths and bond-angles and a general breaking-up of the structure as a result of impact events. Therefore, RMP is an adequate tool for measuring the crystallinity of disordered quartz. The half-width Γ and the frequency ω of the symmetric Si-O-Si stretching vibrational band (A_1 mode) of the SiO_4 tetrahedra are the most characteristic parameters for estimating the degree of crystallinity. In well crystallized quartz, $\Gamma = 5 \text{ cm}^{-1}$ and $\omega = 464 \text{ cm}^{-1}$ while in highly disordered quartz this line shifts to $\omega = 455 \text{ cm}^{-1}$ and broadens up to $\Gamma = 30 \text{ cm}^{-1}$. The Raman lineshapes appear to depend strongly on the degree of lattice disorder subsequent to impact events.

Keywords: Raman spectroscopy, impactite Chicxulub, disordered quartz.

I. Introducción

Durante la última década la espectroscopía Raman (ER) se ha convertido en una técnica analítica importante en diversas áreas de la ciencia moderna y, en particular, en Ciencias de la Tierra. La ER ha conseguido actualmente un lugar relevante entre las técnicas no destructivas para el estudio sofisticado de los minerales (sobre todo en sus aspectos cristalóquímicos, geoquímicos y petrológicos), así como también de las gemas (Gemología), objetos arqueológicos y de patrimonio cultural (Arqueometría). Durante los últimos años la ER se usa ampliamente en diversas ciencias planetarias: astrobiología, estudio de meteoritos y análogos terrestres de Marte (GEORAMAN, 2012).

Las ventajas fundamentales de esta técnica en relación con los métodos tradicionales (EPMA, MEB-EDS, etc.) son su carácter no destructivo y su alta resolución lateral espacial (cercana a $1 \mu\text{m}$) lo que la sitúa como una poderosa herramienta para el análisis de diversos materiales y objetos en Ciencias de la Tierra (Ostrooumov, 2011).

Las otras principales ventajas de la ER son las siguientes (Marfunin, 1995; Smith y Dent, 2005; Nakamoto, 2009):

- no requiere preparación de la muestra,

- no hay contacto con la muestra,
- diversidad de muestras: la muestra puede ser sólido, líquido o gas,
- las muestras pueden ser opacas o transparentes: polvo microcristalino (10^{-12} g), cristal solo (hasta de $1\ \mu\text{m}$), tableta prensada de una mezcla de polvos, formación natural en la superficie o en la profundidad de un cristal de diferente dimensión y naturaleza,
- el rango de trabajo es de 25 hasta $4000\ \text{cm}^{-1}$ en un simple registro, dentro del cual permite caracterización de compuestos inorgánicos y orgánicos,
- se pueden analizar: en la parte baja $100\ \text{cm}^{-1}$ como estándar; en medio acuoso y solvente; a través de plástico, vidrio, cuarzo, y zafiro,
- alta resolución espectral ($0.001\ \text{cm}^{-1}$),
- rapidez en la adquisición de espectros (10^{-12} seg),
- se puede usar fibra óptica hasta 100 metros,
- posibilidad de investigación de soluciones acuosas y fusiones producidas por temperaturas altas,
- existen diversas librerías Raman en la WEB (<http://www.univie.ac.at/MINSPEC>; <http://rruf.info>).
- tiene la ventaja de poder analizar las inclusiones de minerales que no son observables en la superficie de la muestra, sino al interior de ella; igualmente, se analiza en la actualidad el contenido químico de las fases líquidas, sólidas y de vapor dentro de las inclusiones fluidas, aportando una enorme cantidad de datos adicionales al estudio microtermométrico y geoquímico de las últimas.

En bibliografía, existen muchos ejemplos concretos de la aplicación de la ER en el estudio y la caracterización de diferentes materiales y objetos que están investigando en diversas Ciencias de la Tierra (Nasdala et al., 2004; GEORAMAN, 2012):

Dichos ejemplos incluyen:

- identificación de minerales y sus variedades,
- análisis de fases minerales (por ejemplo, identificación de los compuestos en soluciones sólidas),
- caracterización espectroscópica de nuevas especies minerales,
- investigaciones cristal químicas: fenómeno de orden-desorden estructural e isomorfismo;
- estudio de los microcristales hasta $100\ \text{Å}$;
- origen del color de minerales;

- estudio de polimorfismo, politipos, transformaciones de fases;
- estudio de inclusiones (sólidas, líquidas y gaseosas),
- imágenes y mapeo Raman (distribución espacial) de las muestras heterogéneas,
- caracterización de defectos y estructura interna de minerales,
- estudio de minerales en las condiciones de altas y ultra-altas temperaturas y presiones: geobarometría (p. e., en rocas metamórficas de diferente origen),
- cálculo de las constantes termodinámicas de los minerales,
- estudios de contaminación de aguas y suelos (detección de complejos metálicos, ácidos, hidrocarburos).

Se puede decir que durante la última década la ER fue aplicada exitosamente en casi todas las geociencias y prácticamente todos los tipos de muestras fueron investigados con la ayuda de esta técnica lo que se explica, obviamente, por sus ventajas experimentales. En particular, la ER constituye actualmente uno de los métodos más adecuados para la caracterización de las propiedades cristaloquímicas en las muestras heterogéneas (Ostrooumov et al., 1999). En particular, este método es muy propicio para distinguir las modificaciones polimorfas de los minerales, ya que la sensibilidad de frecuencias vibracionales y de intensidades difusas de las bandas características permite determinar los cambios débiles en la estructura cristalina (Ostrooumov, 2007).

En el presente estudio la ER se aplicó a la caracterización mineralógica de las brechas de impacto del cráter Chicxulub y se examinaron en general las posibilidades del método para el estudio de las impactitas. Los espectros Raman fueron obtenidos por medio de un barrido detallado en una muestra de la brecha de impacto proveniente del núcleo del pozo Yucatán 6, de PEMEX. Esta muestra es la única en su sentido ya que representa el corte del núcleo en la profundidad de 1377-1379 metros del pozo anteriormente mencionado.

II. Breve caracterización del cráter Chicxulub.

En la bibliografía existe un amplio reconocimiento de una hipótesis que relaciona el origen del cráter Chicxulub (México) con el fenómeno de impacto por un impacto meteorítico. Por otro lado, algunos geocientíficos no están de acuerdo con este punto de vista sobre su génesis. Entre los minerales característicos de Chicxulub se han identificado varios polimorfos de sílice (Ostrooumov et al., 2002), el estudio detallado de los cuales permitiría definir el origen de estos compuestos ya que sus particularidades cristaloquímicas son los indicadores sensibles de alta presión y de diferente grado de cristalinidad.

El gigantesco cráter de impacto Chicxulub (>200 km), se encuentra sepultado por varios centenares de metros (400-1000 m) de depósitos marinos de plataforma en el borde septentrional de la península de Yucatán, México (Figura 1). La presencia de cuarzo de cho-

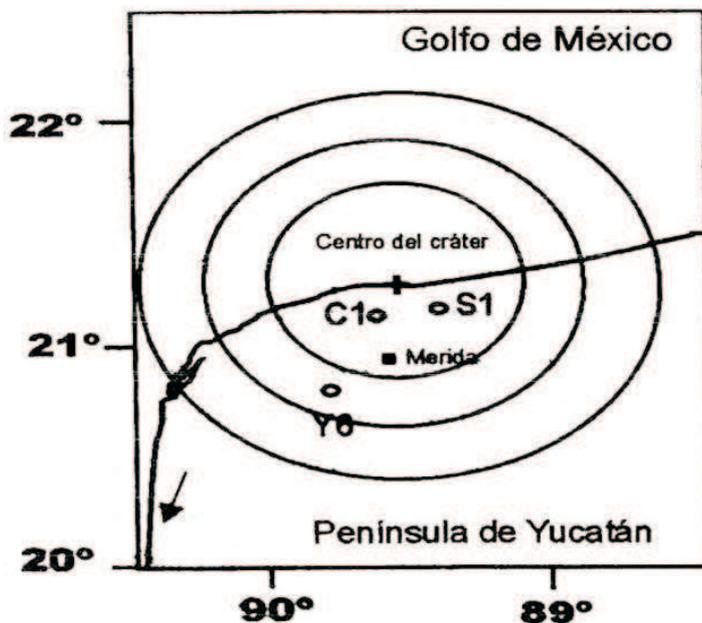


Figura 1: Ubicación geográfica de la estructura Chicxulub (México). La estructura Chicxulub como fué marcada por anomalías gravimétricas y ubicación de los pozos exploratorios de PEMEX Yucatán-6 (Y6), Chicxulub-1 (C1) y Sacpuc-1 (S1).

que, vidrio diaplético de cuarzo y diversas texturas específicas, constituyen evidencias petrográfico-mineralógicas importantes del origen por impacto del cráter Chicxulub. Todos estos rasgos fueron determinados en láminas delgadas de rocas de Chicxulub, por medio del microscopio petrográfico. Los minerales polimorfos de alta presión de sílice, sin embargo, son considerados como la evidencia más sólida de impacto, y son de esperar en un evento de la magnitud del ocurrido en Chicxulub.

La sílice es uno de los componentes más comunes y durables de la corteza terrestre en forma del cuarzo α -trigonal. Durante un gran impacto meteorítico dos polimorfos más densos de sílice, la coesita monoclinica y el cuarzo desordenado, pueden formarse a partir de cuarzo, a presiones mayores de 3 a 10 GPa. Estos minerales son difíciles de detectar por métodos convencionales, en virtud de su escasa abundancia y desarrollo mínimo en tamaño. La necesidad de usar métodos no destructivos se hace más obvia en el caso de Chicxulub, ya que se trata de material cuya disponibilidad es sumamente limitada.

III. Materiales y métodos

Una placa de 10 x 6 cm de la brecha de impacto proveniente del núcleo 14 (1208-1211 m.b.n.m.) correspondiente al pozo de exploración Yucatán 6 de PEMEX, fue seleccionada como muestra de estudio (Figura 2). La roca es una brecha polimíctica. La matriz de la brecha ocupa cerca del 50% en volumen y se compone principalmente de calcita micrítica, de

acuerdo con estudios de catodoluminiscencia realizados con anterioridad. Los clastos llegan a medir hasta un centímetro en tamaño. Entre los clastos predominan fragmentos del basamento cristalino (ígneo y metamórfico), notablemente transformados por el impacto, y fragmentos arcillosos de forma subredondeada, los cuales representan, probablemente, material fundido por el impacto y posteriormente alterado por procesos hidrotermales. Una proporción menor de los clastos está constituida por material sedimentario, prevaleciendo los clastos ricos en calcita y anhidrita sobre los de sílice. Cabe señalar que la proporción entre los clastos de diferente litología varía significativamente de un lugar a otro en el espacio reducido comprendido por el núcleo. Cristales de cuarzo chocado con rasgos planos de deformación se encuentran esporádicamente en la roca. La inspección mineralógica preliminar de la muestra permite concluir que la roca sufrió alteración hidrotermal de baja temperatura. La muestra fue inspeccionada cuidadosamente con el microscopio estereoscópico a fin de localizar los fragmentos del basamento cristalino en los cuales era probable la presencia de polimorfos de alta presión. En consecuencia, más de 30 sitios fueron seleccionados para el análisis por ER.

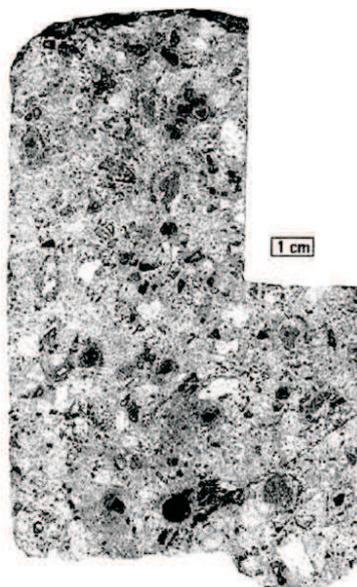


Figura 2: Muestra de la brecha de impacto proveniente del núcleo Y6N19 del pozo Yucatán-6, PEMEX (intervalo 1377-1379 m).

Para este estudio fue utilizado el espectrómetro Raman modelo T64000 Jobin Yvon equipado con un láser de argón con longitud de onda en la región visible ($\lambda=514.5$ nm), ubicado en el Laboratorio de Física Cristalina del Instituto de Materiales, Universidad de Nantes (Francia). El montaje de las muestras permitió registrar los espectros tanto en la configuración macroscópica como en la configuración microscópica. La superficie estudiada varía entonces de 1 mm^2 en la configuración macroscópica a $10 \text{ }\mu\text{m}^2$ bajo el microscopio. Los espectros fueron comparados y presentados usando el programa GRAMS II (Galactic Cor-

piration). Todos los espectros se obtuvieron en condiciones analíticas semejantes, razón por la cual los parámetros de las bandas pueden ser directamente comparadas entre un espectro y otro.

TABLA 1
Líneas Raman (cm^{-1}) para impactitas Chicxulub, coesita natural (CS) y cuarzo (QZ) entre 100 y 1300 cm^{-1} .

Atribución de líneas	Coesita 1 sintética	Coesita 2 natural	R79-2 Chicxulub	R77-17 Chicxulub	Coesita, Arizona 3	Cuarzo 4 natural
CS	116 f	116 f	117 f	-	115.9 m	-
QZ			127 f	127 m	127.8 m	128 f
CS	150.5 m	151 m	150 m	-	151 m	-
CS	175.5 f	176 f	177 f	-	175.7 f	-
CS+QZ	203.5 m	204 m	205 m	205 m	205 m	207 f,an
QZ	-	-	-	264 m	-	264 m
CS	268 f	269 f	270 f	-	271 f	-
CS	325.7 m	326m	325 m	-	325 m	-
CS+QZ	354.7 m	355 m	356 m	356 m	355 m	356 m
QZ	-	-	394 d	395 m	-	395 m, sp
QZ	-	-	401 d	-	-	401 d
CS	425.5 m	427 m	-	-	425 m	-
QZ	465.6 m	466 m	464 m	464 m	463 mf	464 mf
CS	520 mf	521 mf	520 f	-	521 s	-
QZ	-	-	-	695 d	-	696 d
CS	-	785 d	-	-	-	-
QZ	-	-	794 d	795 d	-	795 w,sp
QZ	-	-	804 d	806 d	-	807 d
CS	-	815 d	-	-	-	-
CS	-	837 d	834 d	-	-	-
CS	-	1036 d	-	-	-	-
CS+QZ	-	1065 d	1064 d	1065 d	-	1066 d, sp
QZ	-	-	1081 d	1082 d	-	1083 d
CS	-	1144 d	-	-	-	-
CS+QZ	-	1164 d	1160 d	1162 d	-	1161 d
QZ	-	-	1232 d	1230 d	-	1231 d

Intensidad de líneas: d, débil; m, mediana; f, fuerte; mf, muy fuerte; an, ancho; sp, superpuesto.

IV. Resultados y discusión

Los espectros Raman fueron obtenidos por medio de un barrido detallado en cada uno de los fragmentos de interés. En la mitad de los fragmentos analizados de esta manera fue identificada calcita como fase principal, con líneas características cercanas a 152, 278, 710 y 1084 cm^{-1} . Las fases dominantes identificadas en otros fragmentos son albita (479, 508 cm^{-1}) y cuarzo (464 cm^{-1}).

La figura 3a-d muestra cuatro espectros Raman típicos obtenidos de las rocas de Chicxulub que fueron registrados en el intervalo espectral 100-1300 cm^{-1} . Las frecuencias

de todas las líneas observadas para cada sección estudiada se dan en la tabla 1. Esta tabla proporciona también los datos publicados para α - cuarzo y la coesita, así como también las líneas de Raman de la coesita sintética y de los minerales provenientes de las rocas de impacto de la Arizona (USA).

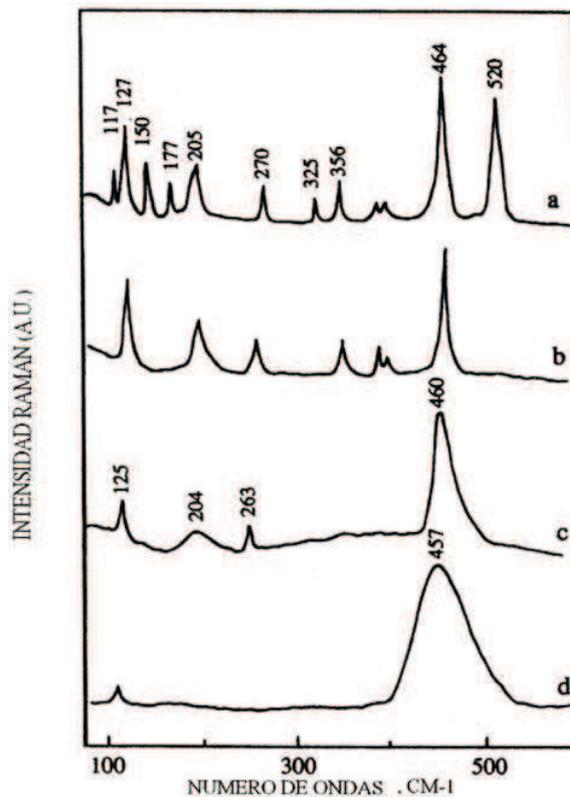


Figura 3: Espectros Raman de las impactitas provenientes del cráter Chicxulub (México): a-coesita+cuarzo, b-cuarzo con la estructura ordenada, c-cuarzo con el desorden estructural intermedio, d-cuarzo con la estructura desordenada.

Los resultados del estudio muestran que las impactitas de Chicxulub contienen principalmente tres polimorfos de sílice: el original α - cuarzo y dos variedades de alta presión - coesita y cuarzo desordenado. α - cuarzo se puede identificar inmediatamente con base en su línea Raman más intensa cerca de 464 cm^{-1} . La coesita natural se caracteriza por una línea más intensa cercana a 520 cm^{-1} y otras de menor intensidad alrededor de 425 , 356 y 270 cm^{-1} (Figura 3a). Basándose en la identificación detallada de los modos vibracionales para diferentes modificaciones de sílice (Lazarev, 1995; Marfunin, 1995), estas líneas fueron asignadas a los modos vibracionales conocidos bajo términos espectroscópicos B_{1g} , E_g , A_{1g} . La línea más intensa de 520 cm^{-1} se ha asignado a un modo de valencia Si-O-Si (modo vibracional A_1), que está correlacionando con el modo de 464 cm^{-1} del α -cuarzo. Estas dos líneas

más intensas (520 y 464 cm^{-1}) son suficientes para distinguir correctamente las dos formas cristalinas de SiO_2 .

Los siguientes razonamientos de carácter teórico general contribuyen a nuestra interpretación de los espectros. Los espectros Raman reflejan movimientos de los átomos en su entorno químico-estructural, en este caso, de Si y O en coordinación tetraédrica en la estructura de armazón de diferentes fases de sílice. Las líneas superiores a 600 cm^{-1} se encuentran en correlación con los modos de las uniones Si-O intratetraédricos (modos de valencia), mientras que la aparición de las bandas por debajo de 400 cm^{-1} se debe a los modos de los ángulos Si-O-Si intertetraédricos (modos de torsión y deformación de las cadenas). Las vibraciones responsables de una banda en la región $300\text{-}400\text{ cm}^{-1}$ se atribuyen a las vibraciones más potentes relacionadas con el número de miembros en los anillos formados por los tetraedros SiO_4 en estructuras cíclicas con base en sílice. Por ejemplo, fue establecido que las estructuras con cuatro tetraedros SiO_4 (como en coesita o feldespatos) tienen varios modos T-O-T por arriba de 500 cm^{-1} , mientras que las estructuras cíclicas con seis miembros (cuarzo, cristobalita, tridimita) presentan un solo modo del mismo tipo por debajo de 400 cm^{-1} (Marfunin, 1995). De acuerdo con estos datos, los fragmentos estudiados contienen tanto las fases con unidades cíclicas de seis (cuarzo), como de cuatro (coesita) miembros.

El espectro Raman de α -cuarzo cristalino exhibe líneas cerca de $128, 206, 356, 395, 464, 696, 795, 806, 1082, 1160\text{ cm}^{-1}$ (Figura 3b). La identificación detallada de los modos vibracionales de diversas formas de sílice ha sido realizada en publicaciones anteriores por varios autores que asignaron todas las líneas y bandas observadas (Lazarev, 1995). En varios fragmentos de la muestra fueron detectadas tres diferentes modificaciones de cuarzo: cristalino, de desorden intermedio y de alto desorden (Figura 3).

El desorden estructural y el diferente grado de cristalinidad del cuarzo se reflejan en sus espectros Raman (Figura 3c,d). Estos dos fenómenos provocan en los espectros Raman varios cambios significativos. Entre ellos hay que destacar los siguientes: la desaparición de una serie de las líneas, su gradual ensanchamiento y, finalmente, el cambio de las frecuencias de las bandas características. En particular, este cambio de la frecuencia (se observa, como regla, el desplazamiento a los números de onda más bajos) se puede atribuir al desorden estructural de la estructura interna del cuarzo cuando ella llega a ser cada vez más desordenada (Tabla 1).

El cambio hacia números de onda más bajos fue observado especialmente para la línea alrededor de 464 cm^{-1} (modo de valencia Si-O-Si) que indica, por lo general, que las distancias medias entre los átomos llegan a ser más grandes, es decir, que la red cristalina se expande levemente. El cuarzo cristalino se caracteriza por el espectro Raman con la línea intensa y bien definida cerca de 464 cm^{-1} . En el espectro Raman del cuarzo de desorden intermedio esta línea cambia de posición hacia 461 cm^{-1} y, además, desaparecen tres líneas de baja frecuencia ($401, 392, 354\text{ cm}^{-1}$). Finalmente, en el espectro Raman de una modificación de alto desorden aparece una sola línea cerca de 455 cm^{-1} (a veces, se observa también la línea cerca de 122 cm^{-1}) que se caracteriza por el cambio de la forma (ensanchamiento) y la disminución de la intensidad. El ensanchamiento de esta línea y la disminu-

ción paralela de la intensidad puede ser interpretado de tal manera que, durante el desorden estructural, la distribución de las longitudes y los ángulos de los enlaces entre y dentro de los tetraedros SiO₄ llegue a ser cada vez más irregular.

En un trabajo experimental (McMillan et al., 1992) se han obtenido los espectros Raman de los cristales del cuarzo para los cuales se ha simulado un fenómeno de choque (con las presiones máximas entre 21.7 GPa y 31.4 GPa). De acuerdo con estos datos experimentales, la línea prominente cerca de 464 cm⁻¹ en el cuarzo no chocado se desplaza a los números de onda más bajos en muestras chocadas: 463 cm⁻¹ (21.7 GPa), 461 cm⁻¹ (25.8 GPa), 455 cm⁻¹ (31.4 GPa). En estos experimentos, solamente la muestra de 31.4 GPa muestra el cambio de frecuencias más marcado para las líneas del cuarzo cristalino (cerca de 455, 800 y 1060 cm⁻¹), acompañados por el cambio considerable de sus espectros (en particular, por la desaparición de algunas líneas características y el ensanchamiento de la línea principal alrededor de 460 cm⁻¹).

Por lo tanto, comparando nuestros resultados con los obtenidos en los experimentos de laboratorio, podemos asumir que la formación del cuarzo desordenado en las impactitas de Chicxulub ocurrió por lo menos en la presión de 26-31 GPa, y más probable en una presión máxima de 31 GPa.

Con el fin de medir el grado de cristalinidad en la espectroscopía se usa la llamada anchura a media altura o más corto media-anchura (Γ) de la línea principal del cuarzo (464 cm⁻¹) en el espectro Raman (Nasdala et al., 2004). Los resultados de esta medición muestran que en los espectros Raman de las tres diferentes modificaciones del cuarzo la línea fundamental se caracteriza por el ensanchamiento gradual y como la consecuencia, por el aumento del valor de la media-anchura lo que confirma la disminución de su cristalinidad.

TABLA 2
Posición y medio-anchura de las líneas Raman (cm⁻¹) entre 100 y 600 cm⁻¹ para el cuarzo con diferente grado de cristalinidad: cristalino, de alto orden (1), de desorden intermedio (2) y de alto desorden (3) presentes en el cráter de Chicxulub

MODOS VIBRACIONALES	1	2	3
E	128	122-125	120-123
A ₁ (ancha)	207	200-204	-
E	265	260-263	-
A ₁ (débil)	356	353	-
E	394	-	-
E	401	-	-
A ₁ (fuerte)	464	458-460	455
Medio-anchura (Γ) de la banda 464 cm ⁻¹	5	10-15	>30

La media anchura de la línea intensa Raman cerca de 464 cm⁻¹ aparece como el mejor indicador para investigar los cambios relacionados con el orden estructural. Los valores

de la media anchura alrededor de $5-7 \text{ cm}^{-1}$ son característicos para el cuarzo cristalino. El cuarzo con el desorden intermedio muestra el valor Γ entre $10-15 \text{ cm}^{-1}$, mientras que en muestras del cuarzo altamente desordenadas Γ es igual o más de 30 cm^{-1} (Tabla 2).

La interpretación de los resultados obtenidos permite confirmar que en la brecha polimíctica se encuentran fragmentos de basamento cristalino del Yucatán con rastros de polimorfos de SiO_2 de alta presión y especialmente de la coesita y el cuarzo desordenado. Estos estudios dan la base para creer que las fases de alta presión de sílice se encuentran presentes en la brecha polimíctica de la estructura Chicxulub, con lo cual la hipótesis de su origen por impacto meteorítico se ve favorecida. Por lo tanto, la presencia de estas fases de alta presión en las rocas del cráter Chicxulub fortalece la idea de su formación por impacto, y descarta la posibilidad de origen volcánico.

Conclusiones

En suma, la coexistencia de dos formas cristalinas de SiO_2 (es decir, de la coesita y el cuarzo desordenado) en las impactitas de Chicxulub ha sido comprobado por sus Raman espectros. Mientras que estos espectros son extremadamente sensibles a la orden de corto alcance ellos también producen la información sobre el desorden total. Por lo tanto, resulta que el orden estructural del cuarzo se puede caracterizar correctamente por la ER. El cambio de la frecuencia, ensanchamiento de líneas, así como también la desaparición de algunas líneas de baja frecuencia dependen fuertemente del grado de orden estructural. Midiendo la media anchura de la banda principal Raman de Si-O cerca de 464 cm^{-1} , se puede estimar el grado de desorden de la red incluso para el cuarzo altamente desordenado. Las muestras estudiadas en el laboratorio por el choque de alta presión muestran los espectros Raman muy similares a los mismos obtenidos en este estudio de las rocas de Chicxulub. Por eso, aparece una evidencia bien definida que las rocas del cráter Chicxulub han experimentado un metamorfismo del choque. Por lo tanto, la ER es un método microanalítico de gran alcance para investigar el proceso del desorden estructural en los minerales y, en particular, en los polimorfos de sílice.

Referencias

- GEORAMAN 2012. Xth International Conference on Raman Spectroscopy applied to Earth Sciences. Book of abstracts. <http://georaman10.uhp-nancy.fr>
- Lazarev, A. 1995. Vibrational spectra and structure of silicates. Edition Science, Moscow.
- Marfunin, A.S. 1995. Advanced Mineralogy: Methods and instrumentation (Results and recent developments). Vol.2. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York.
- McMillan, P. F., Wolf, G.H., Lambert, P. 1992. A Raman spectroscopic study of shocked single crystalline quartz. *Physics and Chemistry of minerals*, 19, 71-79.

- Nakamoto, K. 2009. Infrared and Raman spectra of inorganic and coordination compounds, J. Wiley and Sons Ltd., 6 th edition, New York.
- Nasdala, L., Smith D., Kaindl, R. 2004. Raman spectroscopy: Analytical perspectives in mineralogical research. In: Spectroscopic methods in mineralogy. (Eds. Beran A, Libowitzky E.), European Mineralogical Union, Notes in Mineralogy, vol.6.
- Ostrooumov, M. 2007. Destabilization phenomena in volcanic opals (Mexico): Raman, IR and XRD study. *Spectrochimica Acta, Part A*, 68, 1070-1076.
- Ostrooumov, M. 2011. Avances recientes de la espectroscopía Raman en Ciencias de la Tierra. <http://www.mineralog.net>
- Ostrooumov, M., Fritsch, E., Lefrant, S., Lasnier, B. 1999. Spectres Raman des opales: aspect diagnostique et aide a la classification. *European Journal of Mineralogy*, v.11, No.5, 899-908.
- Ostrooumov, M., Faulques, E., Lounejeva, E. 2002. Raman spectrometry of natural silica in Chicxulub impactite, Mexico. *Comptes Rendus de l'Academie des Sciences*, 334, 21-26.
- Smith, W. E., Dent, G. 2005. *Modern Raman Spectroscopy: A Practical Approach*. John Wiley & Sons Ltd., Chichester, UK.
- <http://www.univie.ac.at/Mineralogie/MINSPEC/raman.htm>
- <http://www.mineralog.net>
- <http://rruf.info>