

MICRO-DIAMANTES ORIGINADOS POR IMPACTO DE METEORITOS

Y. Mendez Escamilla^{1,*}, G. Gallegos Ortega¹, J.A. Cobos-Murcia^{1,2}

¹Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales, UAEH, Carr. Pachuca-Tulancingo km 4.5, Mineral de la Reforma, Hidalgo, 42183, México.

²Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, Depto. De Cátedras, Av. Insurgentes Sur 1582, Col. Crédito constructor, Deleg. Benito Juárez, Ciudad de México, C.P. 03940, México.

**Autor de correspondencia: catseven78@gmail.com*

RESUMEN

Los micro-diamantes formados por un meteorito o también llamados diamantes de impacto, son diamantes creados a partir del metamorfismo generado por el choque entre un cuerpo cósmico y la corteza (zona de impacto). Para que este fenómeno ocurra, deben darse ciertas condiciones termodinámicas. Hasta el momento, solo se conoce la formación de micro-diamantes y se desconocen las condiciones energéticas emitidas por el choque de masas (meteorito y suelo) para asemejarse a uno de los procesos geológicos más importantes para la formación de diamantes terrestres, así como la forma en que se expresa espontáneamente dicho fenómeno. Por ello, en el presente trabajo se estudiaron simuladamente los cambios termodinámicos (entalpía, entropía y capacidad calorífica) a los que es sometido el carbono de la corteza terrestre para la formación de diamantes terrestres, pero bajo las condiciones de impacto de meteoritos. Para ello se utilizaron los softwares HSC Chemistry (versión 5.1) y wolframalpha manipulando las variables fase del carbono y temperatura, esta última de acuerdo a los valores registrados para la formación de micro-diamantes por impacto y diamantes terrestres, así mismo se estudiaron los resultados de acuerdo a la fase del carbono. Los resultados del trabajo indicaron que el fenómeno es exógeno y/o endógeno dependiendo de la fase del carbono capturado en el software y su grado de dispersión de energía. Ya que a mayor dispersión de energía la formación de diamantes no se ve favorecida.

Palabras Clave: Diamantes, Impacto, Energía, Meteoritos.

1. INTRODUCCIÓN

El diamante es un mineral conocido por su inigualable belleza y valor, posee la más alta dureza en la escala de Mohs. El metamorfismo del carbono es su proceso de génesis más conocido, de manera que es una de las formas más estables del carbono además del grafito [1]. El cual, es una fase predecesora al diamante y tiene una tasa de conversión despreciable a temperatura ambiente.

La mayoría de los diamantes naturales requieren condiciones muy específicas para generarse, tales como; elevada presión ($4.5e+9$ a $6.0e+9$ Pa), aunque ocasionalmente cristalizan diamantes a profundidades de 300-400 km, pero a un intervalo de temperatura comparativamente bajo que va desde aproximadamente 900-1300 °C. Estas condiciones se encuentran en dos lugares en la Tierra; en el manto de la litosfera bajo placas continentales relativamente estables, y en el sitio de impacto de meteoritos [2].

En el presente trabajo se presenta la formación de diamantes por medio de la energía generada en un impacto de meteorito, teniendo como antecedentes los datos sobre diamantes *de impacto* encontrados en el *Cráter Popigai* (Siberia, Rusia). Estos diamantes formados a partir de cierta presión ($3.5e+10$ Pa la menor estimación) y altas temperaturas (1300°C - 1500°C) generadas en el momento de impacto, al tener contacto con el basamento compuesto por grafito transformaron su estructura molecular convirtiéndolo en diamante, con diámetros promedio de 0.5 a 2 mm [3]. Un meteorito puede clasificarse de acuerdo al metamorfismo de choque que genere, en promedio un meteorito con la capacidad para formar un diamante provoca una presión mayor a $3.0e+10$ pascales y alcanza a llegar a la superficie de la tierra con temperaturas muy bajas. El impacto genera energía calorífica que puede llegar hasta los 2000°C [4]. Sin embargo, la formación de un micro-diamante presenta factores muy distintos a los factores de formación de un diamante terrestre normal. De acuerdo a la bibliografía consultada se desconoce la formación de diamantes de tamaño terrestre (3.51 g/cm^3 en promedio) durante un fenómeno de impacto; los micro-diamantes son la única variedad de carbono conocido en zonas de impacto, con tamaños menores a los 10 mm [5]. Por ello, con el uso del software HSC Chemistry (versión 5.1) y la aplicación wolframalpha trabajados en la asignatura Termodinámica del Programa Educativo de la Licenciatura en Ingeniería en Geología Ambiental, se realizó el análisis termodinámico para conocer datos como la capacidad calorífica, la entalpía de formación y la entropía de la génesis mineral de micro-diamantes producidos por impacto de meteoritos para simularlos en el estado carbono-diamante, partiendo de las temperaturas reportadas en la literatura.

2. PARTE EXPERIMENTAL

Como punto de partida se realizó una revisión bibliográfica relacionada con los micro-diamantes generados en el cráter Popigai, Rusia para conocer el tamaño promedio de dichas gemas y las temperaturas registradas en este proceso, así como aquellas temperaturas registradas para el proceso de generación de diamantes de forma natural.

Para conocer la variación de entalpía y entropía de ambas fases del carbono bajo condiciones de fenómeno de impacto; se realizó una comparación de la capacidad calorífica a presión constante (C_p) de grafito y de diamante usando la temperatura registrada en el *cráter Popigai* en Rusia. En el software se capturó el intervalo de temperaturas conocidas en un impacto de meteorito (-15°C a 2000°C), así como las temperaturas conocidas en la formación de un diamante terrestre (1300°C a 2000°C). Primero se calculó la entalpía y entropía del carbono en estado elemental, carbono en fase grafito y carbono en fase diamante en el intervalo -15°C a 2000°C . Se hizo el mismo calculo en HSC Chemistry con ambos intervalos de temperaturas (-15°C a 2000°C y 1300°C a 2000°C).

A continuación, se muestra un sistema de ecuaciones diseñado con el fin de describir la relación entre las variables energía interna, velocidad, temperatura y masa. Definiendo: U =energía interna, V =velocidad, T =temperatura, m =masa $U=U(V, T, m)$, dividiendo en dos casos $U=U(V, T)$ (caso 1) y $U=(m, T)$ (caso 2). Considerando el caso 1 $U=U(V, T)$:

$$dU = (dU/dv)T dv + (dU/dT)v dT \quad (\text{Ec. 1})$$

$$dV = (dv/dU)T du + (dv/dT)U dT \quad (\text{Ec. 2})$$

$$dT = (dT/dv)U dv + (dT/dU)v dU \quad (\text{Ec. 3})$$

Considerando el caso 2 $U=(m, T)$:

$$dU = (dU/dm)T dm + (dU/dT)m dT \quad (\text{Ec. 4})$$

$$dm = (dm/dU)T dU + (dm/dT)U dT \quad (\text{Ec. 5})$$

$$dT = (dT/dm)U dm + (dT/dU)m dU \quad (\text{Ec. 6})$$

Las ecuaciones obtenidas en el párrafo anterior son las que se han considerado para trabajar en el software HSC Chemistry 5.1. Teniendo en cuenta que la temperatura es la única variable con la que se pueden realizar cambios acerca de la formación de micro-diamantes por impacto; se han usado únicamente las ecuaciones 3 y 6, en las cuales se desarrolla de manera dependiente la temperatura y a partir de ello poder calcular la capacidad calorífica del carbono en fase grafito y carbono en fase diamante, así como determinar la cantidad de energía (entalpía) generada en el proceso debido a la naturaleza de la reacción.

3 RESULTADOS

En la Figura 1 se muestran los resultados de la capacidad calorífica del carbono en estado elemental a presión constante (C_p), calculados en el software HSC Chemistry 5.1 bajo el intervalo de temperatura conocido en un impacto de meteorito y temperatura de erupciones profundas, zona de formación de diamantes terrestres (-15°C - 2000°C).

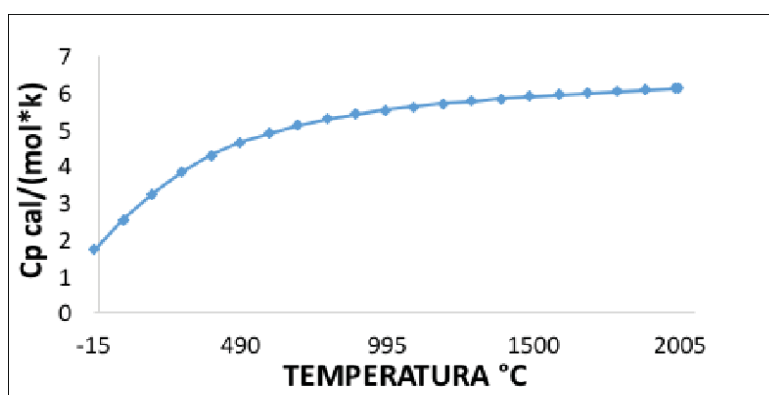


Figura 1. Variación de la capacidad calorífica del carbono elemental a presión constante (C_p) en función de las temperaturas registradas en la generación de diamantes por impacto de un meteorito.

En la Figura 1 se observa que la capacidad calorífica del carbono elemental aumenta de manera proporcional a la variación de la temperatura. Estos resultados indican que al aumentar la temperatura por consecuencia también la capacidad calorífica ya que es considerada la cantidad de energía que se necesita para elevar dicha propiedad. De igual forma es posible notar que entre los 385°C y 585 °C el carbono presentó un cambio de energía provocando que la línea de tendencia cambie de dirección, esto es debido a lo que se podría decir un “punto de saturación de energía” en donde la capacidad calorífica comienza a dispersarse por completo en la estructura del grafito. En termodinámica, esto se reconoce como un proceso endógeno ya que esta variación de energía se concentra en el sistema (masa / volumen de carbono sometido a un aumento de temperatura) y no en sus alrededores.

En la Tabla 1 se muestran los resultados del carbono en fase diamante al calcular su capacidad calorífica a presión constante (C_p), entalpía (ΔH) y entropía (ΔS) en el software HSC Chemistry 5.1 bajo el intervalo de temperatura conocido en un impacto de meteorito y temperatura de erupciones profundas, zona de formación de diamantes terrestres (-15°C - 2000°C).

Tabla 1. Capacidad calorífica a presión constante (C_p), entalpía y entropía del carbono en fase diamante considerando temperaturas generadas en un fenómeno de impacto.

T °C	C_p cal/(mol*K)	ΔH kcal/mol	ΔS cal/(mol*K)
-15	0.902	0.481	-0.709
25	1.445	0.453	-0.808
85	2.096	0.423	-0.899
185	2.937	0.389	-0.985
285	3.592	0.363	-1.036
385	4.111	0.344	-1.068
485	4.515	0.33	-1.087
585	4.812	0.322	-1.098
685	5.007	0.314	-1.106
726.85	5.059	0.311	-1.11
726.85	5.074	0.311	-1.11
785	5.182	0.306	-1.115
885	5.336	0.299	-1.121
985	5.46	0.294	-1.125
1085	5.564	0.29	-1.128
1185	5.652	0.287	-1.13
1285	5.729	0.284	-1.132
1385	5.797	0.282	-1.133
1485	5.857	0.28	-1.134
1585	5.913	0.279	-1.135
1685	5.963	0.277	-1.136
1785	6.01	0.276	-1.137
1885	6.054	0.275	-1.137
1985	6.096	0.274	-1.138
2000	6.102	0.274	-1.138

En la Tabla 1 se observa que la capacidad calorífica del carbono en fase diamante es menor en cada lapso de temperatura que la obtenida en el carbono en estado natural (como elemento); diamante: C_p de 0.902 a 6.102 cal/(mol*K) y grafito C_p de 1.698 a 6.11 cal/(mol*K). Sin embargo, el punto de saturación en el carbono en fase diamante ocurre a una temperatura mayor (726.85 °C). Esto quiere decir que la cantidad de energía útil para elevar la temperatura del sistema está en el carbono como elemento y que el carbono en fase diamante es el sistema que transfiere su energía a sus alrededores, por lo tanto, su C_p será menor.

En la Figura 2 se muestra la representación gráfica de la variación de la entropía y capacidad calorífica del carbono en fase diamante en el intervalo de temperatura de -15°C a 2000°C. En la Figura 2 se observa que hay una disminución en la entropía (valores negativos) respecto al aumento de la temperatura, debido a la pérdida de energía en el carbono diamante (considerando P constante). Esto se da debido a que a menor entropía hay un menor grado de desorden en el sistema, en este caso el sistema es el carbono en fase diamante e indica también la espontaneidad del mismo; por lo tanto, la formación del diamante a estas temperaturas no es de manera espontánea; ya que los procesos espontáneos se dirigen

hacia donde la dispersión de la energía es mayor y en este caso disminuye (menor entropía). "Cuando ΔS es negativo y ΔH es positivo, el proceso no es espontáneo a ninguna temperatura, porque el sistema se vuelve más ordenado y absorbe calor en lugar de liberarlo (Khan, 2018)". En otras palabras, es necesario el desorden para la espontaneidad.

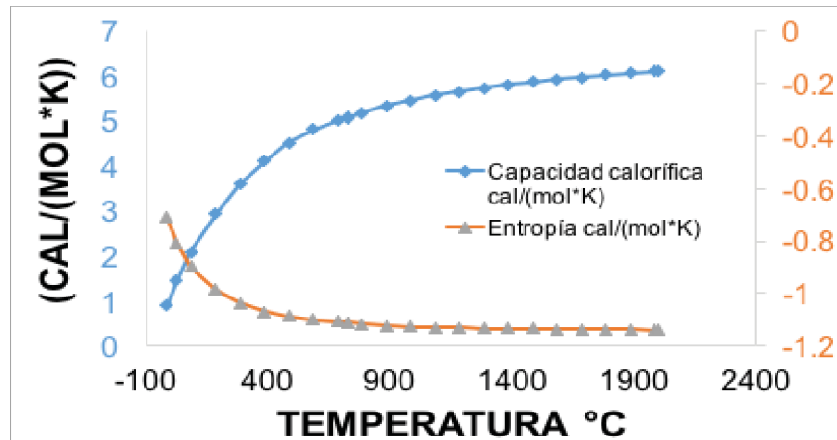


Figura 2. Variación de la Capacidad calorífica y la entropía (ΔS) del carbono en fase diamante en función de la temperatura.

En las Figura 3 se muestra el comportamiento de la entalpía y capacidad calorífica a presión constante en el intervalo de temperatura de -15°C a 2000°C . En la Figura 3 se observa que los datos para el carbono en fase diamante no fueron negativos, pero los resultados de la entalpía con respecto a la temperatura indican que es negativa porque disminuye de acuerdo a la fase inicial (-15°C) y la fase final (2000°C). Esta pérdida de energía en forma de calor a presión constante se traduce como un proceso exotérmico.

En la Tabla 2 se muestran los resultados del carbono en fase grafito obtenidos a partir del análisis realizado con datos de la bibliografía consultada. Tomando en cuenta la temperatura que llegó a registrarse al impactar un meteorito en el cráter Popigai en Rusia (1300°C) y la temperatura en promedio con la que se forma un diamante terrestre de forma natural (2000°C).

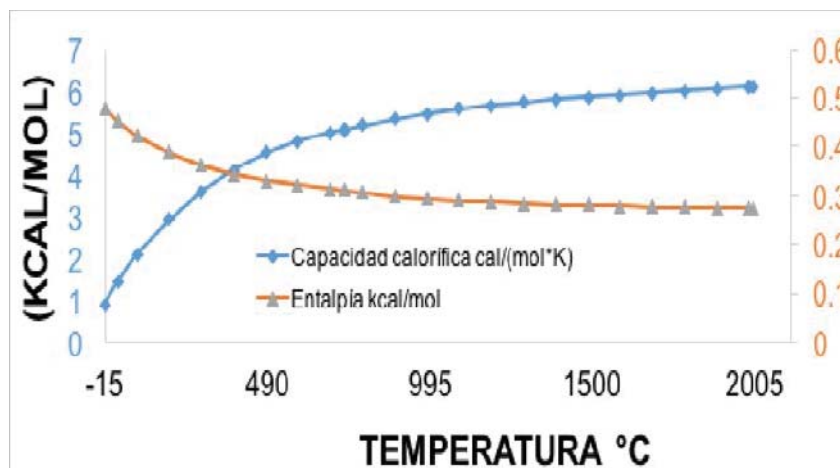


Figura 3. Variación de la Capacidad calorífica y la entalpía (ΔH) del carbono en fase diamante en función de la temperatura.

Tabla 2. Entalpía y entropía de formación con base en temperaturas generadas por impacto de meteorito.

T	ΔH	ΔS
C	kcal	cal/K
1300	0.284	-1.132
1400	0.282	-1.133
1500	0.28	-1.134
1600	0.278	-1.135
1700	0.277	-1.136
1800	0.276	-1.137
1900	0.275	-1.137
2000	0.274	-1.138

En la Tabla 2 se observa que los datos tienden a elevarse conforme aumenta la temperatura pero a menor velocidad comparados con los datos obtenidos del carbono-diamante, y a diferencia de los datos obtenidos en el gráfico 1, en el cual únicamente se trazó C_p debido a que los valores de entropía y entalpía resultaban igual a cero; esto es debido a que la cantidad de energía que se encuentra en movimiento en el carbono en fase elemental es considerada como estándar; ya que no se está considerando ninguna condición extraordinaria o un estado específico puesto que es la formación del elemento a partir del mismo elemento., en este caso la columna de entalpía y entropía ya no exhiben esos valores; dado que ya no se está trabajando con solo el elemento carbono, sino con carbono en fase grafito.

La Figura 4 muestra la variación de la entalpía respecto a un intervalo de temperatura de 1300 °C a 2000°C del carbono en fase grafito.

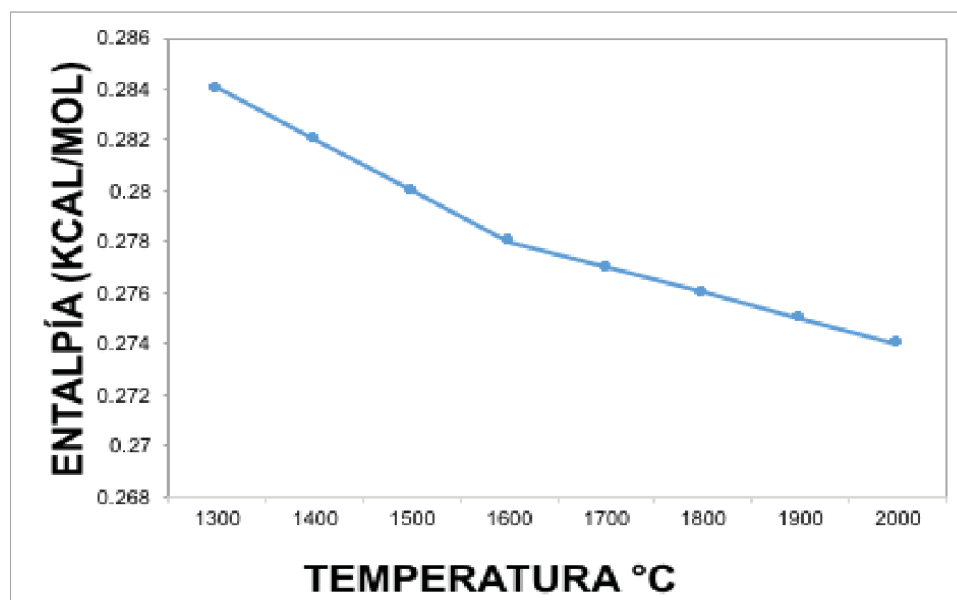


Figura 4. Entalpía de formación de carbono en fase grafito a carbono en fase diamante en función de la temperatura generada en el cráter Popigai (1300°C) y la temperatura necesaria para la formación de diamantes terrestres (2000°C).

La cantidad de energía que se transfiere para igualar ambas temperaturas depende de la capacidad calorífica y de la diferencia de temperatura entre los cuerpos. En la Figura 4 se observa que para obtener carbono en fase diamante a partir de grafito, manteniendo la presión constante, es necesario ceder energía al sistema y como se puede observar; este se manifiesta como una disminución, con lo cual el proceso es posible identificarlo como endotérmico y la transferencia de energía en forma de calor como positiva.

En la Figura 5 se aprecian los valores de entropía de la reacción de $C(G) = C(D)$, es decir, carbono en fase grafito a carbono en fase diamante.

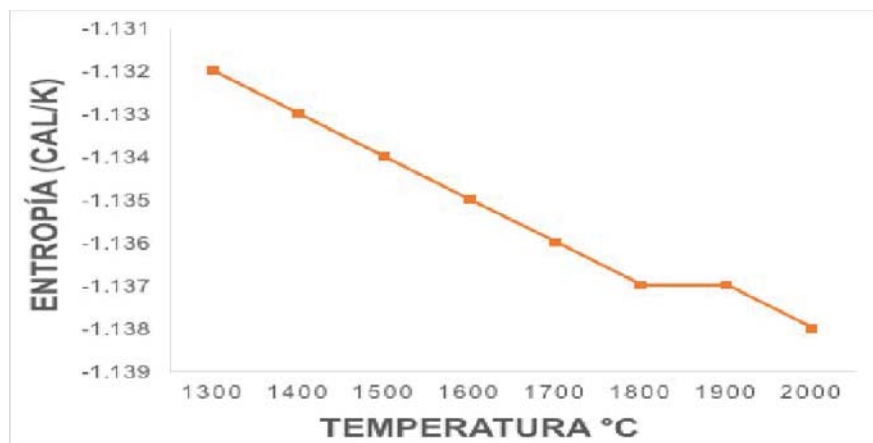


Figura 5. Entropía de $C(G) = C(D)$ en función de la temperatura límite de formación de diamante terrestre y la temperatura generada en un impacto de meteorito.

En la Figura 5 se muestra que se obtuvieron valores negativos en la entropía de la reacción y llegando a un equilibrio a una temperatura de 1800 °C a 1900 °C. De acuerdo con la primera ley de la termodinámica, la energía se conserva, pero esa energía suele dispersarse. Cuando la energía se dispersa es menos aprovechable, y es lo que se puede ver en esta figura, al observar estos resultados es posible observar que el grado de dispersión mayor no siempre por ser positivo debe ser favorable, en este caso es notoria una menor entropía, esto quiere decir que la energía, sí se aprovecha de manera útil a pesar de que la entropía sea menor. Si los valores hubiesen sido positivos entonces la energía dispersa es más difícil de aprovechar y por consecuencia el micro-diamante no se formaría. La espontaneidad es pasar de un estado de menor grado de dispersión de energía a uno de mayor, es decir, de menor a mayor entropía; sin embargo, en la formación de micro diamantes no es así por lo tanto este fenómeno no es espontaneo y con respecto a la entalpía, al disminuir de manera proporcional el grado de dispersión significa que el sistema transfiere energía en forma de calor hacia los alrededores por lo que esto se traduce en una disminución de la entalpía, de manera que es un fenómeno exógeno. Pero también es un proceso endotérmico (el calor se transfiere desde los alrededores hacia el sistema) debido a que la entalpía del producto (carbono-diamante) es mayor que la entalpía de los reactivos (carbono-grafito).

4. CONCLUSIONES

Con base en los resultados obtenidos se puede decir que el proceso para formar micro-diamantes depende de la entalpía de formación y la entropía presente en la zona de impacto cuando comienzan las variaciones de temperatura, y que para formar diamantes de un

tamaño normal (como los generados en erupciones profundas por debajo de las placas litosféricas) en un proceso como este sería muy difícil, necesitaría tiempo, más que solo temperatura para desarrollar diamantes por impacto; y esto se comprueba con el grado de espontaneidad del fenómeno; ya que, en cuanto a la espontaneidad del sistema (carbono), la formación de carbono en fase diamante considerando temperaturas generadas en un fenómeno de impacto fueron indicativas de un proceso no espontáneo y por ende lo es para el caso de los micro-diamantes, por lo que el grafito no se convertirá en micro-diamante de manera simultánea al impacto. Adicionalmente, al no considerar la entropía generada en el impacto, así como la entalpía de formación en este sistema termodinámico y solo se tomarán en cuenta los datos de capacidad calorífica (C_p) con relación a la temperatura; no se demostraría que la energía necesaria para formar micro-diamantes es insuficiente para formar diamantes terrestres, a pesar de que el grafito presente una capacidad calorífica idónea para su formación; se necesita tiempo y espacio para ello.

AGRADECIMIENTOS

Los autores externan su gratitud al Programa Educativo de la Licenciatura en Ingeniería en Geología Ambiental de la UAEH (Asignatura Termodinámica), al CONACyT por el apoyo financiero otorgado en la beca doctoral 588107, así como al Programa de Cátedras CONACyT.

BIBLIOGRAFIA

- [1] E. J. Tarbuck, F.K. Lutgens. Ciencias de la Tierra. Una introducción a la geología física, 8 ed, Pearson, Madrid (2005).
- [2] King, H. M. (2005). How do diamonds form? Obtenido de Geology.com: <https://geology.com/articles/diamonds-from-coal/>
- [3] V. Masaitis. Research Gate, 33, (1998) 349-359.
- [4] John W. Stewart. El mundo de la alta presión, 1 ed, Editorial Redverté mexicana (1971) 150-153.
- [5] E. Erlich, W. D. Hausel. Diamond Deposits: Origin, Exploration, and History of Discovery, 1 ed, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc. USA (2002) 3-33.
- [6] A. Khan. Energía libre. Recuperado el 14 de noviembre de 2017, de Energía libre de Gibbs: <https://es.khanacademy.org/science/biology/energy-and-enzymes/free-energy-tutorial/a/gibbs-free-energy>