

Caracterización de rocas arcillosas sello por microscopía electrónica de barrido y microanálisis de rayos x

Carlos Morales- Echevarría, Edgar A. George - de Armas, Silio López- Guerra, Doramis Vega –Torres Juan Antonio Alonso-Pérez*

Centro de Investigación del Petróleo. Churruca # 481, Cerro, La Habana, Cuba, E-mail: cmorales@ceinpet.cupet.cu. *Centro de Investigaciones para la Industria Minero Metalúrgica, Carretera de Varonas 12028, kilómetro 11/2 Capdevila, Boyeros, La Habana, Cuba, E-mail:cipimm@ip.minbas.cu

Recibido: 2 de mayo de 2014. Aceptado: 19 de diciembre de 2015.

Palabras clave: rocas arcillosas sellos, microscopía electrónica

Key words: clayey rocks, seals, mineralogy, electron microscopy.

RESUMEN. La franja norte de crudos pesados representa la fuente principal de hidrocarburos cubanos. Sobre los reservorios se reportan varios espesores arcillosos. Tales secuencias de dichas rocas caracterizan fundamentalmente la base de la Formación Vega Alta, que le proporciona un carácter sellante. La microscopía electrónica de barrido con microanálisis de rayos x se utilizó recientemente como parte de la metodología de análisis, desarrollada en la caracterización de rocas arcillosas sellos en esa franja, la cual consistió en integrar la información morfológica y química. La aplicación de estas técnicas se realizó en muestras de núcleos de perforación y afloramientos. Los resultados de los análisis permitieron que se generara información sobre la naturaleza de las rocas sellos, lo que constituyó un aspecto de importancia a tener en cuenta en la exploración de hidrocarburos. Con la aplicación de estas técnicas se determinaron arcillas, pertenecientes a la mezcla compleja del tipo illita y esmectita. La composición química evidenció la naturaleza de estas rocas, en la que los mayores elementos son: silicio, aluminio, calcio y magnesio. Los resultados del estudio permitieron realizar una mejor caracterización del sello petrolero y posibilitaron llevar a cabo estudios más detallados en la Franja Norte y en otras regiones de interés, aspecto que constituyó el principal objetivo de la presente investigación.

ABSTRACT. The strip of Pand north of heavy crude oil represents the main source of Cuban hydrocarbons. About the reservoirs several thickness of clayey sediments are reported. Such sequences of these rocks characterize the base of Vega Alta formation providing a sealing character. Recently scanning electron microscopy with X ray microanalysis have been used as part of a methodology of analysis, developed for clayey seal rock characterization in thouse strip of land. This methodology consisted on the integration of the morphological and chemical information. These techniques were applied to drilling cores and outcrop samples. The results of the analysis allowed to get information about the nature of the seal rocks, which is important aspect to take into account for the hydrocarbon exploration. With the application of these techniques, clays belonging to the complex mixture illite, smectite were determined. The spectra obtained by x-ray fluorescence, corresponding to clayey rocks. The chemical composition evidence the nature of these rocks, where the major elements are silicon, aluminum, calcium and magnesium. These studies allowed a better characterization of the oil seal, and allowed more detailed studies, not only in the strip of land north and also in other areas, aspect which is the main objective of the present research.

INTRODUCCIÓN

Para la existencia de reservorios de petróleo y gas es imprescindible la presencia de rocas que controlen la migración y la acumulación de los hidrocarburos, las que se conocen como rocas sello. El sello petrolero está constituido por

secuencias de rocas impermeables, indispensable en la existencia de la trampa, la cual impide al fluido escapar y a su vez permite su conservación¹. Cuando estas rocas se localizan sobre rocas madres maduras, en gran parte controlan la distribución regional de hidrocarburos genéticamente relacionados y se manifiestan como sellos. La geología de los campos petroleros de la franja norte de crudos pesados, es muy compleja, tanto desde el punto de vista estratigráfico como estructural. Las estructuras que sirven de trampas a los hidrocarburos están formadas por rocas carbonatadas. Estas trampas estructurales están selladas por arcillas, pedernales, calizas y sedimentos de granos finos del terciario (Formación Vega Alta), la cual recubre casi siempre los reservorios.² La Formación Vega Alta constituye el sello regional en la franja norte de crudos pesados y la presencia de rocas arcillosas caracterizan generalmente dicha formación y le proporciona la naturaleza sellante.³ Por su composición litológica es de gran importancia dentro de los sistemas petroleros de esa franja, y constituye lo que se denomina el sello regional.⁴ Es un olistostroma típico que está cubierto por mantos alóctonos de rocas máficoultramáficas, vulcanitas de arco y de la sección inferior de la propia secuencia de la zona de Placetas. Contiene grandes inclusiones (bloques, olistolitos y olistoplacas) de la misma composición.⁵ Dichas arcillas constituyen capas potentes de sedimentos depositadas fundamentalmente durante la orogenia cubana. Muchas de estas rocas son el resultado de la destrucción y redeposición de sedimentos asociados al complejo oiolítico y al arco volcánico.

Las arcillas constituyen un grupo numeroso de materiales de composición y estructura compleja que sobrepasan las 250 variedades. Desde el punto de vista químico, las arcillas son aluminosilicatos hidratados, por consiguiente, pertenecen al grupo de los minerales de silicato. Sus estructuras son principalmente cristalinas aunque existen algunos materiales amorfos. En su mayoría pertenecen a la subclase filosilicatos, que significa silicatos en forma de hoja. La denominación hace referencia a una de sus principales características: su estructura estratificada con una predominante dirección de exfoliación.⁶

En la mayoría de los suelos tropicales generalmente predominan las mezclas de minerales arcillosos (caolinita, clorita, gibbsita, hematita, etc.). Sin embargo, a veces es posible observar suelos donde un tipo de arcilla predomina porcentualmente sobre las otras. Como ejemplo están los suelos vertisoles, en los que predominan las arcillas expandibles del grupo esmectítico como la montmorillonita.⁷

La aplicación de la microscopía electrónica se inició en Alemania a los pocos años de haberse perfeccionado el microscopio electrónico. Los primeros resultados publicados sobre bentonita y suelos se realizaron por Hofmann en el 1940.⁸ Con su aplicación los geólogos dieron un paso por delante a lo realizado en el estudio de las secciones delgadas.⁹ Con ella se indaga mejor sobre la morfología de los minerales arcillosos de modo que se examina la distribución de estos dentro de los poros. Se aplica con éxito en la exploración petrolera, lo que contribuye a la identificación de microfósiles para que se determine la edad, los paleoambientes, así como también, resuelve problemas vinculados con la evaluación de la calidad de los reservorios a través de estudios diagenéticos. La aplicación de esta técnica permite la observación tridimensional de aspectos texturales a elevados aumentos y se complementa con la de difracción de rayos x, lo que permite comprobar con mayor seguridad el diagnóstico. La valoración de la calidad del sello exige reconocer las especies elementales que lo componen y con este objetivo, se aplican las técnicas propuestas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se tomaron muestras de rocas arcillosas tanto en pozos como en superficie, dado que ellas son las que presentan mejores propiedades sellantes. Se destaca que las muestras seleccionadas de pozos y afloramientos fueron de la formación Vega Alta, la cual se considera el sello regional de la franja norte de crudos pesados. Las técnicas utilizadas en esta investigación fueron la microscopía electrónica de barrido (MEB) y la espectroscopía de rayos X.

Para la MEB se utilizó el equipo: TESCAN. Vega 51305 B

Condiciones de trabajo del equipo: MEB

MAG: 1000x

Hv: entre 10 y 20 KV.

VAC: vacío

DET: SE Detector secundario.

WD: distancia de trabajo: 7 mm para la obtención de la imagen y 23 mm para la obtención de los espectros.

Device: serie o modelo del equipo.

Se trabaja a una escala de 100.

El microscopio tiene integrado un sistema de microanálisis por espectroscopía de dispersión de energía de rayos X, EDERx. Modelo Inca 350, con un detector de silicio para elementos ligeros y resolución de 138 eV de la Oxford Instruments.

PARTE EXPERIMENTAL

La MEB se basa en el principio de la microscopía óptica, en la que se sustituye el haz de luz por un haz de electrones. Con esto se consigue hasta los 100 Å, resolución muy superior a cualquier otro microscopio óptico. Debido a que el límite de amplificación de un microscopio óptico está restringido por la longitud de onda de la luz visible; los

microscopios electrónicos emplean electrones, que tienen una longitud de onda mucho menor que la de la luz y pueden revelar estructuras mucho más finas. La longitud de onda más corta de la luz visible es de alrededor de 4000 Å ($1 \text{ Å} = 1 \times 10^{-10} \text{ m}$). La longitud de onda de los electrones utilizada en los microscopios electrónicos es de 0,5 Å aproximadamente. La técnica de MEB se rige por la comparación de las características morfológicas de los minerales con su composición química elemental que se determina mediante la EDERx, la cual se fundamenta en que un haz de electrones colisiona con los electrones de las capas más internas de los átomos de la muestra y saca un electrón de su sitio, con lo que se crea una vacancia, la cual es ocupada por un electrón de las capas más externas. La transición de ese electrón de la capa externa a una interna genera radiación X. Si la transición se produce de las capas cercanas a la interna se llama radiación de tipo K. Si la transición ocurre de las capas más externas a la capa interna, se llama transición L, M, N, etc. Para que se originen todas estas transiciones, los átomos deben tener electrones suficientes para producir todas las capas necesarias de electrones. El detector de rayos x de dispersión de energía recoge un único espectro emitido por todos los elementos de la muestra a la vez; pero genera un impulso eléctrico para cada fotón de rayos x incidente, cuya altura es equivalente a la energía del fotón. Cada impulso eléctrico generado es separado y almacenado de acuerdo con su valor mediante un analizador multicanal de alturas de los impulsos. En el estudio, se realizaron típicamente análisis cualitativos y cuantitativos de los constituyentes mayoritarios de las áreas de interés. La principal ventaja del análisis por dispersión de energía es su rapidez debido a que el espectrómetro recoge simultáneamente todas las radiaciones características de los elementos presentes en la muestra.

Para proceder al análisis, la muestra se tritura, se coloca en el portamuestras y se recubre con una mezcla de oro y paladio (Au-Pd) en una atmósfera de argón.

Numerosos estudios internacionales toman como referencia la montmorillonita de Wyoming (MMT, Wyoming SWy2). La composición de la montmorillonita SWy2 ha sido reportada de la forma siguiente: $(\text{Si}_{7,94}\text{Al}_{0,06})(\text{Al}_{2,88}\text{Fe}_{0,5}\text{Mg}_{0,62})\text{O}_{20}(\text{OH})_4\text{Na}_{0,68}^{10}$.

Para el análisis de los resultados de la microscopía electrónica, la micrografía perteneciente a la variedad de arcilla illita –smectita (Figura 1) de la MEB. El Atlas de Petrología⁹ de MEB se tomó como referencia para analizar las micrografías obtenidas (Figuras 2, 3 y 4). Los espectros característicos de dichas arcillas se obtuvieron mediante la espectroscopía de dispersión de energía de rayos x (Figura 5). Se cumplió información sobre la composición cuantitativa de estas rocas (Tabla I).

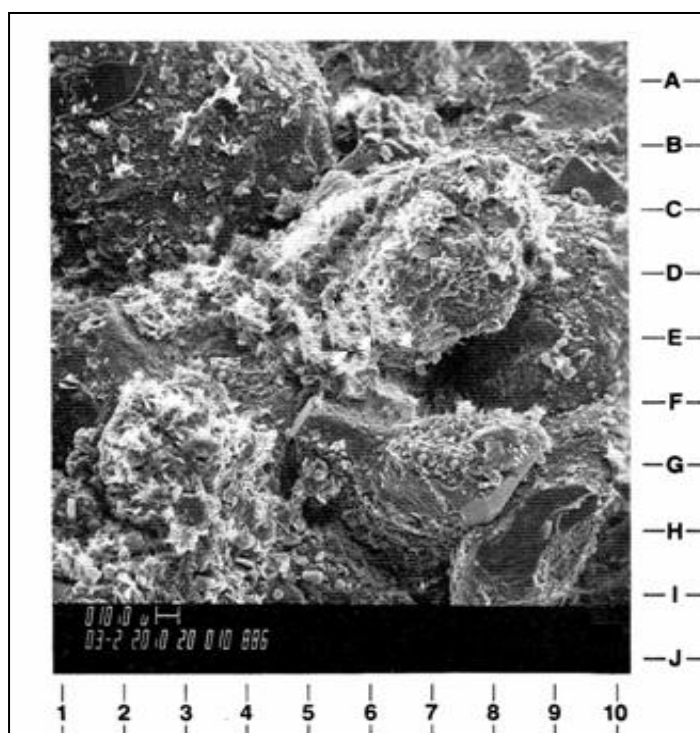


Fig. 1. Micrografía patrón, illita-smectita, 1000x (Welton, 1984).

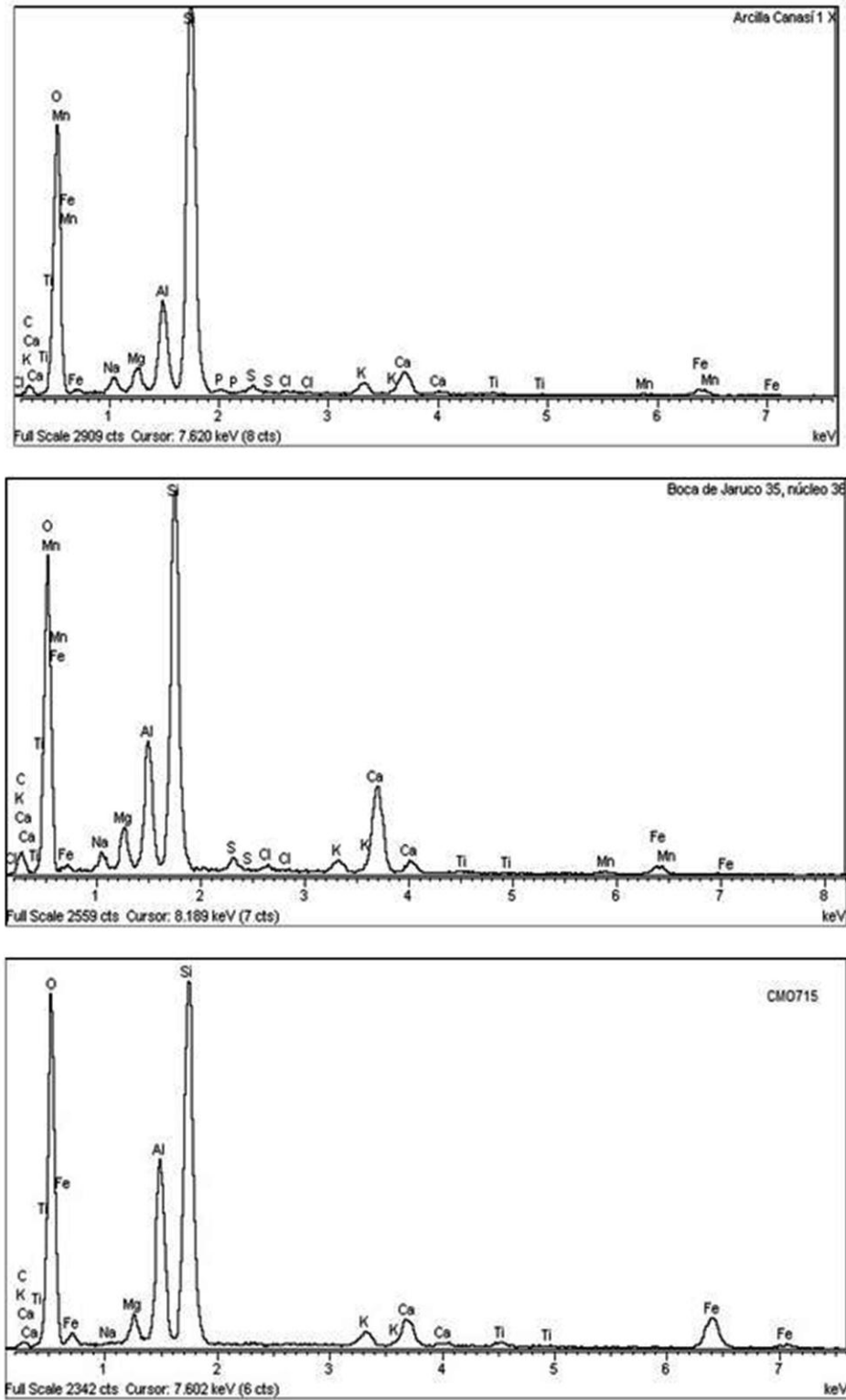


Fig. 5. Espectros de rocas de composición silicatada y aluminica de naturaleza arcillosa.

Tabla 1. Composición química cuantitativa obtenida por microanálisis de rayos x

Muestras/Elementos Químicos (%)	O	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Ti	Mn	Fe
Arcilla Canasí 1 X	55,78	1,45	1,79	5,74	27,72	0,39	0,59	0,21	1,25	2,6	0,21	0,37	1,91
Boca de Jaruco núcleo 36	56,82	1,27	2,46	6,21	20,63	0,1	0,81	0,41	0,98	7,81	0,16	0,46	1,89
CMO715	55,03	0,14	1,54	9,32	21,54	0,02	0,09	0,08	1,26	2,5	0,55	0,1	7,83

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La valoración de la calidad del sello exigió reconocer las especies elementales que lo componen, con ese objetivo se aplicaron las técnicas descritas las cuales ofrecieron datos que garantizaron determinar la naturaleza de los compuestos químicos presentes, con lo que se aseguraron resultados de composición y propiedades físico químicas que complementaron la calidad de la presente investigación.

Las arcillas del grupo Illita–smectita se caracterizaron porque presentan texturas que simulan vértebras o costillas tal y como se observó en la muestra de referencia (Figura 1). En las micrografías de las figuras 2, 3 y 4 se apreciaron las texturas antes explicadas, lo que evidenció el mismo grupo de arcillas, al que se hace referencia. Lo anterior permitió afirmar que lo observado en pozos y superficie corresponde al mismo grupo de arcillas. Es importante señalar que la identificación de la mezcla illita–smectita contó con el apoyo de la difracción de rayos x.

Los procesos diagenéticos de los minerales arcillosos afectan fundamentalmente a los cambios mineralógicos con el enterramiento.¹¹ Las arcillas del grupo de las smectitas pueden formarse a partir de transformaciones ocurridas en rocas de origen volcánico.¹² Los minerales de las arcillas no experimentan modificaciones significativas en condiciones de enterramiento moderadas (2 o 3 km según el gradiente geotérmico).¹²

Se conoce que a grandes profundidades con el aumento de la presión y la temperatura las arcillas se hacen notablemente reactivas. La reacción más significativa que ocurre a profundidad corresponde a la transformación de esmectita a illita.



En esta conversión, la esmectita pierde su agua interlamina a unos 100 °C o 130 °C, y siendo la relación $\text{K}^{+}/\text{H}^{+}$, de la agua de mar normal. En esta etapa, la esmectita pasaría a interstratificados.⁹

Los rasgos texturales típicos que se observaron en las imágenes indicaron la existencia de aglomerados de arcilla y la ausencia de laminación de las rocas, lo que permite inferir que las rocas estudiadas se depositaron en ambientes de elevada energía. La laminación se determinó por el proceso de sedimentación. En ambientes tranquilos la deposición se presenta según la dirección de orientación preferencial y la roca exhibe textura laminar en todas las escalas, en tanto que en ambientes marcadamente energéticos las rocas arcillosas, por lo general, no presentan laminación, o sea, su textura es al azar¹³.

En los espectros característicos de dichas arcillas, ellos se detectó la presencia de silicio (Si) como componente mayoritario que se adjudicó a las fases silicatadas (Figura 5). En orden decreciente se relacionaron los cationes de aluminio (Al), calcio (Ca), magnesio (Mg), sodio (Na), potasio (K) y hierro (Fe). Los espectros correspondieron a las muestras arcillosas, la composición química evidenció la naturaleza de dichas rocas de composición silicatada alumínica en la que los elementos mayoritarios son: silicio, aluminio, calcio y magnesio (Tabla 1). El contenido de calcio justifica el carácter carbonatado de los sedimentos arcillosos, aspecto que se manifiesta en mayor o menor medida en tales rocas. Los elementos que se observaron en menor proporción fueron: hierro, potasio y azufre. Se consideraron no constituyentes en las citadas arcillas y sí contaminantes que se vinculan frecuentemente con las rocas adyacentes. El caso particular del azufre es asociado con el hierro (pirita). Se constataron con los análisis las semejanzas que existen en la composición química tanto de las muestras de los pozos como de las de la superficie, aspecto que permitió correlacionar los sedimentos. En este caso, se presentaron los espectros de las muestras de los pozos Canasí 1X núcleo1 y Boca de Jaruco 35, núcleo 36 y la muestra de la superficie CMO715 de la formación Vega Alta tomada en la localidad Benito Juárez, Placetes, Villa Clara.

Las arcillas del grupo de las smectitas presentan generalmente una composición química variable (Tabla 1), lo que depende mucho del contenido de agua.¹⁴

Desde el punto de vista de rocas sello las arcillas presentan una baja permeabilidad, lo que está relacionado con el pequeño tamaño de sus granos. En realidad, la permeabilidad tiene una estrecha relación con el tamaño de grano, así como con el material y el tipo de cementación.¹⁵

Las arcillas determinadas, dada su naturaleza, tienden a comportarse en gran medida como poco tenaces. La permeabilidad de cualquier formación arcillosa depende fundamentalmente del grado de tenacidad de la unión entre las partículas individuales, o sea, la permeabilidad será máxima si todas las partículas se encuentran compactadas y agregadas, mientras que será mínima si están dispersas y circulando con el fluido.¹⁶ En los casos estudiados, los fluidos que se mueven a través de los poros, tropiezan con condiciones críticas de flujo, caminos y paredes porales

tortuosos y rugosas con gran superficie específica y minerales reactivos tales como arcillas, micas, feldespatos y compuestos de hierro.

CONCLUSIONES

Las investigaciones realizadas en rocas de naturaleza arcillosa permitieron comprobar la eficacia de microscopía electrónica de barrido y de la espectroscopía de dispersión de energía de rayos X, determinar de la composición mineralógica exacta en arcillas.

Asimismo, su aplicación permitió, determinaron la presencia del grupo de arcillas illita-smectita, así como realizar la caracterización morfológica de las rocas, lo que se infiere también en las condiciones de sedimentación.

Por su parte, la espectroscopía de dispersión de energía de rayos X posibilitó determinar cualitativa y cuantitativamente la composición elemental de las rocas estudiadas.

Los resultados permitieron caracterizar rocas sello en la franja norte de crudos pesados y pueden servir de base para la correspondiente aplicación de estas técnicas en otras áreas de interés petrolero.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Morales C, George de Armas E, López S, García D. Caracterización mediante métodos instrumentales del sello de yacimientos petroleros de la Franja Norte de Crudos Cubanos. Anuario de la Sociedad Cubana de Geología. 2013; 1(1):13-17.
2. González D. Desarrollo de modelos de interpretación petrofísica en reservorios carbonatados, aplicados en yacimientos de la Franja Norte de Crudos Pesados. Tesis presentada en opción al título académico de Especialista en Perforación de pozos de petróleo y producción de petróleo. Universidad de Matanzas Camilo Cienfuegos, 2010.
3. Morales C. Estudio litológico facial del sello en la Franja Norte de Crudos Pesados. [Tesis presentada en opción al título académico de Maestría en Geología]. Centro Universitario de Pinar del Río, octubre de 2008.
4. Delgado D, Pérez L, Blanco S, García Y. La Formación Vega Alta en la región occidental de Villa Clara, correlación con el sello de la Franja Norte de Crudos Pesados. III Convención Cubana de Ciencias de la Tierra. Palacio de las Convenciones de La Habana, abril de 2009.
5. Iturralde-Vinent M. Estratigrafía del cinturón plegado del norte de Cuba. Anuario de la Sociedad Cubana de Geología. 2013; 1(1).
6. George de Armas EA, Cremé Espinosa A, Morales Echevarría C, López Guerra S, Agüero Gutiérrez G. Valoraciones sobre fundamentos de la interacción roca-fluido. Revista CENIC Ciencias Químicas, publicación electrónica 2013: 44 [Consultada 3 de julio de 2014]. Disponible en: <http://revista.cnic.edu.cu/revistaCQ>.
7. Fundamentos de edafología. [Consultado 20 de noviembre de 2014]. Disponible en: <http://books.google.com.cu/books?isbn=997764148X>.
8. Besoain E. Mineralogía de arcillas y suelos. [Consultado 27 de diciembre de 2013]. Disponible en: <http://books.google.com.cu/books>.
9. Welton JE. SEM Petrology Atlas. The American of Petroleum Geologists. ed. Tulsa; 1984.
10. Yannan C, Jeroen S van Duijneveldt. Adsorption of Polyetheramines on Montmorillonite at High pH. Langmuir. American Chemical Society; 2010; 26(22): 17210-17217.
11. Arche A. Sedimentología II. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Edición corregida y aumentada, Madrid: 1992.
12. Montserrat I. Los minerales de la arcilla. Atlas de asociaciones minerales en lámina delgada. Volumen 1. [Consultado 27 de diciembre de 2013]. Disponible en: <http://books.google.com.cu>.
13. Cobaleda G, Benavides C. Caracterización integral de rocas arcillosas por microscopía electrónica de barrido, microanálisis y difracción de rayos x. Revista CODICID. 1999; 1(4).
14. Betejtin A. Curso de Mineralogía. Segunda edición, Moscú: Editorial Mir; 1970.
15. Reyes O. Clasificación petrofísica de tipos de rocas en reservorios carbonatados de la Franja Norte de Crudos Pesados de Cuba. Revista Cubana de Ingeniería. 2014; (2): pp. 00 - 00
16. Rodríguez Domínguez G. Evaluación de la influencia de propiedades de fluidos de perforación en el daño a la formación en el yacimiento Seboruco [Tesis en opción al título académico de Especialista en perforación de pozos de petróleo y producción de petróleo]. Matanzas, Universidad de Matanzas, abril de 2010.