


Autenticación del meteorito arenoso AR-51 con técnicas físicas para su caracterización

 María Cerón^{*1} y Jorge Bravo¹

¹ *Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Facultad de Ciencias Físicas. Laboratorio de Análisis de Suelos. Lima, Perú.*

Recibido 04 Ene 2021 – Aceptado 28 Feb 2021 – Publicado 02 Jul 2021

Resumen

Se evidencia la autenticación de la muestra meteorítica Ar-51, como un meteorito arenoso, proveniente de la región de Arequipa, Perú. Las técnicas empleadas para su estudio fueron fluorescencia de rayos X (FRX), difracción de rayos X (DRx) y espectroscopia Mössbauer de transmisión (EMT), que registró datos a temperatura de ambiente, (TA). Los resultados de las fases estructurales consisten principalmente de albita, piroxeno, clinopiroxeno, augita, maghemita y magnetita; y EMT, revela que su composición mineralógica contiene tres sextetos magnéticos, de los cuales, 2 de ellos se asignan a los sitios de la magnetita, el primer sexteto correspondiente al campo magnético mayor es asignado al sitio de Fe^{3+} , sitio A (posición tetraédral); el segundo se adjudica al sitio B, donde se alojan los cationes Fe^{3+} y Fe^{2+} por igual (posición octaédral) y el tercer sexteto magnético se adjudica a la maghemita; la mezcla de posiciones (capas octaédricas y octaédricas/tetraédricas) a lo largo de la dirección [111] genera superposición de planos, los cuales se consideran más estables y tres dobletes paramagnéticos, de los cuales dos de ellos están asociados con cationes estructurales de Fe^{2+} , que podrían ser adjudicados a los subgrupos del silicato piroxeno y el tercer doblete está asociado al sitio del catión de Fe^{3+} .

Palabras clave: Meteorito Ar-51, espectroscopia Mössbauer de transmisión, difracción de rayos X, fluorescencia de rayos X, albita, piroxeno, magnetita, maghemita..

Authentication of the AR-51 stony meteorite with physical techniques for characterization

Abstract

There is evidence for the authentication of the meteoritic sample Ar-51 as a stone meteorite, found in the Arequipa Region, Peru. The analytical techniques used for this study were X-ray fluorescence (XRF), X-ray diffractometry (XRD) and room temperature (RT) transmission Mössbauer spectroscopy (TMS). The results pertaining the structural phases found by XRD include mainly albite, pyroxene, clinopyroxene, augite, maghemite and magnetite. TMS reveals that its mineralogical composition includes three magnetic sextets and two paramagnetic doublets. Two of the sextets are assigned to cation sites in magnetite: the sextet with the higher hyperfine magnetic field is assigned to an Fe^{3+} cation A site (tetrahedral position) and the second one is assigned to the B site, which is occupied evenly by Fe^{3+} and Fe^{2+} cations (octahedral position); and the third magnetic sextet is assigned to maghemite. The presence of both sites (octahedral and tetrahedral layers) along the (111) direction induces plane superposition which is considered more stable. Two of the paramagnetic doublets are associated with structural Fe^{2+} cations that could be assigned to subgroups of the pyroxene silicates, and the third doublet is associated to a Fe^{3+} cation site.

Keywords: Ar-51 meteorite, transmission Mössbauer spectroscopy, X-ray diffractometry, X-ray fluorescence, albite, pyroxene, magnetite, maghemite..

* mceronl@unmsm.edu.pe

© Los autores. Este es un artículo de acceso abierto, distribuido bajo los términos de la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0) que permite el uso, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea debidamente citada de su fuente original.



Introducción

Un meteorito es un meteoroide, que al penetrar en la atmósfera no se vaporiza completamente y alcanza parcialmente la superficie terrestre. Los meteoritos son las rocas más antiguas y primitivas tan antiguo como es sistema solar. El estudio de estos enigmáticos objetos intrigaron a los científicos desde la antigüedad, no solo sobre su lugar de origen, también sobre las condiciones que responden a sus características químicas, estructura y composición mineralógica [1].

Los meteoritos se consideran fragmentos de los primeros cuerpos planetarios formados en el sistema solar. La importancia fundamental de la investigación de los meteoritos, luego de su caída sobre la Tierra, es que permitirá determinar el origen del sistema solar y también el origen de la vida en la Tierra. Toda la información sobre nuestro sistema solar, es rescatada de sobre los meteoritos acaecidos en la tierra, como en la Antártida, y de numerosas misiones espaciales. Existen antecedentes sobre el estudio de las muestras de Meteorito en diversas instituciones del mundo. Se sabe aproximadamente que hay una caída de entre 40 a 60 toneladas por día [2], de las cuales sólo una mínima cantidad puede ser observada y ser testigo para identificar el lugar de impacto, que es < 8 %.



Figura 1: Muestra del meteorito AR-51. Extraída de la Región Arequipa. Observamos sus medidas aproximadas de forma irregular de $10 \times 15 \text{ cm}^2$, cuya masa es aproximadamente 200 g, la cual fue autenticada como una muestra meteorítica (Foto registrada en el Laboratorio de Análisis de Suelos, FCF, UNMSM).

A fin de dar relevancia a este tipo de estudios, debemos considerar que es importante tener en cuenta que, a menos que tengamos suerte de ser testigos de las caídas de los meteoritos, es extremadamente difícil recolectar muestras sobre todo considerando que a lo largo de la historia de la Tierra han caído miles de toneladas de material meteorítico sobre los continentes, océanos, su-

perficie terrestre y regiones densas. El Perú, parece encerrar los mayores fenómenos meteoríticos; es lógico pensar entonces que puede hallarse indicios de estos rasgos cósmicos en nuestra costa desértica, jungla amazónica y aun en el mar peruano en su fondo marino. Por ello, es importante, dado que los resultados de los análisis con las técnicas físicas se complementan entre ellas, y ello servirá de evidencia científica para corroborar que nuestra muestra corresponde a un meteorito.

Sabemos que existen meteoritos rocosos y se reconocen dos grupos principales: condritas y acondritas. Las condritas son el grupo de meteoritos más numeroso, que representa el 87 % de todos meteoritos observados al caer. Las acondritas comprenden aprox. 8 % de los meteoritos rocosos, llamados así porque carecen de cóndrulos. Las variaciones químicas entre los meteoritos condritos definen varios grupos distintos, un primer grupo, conocido como condritas ordinarias (CO), que representan el 80 % de todos los meteoritos conocidos. Tres subgrupos de CO son identificados, grupo H (alto contenido de hierro), grupo L (bajo contenido de hierro) y grupo LL (hierro totalmente bajo). La presencia del catión Fe^{3+} en CO, puede ser interpretada como producto de la alteración terrestre [3, 4].

Las técnicas de caracterización, tales como difracción de rayos X (DRx), espectroscopia Mössbauer de transmisión (EMT) a temperatura de ambiente (TA); complementadas con fluorescencia de rayos X dispersiva en energía (FRX), son técnicas poderosas que permiten determinar si son muestras rocosas (falsos meteoritos) o meteoritos. Es así que, continuando con nuestros estudios sobre muestras meteoríticas, acaecidos en el Perú [5–7], estudiamos una muestra extraída de la Región de Arequipa, denominada AR-51 (ver figura 1), sus coordenadas geográficas exactas se desconocen, presenta medidas de $10 \times 15 \text{ cm}^2$ y una masa de 200 g aproximadamente; tiene un aspecto rugoso, irregular, con estrías en todo su entorno, asimismo presenta una superficie de coloración negruzca, moteada en marrón y oxidada, lo que podría ser como consecuencia de la exposición a la intemperización.

Materiales y Métodos

Preparación de las muestras

La muestra AR-51 fue extraída de la Región Arequipa y fue llevada al Laboratorio de Análisis de Suelos, para autenticar si corresponde o no a una muestra meteorítica. Se procedió con el protocolo de análisis [8]: registrar su masa, que fue de aproximadamente 200 g, y tomar sus medidas aproximadas de $10 \times 15 \text{ cm}^2$. Luego, se procedió a intentar rasgar y/o cortarla con una cuchilla de cirujano; sin embargo, presentaba una gran dureza y, por ello, se hizo un corte con punta diamante; de esta for-

ma se logró cortarla en dos partes y se pudo observar la parte interna, la cual mostraba cóndrulos, pequeños círculos, que a diferencia de la parte externa, no mostraba las moteadas manchas marrones. Luego, se procedió a rasgarla para obtener una pequeña muestra necesaria para los análisis por DRx y EMT. Su alta dureza no permitió que el trabajo fuera fácil; sin embargo, se logró el objetivo.

Fluorescencia de rayos X en Energía Dispersiva (FRXED)

Para obtener resultados sobre la composición elemental cualitativa, empleamos el equipo portátil de FRXED marca Amptek que utiliza un tubo de rayos X con ánodo de Ag, que opera a 30 kV y 50 A. Permite reconocer elementos químicos de $Z > 12$ (magnesio). El arreglo experimental se muestra en la figura 2. Esta técnica al ser muy versátil, permitió realizar el análisis de la muestra sin necesidad de molerla, incluyendo ambas secciones, la parte interna y la externa o superficie.

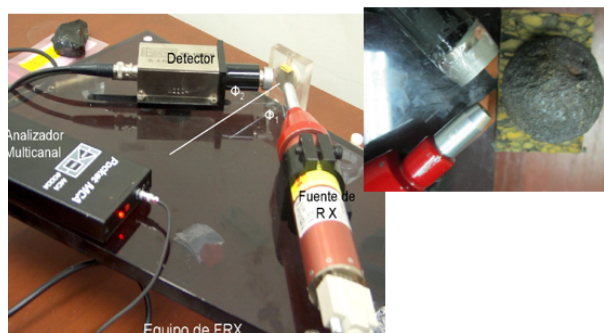


Figura 2: Arreglo geométrico experimental del equipo de FRX, para el análisis de la muestra AR-51, la cual fue analizada tomando registros de puntos en la parte superficial como en la parte interna del meteorito.

Difracción de Rayos X (DRX)

Los análisis para determinar las fases estructurales de los minerales presentes, se realizó empleando un difractómetro MINIFLEX RIGAKU, el cuál empleó una radiación de $\text{Cu-K}\alpha$ ($\lambda = 1,54178\text{\AA}$); el intervalo de la escala angular fue de $4^\circ < 2\theta < 80^\circ$ y el avance 2θ fue de $0.02^\circ/\text{paso}$ con una permanencia de 2 s por paso.

Espectroscopia Mössbauer de Transmisión (EMT)

La técnica de EMT fue empleada para obtener información detallada sobre la composición mineralógica con contenido de hierro. Se empleó un espectrómetro convencional que fue usado con una señal de modulación y velocidad sinusoidal con 1024 canales. El espectro Mössbauer

se tomó a temperatura de ambiente ($T_A \cong 298\text{K}$) en geometría de transmisión usando una fuente de ^{57}Co en una matriz de Rh, los cuales fueron analizados empleando el programa Normos de Brand [9]. Esta instrumentación está ubicada en el Laboratorio de Archeometría de la Facultad de Ciencias Físicas, UNMSM.

Análisis y discusión de resultados

Análisis por Fluorescencia de rayos X en Energía Dispersiva (FRXED).

En la figura 3 se observan los resultados cualitativos de: (a) la parte superficial y (b) la parte interna; en ambos resultados se observa la presencia de los mismos elementos: Si, Ar, K, Ca, Ti, Mn, Fe, Cu y Sr, en la parte interna hay menor concentración de Mn y Zn.

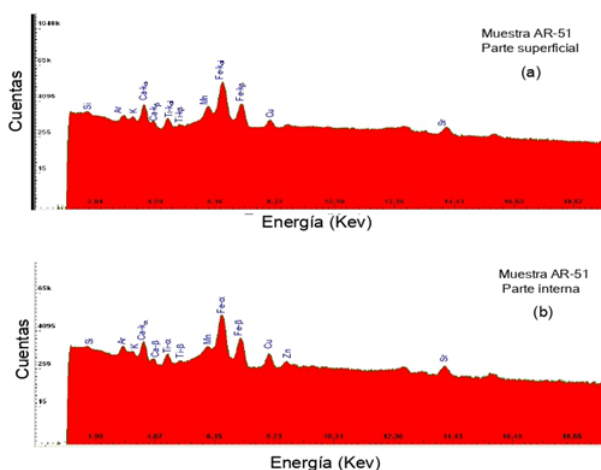


Figura 3: Resultados cualitativos de la muestra AR-51, donde se observan los mismos elementos: Si, Ar, K, Ca, Ti, Mn, Fe, Cu y Sr, en la parte interna hay menor concentración de Mn y Zn.

Análisis por Difracción de Rayos X (DRX)

En la figura 4, observamos la presencia de las fases estructurales que consisten principalmente de óxidos de hierro, tales como: magnetita (Mg) ($\text{Fe}^{2+}\text{Fe}_2^{3+}\text{O}_4$), y maghemita (Mh) ($\text{Fe}_3^{3+}\text{O}_3$); y silicatos como: albita (Al) ($\text{Ca,Mg,Fe}_2\text{Si}_2\text{O}_6$), augita (Au) ($\text{Ca(Mg,Fe,Al)Si}_2\text{O}_6$), piroxeno (Py) y el clinopiroxeno (Cly) ($\text{CaFeSi}_2\text{O}_6$). El piroxeno tiene una estructura común que consiste en cadenas simples de tetraedros de sílice su fórmula general es $\text{XY}(\text{Si,Al})_2\text{O}_6$, donde 'X' representa calcio, sodio, hierro²⁺, manganeso, litio o magnesio, e 'Y' representa iones de menor tamaño como el cromo, aluminio, hierro²⁺, hierro³⁺, magnesio, manganeso o titanio. Sabemos, que el piroxeno tiene subgrupos como el clinopiro-

xeno, el cual puede cristalizar en sistema monoclinico y así resultar en una nueva fase, conocida como la augita. Las fases estructurales halladas en toda la muestra se pueden observar con sus picos característicos definidos, tal como la Al, donde sus picos principales de máxima intensidad están en $2\theta=27.8^\circ$ y 21.6° ; para la Au sus picos principales están en $2\theta=29.8^\circ$ y 65.18° . Podemos observar varios picos principales característicos que se encuentran superpuestos, tales como: Au + Py (35.8° ; 42.3° y 56.8°). Es importante mencionar que las fases estructurales superpuestas de Cly+Py+Au, ubicados en

$2\theta=29.81^\circ$, sería el pico característico de la fase de cristalización del Cly en Au. Observamos la presencia de dos óxidos de Fe, el primero de ellos, la Mg al tratarse de una estructura espinel, se logra observar con su pico principal ($2\theta=35.0^\circ$) [311] y el segundo, es la Mh, que se identifica por sus picos principales ubicados en $2\theta=32.0^\circ$ y 35.60° ; es importante mencionar que no observamos el mineral primario cuarzo, que es una fase característica de todas las muestras de suelos terrestres. Esto garantiza que AR-51 es una muestra proveniente del espacio exterior.

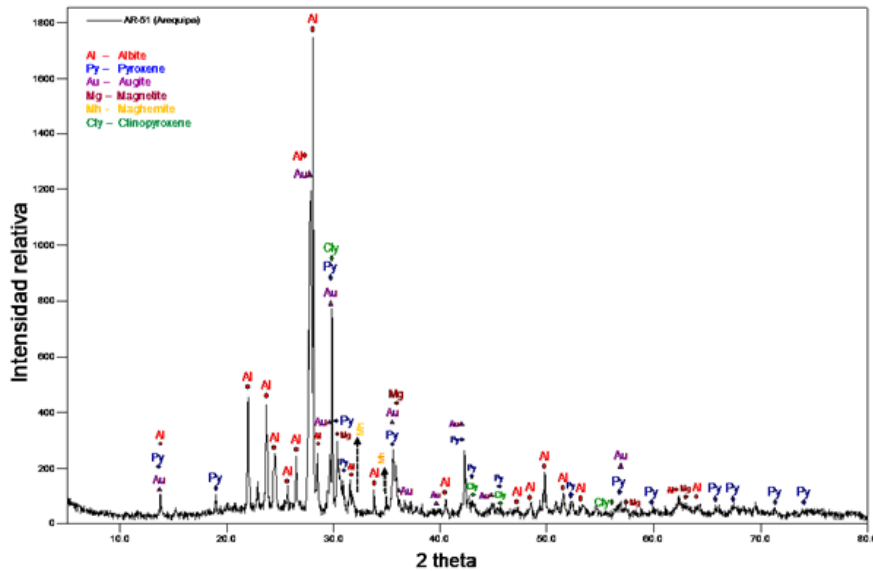


Figura 4: Patrones de difracción de rayos X de la muestra AR-51, demostrando reflexiones de sus picos característicos de las fases de albita (Al), piroxeno (Py), Augita (Au), clinopiroxeno (Cly), magnetita (Mg) y maghemita (Mh).

Análisis por Espectroscopia Mössbauer de Transmisión del ^{57}Fe (EMT)

En la figura 5, se observan los sub espectros de la muestra AR-51, que resultan del análisis por la técnica de EMT, el cual fue registrada a temperatura de ambiente (TA), que nos permite caracterizar su composición mineralógica con seis sub espectros: tres sextetos magnéticos y tres dobletes paramagnéticos. De los sextetos magnéticos, dos corresponden a la magnetita (Mg) y sabemos que la Mg es miembro del grupo espinel, de sistema cristalino cúbico, ésto es $1/3$ del hierro como Fe^{3+} ocupa todos los sitios tetraedrales (sitios A), un tercio de hierro como Fe^{3+} ocupa la mitad de los sitios octaedrales (sitios B) y un tercio de hierro como Fe^{2+} ocupa el resto de los sitios octaedrales (sitios B). Por tanto, resulta que estos dos sextetos magnéticos son asignados a los sitios de la magnetita, el primero corresponde al sitio A

de Fe^{3+} (posición tetraedral), cuyo campo magnético es mayor; el segundo se adjudica al sitio B, donde se alojan los cationes Fe^{3+} y Fe^{2+} por igual (posición octaedral). Mientras que el tercer sexteto magnético se adjudica a la maghemita (Mh).

La mezcla de ambas posiciones (capas octaédricas y tetraédricas) a lo largo de la dirección [111] genera superposición de planos, los cuales se consideran más estables. Mientras que los otros tres sub espectros se adjudican a los dobletes paramagnéticos, de los cuales dos de ellos están asociados con cationes estructurales de sitio de Fe^{2+} , que podrían ser adjudicados a los minerales de los subgrupos del silicato piroxeno y el tercer doblete está asociado a un sitio ocupado por el catión de Fe^{3+} . La EMT es una técnica que nos permite observar la oxidación de los cationes de Fe^{2+} [10,11]; por ello, para AR-51, dichos cationes pueden ser parcial o completamente reoxidados para formar Mh en el meteorito.

Al atravesar la corteza terrestre, existen cambios de temperatura donde la existencia de oxígeno suficiente a alta temperatura, da lugar a la oxidación de Mg a Mh. En la tabla 1, se observan sus parámetros hiperfinos, los cuales son: el corrimiento isomérico, δ (mm/s); el desdoblamiento cuadripolar y/o corrimiento cuadripolar, ε (mm/s) y su campo magnético hiperfino B_{hf} (T).

Muestra registrada a TA ($\approx 298^\circ\text{K}$)			
Fases minerales	Muestra Ar-51		
	δ (mm/s) ± 0.01	2ε (mm/s) ± 0.01	B_{hf} (T) ± 0.1
Magnetita, sitios A tetraedrales (Fe^{3+})	0.22	-0.160	48.40
Magnetita, sitios B octaedrales (Fe^{2+})	0.626	0.00	46.71
Maghemita	0.281	-0.02	49.80
Sitio (Fe^{2+})	1.15	2.69	
Sitio (Fe^{2+})	1.00	1.93	
Sitio (Fe^{3+})	0.33	0.55	

Tabla 1: Parámetros hiperfinos de la muestra AR-51 registrados a TA.

Conclusiones

Con las técnicas físicas nucleares de EMT complementadas con DRX y FRX, se logró la caracterización de la muestra AR-51 y verificar su autenticidad de ser una muestra de meteorito tipo condrito arenoso (meteorito CO). Los elementos de Si, Fe, Ca hallados por FRX, se encuentran formando la estructura de los minerales silicatos, como: augita, piroxeno y clinopiroxeno hallados por DRX, que son minerales comunes hallados en meteoritos y rocas ígneas; sin embargo no se halla presencia del mineral primario cuarzo, siendo éste un mineral presente en toda muestra de suelo terrestre.

Asimismo, se evidenció la presencia de óxidos de Fe, como magnetita y maghemita, con sitios de Fe^{2+} y Fe^{3+} , hallados por DRX y EMT. La magnetita estaría vinculada a los sitios octaédricos de la estructura espinela inversa donde se encuentran posicionados la mitad de los cationes Fe^{3+} y todos los cationes Fe^{2+} ; mientras que en el segundo están los sitios tetraédricos ocupados por la otra mitad de los cationes de Fe^{3+} . Este fenómeno ha sido explicado como un efecto de salto del electrón, es decir, que los cationes de Fe^{2+} y Fe^{3+} en los sitios B octaedrales intercambian electrones con frecuencia suficientemente rápida que afecta el ancho de línea. Por otro lado, el tercer sexteto está asignado a la maghemita, dado que la variación de Fe^{2+} a Fe^{3+} , permite verificar la oxidación de la magnetita a maghemita.

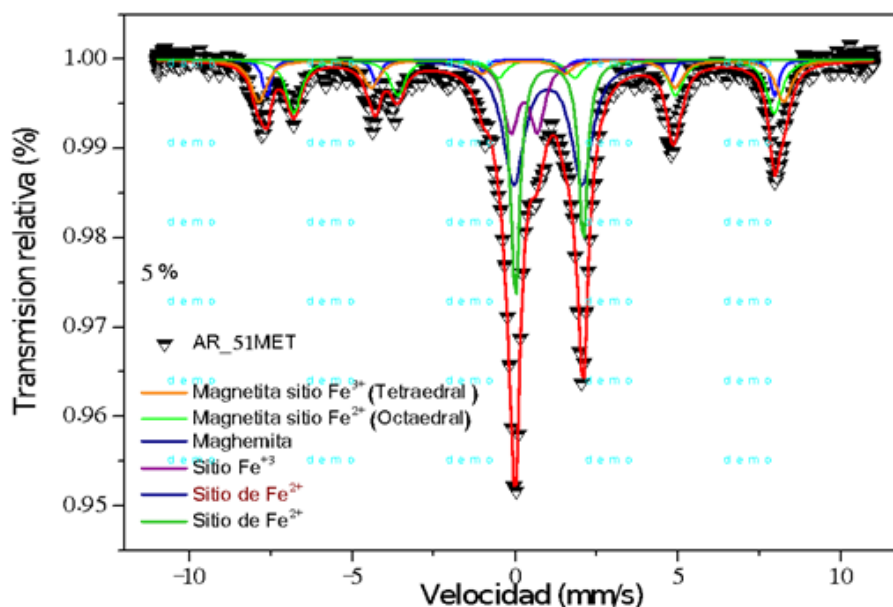


Figura 5: Espectro Mössbauer de la muestra AR-51, registrada a temperatura de ambiente (TA).

Agradecimientos

Los autores agradecen la colaboración a los miembros de los Laboratorios de Análisis de Suelos, de Arqueome-

tría y de Difractometría de Rayos X de la FCF; UNMSM, por permitirnos el uso de sus instrumentos, materiales y equipos para la investigación de esta muestra.

Referencias

- [1] R. Scorzelli. Meteorites: Messengers from the Outer Space. *J. Braz. Chem. Soc.*, 19 (2), 226-231 (2008).
- [2] M. Campbell-Brown and A. Hildebrand. A new analysis of fireball data from the Meteorite Observation and Recovery Project (MORP). *Earth, Moon, and Planets*, 95 (1-4), 489-499 (2004).
- [3] A. Rubin. Mineralogy of meteorite groups. *Meteoritics B Planetary Science*. 32. (23), 1-247 (1997).
- [4] R. Brooks, M. Hoashi, E. Fernandes De Lima, M. Dos Santos, D. Ryab, J. Holzbecher, J. Johnston, Y. Kawachi and P. Sipiera. The Iguaracu H5 chondrite: a fall from Paraná State, Brazil. *Meteoritics* 25, 231-232 (1990).
- [5] M. Cerón, J. Bravo. Caracterización Mineralógica de un Impacto Meteorítico en la Localidad de Carancas-Puno. *Rev. Investig. Fis.* 12 (1), 5-12 (2009).
- [6] M. Cerón, J. Bravo. Characterization of the Carancas-Puno meteorite by energy dispersive X-ray fluorescence, X-ray diffractometry and transmission Mössbauer spectroscopy. *Hyperfine Interact.* (203), (1-3), 17-23 (2011).
- [7] M. Cerón, J. Bravo and F. Reyes. Magnetic Properties of the Tuxtuc Meteorite via 57 Fe Mössbauer Spectroscopy. *Revista de Investigación de Física*. 22. (1), 1-5. (2019).
- [8] J. Bravo, J. Fabián, M. Cerón, A. Trujillo, Y. Huaypar, M. Mejía. Manual de Laboratorio de Análisis de Suelos. Laboratorio de Análisis de Suelos. Facultad de Ciencias Físicas. Universidad Nacional Mayor de San Marcos (2000).
- [9] R. Brand. Normos Mössbauer Fitting Program. User's Guide. Wissenschaftlich Elektronik GmbH, Starnberg. (1995).
- [10] G. Picasso, J. Vega, R. Uzuriaga and G. Ruiz. Synthesis of nanoparticles of magnetite by sol-gel and precipitation methods: study of chemical composition and structure. *Rev. Soc. Quím. Perú.* 78(3), 170-183 (2012).
- [11] M. Mejía. Estudio de la deposición de óxido diférrico (magnetita) sobre fieltro de carbono (Tesis de Posgrado). Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP). Lima, Perú. (2016).