

## Determinaciones estructurales en apatitos de rocas fosfóricas cubanas e influencia en la solubilidad del $P_2O_5$



### Structural determinations in apatites from cuban phosphorite rocks and their influence on the solubility of $P_2O_5$ .

CU-ID: 2144/v13e18

① José Antonio Alonso-Pérez<sup>1</sup>, ② Martha Alonso-Rodríguez<sup>2</sup>,  
③ Rafael Antonio Alonso Rodríguez<sup>3</sup>, ④ Abdel Casanova Gómez<sup>4</sup>

**RESUMEN:** A partir del conocimiento que se logra de la composición microelemental y mineralógica, mediante el empleo combinado de técnicas instrumentales de: *Microscopia Electrónica de Barrido y Espectrometría de Fluorescencia de rayos-X Dispersiva de Energías (MEB-EDS)*, *Difracción de rayos-X*, *Análisis Térmico y Espectroscopia Infrarroja con Transformada de Fourier (FTIR)*, se determinó la naturaleza del isomorfismo del mineral de fósforo fundamental que caracteriza las menas fosfóricas (granulares calcáreas y arcillosas) del yacimiento cubano “Trinidad de Guedes”, depósito que se localiza en la provincia de Matanzas. Se concluye que el principal mineral de fósforo que se identifica en las menas del yacimiento, lo constituye *el carbonato-fluorapatito (CFA)*, cuyos parámetros reticulares calculados mediante la variante fotográfica de Debye-Scherrer:  $a_0 = 9.318 \pm 0.001 \text{ \AA}$ ;  $c_0 = 6.912 \pm 0.001 \text{ \AA}$ ,  $V = 519.8 \pm 0.01 \text{ \AA}^3$ , indican el alto grado de isomorfismo aniónico del mineral que se manifiesta en la elevada potencialidad para uso directo de las rocas y durante la preparación de fertilizantes minerales, de manera particular se menciona el producto cubano registrado bajo la marca comercial *AGROMENAS*, desarrollado por especialistas del CIPIMM, mediante tecnología novedosa con propiedad industrial, entre otros productos de interés agrícola obtenidos en el país. La elevada potencialidad del fósforo de la roca para el uso que se indica, se evaluó a partir del Índice de Solubilidad Absoluta (ISA) en diferentes extractantes químicos, éste a su vez se justifica a través de los mecanismos isomórficos de sustitución de iones  $CO_3^{2-} / PO_4^{3-}$  que tuvieron lugar en el CFA durante la precipitación de las menas en ambiente sedimentario-marino ( $\% CO_2 = 5,61$ ;  $CO_3^{2-} / PO_4^{3-} = 0.273$ ), del mismo orden de magnitud a los que transcurrieron en el CFA del yacimiento norteamericano “Carolina del Norte” ( $CO_3^{2-} / PO_4^{3-} = 0.257$ ). De forma paralela, los resultados que se logran en rocas fosfóricas cubanas del yacimiento “La Pimienta” (prov. Pinar del Río), cuyas menas se formaron a partir de eventos de infiltración-residual de las calizas fosfatadas, éstas se clasifican como de mediano potencial del fósforo para el referido uso, dado por la menor influencia del citado mecanismo de sustitución de iones  $CO_3^{2-} / PO_4^{3-} = 0.048$  en la red cristalina del CFA ( $\%CO_3^{2-} = 1,10$ ).

**Palabras claves:** roca fosfórica, solubilidad del  $P_2O_5$ , isomorfismo, Índice de Solubilidad Absoluta (ISA).

Recibido: 08/03/2021

Aprobado en su forma original: 01/11/2021

<sup>1</sup>Instituto de Geología y Paleontología (IGP), Servicio Geológico de Cuba (SGC), Ministerio de Energía y Minas (MINEM), Vía Blanca No. 1002 / Río Luyanó, San Miguel del Padrón, La Habana, Cuba.

<sup>2</sup>Centro de Investigaciones para la Industria Minero Metalúrgica (CIPIMM), Carretera de Varona # 12028, Km 11/2, Boyeros, La Habana; E-mail: [marthav@cipimm.minem.cu](mailto:marthav@cipimm.minem.cu)

<sup>3</sup>Centro Nacional de Investigaciones Científicas; Ave. 25, esq. 21- A, Reparto Cubanacán, Playa, La Habana, E-mail: [ralonsorodr@gmail.com](mailto:ralonsorodr@gmail.com)

<sup>4</sup>Centro de Investigaciones e Ingeniería Química (CIQ); Laboratorio de pinturas y barnices, Ave. Vía Blanca s/n entre Infanta y Palatino, Municipio Cerro, La Habana, E-mail: [abdel.casanova@oc.emcomed.cu](mailto:abdel.casanova@oc.emcomed.cu)

\*Correo electrónico: [josea@igp.minem.cu](mailto:josea@igp.minem.cu)

**ABSTRACT :** From the knowledge that is achieved of the microelemental chemical and mineralogical composition through the combined use of instrumental techniques of: Scanning Electron Microscopy (SEM), and Energy Dispersive X-ray Fluorescence Spectrometry (EDS), X-ray diffraction (Debye-Scherrer method), Thermal Analysis, and Infrared Spectroscopy by Fourier Transformed (FTIR), the nature of the isomorphism of the fundamental phosphorus mineral present in the granular phosphoritic ores (calcareous and clayey) of the "Trinidad de Guedes" deposit located in the western region of Cuba it was determined. It is concluded that the main phosphorus mineral that is identified in the ores of the deposit is carbonate-fluorapatite (CFA), mineral name; francolite, to which correspond the following lattice parameters calculated by the Debye-Scherrer powder method were:  $a_0 = 9.318 \pm 0.001 \text{ \AA}$ ;  $c_0 = 6.912 \pm 0.001 \text{ \AA}$ ,  $V = 519.8 \pm 0.01 \text{ \AA}^3$ , consequently it presents a high degree of anionic-structural isomorphism, which is manifested in the adequate solubility of  $P_2O_5$  that it presents for direct use of the rocks and the preparation of mineral fertilizers, in particular mention is made of the Cuban product registered under the AGROMENAS trademark, developed by CIPIMM specialists, through innovative technology with industrial property, among other products of agricultural interest obtained in the country. The behavior of the Absolute Solubility Index (ISA) of the rocks in different chemical extractants is justified through substitution mechanisms of  $CO_3^{2-} / PO_4^{3-}$  ions that took place in the CFA during the precipitation of the ores in a sedimentary marine environment ( $\% CO_2 = 5.61$ ;  $CO_3^{2-} / PO_4^{3-} = 0.273$ ), of the same order as those that occurred in its mineral counterpart from the North American deposit "North Carolina" ( $CO_3^{2-} / PO_4^{3-} = 0.257$ ). On the other hand, the Cuban phosphate rocks of "La Pimienta", located in the west of the country (prov. Pinar del Río), whose ores were formed from successive events of infiltration-residual of the phosphated limestones, said mechanism resulted from lower significance;  $CO_3^{2-} / PO_4^{3-} = 0.048$  ( $\% CO_2 = 1.10$ ), from which lower phosphorus solubility was obtained for direct use of the rocks finally.

**Keywords:** phosphate rock, solubility of  $P_2O_5$ , isomorphism, Absolute Solubility Index (ISA).

## INTRODUCCIÓN

Los depósitos de minerales industriales, entre los cuales se mencionan los de rocas fosfóricas de origen sedimentario - marino y aquellos que se formaron a partir de rocas ígneas, en las que el *carbonato-fluorapatito (CFA)*, nombre mineral: *francolita y fluorapatito (FA)*, presentan en el caso del primero alto grado de isomorfismo tanto aniónico como catiónico en su red cristalina mineral, a diferencia del fluorapatito que no presenta tal regularidad estructural, constituyen ambos los principales minerales portadores del fósforo ( $P_2O_5$ ) a fin de obtener concentrados de alta ley del nutriente mineral para la elaboración de fertilizantes que hoy precisan las industrias químicas con el propósito de lograr su sostenibilidad. Se estima que alrededor del 75 - 80% de las rocas fosfóricas, se agrupan en los citados yacimientos ([Truong y Zapata., 2002](#); [Zapata y Roy, 2007](#)).

Alrededor del 90% de la producción mundial de concentrados de roca fosfórica se destina a la producción de fertilizantes, ácido fosfórico ( $H_3PO_4$ ), fósforo elemental (P) y fosfato monocálcico ( $CaH_2PO_4$ ) para la alimentación animal, como recursos agrogeológicos en función de portador de nutrientes minerales (P, Ca, Mg) y micronutrientes o oligoelementos (Zn, Cu, Mn, etc.), en fertilizantes naturales o encalantes, ya sea en forma directa o en mezclas con diferentes sustratos orgánicos minerales para mejorar así las propiedades físico-químicas de suelos, en particular los ácidos, tal como plantea [van Straaten., \(2002, 2007\)](#), entre otros. El resto (si las reservas industriales lo ameritan), se emplea en la recuperación simultánea de elementos minoritarios valiosos que se asocian a las rocas por mecanismos de adsorción e isomorfismo tales como: uranio (U), estroncio (Sr) y tierras raras (Y, Ce, La, etc.), como señalan ([Emsbo et al., 2015](#)), ([Casañas et al., 2016, 2017](#)), ([Wu et al., 2018](#)) y ([El Balmiki et al., 2021](#)), entre otros.

Cuba ha mostrado avances en el desarrollo de tecnologías de preparación y aplicación agrícola de las rocas fosfóricas, en mezclas físicas con zeolitas intercambiadas a su forma amónica, bentonita y materia orgánica, ejemplo de ello se mencionan los fertilizantes con propiedades ecológicas, tales como: Zeofert, Nerea, Zeofert-P, Ecofert y Agromenas, entre otros, desarrollados en diferentes etapas de investigación por ([Romero et al., 1989](#)), ([Arias et al., \(1991\)](#)), ([Rivero et al., 1991](#)) citado en ([Rodríguez-Fuentes, \(2015\)](#)), ([Febles et al., 2003, 2006](#)), ([Velázquez et al., 2002, 2009, 2010, 2013](#)), ([Rodríguez-Fuentes., \(2015\)](#)), ([Soca., \(2018\)](#)) y ([Laurel., \(2020\)](#)).

De acuerdo a valoraciones de diferentes especialistas de la industria química, la capacidad global de producción de las minas fosfáticas, se proyecta que se incremente desde los 159 millones de toneladas proyectadas en el año 2019, hasta 177 millones de toneladas al concluir el año 2023, esto sin considerar los datos oficiales de la República Popular China, primer exportador mundial. En el resumen anual del Mineral Commodities Summaries de los E.U.A ([2020](#)), la mayor parte del citado incremento se prevé en países del continente africano tales como Jordania, Marruecos, Arabia Saudita, Senegal y Togo, dado el mayor número de proyectos aprobados para la expansión y explotación de yacimientos fosforíticos en el citado continente.

Se plantea que el consumo mundial de  $P_2O_5$ , para la obtención de ácido fosfórico, fertilizantes y otros productos, se proyecta en unos 50 millones de ton/año en el año 2023, comparado con los 47 millones de toneladas / año que se proyectaron para el año 2019. Al respecto en África, la India y América del Sur se calcula un 75% del crecimiento total proyectado, mientras que en los Estados Unidos el consumo de  $P_2O_5$  se espera que oscile entre los 4.0 - 4.5 ton/año ([Mineral Commodities Summaries, 2020](#)).

Por lo expuesto, la valoración acerca del grado de isomorfismo en apatitos que se identifican en rocas fosfóricas resulta de interés actual y futuro, dado que no sólo contribuye a corroborar la génesis de los depósitos, sino que permite además predecir el comportamiento de la solubilidad del mineral de fósforo, propiedad química importante para su uso directo agrícola.

El objetivo del presente trabajo consiste en determinar los parámetros y el volumen de la celda elemental del apatito presente en las rocas fosfóricas del yacimiento “Trinidad de Guedes,” mediante el método de polvo fotográfico de difracción de rayos-X (Debye-Scherrer), así como establecer su vínculo con el Índice de Solubilidad Absoluta (ISA), comparándose los valores que se obtienen con el del yacimiento cubano de génesis de infiltración residual “La Pimienta”, por otra parte, realizar el cálculo de la fórmula estequiométrica del CFA del depósito “Trinidad de Guedes” comparándola así con las de diferentes países y de esta forma predecir la solubilidad del  $P_2O_5$  de las rocas durante los procesos de preparación de fertilizantes o como recurso agrogeológico para uso directo en suelos ácidos.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Las muestras objeto de estudio corresponden al proyecto de toma de muestras tecnológicas representativas de los bloques productivos de recursos geológicos que conformaron el depósito objeto de evaluación según refiere [Alemán et al., \(1991\)](#).

A partir de la muestra litotecnológica de fosforita granular calcárea del pozo criollo (PC-3) del yacimiento “Trinidad de Guedes”, preparada por los geólogos [Alemán et al., \(1991\)](#) durante los trabajos geológicos de Exploración Orientativa Detallada del yacimiento (E.O.D), se procedió a la separación de la fracción monomineral, mediante la clasificación granulométrica con corte en la fracción (- 0,2 + 0,1 mm) según propone [Hernández et al., \(2001\)](#). A continuación, dicha fracción se lava con etanol, se seca y homogeniza, separándose de éstas el apatito puro bajo el microscopio binocular. A continuación la misma se trató con un volumen de 100 mL de ácido acético (5% v/v), con la finalidad de separar las impurezas restantes de carbonato (calcita) que pudieran impurificar dicha fracción.

El registro fotográfico (debyegramas) de la fracción monomineral representativa de la roca del yacimiento, se realiza en cámara de 114 mm de diámetro respectivamente, radiación  $K\alpha$  del Fe; filtro: Mn; tiempo de exposición a la radiación: 4 horas; diferencia de potencial aplicada: 30 kV; corriente anódica: 20 mA.

Para realizar el análisis, la muestra se tritura cada una en un mortero de ágata hasta polvo muy fino y se le adiciona una pequeña porción de polvo de germanio (sustancia de calibración interna) para la corrección de valores angulares, cuyo patrón de difracción corresponde a la tarjeta PCPDF: 4-545. Luego la mezcla se adhiere a una fina fibra de vidrio que se inserta en el eje de giro de la cámara Debye-Scherrer de diámetro 114 mm y con posterioridad se coloca la película con la disposición de Straumanis y la muestra se expone a la radiación  $K\alpha$  del Fe filtrada con Mn durante 4 horas. Finalizada esta etapa las placas se revelan y se dejan secar. Las determinaciones de las distancias interplanares se realizan a través de los ángulos de difracción medidos para cada reflexión y con el auxilio del programa Ttod para PC. Para la interpretación del diagrama de polvo se utiliza la base de datos PCPDF WIN, versión 1.30, JCPDS-ICDD compatible con WINDOWS-2010 para Office 2010.

Para el cálculo de los parámetros reticulares se emplea el Programa LSUCRI de [Garvey \(1986\)](#). En el caso de los parámetros del apatito del yacimiento cubano “La Pimienta” se utilizaron los datos que reporta [González., \(1982\)](#).

A partir del valor del parámetro  $a_0$  de la celda elemental del apatito (Sistema cristalino Hexagonal) se calcula el Índice de Solubilidad Absoluta (ISA) del  $P_2O_5$  de rocas fosfóricas en: citrato de amonio, ácido fórmico y ácido cítrico que propone [McClellan \(1972\)](#) según:

$$ISA (\text{citrato de amonio; pH 7}) = 421,4 (9,369 - a_0) \quad (1)$$

$$ISA (\text{ácido cítrico 2\%}) = 611 (9,378 - a_0) \quad (2)$$

$$ISA (\text{ácido fórmico 2\%}) = 1091 (9,367 - a_0) \quad (3)$$

Donde:  $a_0$  - parámetro de la celda elemental del CFA, Sistema Cristalino Hexagonal calculado experimentalmente por DRX.

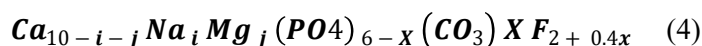
Los termogramas ATD, TG y TGD se determinan en un Derivatógrafo MOM 1500-Q. Se emplean crisoles de cerámica tamaño mediano;  $\alpha$  -  $Al_2O_3$  calcinada como material de referencia; atmósfera del horno: aire sin turbulencia; termopares Pt / Pt (Rh-10 %); sistema de registro: X: Y; sensibilidad de los canales: ATD: 250  $\mu$ V; TG: 500  $\mu$ V; DTG: 1mV; tiempo de medición: 100 minutos; velocidad del papel: 2,5 mm / min; peso de muestra: entre 450-600 mg; velocidad de calentamiento: 10°C / min.

Previo al proceso de preparación y registro de los termogramas se realiza la calibración metrológica del instrumento termoanalítico con el empleo de un patrón de oxalato de calcio monohidratado de pureza analítica (grado PA). Con posterioridad las muestras se colocan en una desecadora que contiene sílica gel o nitrato de magnesio hexahidratado durante 72 horas.

El análisis granulométrico de las muestras tecnológicas se realiza con el empleo de los tamices según norma ASTM de 0,315; 0,10 y 0,032 mm respectivamente.

El análisis mineralógico se realiza con un microscopio binocular MBS-1. Los aumentos que se emplean en el sistema óptico son: lentes oculares (8 X, 12,5 X); lente objetivo (2X). Para la separación del CFA mediante líquidos densos se utiliza bromoformo grado reactivo (PA).

Los contenidos químicos de los elementos presentes en la composición del apatito monomineral, se obtienen en un Microscopio Electrónico de Barrido Philips con EDS y se utiliza el método de corrección de [Rao y Berner \(1995\)](#). Los parámetros de operación utilizados son: voltaje 25Kv; detector estándar; resolución: 146,34; tiempos de exposición al haz de electrones: entre 21 y 115 seg; ángulo de elevación del detector: 27,73°; constante de tiempo: 40 seg; sin inclinación del haz de electrones. El cálculo de las fórmulas estequiométricas se hizo con el empleo de la expresión de ([McClellan et al., 1972](#)) que plantea:



Dónde: *i*- número de iones/gramo de iones  $Na^+$  por fórmula unidad; *j*- número de iones/gramo de  $Mg^{2+}$  por fórmula unidad; *x*-número de iones/g de  $CO_3^{2-}$  por fórmula unidad.

A partir del cálculo del parámetro “ $a_0$ ” de la celda elemental de los CFA de los yacimientos de referencia, se calculan los coeficientes de la fórmula general anterior, para ello se utilizaron las siguientes expresiones:

$$a_0 = 9.374 - 0.204 [x / (6 - x)] \quad (5)$$

$$CO_3^{2-} / PO_4^{3-} = [x / (6 - x)] \quad (6)$$

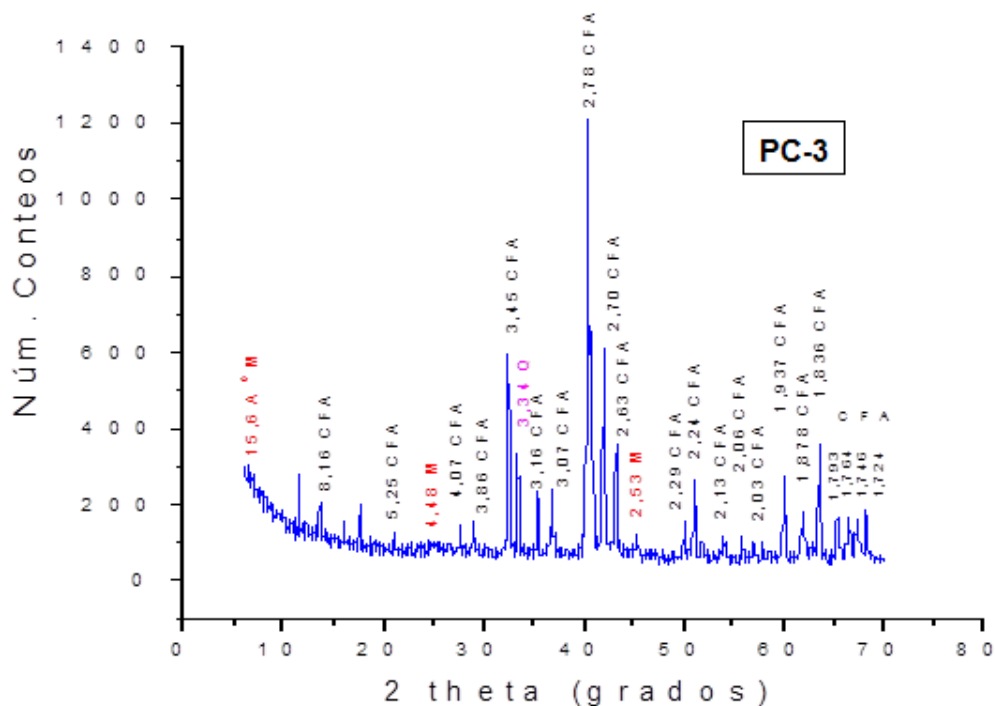
$$i = 1.327 [x / (6 - x)] \quad (7)$$

$$j = 0.515 [x / (6 - x)] \quad (8)$$

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Diffractometría de polvos (drx)

En la [tabla 1](#) se presentan los resultados obtenidos por [Alonso \(2003\)](#) del diagrama de polvos de rayos- X mediante el empleo de la variante fotográfica (Debye-Scherrer) del apatito monomineral del yacimiento “Trinidad de Guedes”, de igual forma el difractograma inicial de polvos de la muestra compósito proveniente del Pozo Criollo PC-3 ([figura 1](#)), en el cual se identifican la arcilla esmectítica (montmorillonita) y cuarzo, ambas en muy baja cuantía (< 5% m/m), las cuales constituyen las impurezas minerales acompañantes del apatito carbonático.



Simbología: **M**- Arcilla esmectítica (montmorillonita)

**Q** - Cuarzo

**CFA** - Carbonato-fluorapatito

**Figura 1.** Difractograma de la muestra del pozo criollo PC-3 (compósito)

A partir de los valores requeridos del diagrama anterior según el programa LSUCRI de [Garvey \(1986\)](#), se determina mediante refinamiento de la celda unitaria e indexado, los parámetros y el volumen de la celda elemental del apatito:  $a = 9,319 \text{ \AA}$  (8);  $c = 6,912 \text{ \AA}$  (10);  $V = 519,8 \pm 9 \text{ \AA}^3$ , se concluye que se trata de la variedad carbonática del apatito: Carbonato-fluorapatito (CFA) o francolita, debido a la contracción apreciable del parámetro  $a$  y corresponde al hecho que: iones  $\text{PO}_4^{3-}$  se sustituyen por  $\text{CO}_3^{2-}$  en la red cristalina del mineral lo que concuerda con lo reportado en la Base de Datos MINCRYST disponible en INTERNET (versión 2020).

**Tabla 1.** Angulos de difracción ( $2\theta$ ), distancias interplanares  $d$  ( $\text{\AA}$ ), índices de Miller (hkl) e intensidades relativas ( $I/I_R$ ) del CFA monomineral

No	(hkl)	$2(\theta)$ corregida	$I/I_R$	$d$ ( $\text{\AA}$ ) corregida
1	(110)	13,60	<10	8,16
2	(200)	27,75	<10	4,04
3	(002)	32,55	40	3,46
4	(102)	35,56	14	3,17
5	(210)	36,96	20	3,06
6	(211)	40,71	100	2,78
7	(300)	42,06	60	2,70
8	(202)	43,31	30	2,63
9	(301)	45,20	<10	2,52
10	(212)	49,90	<10	2,296
11	(310)	51,10	20	2,246
12	(221)	52,00	<10	2,209
13	(311)	53,95	<10	2,136
14	(113)	56,00	<10	2,063
15	(400)	57,60	<10	2,032
16	(203)	57,90	<10	2,001
17	(222)	60,10	30	1,9343
18	(312)	61,90	10	1,8834
19	(213)	63,50	30	1,8407
20	(321)	65,76	20	1,7842
21	(410)	66,81	20	1,7596
22	(402)	67,76	20	1,7376
23	(004)	67,81	20	1,7367
24	(322)	72,96	<10	1,6292
25	(420)	79,20	<10	1,533
26	(421)	80,50	<10	1,499
27	(502)	82,96	<10	1,4624

En el caso del análisis del CFA de “La Pimienta”, se procedió de forma similar aplicando también la misma variante de Debye-Scherrer, según refiere [González \(1982\)](#). Los resultados obtenidos se presentan en la [tabla 2](#).

**Tabla 2.** Resultados del cálculo de parámetro “a<sub>o</sub>” y “c<sub>o</sub>”, así como contenidos máxicos de CO<sub>2</sub> estructural obtenidos por DRX y TG en apatitos carbonaticos de yacimientos cubanos.

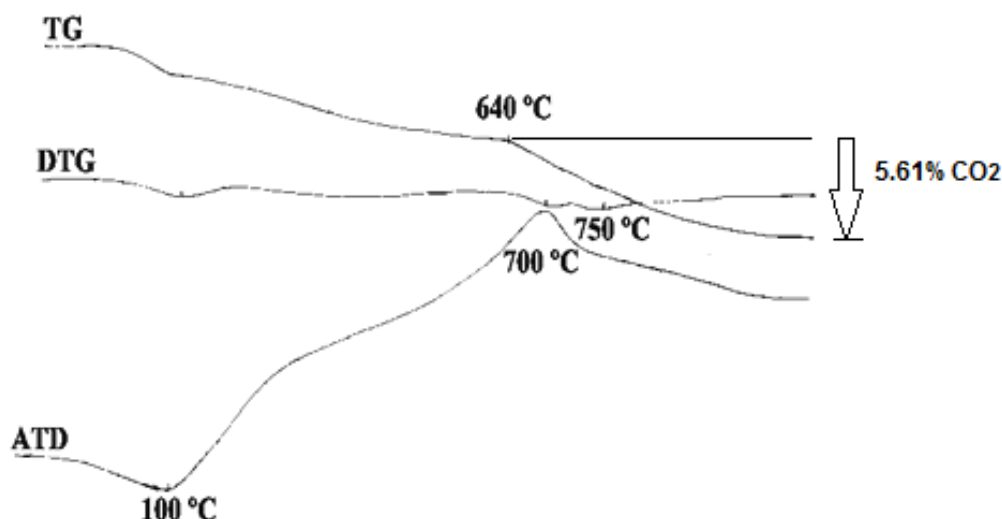
YACIMIENTO	GÉNESIS	a <sub>o</sub> (Å)	c <sub>o</sub> (Å)	% CO <sub>2</sub>
LA PIMIENTA *	Residual	9,359 ± 0.001	6.903 ± 0.001	1.10
TRINIDAD DE GUEDES**	Sedimentario- marino	9,318 ± 0.001	6.912 ± 0.001	5.60

\* Datos reportados por [González \(1982\)](#)

\*\* Datos reportados por [Alonso \(2003\)](#)

### Valoraciones termoanalíticas

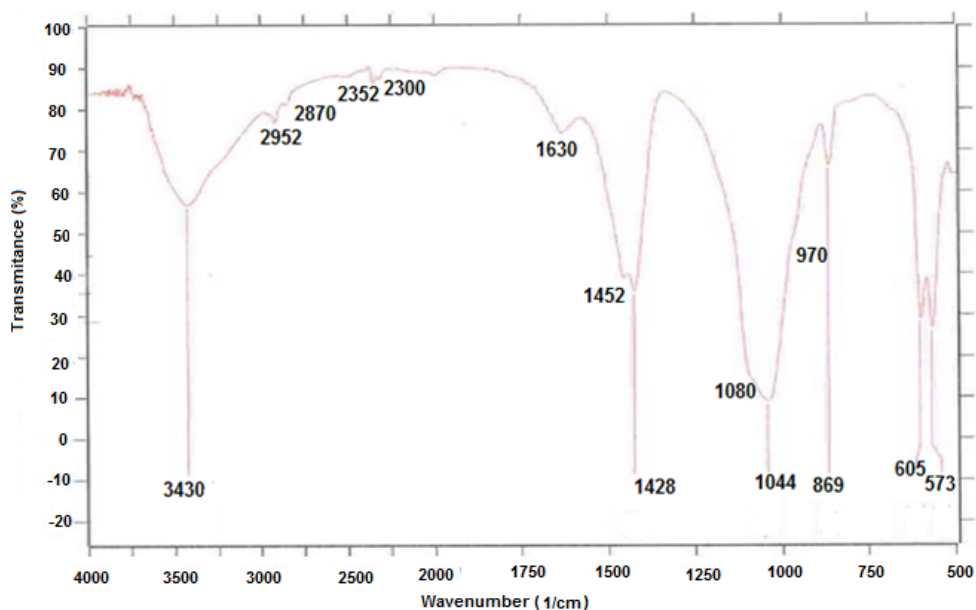
En la [figura 1](#) se presentan los termogramas ATD, TG y TGD de la fracción enriquecida de CFA del yacimiento “Trinidad de Guedes” (muestra del Pozo Criollo-3, E.O.D) y evaluado por Alonso (2002). En el termograma ATD, se aprecia en primer lugar, dos efectos térmicamente activos, el primero de naturaleza endotérmica vinculado al agua adsorbida de la muestra (100°C), así como otro exotérmico (700°C), que se debe a la pérdida del CO<sub>2</sub> y reorganización estructural del CFA en FA (fluorapatito), proceso que comienza a partir de 640°C y culmina en dos etapas tal como se constata en el termograma TGD, arrojando como resultado un 5,61 por ciento de CO<sub>2</sub> estructural presente en la estructura del apatito carbonático de “Trinidad de Guedes”.



**Figura 2.** Termogramas ATD, TG y DTG de la fracción monomineral de CFA de la muestra seleccionada del Pozo Criollo (PC-3).

### Espectroscopia infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR)

El espectro FTIR obtenido por Alonso (2002) para la muestra monomineral del PC-3, se presenta seguidamente en la [figura 3](#) y, en la [tabla 3](#), las asignaciones de sus modos vibracionales (valencia y deformación) del CFA correspondientemente.



**Figura 3.** Espectro FTIR del CFA monomineral (Pozo Criollo- 3)

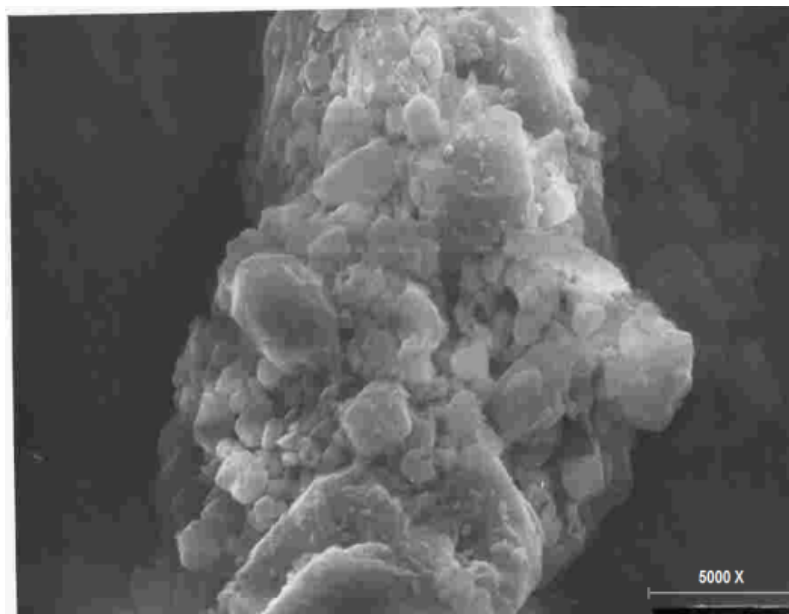
**Tabla 3.** Bandas de absorción IR de la muestra monomineral de CFA (PC-3) objeto de investigación y su correspondiente asignación

Número de onda ( $\nu$ $\text{cm}^{-1}$ )	Forma e intensidad de la vibración	Asignación
3430	Amplia y mediana	$\nu$ (H-O-H); H <sub>2</sub> O adsorbida (CFA)
2870; 2952	Débiles y estrechas	$\nu$ (CH <sub>3</sub> ); $\nu$ (CH <sub>2</sub> ) fósiles
2300	Muy débil y estrecha	$\nu_3 + \nu_4$ (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )
2352	Muy débil y estrecha	$\nu_3 + \nu_4$ (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )
1630	Amplia y mediana	$\delta$ (H-O-H); H <sub>2</sub> O (hidratación)
1428; 1452	Estrechas e intensas	C-O; $\nu_3$ CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> perpend. y paralelo al eje "c" CFA
1080	Hombro	P-O; $\nu_3$ (PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> ) CFA
1044; 970	Amplia y estrecha	P-O; $\nu_3$ (PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> ) CFA
869	Estrecha e intensa	C-O; $\delta$ (CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> ) CFA
605 y 573	Estrechas e intensas	P-O; $\delta$ (PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> ) CFA

[Nathan et al., \(1995\)](#) y [Chukanov \(2014\)](#) entre otros, confirman la presencia de la especie carbonática de apatito (francolita) en el yacimiento, a partir del doblete que se observa a valores de números de onda:  $\nu = 1428$  y  $1452 \text{ cm}^{-1}$ , asignables en ambos casos a vibraciones de valencia del anión CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> en la red estructural del CFA ( $\perp$  y  $\parallel$  al eje cristalográfico "c"), además se distingue el modo vibracional en  $\nu = 869 \text{ cm}^{-1}$ , típico del doblaje del propio anión carbonato. Las bandas de absorción que se observan en  $\nu = 1080, 1044, 970, 605$  y  $573 \text{ cm}^{-1}$ , caracterizan todos los modos vibracionales del anión PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> del CFA. Como aspecto de interés destaca también, la presencia de dos pequeñas vibraciones a valores de números de onda en  $\nu = 2300$  y  $2352 \text{ cm}^{-1}$ , vinculadas a posibles sustituciones de aniones CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> por SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> en la red cristalina del CFA, identificándose además dos vibraciones características adicionales, asignables a los grupos funcionales (-CH<sub>3</sub>) y (-CH<sub>2</sub>) de fósiles fosfatizados (foraminíferos) presentes en la muestra y que se observan a valores de  $\nu = 2300$  y  $2352 \text{ cm}^{-1}$  finalmente.

## Microscopia Electrónica de Barrido- Florescencia de rayos-X dispersiva de energías (MEB - EDS)

En la [figura 4](#) se presenta la micrografía de un fósil fosfatizado (foraminífero), en cuya composición se aprecia conglomerados microcristalinos (redondeados, subredondeados) de CFA con morfología característica tipo “*ramo de flores*”, muy semejante al que presenta [Prévôt \(1990\)](#) en una muestra del yacimiento Benguerir “Ganntour”, en Marruecos.



**Figura 4.** Micrografía MEB de agregados microcristalinos de CFA asociados a un foraminífero del yacimiento “Trinidad de Guedes” (mtra PC-3); Volt. Aceleración: 25 KV; Aumento: 5000 X.

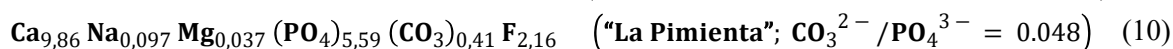
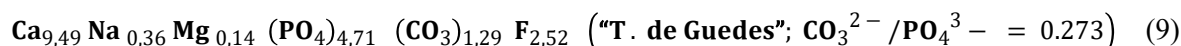
Los resultados promedios del microanálisis elemental que se obtuvieron por MEB-EDS en 5 microcristales de CFA de la micrografía anterior, se exponen en la [Tabla III](#), obtenidos por Alonso (2002).

**Tabla 4.** Resultados del análisis químico por MEB-EDS del CFA de “Trinidad de Guedes”.

%	T. Guedes
CaO	55,09
Na <sub>2</sub> O	0,69
MgO	0,35
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	35,28
CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> (est.)	5,61
F	4,66
CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> /PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	0,273

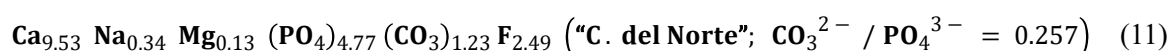
Tal como se observa en la tabla anterior, el grado de sustitución de CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> / PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> en la red cristalina del CFA de “Trinidad de Guedes” resulta de significación, hecho que favorece la solubilidad del P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> de las menas, cuando estas se aplican de forma directa en suelos agrícolas. Al respecto ([Cantera et al., 1997](#)), obtuvieron por su parte, por cientos de eficiencia de conversión del P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> de la roca de significación ( $\epsilon= 42\%$ ), confirmándose lo expuesto acerca de la buena reactividad del P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> de las rocas cuando estas se emplean para la obtención de concentrados (>30% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) y elaboración de fertilizantes completos granulados (NPK) mediante la tecnología TVA.

A partir de los resultados obtenidos y aplicando la fórmula de [McClellan \(1972\)](#), se calcularon las fórmulas estequiométricas globales del CFA mineral de ambos yacimientos cubanos:



Las fórmulas de ambos yacimientos cubanos, indican grados de sustitución de iones  $\text{CO}_3^{2-} / \text{PO}_4^{3-}$  que difieren, resultado que se explica por el origen de formación de ambos depósitos, sedimentario-marino para el caso del yacimiento “Trinidad de Guedes” y residual de infiltración para el caso de las menas del yacimiento “La Pimienta”.

A manera de comparación se presenta la fórmula estequiométrica global del CFA asociado al yacimiento “Caroliona del Norte” (E.U.A), dado por la analogía cristaloquímica que se constata en relación grado de sustitución de iones  $\text{CO}_3^{2-} / \text{PO}_4^{3-}$  según plantean [Chien \(2003\)](#).



Se destaca la utilidad aplicada que presenta el resultado obtenido del parámetro de la celda elemental a del CFA con relación al Índice de Solubilidad Absoluta (ISA) en diferentes disolventes (citrato de amonio neutro, ácido fórmico y ácido cítrico al 2%), cuyos resultados se compararon con aquellos que se realizaron por vía química ([tabla 4](#)), en la cual se observa mayor coincidencia de resultados en el caso del extractante citrato de amonio. Al respecto [Zaharah and Sharifuddin \(2002\)](#), exponen que cuando se utiliza citrato de amonio, éste presenta mejor bondad de ajuste ( $r^2 = 0.92$ ;  $P \leq 0.05$ ), si se compara con el resto de los reactivos convencionales para uso directo de rocas fosfóricas en la agricultura, hecho que está en concordancia con los obtenidos por DRX para el caso del referido extractante, sin embargo estos se consideran aceptables para el caso del ácido cítrico (2%) y menos confiables para el ácido fórmico (2%), dados por las menores bondades de ajuste que se logran ( $r^2$ ).

**Tabla 5.** Resultados del ISA en apatitos carbonáticos de “Trinidad de Guedes”, “La Pimienta” y “Carolina del Norte” (E.U.A), obtenidos por DRX y tres disolventes químicos convencionales.

DEPÓSITO	ISA ACIDO CITRICO (2%)	ISA ACIDO FORMICO (2%)	ISA CITRATO DE AMONIO (pH =7)
Trinidad de Guedes	36.66 (cristalografía; $a_0$ )	63.27 (cristalografía; $a_0$ )	21.49 (cristalografía; $a_0$ )
	29.30(análisis químico)	25.50 (análisis químico)	23.10 (análisis químico)
La Pimienta	11.61 (cristalografía; $a_0$ )	8.73 (cristalografía; $a_0$ )	4.21 (cristalografía; $a_0$ )
Carolina del Norte	40.4 (análisis químico)	82.2 (análisis químico)	19.4 (análisis químico)

Datos reportados por [Truong Bing y Zapata \(2002\)](#)

Datos reportados por [Zaharah and Sharifuddin \(2002\)](#)

Los valores que se obtienen del ISA, señalan que el CFA de la roca cubana de “Trinidad de Guedes”, resulta más soluble que el de las menas fosfatadas del depósito “La Pimienta”, cuando estas se utilizan de forma directa en suelos, lo cual guarda relación con la génesis sedimentario - marina en el cual dichas rocas se formaron, sin embargo, las menas del depósito “La Pimienta”, donde los procesos de meteorización determinaron menor grado de sustitución isomórfica de iones  $\text{CO}_3^{2-} / \text{PO}_4^{3-}$  en la red cristalina del apatito, la solubilidad del  $\text{P}_2\text{O}_5$  en el apatito-carbonático mineral para el referido uso resulta de menor significación.

Los resultados de la [tabla 5](#) señalan además solubilidades similares para las rocas de “Trinidad de Guedes” y “Carolina del Norte” respectivamente, planteándose como posible hipótesis que justifica tal comportamiento, la formación de ambos depósitos en la misma provincia fosfogenética mundial; *Litoral Oeste del Atlántico*, favoreciéndose por dicho motivo el citado mecanismo de sustitución aniónica, en consecuencia el incremento del número de imperfecciones en la estructura cristalina del apatito (menores tamaños de cristalita), lo que de conjunto determina las mayores solubilidades del  $P_2O_5$  en los mencionados extractantes e indican el alto potencial agronómico de dichas rocas para uso directo en la agricultura. Por su parte, las menas del yacimiento “La Pimienta”, donde el citado mecanismo fue de menor significación, dicho apatito carbonático presenta mediana potencialidad para el referido uso, todo lo cual guarda relación con la clasificación propuesta por [Diamond \(1979\)](#) citado en [Zapata y Roy \(2007\)](#), cuyos resultados se presentan en la siguiente tabla.

**Tabla 6.** Clasificación de las rocas fosfóricas para aplicación directa según los tenores de solubilidad del  $P_2O_5$  en los disolventes (extractantes) químicos convencionales.

Potencial de la roca	Solubilidad (% $P_2O_5$ )		
	Citrato de Amonio (pH=7)	Ácido cítrico (2%)	Ácido fórmico (2%)
Alto	>5.4	>9.4	>13.0
Medio	3.2-4.5	6.7-8.4	7.0-10.8
Bajo	<2.7	<6.0	<5.8

De forma paralela en la [tabla 7](#), se presenta el efecto que provoca el tratamiento de intercambio iónico de las zeolitas naturales intercambiadas en su forma amónica y la solubilidad del  $P_2O_5$  de las rocas fosfóricas, efecto demostrado por [Lai y Eberl., \(1986\)](#) y por diferentes investigadores del país, entre ellos los de ([Arias et al., 1991](#)), ([Velázquez et al., 2002](#)) y ([Febles et al., 2003, 2006](#)).

Los resultados que se obtuvieron, corroboran la secuencia de solubilidad del  $P_2O_5$  siguiente: “Trinidad de Guedes” > “La Pimienta”, resultado análogo al que se obtuvo cuando se emplean los extractantes químicos convencionales, demostrándose la relación que se establece entre citado el mecanismo isomórfico de sustitución en la red cristalina del CFA y el incremento de la solubilidad del  $P_2O_5$  de las rocas.

**Tabla 7.** Resultados de la cinética de liberación del fósforo en rocas fosfóricas de yacimientos cubanos en mezclas con zeolitita ( $NH_4^+$ ) de yacimientos cubanos “Tasajeras” y “San Ignacio”.

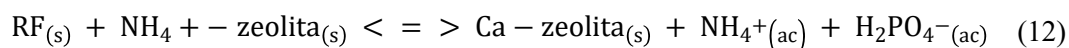
Tiempo (días)	TRINIDAD DE GUEDES		LA PIMIENTA
	% Extracción de $P_2O_5$ con:		%Extracción $P_2O_5$ (ZT)
	ZT	ZSI	
0	21	21	14
6	39	46	37
12	75	84	44
24	84	93	62
48	99	100	69

Las diferencias que se observan en la cinética de solubilidad del  $P_2O_5$  en la roca fosfórica de “Trinidad de Guedes” de la tabla anterior, se explican en los contenidos de zeolita total y la capacidad de intercambio catiónico (CIC), algo mayores para la roca del yacimiento “San Ignacio” (tipo I) según reportan [Velázquez et al., \(2002, 2009, 2010, 2013\)](#).

**Tabla 8.** Resultados semicuantitativos (% m/m) y CIC (total) de los tipos tecnológicos (I) de zeolitas del yacimiento “Tasajeras” y “San Ignacio respectivamente

MUESTRA TECNOLÓGICA	CLINOPTILOLITA HEULANDITA (%)	MORDENITA (%)	Zeolita Total (%)	CIC (total) (meq/100g)
Tasajeras	58	14	72	124,50
San Ignacio	60	20	80	135,80

La disponibilidad de fósforo en las rocas fosfóricas (RF) durante su interacción con el suelo, tiene lugar mediante dos reacciones químicas combinadas: disolución del fósforo de la R.F e intercambio iónico, dicha modificación de la reactividad de fósforo de las rocas fosfóricas, fue demostrada experimentalmente por [Lai y Eberl., \(1986\)](#). Al respecto, ambos autores plantean la hipótesis que durante la disolución de la RF, la zeolita natural secuestra iones  $\text{Ca}^{2+}$  de la RF, al unísono se produce el intercambio en la zeolita amónica (previamente cargada) con liberación de iones  $\text{NH}_4^+$  al medio de reacción, por dicho motivo, la actividad de los iones  $\text{Ca}^{2+}$  en disolución disminuye, lo que conlleva a que la RF se disuelva gradualmente. Cabe señalar además que ambos eventos, tienen la ventaja de liberar lentamente tanto los iones  $\text{NH}_4^+$  como  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ , proceso que se representa a manera de resumen mediante la siguiente reacción química como indica [van Straaten., \(2007\)](#):



Por lo anterior, cuanto mayor resulta la CIC total y el contenido másico de la zeolita natural de partida, se favorecerá entonces la cantidad de iones  $\text{NH}_4^+$  que ocupen los sitios de intercambio de la zeolita (canales), asimismo se incrementará la actividad iónica de estos en el medio acuoso, con el secuestro de iones  $\text{Ca}^{2+}$  que provoca asimismo mayor cuantía de disolución del fósforo de la roca finalmente.

## CONCLUSIONES

1. El mineral de fósforo fundamental, portador del componente útil  $\text{P}_2\text{O}_5$  presente en rocas granulares calcáreas y arcillosas del yacimiento “Trinidad de Guedes”, lo constituye el *carbonato-Fluorapatito (CFA)*; *francolita*, cuyos parámetros reticulares, calculados por la variante fotográfica de rayos-X (Debye- Scherrer) fueron:  $a_0 = 9.318 \pm 0.001 \text{ \AA}$ ;  $c_0 = 6.912 \pm 0.001 \text{ \AA}$ ,  $V = 519.8 \pm 0.01 \text{ \AA}^3$ , resultado que demuestra el alto grado de isomorfismo aniónico por sustitución de iones  $\text{PO}_4^{3-} / \text{CO}_3^{2-}$  en la estructura del apatito carbonático que caracteriza tales menas.
2. La valoración termoanalítica que se realizó mediante el empleo de variantes combinadas de ATD-TG-TGD y espectroscopia FTIR, confirmaron la naturaleza carbonática del apatito de “Trinidad de Guedes” y el origen sedimentario marino del depósito, obteniéndose como resultado un 5,61%  $\text{CO}_2$  estructural en la red cristalina del CFA.
3. Se comprueba que la fórmula estequiométrica del CFA del yacimiento cubano, guarda similitud con la del yacimiento “Carolina del Norte” en cuanto al grado de isomorfismo de iones ( $\text{PO}_4^{3-} / \text{CO}_3^{2-}$ ): 0.273 (“T. Guedes”) y 0.257 (“C. Norte”), de ahí la buena respuesta de solubilidad del fósforo de ambos minerales frente a los disolventes químicos convencionales para su posterior empleo en la elaboración de diferentes formulaciones de fertilizantes, en particular se menciona el producto cubano que comercializa el Grupo GeoMinsal del MINEM, registrado con la marca *AGROMENAS*, a partir de la tecnología novedosa desarrollada por especialistas del CIPIMM.
4. Los similares resultados del Índice de Solubilidad Absoluta (ISA) del apatito obtenidos en rocas fosfóricas del yacimiento “Trinidad de Guedes” y “Carolina del Norte” (E.U.A), se consideran con un alto potencial agronómico para aplicación directa en suelos, hecho que se justifica a través de la

génesis de formación de las menas; sedimentario - marina y similar localización en la provincia fosfogénica mundial; Litoral Oeste del Atlántico.

5. Las rocas fosfóricas del yacimiento de “La Pimienta”, se clasifican de mediano potencial agronómico para uso directo, dado el menor grado de isomorfismo aniónico estructural que presenta el apatito carbonático (1,10% CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>), motivado por la génesis residual de formación de las menas.

### BIBLIOGRAFÍA

- Alemán, I., Alvarez, H., Carballo, D. & otros. 1991. Exploración Orientativa y Detallada del yacimiento de fosforitas Trinidad de Guedes, Oficina Nacional de Recursos Minerales (ONRM). Informe No. 4023, MINBAS, República de Cuba.
- Alonso, Pérez J.A. 2003. Caracterización y propiedades cristalográficas de rocas fosfóricas del yacimiento Trinidad de Guedes. Tesis de Maestría. Mención Química Inorgánica, Facultad de Química, Universidad de La Habana.
- Arias, E, Moreno, E; Soca, M, González, J.A, Gil, R, John, C.M & Febles, J.A. 1991. Evaluación de fertilizantes minerales mezclados con zeolita natural y amónica obtenida a partir de residuales de fábricas de fertilizantes. Memorias 3ra Conferencia Internacional sobre Ocurrencia, Propiedades y Uso de las Zeolitas Naturales, Abril 9-12 Zeolita`91. La Habana (Memorias).
- Cantera, V, M & Suárez, N. S. 1997. Utilización de minerales fosfóricos para la producción de fertilizantes completos granulados (NPK) mediante el proceso TVA en la Empresa Rayonitro. Memorias de la 4<sup>ta</sup> Reunión Internacional de la Red Latinoamericana de Roca Fosfórica, EXPOCUBA, La Habana.
- Casañas, Díaz X., Torres, Zafra J.L., Lavaut, Copa W., Alonso, Pérez J.A., Llanes, Castro., A.I. & Cobas, Botey, R. 2016. Elementos de las tierras raras, elementos del grupo del platino y otros raros y dispersos: Principales tipos genéticos de depósitos y posibles áreas de prospección en el territorio nacional. Parte I. Rev. INFOMIN, Vol. 9, No.1, Julio-Diciembre, pag. 85-105, ISSN: 1992 4194, (Reseña) , Available: <[http:// www.infomin.co.cu](http://www.infomin.co.cu) >, [Consulted: June 15, 2020].
- Casañas, Díaz X., Torres, Zafra J.L., Lavaut, Copa W., Alonso, Pérez J.A., Llanes, Castro., A.I. & Cobas, Botey, R. 2017. Elementos de las tierras raras, elementos del grupo del platino y otros raros y dispersos: Principales tipos genéticos de depósitos y posibles áreas de prospección en el territorio nacional. Parte II. INFOMIN, Vol. 9, No.1, Enero- Junio: 67-84, ISSN: 1992 4194, (Reseña), Available: <<http://www.infomin.co.cu> >, [Consulted: June 15, 2020].
- Chien, S.H. 2003. Factors Affecting the Agronomic Effectiveness of Phosphate Rock for Direct Application. In Direct Application of Phosphate Rock and Related Technology. Latest. Development and Practical Experiences, pp. 50-62 (S.S.S Rajan and S.H Chien, ed.). Special Publications IFDC-SP-37, IFDC, Muscle Roads, Alabama.
- Chukanov, N. 2014. Infrared Spectra of Mineral Species. Ed. Springer Dordrecht Heidelberg New York London, <https://doi.org/10.1007/978-94-007-7128-4> ISSN 2194-3184.
- Diamond, R.B. 1979. Views on marketing of phosphate rock for direct application. In: IFDC, ed. Seminar on phosphate rock for direct application. Special Publication SP-1. Muscle Shoals, U.S.A, IFDC.
- El Balmiki, R., Raji, O., Ouabid, M., Elghali, A., Khadiri Yazami, O. & Bodinier, J.L 2021. Phosphate Rocks: A Review of Sedimentary and Igneous Occurrences in Morocco. Minerals 11, 1137, <https://doi.org/10.3390/min11101137>
- Emsbo, P.; McLaughlin, P.I.; Breit, G.N.; du Bray, E.A. & Koenig, A.E. 2015. Rare Earth Elements in Sedimentary Phosphate Deposits: Solution to the Global REE Crisis? Gondwana Res., 27, 776-785.

- Febles, J.A; Velázquez, M & Otros. 2003. Estudio de pre-factibilidad técnico- económica del empleo de los minerales tipo zeolita, bentonita, rocas fosfóricas y otros en la formulación de fertilizantes ecológicos a partir de materia prima nacional. Informe de Investigación 48, CIPIMM.
- Febles, J.A & Velázquez M., 2006. Results of the application of organ-mineral products from Natural Zeolites as substitutes of chemical fertilizers. 7th International Conference on Occurrence, Properties, and Utilization of Natural zeolites. Socorro, New México, USA. (Abstract. in Zeolite '06).
- Garvey, R.1986. "LSUCRI PC Unit Cell Refinement with Indexing for the Personal Computer" Powder Diffraction, N° 1, pag.114 -116.
- González, C.R.1982. Carácter del isomorfismo del apatito del yacimiento La Pimienta", Rev. Serie Geológica, Centro de Investigaciones Geológicas, No. 5, pag. 6-13, MINBAS, Cuba.
- Hernández, N., Montejo, E. & otros. 2001. "Obtención de concentrados de fosforitas a partir de la mena tipo III del yacimiento Trinidad de Guedes", Jornada Científica Anual de la Filial Habana, Sociedad Cubana de Geología.
- Lai, T.M. & Eberl, D.D. 1986. Controlled and renewable release of phosphorus in soils from mixture of phosphate rock and NH<sub>4</sub>-exchanged clinoptilolite. *Zeolites* 6:129-132.
- Laurel, Gómez, M., Velázquez, Garrido, M., Montejo, Serrano, E., Martín, Hervé, D., Lozada, García, Y. & Hidalgo, Liriano, E., 2020. Aprovechamiento de minerales industriales cubanos en producciones de alto valor agregado, ISSN: 1992 4194, Available: <<http://www.infomin.co.cu>>, [Consulted: January 7, 2021].
- McClellan G.H. 1972. "Evaluation des Phosphates naturels pour l' application directe", Comité Agronomique de L' Hyperphosphate, Missillac (Loire Atlantique), 12-14 Decembre.
- Mineral Commodities Summaries. 2020. U.S.A. Department of the Interior, U.S. Geological Survey (USGS), Reston, Virginia.
- Nathan, Y, Shoval, S., Knubovets, R., Graft, M, Rabinovitz, J., Apfelbraum, F. & Yariv, S. 1995. Infrared study of apatites from the Negev phosphorites", *Current Research, Geol. Surv. Israel*, Vol. 9: 16-19.
- Prévôt, L. 1990. "Geochemistry, Petrography, Genesis of Cretaceous-Eocene Phosphorites. The Ganntour Deposit (Morocco): a type example". *Memories de la Société Géologique de France*, No. 158, 232p.
- Rao, J.L & Berner, R.A. 1995. "Development of an electron microprobe method for the determination of phosphorus and associated elements in sediments", *Chemical Geology*, Vol. 125: 169-184.
- Rivero, L., Pérez, J.E., Rodríguez-Fuentes, G., Morales, V. & M. Soca. 1991. Mejoramiento de sustratos orgánicos con zeolitas. *G. Rodríguez-Fuentes y J.A. González editores. Centro Convenciones, La Habana, Parte II. (1991) 20.*
- Rodríguez, Fuentes, G. 2015. La Ingeniería de Zeolitas Naturales: Desarrollo de Nuevos Materiales y sus Tecnologías. Tesis segundo doctorado, IMRE, Universidad de La Habana.
- Romero, J.C., Velázquez, M & otros. 1989. Uso de las zeolitas naturales en la formulación de fertilizantes Minerales. Informe de Investigación No. 86 CIPIMM.
- Soca, Núñez, M. 2018. Uso de la zeolita en cultivos de importancia económica. *Rev. INFOMIN, CIPIMM*, Vol.10, No.1, Enero-Junio: 46-56, ISSN: 1992 4194, Available: <<http://www.infomin.co.cu>>, [Consulted: June 15, 2020].
- Truong, B. & Zapata F. 2002. Standard characterization of phosphate rock samples from the FAO/ IAEA phosphate project: In: IAEA, ed. Assessment of soil phosphorus status and management of phosphatic fertilizers to optimise crop production, pp. 9-23. IAEA TECDOC. 1272. Viena, IAEA. 473 pp.

- van Straaten, P. 2001. Minerales en la Agricultura. Proyecto de Investigación CYTED XIII-2. "Fertilizantes y Enmiendas de Origen Mineral: 17-34 p.
- van Straaten, P. 2002. Rocks for crops: Agrominerals of sub-Saharan Africa. ICRAF, Nairobi, Kenya, 338p.
- van Straaten, P. 2007. Agrogeology. Ed. Enviroquest Ltd., 352 River Road, Cambridge, Ontario N3C 2B7 Canada, 426 p., ISBN: 978-0-9680123-5-2,
- Velázquez, M.; Rodríguez, T. & otros. 2002. Tecnología de obtención de producto de alto valor agregado Zeofert-P Informe Técnico del CIPIMM.
- Velázquez M.; J.A Febles & otros. 2009. Obtención de Fertilizantes Ecológicos a partir de materias primas nacionales. Informe de Investigación No.56 del CIPIMM.
- Velázquez, M., Alonso J.A., Montejo E., Alfonso, E & otros. 2010. Contribución de los minerales en la obtención de fertilizantes órgano-minerales de liberación lenta, 45 Congreso de Suelos, Cuba.
- Velázquez M, Montejo E, Alfonso E, Alonso, J.A, Figueredo Frías V, Rodríguez A., Villavicencio B, Puentes D, Fernández N & Estrada J. 2013. Alternativas de empleo de las agromenas en la producción de alimentos, X Congreso Cubano de Geología (GEOLOGIA), Geología y Prospección de Minerales no Metálicos, *GEO3-P13*.
- Varlamov, D. 2020. Information - Calculation System "WWW-MINCRYST"-Web-Toolkit for Working with Mineral Structures and its Integration into the Space of Geological Knowledge, [CEUR-WS.org/Vol.-2784/spaper06.pdf](http://CEUR-WS.org/Vol.-2784/spaper06.pdf).
- Wu, S.; Wang, L.; Zhao, L.; Zhang, P.; El-Shall, H.; Moudgil, B.; Huang, X. & Zhang, L. 2018. Recovery of Rare Earth Elements from Phosphate Rock by Hydrometallurgical Processes- A Critical Review. Chem. Eng. J., 335: 774-800.
- Zaharah, A.R. & Sharifuddin, H.A.H. 2002. Phosphorus availability in an acid tropical soil amended with phosphate rocks In: IAEA, ed. Assessment of soil phosphorus status and management of phosphatic fertilizers to optimise crop production, pp. 294-303. IAEA TECDOC. 1272. Viena, IAEA. 473 pp
- Zapata, F. & Roy, R.N. 2007. Utilización de las rocas fosfóricas para una agricultura sostenible. Publicación Conjunta de la Organización de Naciones Unidas (ONUDI) para la Agricultura y la Alimentación (FAO) y el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), ISBN 978-92-5-305030-7.

**Conflicto de Intereses:** Los autores declaran no tener conflicto de intereses

**CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES:** Lic. José Antonio Alonso Pérez, MsC (IGP-SGC). Elaboró, dirigió y desarrolló la investigación. Participó en la metodología de diseño de la investigación, así como la propuesta de todos los ensayos mineralógicos a fin de llevar a cabo la caracterización del apatito presente en las rocas fosfóricas del yacimiento "Trinidad de Guedes" (prov. Matanzas). Participó además en la discusión de los resultados obtenidos. Realizó la escritura del artículo. Ing. Martha Velázquez Garrido, MsC (CIPIMM). Revisó críticamente el artículo, corroborando los resultados agronómicos del Índice de Solubilidad Absoluta (ISA) del fósforo, con los de los análisis químicos obtenidos en diferentes extractantes y a través del empleo de la roca fosfórica de Trinidad de Guedes en mezclas con zeolitas (producto ZEOFERT, ZEOFERT-P) y aquellos que se lograron a partir de datos cristalográficos. Lic. Rafael Antonio Alonso Rodríguez (CNIC). Participó en la interpretación de los resultados obtenidos por FTIR y MEB-EDS. Revisó además el artículo y la bibliografía consultada con el programa End-Note. Lic. Abdel Casanova Gómez, MsC (CIQ). Participó en la interpretación de los resultados obtenidos por DRX y A.Térmico (ATD, TG, DTG). Realizó además la revisión crítica del artículo, sugiriendo nuevas ideas para trabajos futuros en relación con la temática de rocas fosfóricas.

Los autores de este trabajo declaran no presentar conflicto de intereses.

Este artículo se encuentra bajo licencia [Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional \(CC BY-NC 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)