

Análisis de Fry en el estudio de la génesis del distrito metalogénico Santa Lucía-Matahambre

Ramón Guillermo Pérez-Vázquez
Elmidio Estévez-Cruz
Maite Susana Romero-Espinosa

Resumen

El presente trabajo tuvo como objetivo fundamental aplicar el análisis de Fry con el fin de establecer la relación espacial y genética que existe entre los diferentes yacimientos y manifestaciones del distrito metalogénico Santa Lucía y revelar su dirección preferencial. Los resultados mostraron una clara relación en la distribución espacial de los cuerpos minerales al agruparse en la nube de puntos. Ello indicó que todos los cuerpos minerales y manifestaciones del distrito metalogénico se originaron a partir del mismo proceso formador de las menas y que procesos posteriores de tectónica y mantos de cabalgamiento evidentes en la zona distribuyeron en varios depósitos y manifestaciones lo que fue un solo yacimiento mineral. Este trabajo ofrece información para la confección del Mapa Metalogénico 1: 250 000 dirigido por el Servicio Geológico de Cuba (IGP).

Palabras clave: Análisis de Fry; yacimientos minerales; distrito metalogénico Santa Lucía.

Fry analysis for the investigation of the genesis of the metallogenic district Santa Lucia-Matahambre

Abstract

The main objective of this investigation is to implement the Fry analysis in order to establish the spatial and genetic relation between different ore bodies and manifestations in the metallogenic district of Santa Lucia and reveal the preferential direction. The results show a clear relation in the spatial distribution of the ore bodies as they are grouped in a cloud of points. This indicates that all the ore bodies and manifestations of the metallogenic district constitute the process giving rise to the ore bodies and that subsequent processes occurring in the tectonics and overthrusting mantle that were evidenced in the area caused a single ore body to scatter into various deposits and manifestations. This investigation provides information for generating a 1: 250 000 Metallogenic Map headed by the Cuban Geological Service (IGP, acronym in Spanish).

Keywords: : Fry analysis; ore bodies; metallogenic District of Santa Lucia.

1. INTRODUCCIÓN

La formación de un depósito mineral con valor económico es un proceso complejo donde intervienen muchos factores. Así diferentes tipos genéticos de yacimientos ocupan diferentes períodos de tiempo en la historia de la Tierra y diferentes patrones de formación (Groves *et al.* 2005; Groves & Bierlein 2007; Richards 2013; Jenkin *et al.* 2015).

Con el desarrollo científico técnico la demanda de recursos minerales se incrementa constantemente, incluso minerales que años atrás no se utilizaban hoy son extremadamente necesarios. Por ejemplo, el chip de una moderna computadora contiene más de la mitad de todos los elementos de la tabla periódica (Graedel *et al.* 2013).

Perfeccionar los modelos de yacimientos minerales, aclarar su génesis y la identificación de nuevas clases de yacimientos debe dirigirnos a reevaluar el potencial mineral de regiones que previamente han sido poco exploradas (Metcalf *et al.* 2006; Phillips & Powell 2010; Zhong, Keyan & Chuanzhong 2012; Estévez-Cruz 2013; Lusty & Gunn 2015).

La necesidad de reconocer y distinguir cuáles factores son esenciales y cuáles son fortuitos para la presencia del yacimiento debe estimular a la realización de estudios comparativos críticos de los grupos de yacimientos minerales, utilizando todas las herramientas geológicas, geoquímicas, geofísicas y estadísticas a disposición (Proenza & Melgarejo 1998; Ariosa-Iznaga 2002; Appold & Monteiro 2009; Estévez-Cruz 2013).

El distrito metalogénico Santa Lucía es un ejemplo de región en la que a los yacimientos que en ella se localizan se les han asignado varias génesis en función de las diferentes etapas de prospección y exploración que se han desarrollado. Cada etapa ha cumplido sus objetivos, esclareciendo las características geológicas y mineras de los mismos.

Esta investigación va encaminada a realizar el análisis de Fry, confeccionar el patrón de distribución espacial muy relacionado con su génesis, precisar si existe una relación en la distribución espacial de los cuerpos minerales y si la formación de todos los depósitos ocurrió debido a un proceso único (Fry 1979; Vearncombe & Vearncombe 1999; Fossen 2010; Estévez-Cruz 2013).

El método de autocorrelación espacial fue desarrollado por Norman Fry, creado como una vía para medir la deformación en rocas a partir de patrones de objetos que inicialmente mostraban una distribución aleatoria (Fry 1979). La técnica, que se considera equivalente de la

variografía en los métodos geoestadísticos, se ha utilizado para establecer la existencia de regularidad en los datos, establecer los controles de la mineralización aurífera y estudiar los patrones de distribución de diferentes tipos genéticos de yacimientos minerales (Vearncombe & Vearncombe 1999; Yaghubpur & Hassannejad 2006; Kreuzer *et al.* 2007; Carranza 2009; Carranza *et al.* 2009; Fossen 2010; Estévez-Cruz 2013).

1.1. Características geográficas y geológicas

El distrito metalogénico Santa Lucía–Matahambre se encuentra ubicado en el límite norte del terreno Guaniguanico, al noroeste de la provincia de Pinar del Río, Cuba occidental. Según la división política administrativa pertenece al municipio de Minas de Matahambre y se encuentra a 46 km de la capital provincial (Figura 1). En el área se identifican claramente dos campos minerales: campo mineral Santa Lucía y campo mineral Matahambre (Figura 1A)

La región presenta un relieve relativamente suave, con un sistema de crestas bajos con un rumbo que oscila entre (N35°E–N45°E) y crestas laterales bien marcadas con rumbo noreste–suroeste; las elevaciones más altas son: Loma Rogelia (256 m) y Matahambre (243 m) (Pérez & Melgarejo 1998).

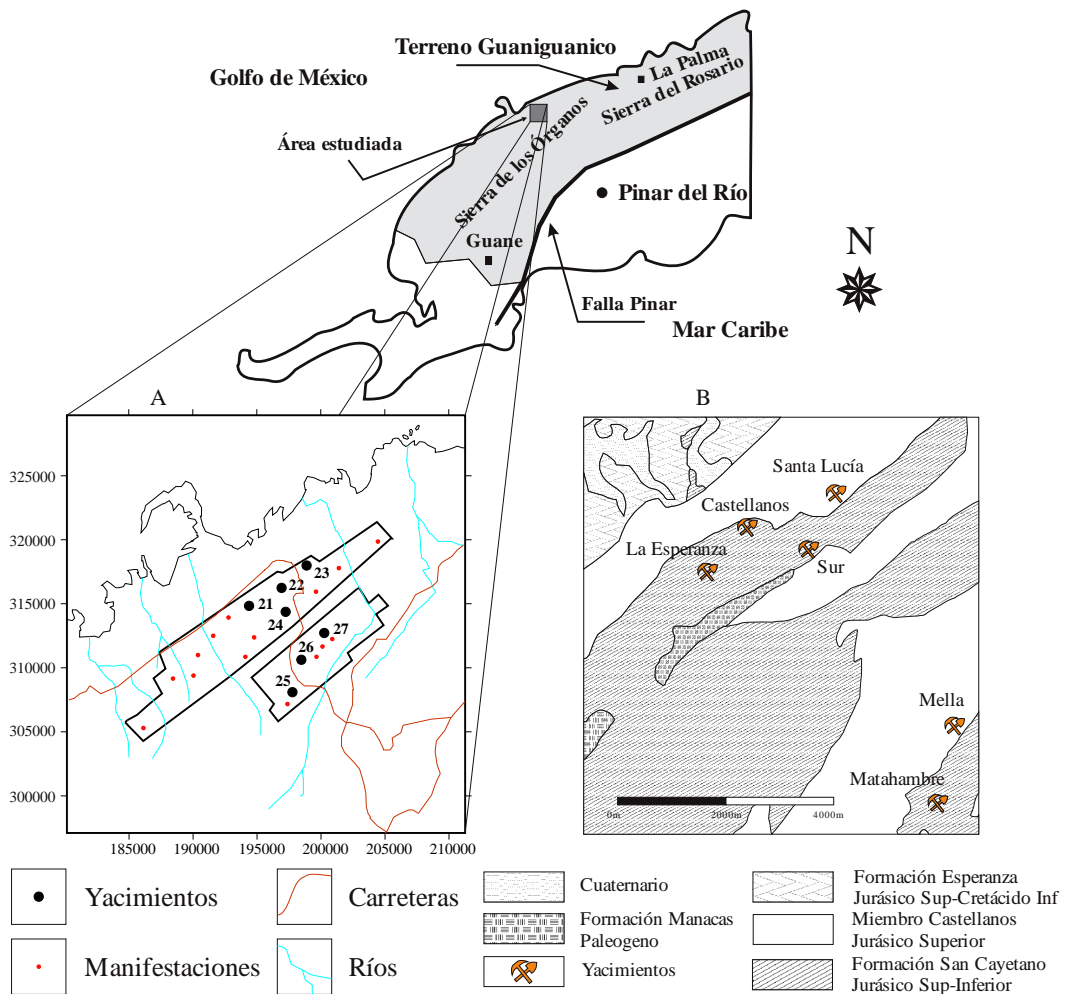


Figura 1. Mapa de ubicación geográfica, geológica, de yacimientos y manifestaciones a escala 1: 50 000. 21) La Esperanza; 22) Castellanos; 23) Santa Lucía; 24) Sur; 25) Nieves; 26) Matahambre; 27) Mella.

Esta es una región con alto potencial minero, por lo tanto, el principal renglón económico, en tiempos de explotación, fue la minería. Actualmente la economía se basa en la industria agropecuaria y forestal. También se desarrolla el turismo en cayo Jutías, uno de los atractivos más fascinantes de la región (Beades-González 1998).

Para la realización del trabajo se contó con los informes de búsqueda y exploración realizados en el área así como artículos y publicaciones referentes a la misma (Yurpalov *et al.* 1972; Verchigora *et al.* 1982; Pérez & Melgarejo 1998; Valdés-Nodarse 1998; Pérez-Vázquez 2000). En la geología de la región se distingue la formación San Cayetano (Jurásico Inferior-Superior) como la más antigua. Son comunes en ella las estructuras de *ripple marks*. La base de la formación es desconocida y en ella se encuentran todos los yacimientos y manifestaciones minerales del área (Figura 1B). La formación está compuesta por limolitas y argilitas de

color gris a gris oscuro, pardo y violáceas, finamente estratificadas con aspecto pizarroso, intercaladas con areniscas cuarzosas y cuarzo-micáceas, estratificadas de color blanquecino o amarillo rojizo, a veces algo oxidado y con espesores variables (Yurpalov *et al.* 1972; Verchigora *et al.* 1982). También afloran limoareniscas estratificadas de color naranja intercaladas con limolitas. En las limolitas aparecen con frecuencia concreciones terrígenas con estructura concéntrica que generalmente oscilan entre 2 cm y 4 cm de diámetro. Las limolitas y lutitas pueden contener abundante materia orgánica siendo muy carbonosas y con una coloración gris muy oscuro a negras cuando no están muy meteorizadas. Tectónicamente el área estudiada se caracteriza por el desarrollo de escamas tectónicas, están desarrolladas ampliamente dislocaciones disyuntivas, diferentes por su origen, morfología, amplitud y dirección de desplazamiento, período de ubicación y manifestación de los movimientos repetidos. En la parte meridional oriental de la zona de Guaniguanico se identifican las dislocaciones tectónicas más antiguas, que es la base del manto Pinar. Son las fallas inversas de sobrecorrimiento, que delimitan escamas y otras fallas inversas conjugadas. También están presentes las fallas inversas con desplazamiento (falla Manacas, Limonar) y fallas con buzamiento abrupto con desplazamiento vertical (falla Laguna, Macurije) (Yurpalov *et al.* 1972; Verchigora *et al.* 1982; Pérez & Melgarejo 1998).

Conjuntamente con el yacimiento Santa Lucía (Figuras 1A y 1B) se encuentran los depósitos Matahambre, Castellanos, La Esperanza, Nieves y más de 20 depósitos y manifestaciones de tipo SEDEX que constituyen el distrito metalogénico, con contenidos promedios de 1,95 % de Pb y 6,14 % de Zn (Yurpalov *et al.* 1972; Verchigora *et al.* 1982). Los depósitos se caracterizan por ser estratiformes y concordantes con las rocas encajantes. Los cuerpos que afloran a la superficie se encuentran intensamente oxidados y forman amplios sombreros de hierro o *gossan*, con óxidos e hidróxidos de Fe. De manera general, el sulfuro dominante es la pirita, en menor cuantía la esfalerita y la galena; como minerales acompañantes aparecen la pirrotina, marcasita y calcopirita; como trazas la arsenopirita, magnetita y la bornita. La zona de oxidación está compuesta por goethita, hematita, magnetita, lepidocrocita, cerusita, anglesita, barita, smithsonita, covelina, calcocita y pequeñas cantidades de oro. El cuarzo, la calcita, dolomita, clorita y los feldespatos son los principales minerales no metálicos (Pérez-Vázquez 2000).

2. METODOLOGÍA

Como se ha señalado, el método de autocorrelación espacial fue desarrollado por Norman Fry a finales de la década de los 70. También conocido como análisis de Fry, fue creado como una vía para medir la deformación en rocas a partir de patrones de objetos que inicialmente mostraban una distribución aleatoria. Así para n puntos hay una relación espacial de n^2-n que puede ser ilustrada con un gráfico de punto y un diagrama de rosa. La técnica consiste en tomar una serie de datos puntuales y realizar una distribución de los mismos aplicando una plantilla. En el ejemplo de la Figura 2 se muestra cómo va ubicando la plantilla en el centro de cada uno de los 8 puntos originales y redibuja el resto. Al final, al ir aplicando la fórmula de la relación espacial n^2-n , quedará una serie de 56 puntos (Figura 2).

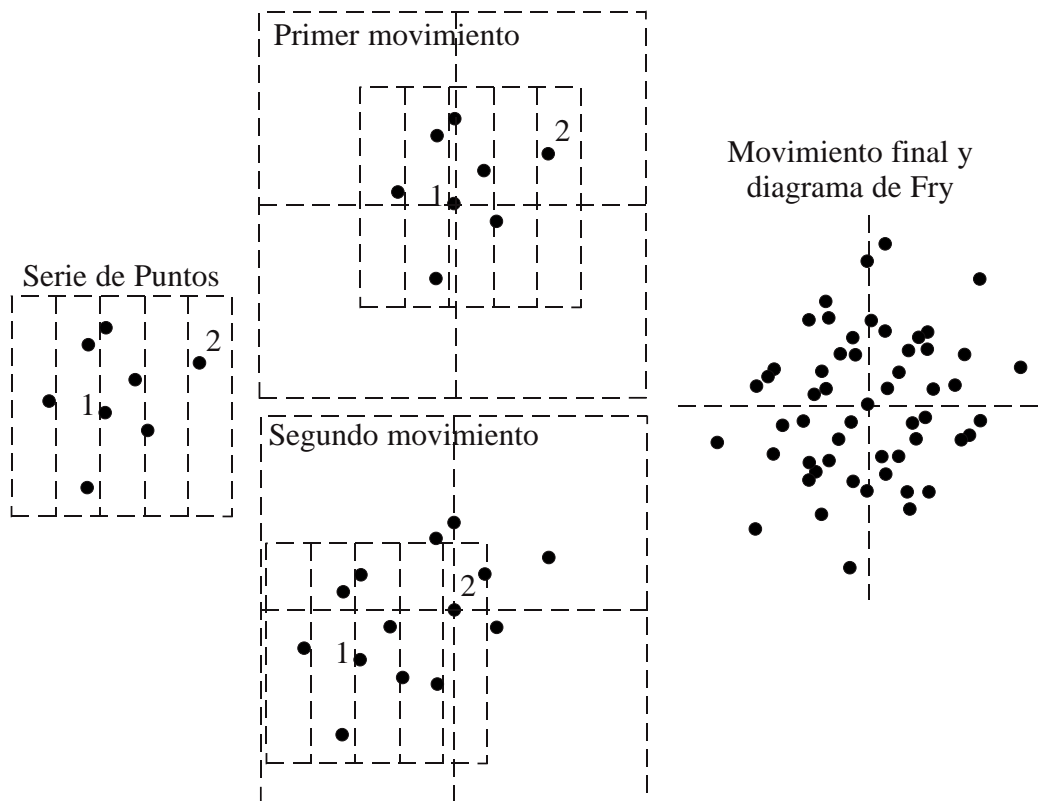


Figura 2. Procedimiento esquemático para crear el diagrama de Fry a partir de una serie de 8 puntos (Carranza 2009).

La técnica que se considera equivalente de la variografía en los métodos geoestadísticos se ha utilizado para establecer los controles de la mineralización aurífera y estudiar los patrones de distribución de diferentes tipos genéticos de yacimientos minerales; varias investigaciones han demostrado la aplicabilidad del método (Fry 1979;

Vearncombe & Vearncombe 1999; Yaghubpur & Hassannejad 2006; Carranza 2009; Carranza *et al.* 2009; Fossen 2010; Estévez-Cruz 2013).

El gráfico de Fry permite identificar la existencia de regularidad, patrones no visibles en la disposición espacial de los datos, pero además, registra la distancia y dirección entre los pares de puntos trasladados, lo que permite construir diagramas de rosas. Estos diagramas se construyen para todos los pares de puntos y para pares separados a una distancia dada, facilitando el estudio de tendencia o procesos que operan a distintas escalas (Estévez-Cruz 2011). Para realizar el análisis se contó con la ubicación de las coordenadas X, Y de todos los yacimientos y manifestaciones que componen el distrito metalogénico Matahambre Santa Lucía (Tabla 1). Estos datos fueron exportados al software libre DotProc versión 1.0 (Kuskov, Mikhailov & Dirks 2012a, 2012b). DotProc es un sistema especializado para ayudar a los geocientíficos a realizar análisis con juegos de datos de dos dimensiones (2D). Con el mismo se pueden estudiar uno o varios yacimientos o manifestaciones minerales, cuerpos intrusivos de una particular composición, resultados de estudios geoquímicos, intersección de pozos proyectados en la horizontal. Las funciones que pueden ser desarrolladas con el DotProc son las siguientes: análisis de Fry de distribución de puntos, análisis fractal de distribución de puntos y pruebas de uniformidad de distribución de puntos (Kuskov, Mikhailov & Dirks 2012a, 2012b). En nuestro caso el análisis de Fry se realizó con el fin de establecer la relación espacial y genética que existe entre los diferentes yacimientos y manifestaciones y revelar su dirección preferencial. En el distrito metalogénico Santa Lucía hay un gran número de yacimientos y manifestaciones agrupados en dos campos minerales: Santa Lucía, con 14 depósitos y Matahambre con 13.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Según la literatura (Yurpalov *et al.* 1972; Fry 1979; Verchigora *et al.* 1982; Valdés-Nodarse 1998; Pérez & Melgarejo 1998) los yacimientos del área ocupan cierta posición espacial, siempre asociados a las partes positivas del relieve, lo cual ofrece un criterio geomorfológico de búsqueda muy significativo para la zona.

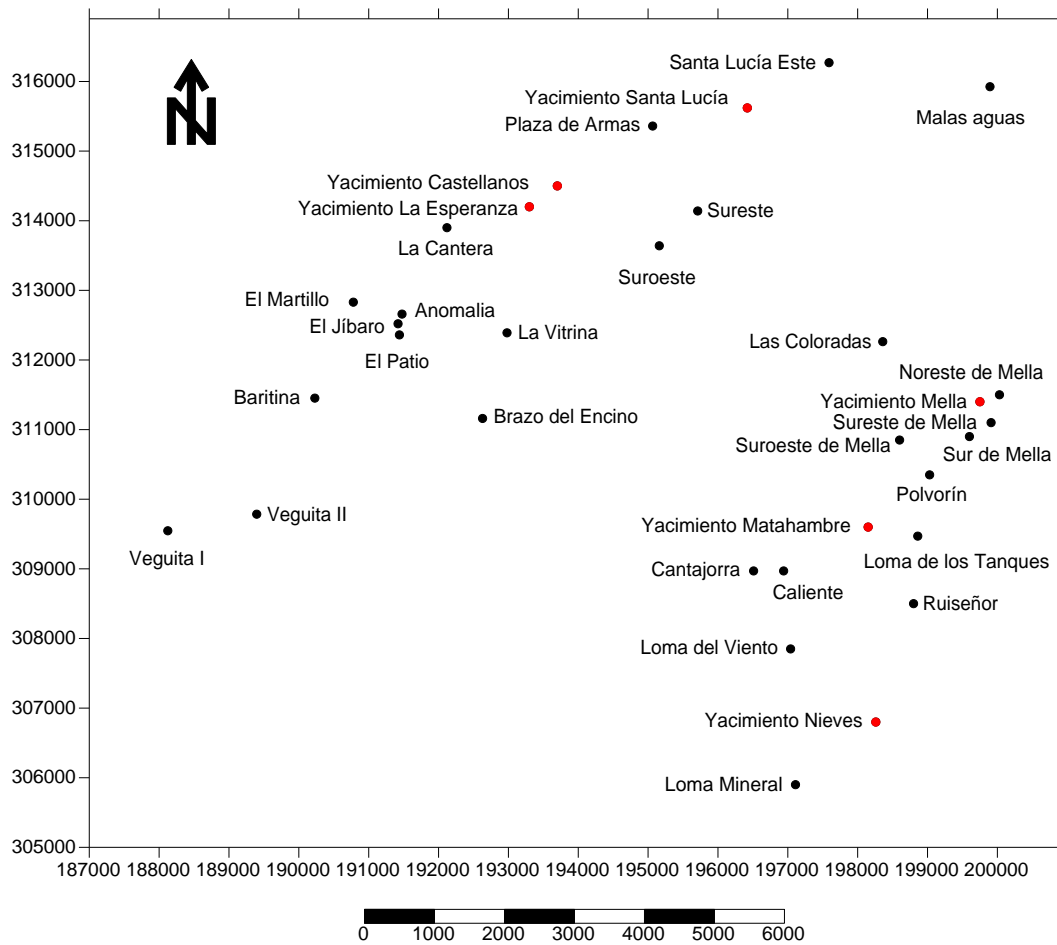


Figura 3. Mapa de ubicación de los yacimientos y manifestaciones del distrito metalogénico Santa Lucía Matahambre.

En la Figura 3 se observan todos los yacimientos y manifestaciones de los campos minerales Santa Lucía y Matahambre; los mismos se ven como puntos aislados, aparentemente sin relación alguna entre ellos. Incluso, Santa Lucía se encuentra separado, aproximadamente, a unos 15 km del campo mineral Matahambre. Al utilizar las coordenadas X, Y de los yacimientos y manifestaciones del campo mineral Santa Lucía, en el análisis de Fry, vemos que los resultados muestran que existe una relación entre ellos, que hay una regularidad. Todos se agrupan en una nube de puntos en dirección NE-SW que como lo expresa la literatura (Yurpalov *et al.* 1972; Fry 1979; Verchigora *et al.* 1982; Valdés-Nodarse 1998; Pérez & Melgarejo 1998; Vearncombe & Vearncombe 1999; Pérez-Vázquez 2000; Richards 2013;) es la dirección preferencial de los cuerpos que componen el campo mineral y el diagrama de rosa ratifica este comportamiento (Figura 4).

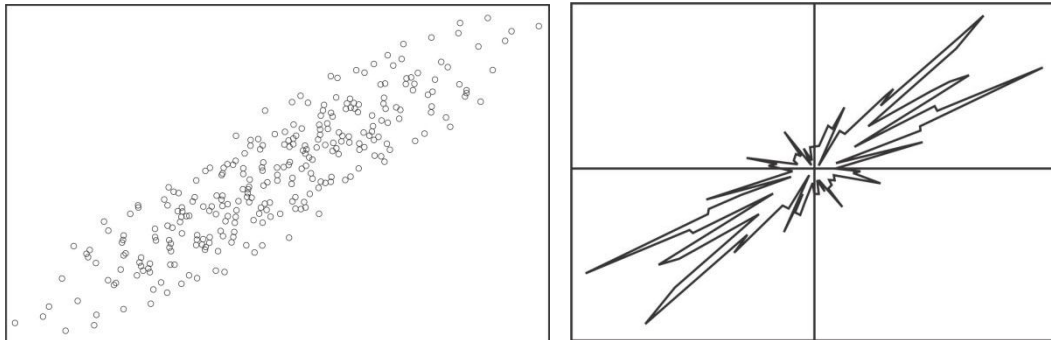


Figura 4. Nube de puntos (izquierda) y diagrama de rosa (derecha) obtenidos como resultado del análisis de Fry para el campo mineral Santa Lucía.

Todo parece indicar que el campo mineral se formó a partir de varios canales de ascenso de la mineralización en un único proceso metalogénico, debido a que la nube de puntos se encuentra agrupada (Figura 4, izquierda) y que posteriormente la actividad tectónica y los mantos de cabalgamientos, evidentes en la geología de esta región, se encargaron de separar lo que en un momento fue un solo cuerpo mineral. Sucede otro tanto cuando observamos el diagrama de Fry del campo mineral Matahambre (Figura 5).

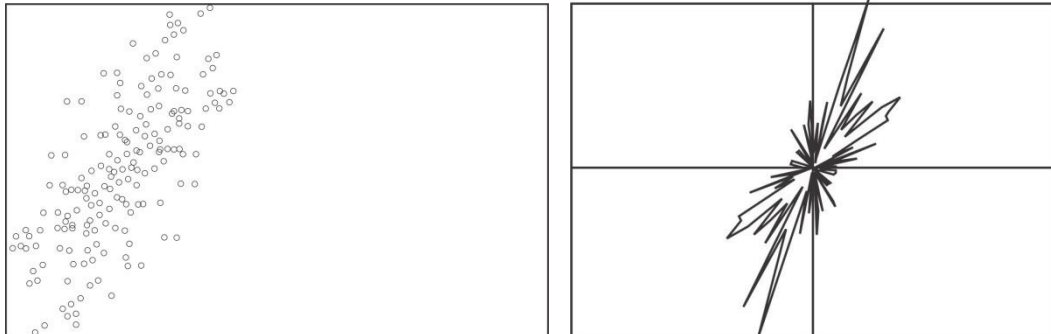


Figura 5. Nube de puntos (izquierda) y diagrama de rosa (derecha) obtenidos como resultado del análisis de Fry para el campo mineral Matahambre.

Si se realiza el análisis de Fry para todo el distrito metalogénico podemos ver (Figura 6) que en la nube de puntos resultante se observan, de noroeste hacia el sureste, tres bandas de puntos o lineamientos que se orientan suroeste–noreste. La banda de la parte superior izquierda representa el campo mineral Santa Lucía, la de la parte inferior derecha el campo mineral Matahambre y la banda central pudiera estar producida por fallas, que siguen una dirección y establecen una correspondencia entre todo el distrito metalogénico.

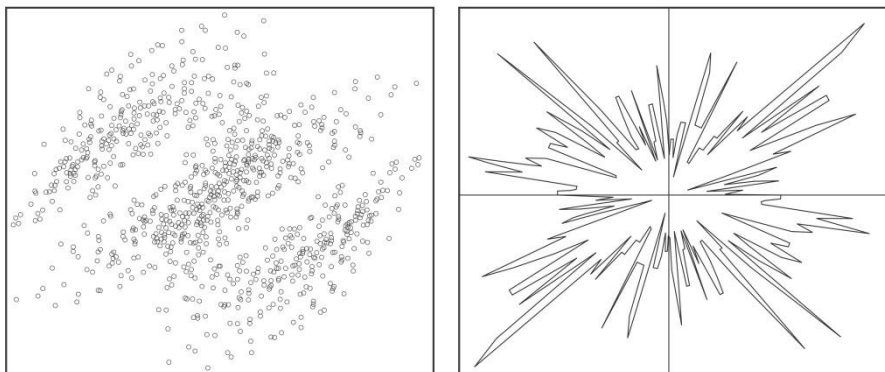


Figura 6. Nube de puntos (izquierda) y diagrama de rosa (derecha) obtenidos por el autor resultado del análisis de Fry para todo el distrito metalogénico Santa Lucía.

En el diagrama de rosa se aprecia una segunda dirección sureste-noroeste, que parece estar relacionada con las fallas transversales de edad Jurásico Inferior formadas durante la deposición de la formación San Cayetano, que se encuentran paralelas o semiparalelas a los canales de ascenso (Valdés-Nodarse 1998). Es por eso que solo aparecen al realizar el análisis de Fry a los campos minerales unidos: campo mineral Santa Lucía y el campo mineral Matahambre, en este último donde se encuentran los canales de ascenso y la mineralización Cuprífera (Figura 5). Todo esto pudiera evidenciar que la región se formó a partir de un fenómeno o proceso metalogénico único para ambos campos minerales.

4. CONCLUSIONES

De los resultados del análisis de Fry se llega a las siguientes conclusiones:

1. Existe una clara relación en la distribución espacial de los cuerpos minerales al agruparse la nube de puntos.
2. El bandeamiento o lineamiento de los depósitos minerales observado al aplicar el análisis de Fry puede estar producido por fallas, que siguen una dirección NE-SW, y establece una correspondencia entre todo el distrito metalogénico.
3. Las nubes de puntos concentradas en áreas muy específicas, como resultado de la aplicación del análisis de Fry, demuestran que todos los cuerpos minerales y manifestaciones del distrito metalogénico forman parte del mismo proceso formador de las menas.
4. Procesos posteriores de tectónica y mantos de cabalgamiento evidentes y abundantes en la zona distribuyeron en varios

depósitos y manifestaciones, lo que fue un solo yacimiento mineral.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a la empresa Geominera de Pinar del Río, por su ayuda en la revisión de los materiales de archivo sin los cuales hubiera sido imposible este trabajo y al departamento de Geología de la Universidad de Pinar del Río por su apoyo ilimitado, especialmente a Robert Ramírez Hernández, por sus consejos y materiales facilitados.

6. REFERENCIAS

- APPOLD, M. S. & MONTEIRO, L. V. S. 2009: Numerical modeling of hydrothermal zinc silicate and sulfide mineralization in the Vazante deposit, Brazil. *Geofluids* 9(2): 96-115.
- ARIOSIA-IZNAGA, J. D. 2002: *Sobre la problemática del desarrollo de los modelos descriptivos de yacimientos minerales en Cuba*. Tesis doctoral. 112 p. Disponible en: www.ismm.edu.cu/edum.
- BEADES-GONZÁLEZ, R. 1998: *Historia local municipio Minas de Matahambre* (Inédito). Tomo I, 15-16 p.
- CARRANZA, E. J. M.; OWUSO, E. A. & MARTIN, H. 2009: Mapping of prospectivity and estimation of number of undiscovered prospects for lode gold, southwestern Ashanti Belt, Ghana. *Mineralium Deposita* 44(8): 915-938.
- CARRANZA, E. J. M. 2009: Controls on mineral deposit occurrence inferred from analysis of their spatial pattern and spatial association with geological features. *Ore Geology Review* 35(3): 383-400.
- ESTÉVEZ-CRUZ, E. 2011: *Metodología para la evaluación del potencial mineral de áridos naturales. Caso de estudio-Llanura Sur de Pinar del Río*. Tesis doctoral. Universidad de Pinar del Río. 204 p.
- ESTÉVEZ-CRUZ, E. 2013: Modelación de yacimientos de arena y grava en la llanura sur de Pinar del Río. *Minería y Geología* 29(3): 18-37.
- FOSSON, H. 2010: *Structural Geology*. Cambridge University Press. 60-66 p.
- FRY, N. 1979: Random point distributions and strain measurement in rocks. *Tectonophysics* 60(1): 89-105.
- GRAEDEL, T. E.; HARPER, E. M.; NASSAR, T. & RECK, B. K. 2013: On the materials basis of modern society. Proceedings of the National Academy of Sciences. First published online December. Disponible en: [doi/10.1073/pnas.1312752110](https://doi.org/10.1073/pnas.1312752110)
- GROVES, D. I. & BIERLEIN, F. P. 2007: Geodynamic settings of mineral deposit systems. *Journal of the Geological Society* 164(1): 19-30.
- GROVES, D. I.; VIELREICHER, R. M.; GOLDFARB, R. J.; KENT, C. & CONDIE, K. C. 2005: Controls on the heterogeneous distribution of mineral deposits through time. *Geological Society, London, Special Publications*, 248(1): 71-101.

- JENKIN, G. R. T.; LUSTY, P. A. J.; McDONALD, I.; SMITH, M. P.; BOYCE, A. J. & WILKINSON J. J. 2015: Ore deposits in an evolving Earth: an introduction. *Geological Society, London, Special Publications*, 393(1): 1-8.
- KREUZER, O. P.; BLENKINSOP, T. G.; MORRISON, R. J. & PETERS, S. G. 2007: Ore controls in the Charters Towers goldfield, NE Australia: Constraints from geological, geophysical and numerical analyses. *Ore Geology Reviews* 32(1): 37-80.
- KUSKOV, A.; MIKHAILOV, A. & DIRKS, P. 2012a: DotProc-Geoscientific Analysis Software. Software libre versión 1.0. SRK Consulting. Integrated Science and Engineering Consultancy [en línea]. Consulta: nov 2014. Disponible en: http://www.kuskov.com/component/option,com_remository/Itemid,30/
- KUSKOV, A.; MIKHAILOV, A. & DIRKS, P. 2012b: DotProc Manual. Versión 1.0. SRK Consulting. Integrated Science and Engineering Consultancy [en línea]. Consulta: nov 2014. Disponible en: <http://www.kuskov.com/content/view/65/70/>
- LUSTY, P. A. J. & GUNN, A. G. 2015: Challenges to global mineral resource security and options for future supply. *Geological Society, London, Special Publications*, 393(1): 265-276.
- METCALFE, R.; TAKASE, H.; SASAO, E.; OTA, K.; IWATSUKI, T.; ARTHUR, R. C.; STENHOUSE, M. J.; ZHOU, W. & MACKENZIE, A. B. 2006: A system model for the origin and evolution of the Tono Uranium Deposit, Japan. *Geochemistry: exploration, environment, analysis* 6(1): 13-31.
- PÉREZ-VÁZQUEZ, R. G. 2000: *Pronóstico de metales preciosos (Au y Ag) en el campo mineral Matahambre*. Tesis de maestría. Pinar del Río. 92 p.
- PÉREZ, R. G. & MELGAREJO, J. C. 1998: El yacimiento Matahambre (Pinar del Río, Cuba): estructura y mineralogía. *Acta Geológica Hispánica* 33(1-4): 133-152.
- PHILLIPS, G. N. & POWELL, R. 2010: Formation of gold deposits: a metamorphic devolatilization model. *Journal of Metamorphic Geology* 28(6): 689-718.
- PROENZA, J. A. & MELGAREJO, J. C. 1998: Una introducción a la metalogenia de Cuba bajo la perspectiva de la tectónica de placas. *Acta Geológica Hispánica* 33(1-4): 89-131.
- RICHARDS, J. P. 2013: Giant ore deposits formed by optimal alignments and combinations of geological processes. *Nature Geoscience* 6(11): 911-916.
- VALDÉS-NODARSE, E. L. 1998: Pb-Zn "SEDEX" deposits and their copper stockwork roots, western Cuba. *Mineralium Deposita* 33(6): 560-567.
- VEARNCOMBE, J. & VEARNCOMBE, S. 1999: The spatial distribution of mineralization: applications of Fry analysis. *Economic Geology* 94(4): 475-486.
- VERCHIGORA, N.; HERNÁNDEZ, A.; SIMÓN, A.; GARCÍA, L. & ESCALONA, N. 1982: Informe de búsqueda a escala 1:10 000 realizado en el campo

mineral Castellanos Santa Lucía. Informe final. Archivo histórico de Pinar del Río. 508 p.

YAGHUBPUR, A. & HASSANNEJAD, A. A. 2006: The Spatial Distribution of Some Chromite Deposits in Iran, Using Fry Analysis. *Journal of Sciences, Islamic Republic of Iran* 17(2): 147-152.

YURPALOV, O.; ZAMESHIKOV, M.; SEDOV, V.; AVTONEEV, S.; SHULZHENKE, V. & AMISENOV, Y. 1972: Informe con el cálculo de reservas de las menas de plomo-cinc del yacimiento Santa Lucía según los trabajos de exploración geológica. 48 p.

ZHONG, W.; KEYAN, X. & CHUANZHONG, S. 2012: The grade-tonnage model for china's molybdenum deposits. *Acta Geologica Sinica* 86(3): 680-690.

Ramón Guillermo Pérez-Vázquez monico@civil.cujae.edu.cu

Master en Geología. Profesor Auxiliar.

Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría. La Habana, Cuba

Elmidio Estévez-Cruz estevez@upr.edu.cu

Doctor en Geología. Profesor Titular.

Universidad de Pinar del Río, Cuba.

Maite Susana Romero-Espinosa.

Ingeniera Geóloga.

Fábrica de Cemento de Cienfuegos, Cuba