

Evaluación del riesgo por inundación en la comunidad Pradera Alta, municipio Maracaibo, Venezuela

Lizetty Díaz-Borrego
Alina Rodríguez-Infante

Resumen

La investigación tuvo como propósito identificar las áreas vulnerables al riesgo por inundación en la comunidad Pradera Alta, de la parroquia Francisco Eugenio Bustamante. La metodología aplicada consistió en la exploración de campo para inventariar riesgos de origen natural y antrópico, el análisis de muestras en el laboratorio para evaluar características físico-mecánicas de los suelos y la realización de sondeos geoelectrónicos para determinar la presencia de lentes acuíferas, la profundidad y espesor de los niveles de suelo. Se logró establecer tres áreas con distinto nivel de riesgo (alto, medio y bajo), estando el sector más vulnerable en el extremo noroeste de la comunidad, donde la probabilidad de ocurrencia de inundación es elevada y las personas se encuentran en peligro, tanto en el exterior como en el interior de las viviendas. Se constata que los principales factores que condicionan el riesgo por inundación en este sector están relacionados con las características del suelo, las condiciones hidrológicas, la pendiente del terreno, el socavamiento y la erosión y factores antropogénicos condicionados por la ausencia de ordenamiento territorial.

Palabras clave: estudios de vulnerabilidad y riesgo; riesgo por inundación; ordenamiento territorial; comunidad Pradera Alta; Venezuela.

Flood Risk Assessment in the Community of Pradera Alta, Municipality of Maracaibo, Venezuela

Abstract

The objective of this investigation was to identify the areas susceptible to flooding in the Parish Church Francisco Eugenio Bustamante of the Community of Pradera Alta. The methodology applied involves a site exploration for the identification of natural and non-natural risks, sample lab analyses for the assessment of physical and mechanical characteristics of soils and geo-electric surveys for the identification of aquifers, ground level depth and thickness. Three areas with distinctive risk levels (high, average and low) were identified. The most vulnerable sector is located in the far northwest of the community. The residents are at risk both inside and outside of their homes due to the high probability of flood occurrence. Evidence shows that the main factors contributing to the occurrence of floods in this sector are associated with soil characteristics, hydrological conditions, ground slopes and soil erosion in addition to non-natural factors which are attributed to the lack of territorial planning.

Keywords: vulnerability and risk assessments; flood risk, territorial planning; community of Pradera Alta; Venezuela.

1. INTRODUCCIÓN

Las inundaciones por desbordamiento de los ríos constituyen eventos recurrentes y se presentan como consecuencia de lluvias fuertes o continuadas que superan la capacidad de transporte de los ríos y la capacidad de absorción del suelo, produciéndose la inundación de las tierras adyacentes. Estos eventos ocurren de forma aleatoria en función de los procesos climáticos locales y regionales.

Estadísticamente, los ríos igualan o exceden el nivel medio de inundación cada 2,33 años (Leopold, Wolman & Miller 1964). Los problemas resultantes de los desbordamientos de las corrientes de agua dependen del grado de ocupación humana de la superficie de la cuenca y de la frecuencia con la cual ocurren las lluvias.

En el estado Zulia los riesgos naturales y antrópicos son frecuentes, lo que justifica las numerosas investigaciones que al respecto se han realizado en diferentes municipios y parroquias de este estado, tales como el informe de Borges (2003) que diagnostica y clasifica los riesgos en alto, medio, bajo, tomando en cuenta su intensidad; y el mapa de riesgos naturales y antrópicos en la isla San Carlos del municipio insular Almirante Padilla del estado Zulia, realizado por Labrador (2013). Este mapa fue desarrollado a través de observaciones de campo, análisis de imágenes satelitales de diferentes fechas y comparación con mapas históricos.

En relación con las inundaciones en el municipio Maracaibo se reportan investigaciones que han realizado un aporte importante en el reconocimiento de los principales factores que condicionan el desarrollo del proceso. Tal es el caso de las investigaciones de Acevedo (2008) y Orozco (2013) en la comunidad de Puerto Caballo. Finol (2013) realiza un mapa de zonas vulnerables a inundaciones en el barrio Nectario Andrades Labarca, de la parroquia Idelfonso Vásquez.

La comunidad Pradera Alta es también afectada por este fenómeno y al igual que toda la ciudad de Maracaibo durante los últimos 25 años ha tenido un crecimiento demográfico gigantesco hacia el noroeste, acompañado de una deficiente planificación del ordenamiento territorial. La construcción de infraestructuras no acordes a las amenazas naturales del entorno, y sin las normas establecidas, implica un riesgo socionatural a una población que no tiene conciencia del peligro y donde se asientan los sectores más frágiles de la sociedad ante los desastres naturales, lo que incrementa la vulnerabilidad a estos fenómenos naturales.

Las tierras de la actual comunidad de Pradera Alta formaban parte de granjas abandonadas por sus dueños, lo que motivó que fueran usadas para la

construcción de viviendas. Sin embargo, aún no han sido consolidados los servicios públicos básicos y solo cuentan con servicio de electricidad.

Por otra parte, aproximadamente desde hace ocho años se ha generado inestabilidad del terreno como consecuencia del desnivel topográfico, la perforación de pozos sépticos, la toma clandestina de agua potable y el sistema de canales de aliviadero de la planta construida por Hidrolago, filial de HIDROVEN (casa matriz de Agua Potable y Saneamiento), en el estado Zulia. A lo anterior se suma el hecho de que muchas viviendas se encuentran por debajo del nivel topográfico de las calles, las que en ocasiones son parte de los cauces de escorrentía superficial, condicionando todo ello que durante el ciclo de invierno (período de precipitaciones) se produzcan inundaciones en el sector, estando la comunidad clasificada por Protección Civil como zona potencial de amenaza y riesgo.

Con el objetivo de evaluar el riesgo por inundación en la comunidad Pradera Alta, sector 2, del municipio Maracaibo, se procedió a diagnosticar las áreas de amenazas y su vulnerabilidad, caracterizando los fenómenos presentes en la zona de estudio, lo que permitiría diseñar los planes de mitigación de riesgos.

La gestión de riesgos comprende un conjunto de acciones destinadas a transformar los escenarios de riesgos, identificando las potenciales amenazas y vulnerabilidades presentes en el ámbito geográfico, proponiendo métodos de prevención y mitigación para reducir dichos riesgos y fortaleciendo estrategias de preparación y respuesta para afrontar de la mejor manera posible los impactos potenciales (Bataglia 2007).

Los resultados de este proceso continuo de manejo o gestión de riesgos incluyen, según Liñayo y Estévez (2000):

- Medidas para disminuir el riesgo de desastres a largo plazo (prevención), eliminando sus causas, como la intensidad de los fenómenos, la exposición o el grado de vulnerabilidad.
- Medidas de preparación, cuyo objetivo es asegurar una respuesta apropiada en caso de necesidad, incluyendo alertas tempranas oportunas y eficaces, así como evacuación temporal de gente y bienes de zonas amenazadas.
- Medidas de respuesta cuando está sucediendo o ha sucedido un desastre (manejo o gestión de desastres, recuperación, reconstrucción).

En la comunidad Pradera Alta, sector 2, los movimientos de materiales inestables constituyen el principal factor de riesgo ya que los suelos son de

tipo areno-limo-arcillosos poco consolidados, que pierden su estabilidad ante la ocurrencia de precipitaciones de gran intensidad. El fenómeno se potencia, generando inundaciones, debido a la intervención antropogénica, como el desvío y relleno de los cauces de ríos, quebradas y canales, así como la remoción de la capa superficial y modificación topográfica.

La investigación tuvo el propósito de identificar las áreas vulnerables al riesgo por inundación en la comunidad Pradera Alta, de la parroquia Francisco Eugenio Bustamante. Para ello cada componente se analiza en forma detallada, determinándose los factores incidentes que son cartografiados en un mapa de riesgo por inundaciones, el cual indica el grado o nivel de peligro, así como su evolución a través del tiempo. En él se puede incluir una propuesta de zonificación territorial, considerándolo para la identificación, tipificación y caracterización de las amenazas presentes en la comunidad.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Se desarrollaron cuatro etapas durante la investigación. La primera inició con los estudios básicos desde la obtención de la información general y de antecedentes en cuanto a la problemática existente. Con la finalidad de conocer las características topográficas y geológico-estructurales del área de influencia, se interpretaron los mapas temáticos existentes de la zona y el plano catastral (planimétrico y altimétrico), a escala 1: 25 000. Ello permitió obtener una visión más amplia sobre las características de los componentes del ecosistema de la localidad.

Una segunda etapa consistió en la exploración de campo, con varias visitas a la jurisdicción, para realizar un censo socioeconómico y un inventario de riesgos naturales, la aplicación de métodos cualitativos para la evaluación y análisis de riesgos que implica el conocimiento preciso de las amenazas, de los elementos en riesgo y de sus vulnerabilidades, basados en la experiencia y observaciones en el sitio de interés, todo esto con la finalidad de delimitar y diagnosticar las zonas afectadas. Al mismo tiempo se evaluó la infraestructura correspondiente al área de estudio con la inspección visual de las construcciones existentes, entrevistas no estructuradas y lista de cotejo, tomas de fotografías y coordenadas geográficas.

En una segunda fase se procedió a la toma de muestras para su análisis de laboratorio, para lo cual se realizaron seis calicatas, según la normativa exigida por la Sociedad de Geotecnista de Venezuela (SGV) y los criterios de calidad establecidos en las normas COVENIN, ASTM y AASHTO. Los resultados de estos ensayos permitieron evaluar las características físicas y mecánicas del suelo. Finalmente se realizó un sondeo geoelectrico (SEV)

con el georresistímetro marca PASI, modelo E2 DIGIT, con la finalidad de detectar la presencia de lentes acuíferas, su profundidad y espesor de los niveles de suelos.

Una tercera y última etapa consistió en el procesamiento, análisis e interpretación de datos obtenidos en la etapa de exploración, delimitándose el área afectada por las inundaciones así como el grado o nivel de amenazas y vulnerabilidad de los diferentes fenómenos identificados y su evolución a través del tiempo.

Para la representación cartografía de los resultados se utilizaron los sistemas Sasplanet versión 13, el Global Mapper, versión 15.2 y el ArGIS, versión 10.1, para las imágenes y los SHP (shapelife) para los mapas.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La aplicación de la metodología antes descrita permitió diagnosticar las áreas de amenazas, la vulnerabilidad y la evaluación del riesgo en la comunidad Pradera Alta, localizada geográficamente en el extremo noroeste del lago Maracaibo del estado Zulia en Venezuela.

Como resultado inicial del diagnóstico se determinó que el fenómeno natural que afecta es de origen hidrológico, como proceso primario, basados en los siguientes criterios:

Geomorfológico: la superficie ocupada por la comunidad se caracteriza por presentar pendientes muy bajas, que a su vez se encuentran ubicadas a lo largo de las líneas de drenaje (Figura 1)



Figura 1. Fotos de áreas planas de la zona de estudio y socavamiento en el sitio.

Los aspectos geomorfológicos destacan áreas de socavamiento o erosión moderada, llanuras de inundaciones, escurrimiento difuso o superficial, surcos, pequeños deslizamientos y áreas anegadizas, todos ellos representados en el esquema geomorfológico (Figura 2).

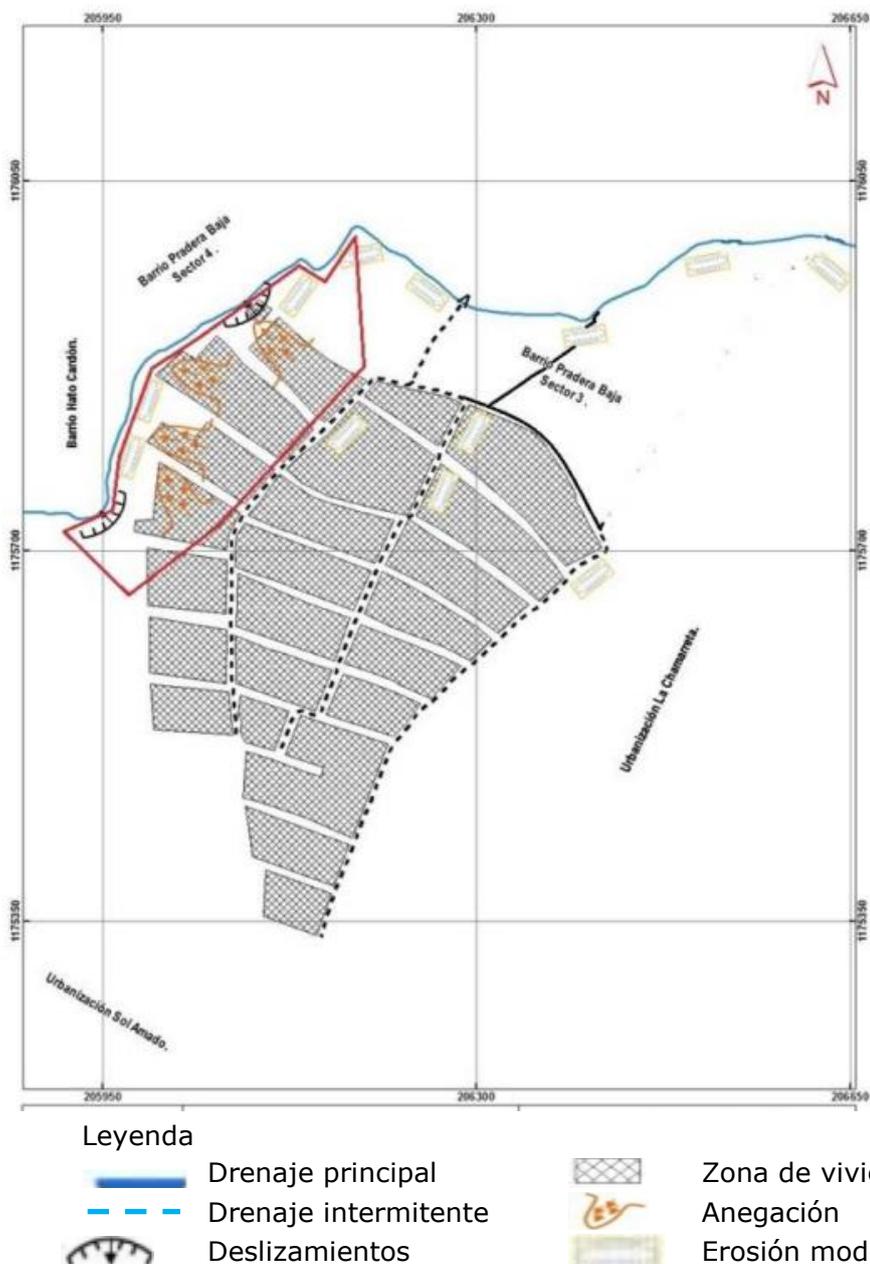


Figura 2. Esquema geomorfológico.

De igual modo, predomina un clima cálido seco, que se caracteriza por ser árido y semiárido, presentando elevadas temperaturas durante todo el año, fuerte evaporación y escasas precipitaciones. La temperatura promedio oscila entre 35 °C y 38 °C; las lluvias varían entre 200 mm y 600 mm anual.

Geológico: los terrenos sobre los cuales se asienta la comunidad están compuestos por depósitos heterogéneos no consolidados, muy erosionables por los flujos torrenciales (Figura 3)



Figura 3. Suelo heterogéneo no consolidado.

Según los resultados obtenidos con el Sondeo Eléctrico Vertical (Tabla 1) la primera capa, que tiene espesor y profundidad de 1,1 m, está constituida de arena con mediana resistividad, indicando que se encuentra seco y sin arcillas. Debajo de esta capa, y con un espesor de 15,9 m, se encuentra una capa completamente arcillosa la cual tiene una resistividad extrema de 1,4 ohm x m. Sigue una tercera capa de alternancia de arenas acuíferas con capas intercaladas de arcilla con un espesor total de 16,4 m y una profundidad de 33,4 m. La cuarta capa está constituida probablemente por una arena bien compactada debido al alto valor de resistividad aparente interpretado (336,9 ohm x m).

Tabla 1. Profundidades del SEV

Sondeo Eléctrico vertical: Pradera Alta							
Medición	AB/2 (m)	MN2 (m)	I (mA)	V (mV)	P.5 (mV)	K	R (Ohm ² m)
1	1,00	0,25	11,5	307,6	0,0	5,8	157,5
2	1,50	0,25	16,5	107,9	0,0	13,7	89,5
3	2,00	0,25	15,1	30,7	0,0	24,7	65,0
4	3,00	0,25	15,0	10,2	0,0	56,1	38,1
5	3,00	0,75	12,9	28,2	0,0	17,6	38,6
6	4,00	0,75	15,9	13,5	0,0	32,3	27,4
7	5,00	0,75	14,9	6,1	0,0	51,1	20,9
8	7,00	0,75	12,3	2,0	0,0	181,4	16,4
9	8,00	0,75	14,4	1,5	0,0	132,8	13,5
10	10,00	0,75	13,9	0,7	0,0	208,2	10,4
11	10,00	2,50	10,7	1,9	0,0	58,9	10,4
12	12,00	2,50	11,3	1,2	0,0	86,5	9,1
13	15,00	2,50	21,6	1,2	0,0	137,4	7,6
14	20,00	2,50	26,1	0,7	0,0	247,4	6,6
15	25,00	2,50	18,6	0,3	0,0	385,7	6,2
16	30,00	2,50	28,0	0,3	0,0	561,5	6,0
17	30,00	7,50	21,0	0,7	0,0	176,7	5,8
18	40,00	7,50	22,0	0,4	0,0	323,3	5,8
19	50,00	7,50	30,0	0,4	0,0	511,8	6,8
20	60,00	7,50	31,9	0,3	0,0	742,2	6,9
21	70,00	7,50	37,7	0,3	0,0	1 014,4	8,0
22	80,00	7,50	102,3	0,7	0,0	1 328,6	9,0
23	100,00	7,50	160,5	0,8	0,0	2 082,6	10,3

Desde el punto de vista geológico, los terrenos estudiados corresponden a la formación El Milagro, la cual tiene lateralmente muchas variaciones litológicas. La capa superficial es fácilmente saturable ya que tiene poco más de un metro de espesor y profundidad, alcanzando esta la capa arcillosa impermeable que no permite su drenaje. Este factor causa inundaciones en áreas topográficamente deprimidas del sector 2 de Pradera Alta durante los periodos de lluvia.

El acuífero que se encuentra debajo de la capa arcillosa no interfiere localmente con la problemática de la comunidad, la cual se ve afectada únicamente por la falta del drenaje superficial y por la topografía donde las comunidades se encuentran ubicadas.

La descarga de fluidos, como por ejemplo las aguas negras en el subsuelo a través de pozos sépticos, ubicados en áreas topográficamente más altas, es razón suficiente para crear una escorrentía internamente en la capa superficial y manifestarse permanentemente en las zonas topográficamente más bajas.

Como solución al problema se puede sugerir la realización de una red de cloacas canalizadas hacia el sector La Chamarreta, con dirección paralela al sistema natural de drenaje superficial que se observa en el territorio (disposición del canal natural), tal como se muestra en la Figura 4.

Sondeo Eléctrico Vertical: Pradera Alta				
Secuencia Electrostratigráfica Interpretada				
Capa n.	Profond. (m)	Espesor (m)	Resistiv. (Ohm*m)	Litotipo Probable
1	1,1	1,1	150,6	Arena superficial
2	17,0	15,9	1,4	Arcilla
3	33,4	16,4	56,7	Alternancia de Arena acuífera con capas de arcilla
4	Indefinida	Indefinido	336,9	Arena bien compactada

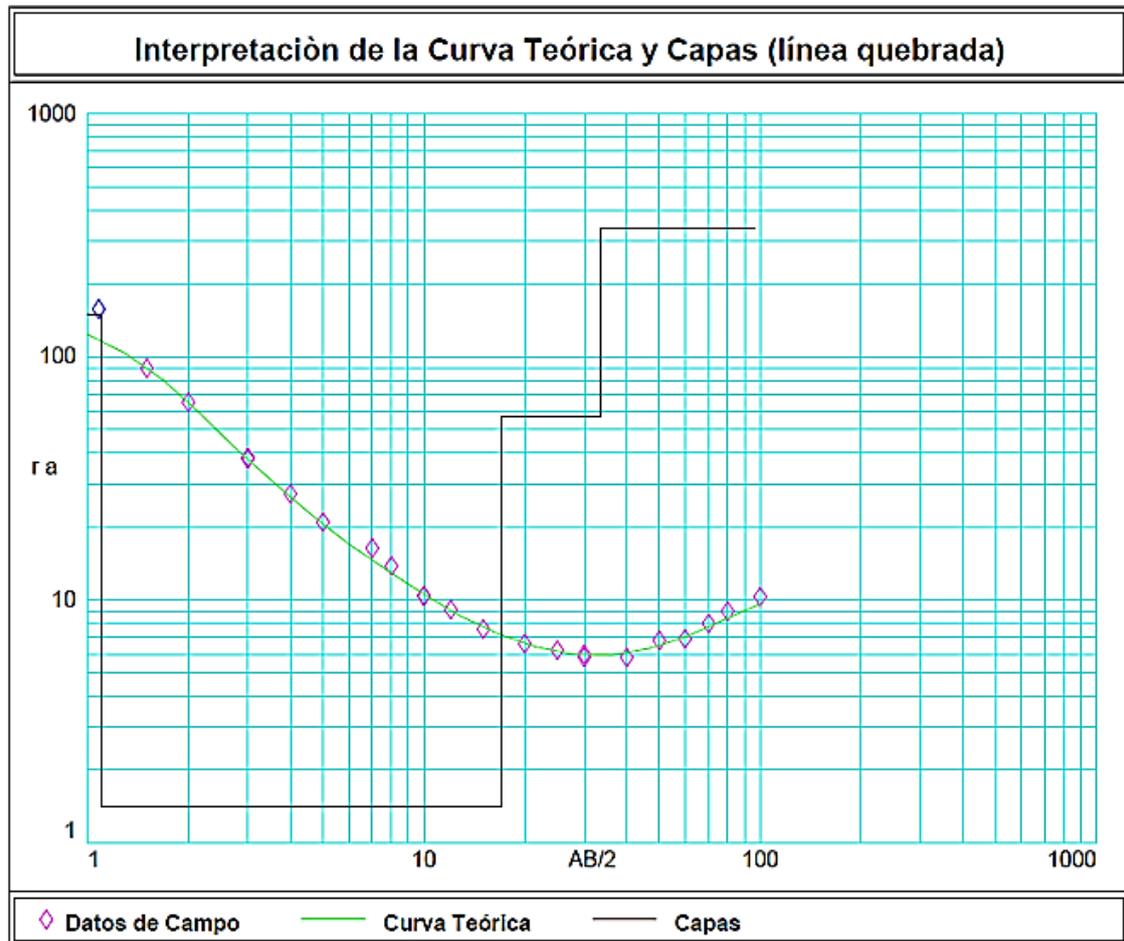


Figura 4. Sondeo e interpretación de la curva y capas. Fuente: Malandrino (2012)

Hidrológico: áreas anegadizas o áreas con suelos reteniendo altos niveles de humedad y cotas de máxima inundación marcadas en algunas viviendas (Figura 5)



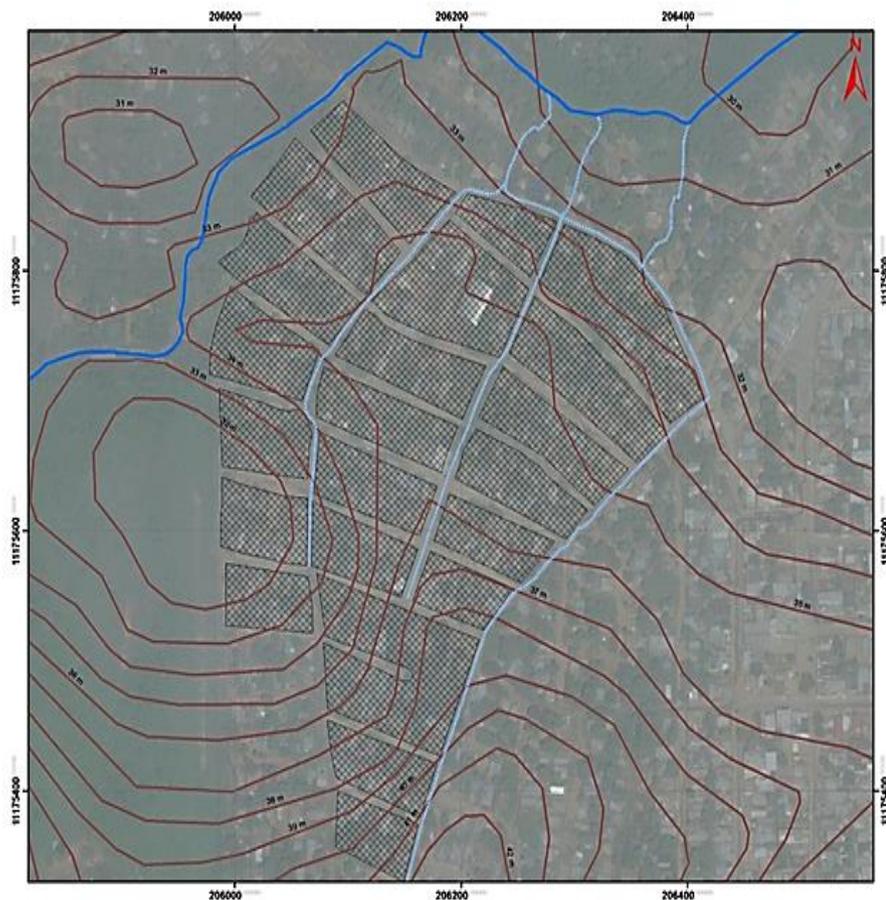
Figura 5. Áreas anegadizas cerca del drenaje principal.

En general, el patrón de drenaje del área de estudio está estrechamente ligado a la estructura del área. La forma de drenaje localizada se caracteriza por ser permanente y de tipo meandriforme, de forma subparalela, con tendencia a ramificarse con otros drenajes intermitentes o hilos de agua que pueden considerarse como drenajes debido a que en periodo de

precipitaciones algunas avenidas o calles son cursos de aguas de escorrentías.

Posee un escurrimiento difuso, ya que el material de las laderas se encuentra mal consolidado, lo que provoca la formación de pequeñas cárcavas y surcos, mientras que en las zonas planas o de menor cota este escurrimiento se concentra, debido a que existen viviendas que obstruyen el paso de las aguas superficiales en las áreas, como se puede observar en la Figura 6.

Los drenajes naturales se ven afectados por la obstrucción, debido a los escombros y basuras que son arrojadas sin control sanitario, creando como resultado áreas anegadizas (áreas con suelos que retienen altos niveles de humedad) y cotas de máxima inundación marcadas en algunas viviendas.



Legenda

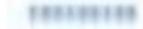
- | | |
|---|---------------------------------|
|  | Drenaje |
|  | Dirección del flujo superficial |
|  | Curvas de nivel |
|  | Zona de viviendas |

Figura 6. Drenajes y curvas de nivel.

Infraestructura: Un aspecto que se tuvo en cuenta fue que en la construcción de algunas viviendas se utilizó material de relleno mal compactado, observándose la alteración y descomposición de los mismos. Igualmente las viviendas están construidas de forma inadecuada e insegura.

Las viviendas se construyeron con láminas de cinc y bloques. Estas edificaciones y la vialidad en el entorno presentan agrietamientos o evidencias de asentamiento o desplazamiento y según la vulnerabilidad asociada a edificaciones se define en función de las características constructivas de cada una y de los daños observados en ellas (Figura 7)



Figura 7. Tipos de vivienda de la comunidad Pradera Alta sector 2.

Definidos los límites y tipología de los fenómenos, así como las áreas con comportamiento crítico, se definieron los niveles de riesgo a inundaciones siguientes:

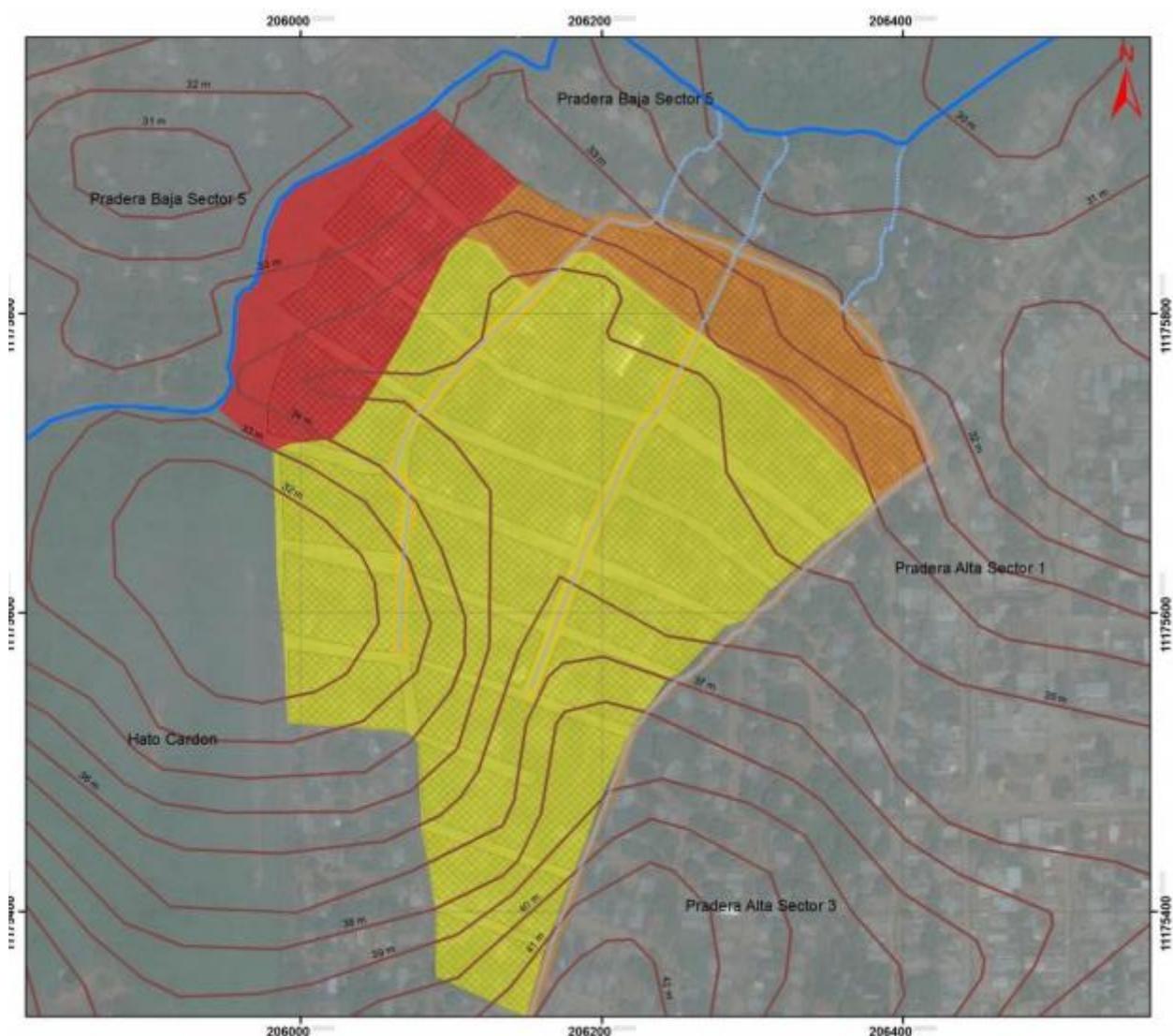
Riesgo bajo: se incluyen aquellos sectores alejados de las márgenes del drenaje, a más de 50 m de distancia del cauce principal y con una diferencia de altura entre 5 m y 10 m con respecto al mismo, donde los procesos hidrológicos influyen con menor afectación e intensidad, siendo débil el peligro para las personas y las viviendas.

La zona de bajo riesgo se encuentra hacia el sureste del sector 2 de la comunidad Pradera Alta, representada con el color amarillo que es una zona denominada de sensibilización, de acuerdo con la Ley Orgánica de Riesgos Socionaturales y Tecnológicos.

Riesgo medio: Áreas con distancias de entre 25 m y 50 m del drenaje, con diferencias altitudinales con respecto al cauce, que varían entre 3 m y 5 m. Las personas están en peligro al exterior de las viviendas, pero no, o casi no, al interior. Las viviendas pueden sufrir daños, pero no destrucción repentina, siempre y cuando su modo de construcción haya sido adaptado a las condiciones del lugar, donde daños severos pueden reducirse con medidas de precaución apropiadas. Esta zona se encuentra ubicada hacia el norte de la comunidad, representada con el color anaranjado, conocida

como zona denominada reglamentación, de acuerdo con la Ley Orgánica de Riesgos Socionaturales y Tecnológicos.

Riesgo alto: Sectores cercanos al drenaje, que presentan restricciones asociadas a sitios críticos de desborde del mismo, y que son zonas de impacto directo, asociadas a distancias menores a 25 m de este, con cotas muy cercanas a las de su cauce (entre 0 y 3 m de diferencia altitudinal). Los eventos se manifiestan con una intensidad relativamente débil, pero con una probabilidad de ocurrencia elevada y las personas, en este caso, están sobre todo amenazadas al exterior de las viviendas. Esta zona se encuentra ubicada hacia el noroeste del área de estudio, representada con el color rojo y es una zona denominada prohibición, de acuerdo con la Ley Orgánica de Riesgos Socionaturales y Tecnológicos. En esta área la construcción de las viviendas no es favorable, ya que están cercanas al drenaje principal y pueden inundarse en periodos de precipitaciones y sequía (Figura 8).



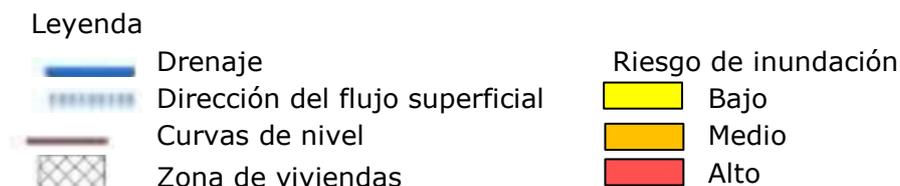


Figura 8. Mapa de riesgo por inundación de la comunidad Pradera Alta sector 2.

4. CONCLUSIONES

- Se identificaron las áreas de amenazas y vulnerabilidad por inundaciones en la comunidad Pradera Alta sector 2, municipio Maracaibo, determinándose que el vertido directo de las aguas residuales sin control alguno tiene una influencia directa sobre el balance del nivel freático, más aún cuando hay suelos permeables y zonas de poca pendiente ($< 5\%$), en donde predominan los procesos verticales de escurrimiento (percolación) sobre los horizontales (drenaje superficial), lo que se incrementa con el periodo de intensas precipitaciones.
- Los principales factores que condicionan el riesgo de inundación en el sector están relacionados con las características del suelo, aspectos hidrológicos, la pendiente del terreno, el socavamiento y erosión, así como los factores antropogénicos, favorecidos por ausencia de ordenamiento territorial.
- En el área ocupada por la comunidad se establecieron tres sectores con diferentes niveles de riesgo, encontrándose en el extremo noroeste de la comunidad el sector más afectado, donde la probabilidad de ocurrencia del fenómeno es elevada y las personas se encuentran en peligro, tanto en el exterior como en el interior de la vivienda.

5. REFERENCIAS

- ACEVEDO, R. 2008: *Zonificación de riesgos naturales y antrópicos del sector Puerto Caballo, de la parroquia Idelfonso Vásquez, municipio Maracaibo, estado Zulia*. Tesis de grado. Instituto Universitario de Tecnología de Maracaibo. 48 p.
- BATAGLIA, M. A. 2007: Vulnerabilidad educativa, política e institucional en comunidades afectadas por las inundaciones de llanuras: aspectos fundamentales para la gestión y la gobernabilidad. Disponible en: <http://hum.unne.edu.ar/revistas/geoweb/Geo10/archivos/vulnedl08.pdf>
- BORGES, R. 2003: Diagnóstico y zonificación de riesgos naturales y antrópicos en la parroquia Coquivacoa (municipio Maracaibo- estado Zulia). Informe. Instituto Universitario de Tecnología de Maracaibo.

- FINOL, R. 2013: Mapa de zonas vulnerables a inundaciones en el barrio Nectario Andrades Labarca, parroquia Idelfonso Vázquez, municipio Maracaibo, estado Zulia. Proyecto Comunitario. Instituto Universitario de Tecnología de Maracaibo. 55 p.
- LABRADOR, E. 2013: *Mapa de riesgos naturales y antrópicos en la isla San Carlos del municipio insular Almirante Padilla del estado Zulia*. Trabajo Especial de Grado. Instituto Universitario de Tecnología de Maracaibo. 69 p.
- LEOPOLD, L. B.; WOLMAN, M. G. & MILLER, J. P. 2012: *Fluvial processes in geomorphology*. Courier Corporation.
- LIÑAYO, A. & ESTÉVEZ, R. 2000: Algunas consideraciones para la formulación de una política nacional en materia de gestión de riesgos y desastres. Ministerio de Ciencia y Tecnología-Programa de Gestión de Riesgos y Reducción de Desastres. Caracas.
- OROZCO, L. 2013: *Elaboración de un mapa de riesgos socionaturales en la comunidad Playa Miami, sector Puerto Caballo, municipio Maracaibo, parroquia Idelfonso Vázquez, estado Zulia*. Instituto Universitario de Tecnología de Maracaibo. 38 p.

Lizetty Díaz-Borrego, lizettyjdiazb@hotmail.com

Licenciada en Educación Mención Geografía, Profesora Asistente,
Instituto Universitario de Tecnología de Maracaibo, Venezuela.

Alina Rodríguez-Infante, rinfante@ismm.edu.cu

Dra. Ciencias Técnicas. Profesora Auxiliar
Departamento de Geología. Instituto Superior Minero Metalúrgico
Moa, Holguín, Cuba

Integración del análisis geomorfológico con métodos geofísicos para la exploración de hidrocarburos en el sector Majaguillar-Corralillo, Cuba

María Victoria Pérez-Peña
Ramón Cruz-Toledo
José Luis Prol-Betancourt
Lourdes Jiménez-de la Fuente

Resumen

Con el objetivo de delimitar áreas perspectivas para la exploración petrolera se realizó un análisis geomorfológico detallado. Para ello se confeccionó un esquema que integra los resultados geológicos, geomorfológicos y geofísicos. Se proponen de este modo dos áreas geomorfológicas (I y II) estructuralmente levantadas, favorables para orientar la exploración y se sugiere el área I como la más perspectiva por estar presentes en ella rocas del margen continental en profundidad, las cuales poseen el mayor potencial petrolero de Cuba.

Palabras clave: geomorfología; geofísica; exploración de petróleo; gravimetría; magnetometría.

Geomorphological Analyses Integrating Geophysical Methods for Hydrocarbon Exploration in the Majaguillar-Corralillo Sector, Cuba

Abstract

A more detailed geomorphological study compared to the previous ones was carried out in order to demarcate the potential areas for petroleum exploration. A diagram that integrates geological, geomorphological and geophysical results was prepared. Two structurally surveyed morphological areas (I and II) are proposed to address exploration. Area I is recommended to be the one with a higher probability given the presence of rocks of the continental margin at depth, which are the most potential location of petroleum occurrence in Cuba.

Keywords: petroleum exploration; geomorphology; geophysics; gravimetry; magnetometry.

1. INTRODUCCIÓN

El sector Majaguillar-Corralillo se encuentra ubicado entre las provincias de Matanzas y de Villa Clara (Figura 1), en la región petrolera norte cubana. Este trabajo surge a partir de la necesidad de realizar un análisis geomorfológico con un grado mayor de detalle que los existentes hasta el momento, con el objetivo de delimitar áreas perspectivas para la exploración de petróleo.

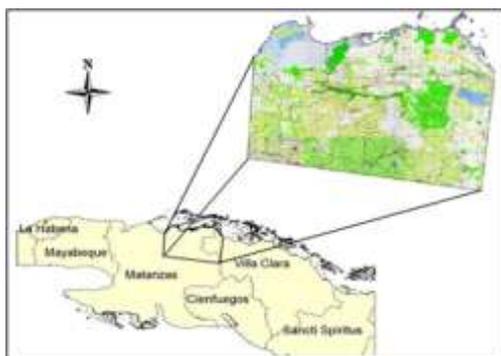


Figura 1. Mapa de ubicación del sector Majaguillar-Corralillo.

De los trabajos ejecutados en esta zona debe destacarse como uno de los más abarcadores el proyecto 2132 "Evaluación de Lead para los bloques 6, 7, 9 y 10", liderado por Álvarez, Aballí & Cruz (1998). En este se materializa la aplicación de métodos geomorfológicos a la búsqueda de petróleo, en una escala 1:250 000 y cubrió prácticamente todo el territorio nacional.

Entre los principales aportes de este proyecto se encuentra la determinación de dos direcciones fundamentales, una noroeste-sureste durante la etapa orogénica y debida a la formación de los plegamientos que formaron las trampas actuales y otra noreste-suroeste, que se asocia al postorogénico y que debe estar relacionada a las vías de migración.

En el informe de López y otros investigadores (2009) se integran datos, informaciones y criterios sobre el potencial exploratorio, mediante los que se determinan los sectores de mayor interés exploratorio, con posibilidades de encontrar yacimientos del *play*, tipo Veloz, a profundidades y condiciones asequibles, así como para la discriminación de algunos sectores donde las rocas del arco volcánico del Cretácico y las ofiolitas tienen grandes espesores.

Aunque la mayoría de las campañas exploratorias en esta zona no han tenido resultados positivos y en los pozos perforados no se han registrado grandes producciones de petróleo, los estudios integrales han mostrado posibilidades de encontrar acumulaciones comerciales asociadas a las rocas

del margen continental y rocas más jóvenes (margas bituminosas). Así los resultados de la aplicación de los métodos geomorfológicos son importantes en la determinación de estructuras levantadas, donde la neotectónica ha jugado un papel fundamental.

Según resultados de las perforaciones se conocen mantos tectónicos caracterizados por la conjugación de rocas de las Unidades Tectonoestratigráficas (UTE) Placetas y Camajuaní, con sus correspondientes sedimentos sinorogénicos, donde pudieran encontrarse acumulaciones de hidrocarburos. Así mismo las rocas de la corteza oceánica ocupan intervalos considerables en mantos de sobrecorrimientos sobre diferentes secuencias estratigráficas, a las cuales se asocia el yacimiento Motembo (García, Linares & Toirac 2009).

En esta área se encuentran numerosas manifestaciones superficiales y de rocas asfálticas en el municipio de Martí, antiguo Hato Nuevo y Guamutas, destacándose las zonas de Angelita, Santa Gertrudis y El Peñón (Linares *et al.* 2011). Se ha demostrado la presencia de yacimientos, minas de asfaltitas y numerosas manifestaciones de petróleo y gas en pozos y superficie.

La presencia de sistemas petroleros activos es un elemento muy importante para la exploración, de ahí que haya sido un incentivo a múltiples estudios geólogo-geofísicos.

Se han realizado hasta el momento variados trabajos de investigación geomorfológica, como método orientativo de búsqueda, sin lograr exponer la relación que guardan con los métodos geofísicos (campos potenciales) para la definición en conjunto de rasgos estructurales.

En este trabajo se proponen las áreas con mayores perspectivas, desde el punto de vista geomorfológico, integrado a los métodos geofísicos (campos potenciales); y de esa manera se delimitan los sectores donde la prospección sísmica tendrá mayores posibilidades de iluminar estructuras en el margen continental plegado.

1.1. Consideraciones geológicas y geoquímicas del bloque 9

En Cuba las rocas del paleomargen continental forman parte del cinturón plegado y sobrecorrido cubano. Este aspecto le concede al área una gran complejidad, que se manifiesta en los cabalgamientos de enormes mantos de rocas ígneas sobre sedimentos de diversa naturaleza, en un medio geológico caracterizado por la presencia de contactos tectónicos abruptos, rampas de despegue, fallas de desplazamiento por el rumbo, que son la

evidencia de un régimen compresivo acaecido entre el Cretácico Superior al Eoceno Medio.

Atendiendo a la clasificación de los petróleos en Cuba, propuesta por López y demás colaboradores (2009), las rocas madres y sus respectivos petróleos en el bloque 9 se agrupan dentro de las familias I y III. Las manifestaciones de Angelita y Santa Gertrudis se clasifican dentro de la familia tipo I. En este sentido y siguiendo el principio de similitud con otras áreas petroleras en Cuba, donde se conoce el gran potencial generador de las rocas madre respectivas, es posible emitir criterios en cuanto a volúmenes de hidrocarburos generados, de ahí las grandes posibilidades de encontrar acumulaciones significativas de petróleo pesado en esta área. La manifestación San Miguel de Los Baños está caracterizada como petróleos de la familia III, cuya roca madre se espera haya sido la formación Carmita, con un elevado contenido terrígeno-arcilloso.

En el área correspondiente al bloque 9 se conocen varias manifestaciones de hidrocarburos superficiales y en pozos (Linares *et al.* 2011); este aspecto es de gran utilidad ya que confirma la presencia de sistemas petroleros y disminuye el riesgo exploratorio. Por estudios geoquímicos realizados a las manifestaciones de hidrocarburos es conocida la presencia de al menos tres sistemas petroleros: sistema Grupo Veloz-Grupo Veloz (!), asociado a la familia I de crudos cubanos y a la UTE Placetas, el cual constituye el principal sistema petrolero en Cuba. Sistema Carmita-Ofiolitas (!), asociado a la familia III de crudos cubanos y a la UTE Placetas; este sistema petrolero se caracteriza por una mayor calidad de sus petróleos y el sistema Jaguita-Margarita (!), asociado a la familia I de crudos cubanos y a la UTE Camajuaní.

Por los datos de los pozos perforados en el área se tiene evidencias de pequeñas producciones, aunque ninguno ha llegado a un volumen como para ser considerado yacimiento. Estos aspectos nos permiten asegurar que ha existido generación y migración de hidrocarburos, siendo la preservación de las acumulaciones en el tiempo, conjuntamente con la presencia de un sello eficaz, los aspectos de mayor riesgo exploratorio (Pérez *et al.* 2013)

2. MATERIALES Y MÉTODOS

En este trabajo se utilizó el mapa geológico de generalización petrolera (1:100 000) elaborado en el CEINPET, la información hipsométrica extraída del Modelo Digital de Elevación y las cartas topográficas (1:50 000). Se densificó la red de drenaje a partir de las cartas topográficas para la interpretación geomorfológica cualitativa y, además, se tuvieron en cuenta criterios de potencialidad y elementos del sistema petrolero del área. A

partir de los resultados obtenidos de la interpretación geológica-geomorfológica se utilizaron datos de los campos potenciales de forma cualitativa.

Se aplicaron también el método cualitativo del drenaje, método de disección vertical y el método de las morfoisohipsas.

Desde el método cualitativo del drenaje se densificaron los sistemas fluviales con la información de las cartas topográficas a escala 1:50 000. Este es el método aplicable por excelencia para la interpretación geomorfológica estructural (Cruz 2008). Se basa en la relación existente entre la red de drenaje, la estructura geológica y los tipos de litología, por lo que a partir de su interpretación se delimitaron áreas y lineamientos que constituyeron las principales direcciones estructurales propuestas (Lamadrid & Horta 1979).

El método de disección vertical ofrece información sobre los procesos de la neotectónica por la intensidad de los movimientos reflejados en el desmembramiento del relieve, relacionado con los movimientos principales de las fallas en las direcciones noreste y noroeste.

El método de las morfoisohipsas se basa en una reconstrucción palinspática del relieve mediante el análisis de las curvas de nivel y despreciando el factor erosivo. A partir del relieve actual se realizaron dos generalizaciones que constituyeron la base del análisis, donde las zonas de fuertes pendientes y las inflexiones en el sentido del aumento del valor se relacionaron con zonas de fallas y límites de bloques, por el contrario, las inflexiones en el sentido opuesto se relacionaron con estructuras positivas y las curvas cerradas con bloques de la corteza terrestre (Lamadrid & Horta 1979).

Los métodos de disección vertical y morfoisohipsas tuvieron la finalidad de proporcionar una idea clara y confiable de la interpretación en la evolución y las características actuales del relieve del área, en estrecha relación con el estilo tectónico propuesto.

Para cada método aplicado se delimitaron áreas que se relacionan con diferentes comportamientos de los índices interpretados y que se corresponden con las determinadas por el método cualitativo del drenaje, constituyendo la base para la construcción del esquema morfoestructural.

Finalmente, se confeccionó un esquema integrado, donde se combinaron los resultados geológicos, geomorfológicos y geofísicos, mediante el cual se delimitaron las áreas perspectivas para la búsqueda de hidrocarburos dentro del sector.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Sistemas de drenaje fluvial en el sector Majaguillar-Corralillo

A partir de la interpretación de los sistemas de drenaje (Figura 2), teniendo en cuenta los tipos de drenaje, configuración, direcciones, lineamientos, divisoria de las aguas y asimetría de las cuencas fluviales, se dividió el sector en cinco áreas.

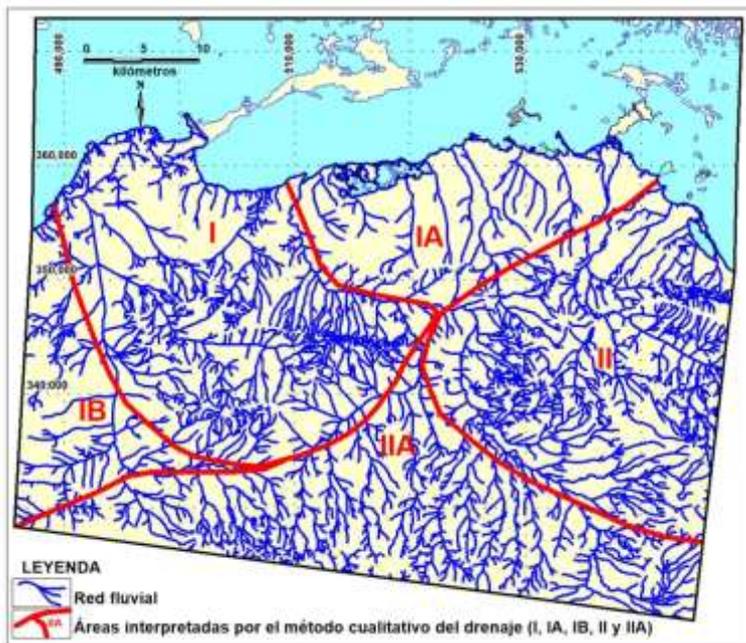


Figura 2. Mapa de drenaje, interpretado a partir de la información de la red de hidrográfica en escala 1:50 000. Muestra las áreas determinadas con diferentes configuraciones de drenaje.

Para la identificación de los lineamientos se consideraron los cambios de rumbo del drenaje, tramos rectos y divisorias de las aguas, aspectos que pudieran estar asociados con contactos geológicos; fracturas y fallas relacionadas a las posibles vías de migración y trampas estructurales. Además, se reconocieron estructuras circulares y semicirculares, que constituyen patrones geomorfológicos para determinar las áreas con mayores perspectivas exploratorias.

Sobre la base de la interpretación de la red de drenaje se elaboró un esquema de lineamientos (Figura 3), en el que se representa un lineamiento principal noreste-suroeste, considerado como una posible zona de falla con desplazamiento sinistral. Este está relacionado directamente con los sistemas alineados de drenaje, donde se conjugan los ríos principales, afluentes, cambios de rumbos y cambios de órdenes de los ríos; y divide el sector en dos regiones fundamentales: septentrional (I, IA y IB) y meridional (II y IIA).

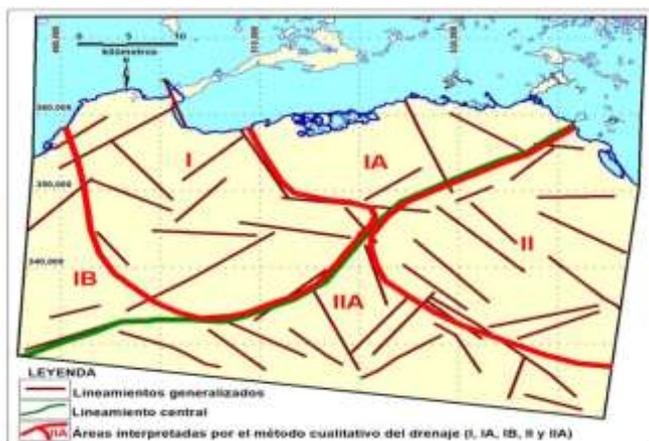


Figura 3. Mapa de lineamientos interpretado a partir de la información de la red de drenaje en una escala 1:50 000. Muestra las distintas áreas del drenaje (I, IA, IB, II y IIA).

Hacia la parte septentrional (IB, I, IA) se ven representados las dos direcciones principales para Cuba, pero la mayor expresión se ubica dentro del área I. Aquí confluyen las direcciones NE-SW y NW-SE, con una mayor densidad de lineamientos referidos a estas direcciones, que responden a las posibles vías de migración y trampas; por lo que constituyen el área más favorable desde el punto de vista estructural.

En la parte meridional (IIA y II) se observa una mayor densidad de lineamientos y se ven representadas las mismas direcciones estructurales del sector septentrional, pero con una mejor expresión de las direcciones relacionadas con las posibles trampas NW-SE. Estas están ubicadas principalmente dentro del área II, por lo que indican que estructuralmente es más favorable como una continuidad del área I, en el sector septentrional.

3.2. Disección vertical

Con el método de disección vertical se pudieron diferenciar las áreas que presentan mayores gradientes de disección del relieve, para analizar las zonas donde la neotectónica ha tenido una mayor influencia. A partir de la interpretación de estos datos fue posible determinar áreas con diferentes grados de desmembramiento del relieve, que se corresponden en gran medida con las interpretadas mediante el método cualitativo del drenaje (Figura 4).

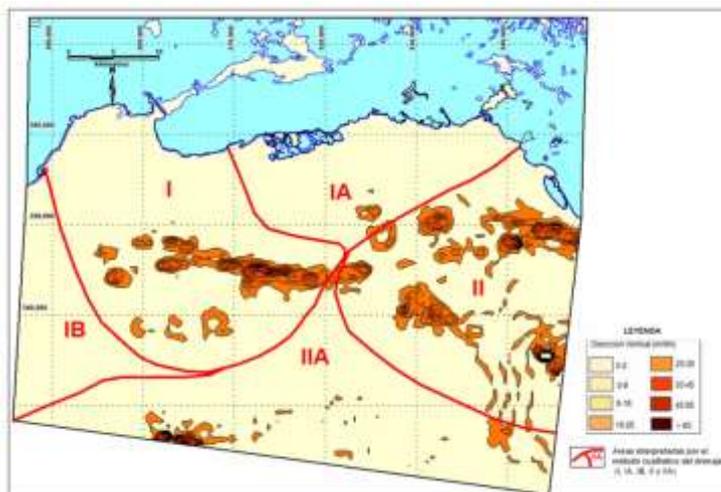


Figura 4. Mapa que muestra las áreas determinadas mediante el método cualitativo del drenaje (I, IA, IB, II y IIA) y su coincidencia con las aportadas por el método de disección vertical a escala 1:50 000.

Área IA: Los valores de disección son bajos, asociados a un bajo desmembramiento del relieve. De forma general, los valores más bajos de disección se encuentran cercanos a la línea de costa, no sobrepasando los 5 m/km² y el gradiente de la disección es muy suave; aunque hacia una parte pequeña del área estos valores alcanzan los 25 m/km².

Área IB: No se observan valores de disección, ya que es un área que presenta un grado de disección muy bajo y el desmembramiento del relieve es de menor intensidad.

Áreas I y II: Ubicadas en el sector central del área septentrional (I) y la parte más oriental del área meridional (II), respectivamente, predominan los valores que alcanzan más de 50 m/km². Así se comporta diferente del resto de la región y se puede decir que el comportamiento del resto del territorio es más homogéneo con respecto a esta zona.

El salto en los valores de disección se puede asociar a escalones geomorfológicos, posiblemente producido por fallas. El gradiente de la disección se hace más abrupto en esta zona, con respecto al resto de la región y el desmembramiento del relieve es muy fuerte. Todas estas condiciones indican que se comportó como un área de levantamiento, donde la dirección predominante es la noroeste-sureste, relacionada posiblemente con fracturas o zona de fallas.

Las características de la disección vertical en estos sectores nos indican que la influencia de la neotectónica ha sido más intensa con respecto al resto de los sectores. Es de destacar que existe una diferencia notable hacia el

área I, con respecto a la inestabilidad tectónica, ya que al norte, en el área Majaguillar, se comporta como una zona muy tranquila.

Área IIA: No se observan valores de disección. Es un área que presenta un grado de disección muy bajo y el desmembramiento del relieve es de menor intensidad. No obstante hacia la parte sureste del área estos son más elevados, de hasta más de 35 m/km². El aumento relativo de estas características morfométricas indican una mayor inestabilidad tectónica.

3.3. Morfoisohipsas

La evolución morfotectónica del relieve de la región se representa en la Figura 5. Para la interpretación tectónica de las morfoisohipsas se realizaron dos generalizaciones a partir del relieve actual. Se analizaron con mayor profundidad la primera y la quinta generalización del relieve, ya que en estas dos es donde se observan los mayores cambios en la evolución del área; resaltando en la quinta generalización una estructura cerrada de gran importancia desde el punto de vista exploratorio.

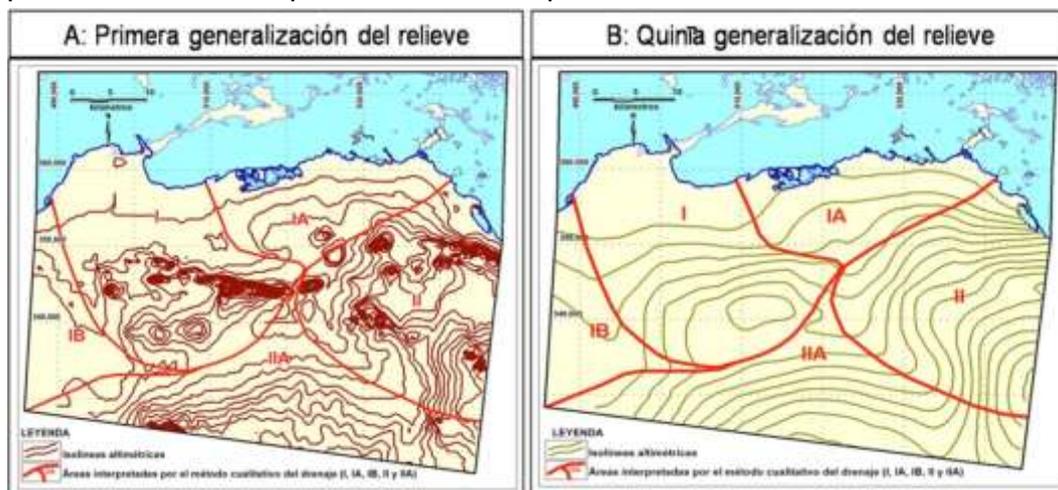


Figura 5. Mapas que muestran las morfoisohipsas combinadas con las áreas geomorfológicas a escala 1:50 000. A: Primera generalización del relieve. B: Quinta generalización del relieve.

Primera generalización del relieve (Figura 5A)

Área I: En general, comienza a destacarse la evolución de las estructuras primarias, mostrando la gran inestabilidad tectónica y direcciones principales de gradientes y lineamientos. Se observan diferentes desplazamientos y una orientación fundamental noroeste-sureste, combinada con la noreste-suroeste, determinándose la principal división geomorfológica norte-sur. Se manifiestan diferencias muy marcadas con respecto al área de Majaguillar, donde no se observa ningún gradiente importante, por las características de las llanuras y de las rocas del

postorogénico que hacen del área una disección vertical muy baja y solo los sistemas de drenajes indican diferentes elementos estructurales.

Área IA: En este sector se definen direcciones estructurales con un gradiente homogéneo, de forma escalonada hacia el sur, donde se identifican los mayores valores altimétricos.

Área IB: En este sector no es representativo para la determinación de las estructuras, de alguna manera tiene que ver con una zona muy tranquila, con poca densificación del drenaje.

Quinta generalización del relieve (Figura 5B)

La quinta generalización permite estimar el paleorelieve de un área específicamente. En Cuba es conocido que el *timing* (o la relación temporal existente entre la formación de las trampas y los procesos de migración y entrapamiento de los hidrocarburos) es favorable. Es decir, que primero ocurrió la formación de las trampas y posteriormente la migración y entrapamiento del petróleo.

Los procesos tectónicos, que dieron origen al cinturón plegado y sobrecorrido cubano, fueron los mismos que provocaron la formación de estructuras levantadas en el subsuelo de las rocas del margen continental. Por ello es posible suponer, a partir de la interpretación de dicha generalización, que la estructura geomorfológica ubicada dentro del área I está asociada a un levantamiento en el subsuelo de escamas de las rocas del margen continental. Es posible ubicar este paleorrelieve en un momento posterior a la formación de las trampas, ya que anteriormente no debieron existir estructuras levantadas donde se pudieran entrapar los hidrocarburos.

Área II: Se muestra la mayor inestabilidad tectónica, representándose fundamentalmente la dirección noroeste-sureste, combinada con la noreste-suroeste, comparable al área I.

Área IIA: Ocupa el borde más occidental de la región meridional, que se corresponde con cierta regularidad a levantamientos hacia el sur, sin significativos gradientes, que son prácticamente homogéneas, muy similar al área IA, pero con valores mayores de altimetría.

En el esquema de las generalizaciones de las morfoisohipsas, dentro del área I se diferencia Majaguillar al norte, representada por una zona muy baja. El resto del área al sur, donde se observa un levantamiento geomorfológico, que indica un abombamiento antiguo con una influencia en las estructuras jóvenes postorogénicas, provocadas por fenómenos y

procesos tectónicos recientes, rediseñando las estructuras preexistentes y reactivando antiguas vías de migración.

3.4. Comparación con los campos potenciales

Teniendo en cuenta la información de los campos potenciales (gravimetría y magnetometría) y su relación con la litología y estructura se pudieron determinar las zonas más favorables para la exploración petrolera, las cuales se corresponden con la presencia del aumento del espesor de los sedimentos del margen continental por debajo de las rocas de la Asociación Ofiolítica.

Gravimetría

El área geomorfológica I se encuentra dentro de una zona de mínimos gravimétricos regionales, que se corresponde con el mínimo norte cubano. Es conocido por trabajos exploratorios realizados que esta zona de mínimos se relaciona con el aumento de espesor de los sedimentos del margen continental (Prol, Riffa & Guerra 2009).

El área geomorfológica II se corresponde con el máximo Motembo, el cual constituye un máximo gravimétrico regional muy fuerte. Esta característica se corresponde con los grandes espesores de rocas ultrabásicas, que han sido reportados en el pozo Motembo 1X. De encontrarse la secuencia del margen continental, debajo de este gran cuerpo serpentinitico, estaría a profundidades mayores de 7 km, según se ha estimado por modelación (Prol, Riffa & Guerra 2009). Bordeando este máximo gravimétrico Motembo, hacia el norte y el noreste, se encuentra una zona de mínimo, posiblemente asociada a la presencia de las rocas del margen continental.

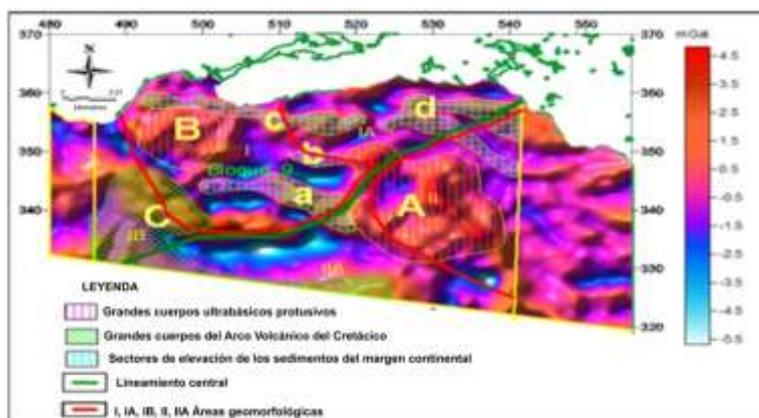


Figura 6. Mapa residual del campo gravitacional en relieve sombreado con las áreas geomorfológicas a escala 1:50 000 (modificado de Prol, Riffa & Guerra 2009).

A partir del mapa de anomalías residuales es posible determinar pequeños máximos locales débiles, los cuales se asocian con elevaciones de margen continental, bajo los sedimentos más jóvenes e, incluso, bajo las rocas de la Asociación Ofiolítica (Prol, Riffa & Guerra 2009), resultando las zonas más atractivas para direccionar la exploración de hidrocarburos (Figura 6).

Magnetometría

Como se observa en la Figura 7 el área geomorfológica I se relaciona con un mínimo magnético regional hacia la parte noreste del sector, lo cual se comporta de igual manera con la gravimetría, por lo que se reafirma la posibilidad de encontrar las rocas del margen continental. Mientras que el área geomorfológica II se corresponde con un máximo magnético, el cual está asociado con un gran cuerpo de rocas ultramáficas serpentinizadas, Motembo; y hacia la parte sureste, aparece una zona de mínimo, la que está relacionada a la posible presencia de los carbonatos en profundidad. Por esta razón, dentro del área II, este pequeño sector constituye la parte más favorable para orientar la exploración.

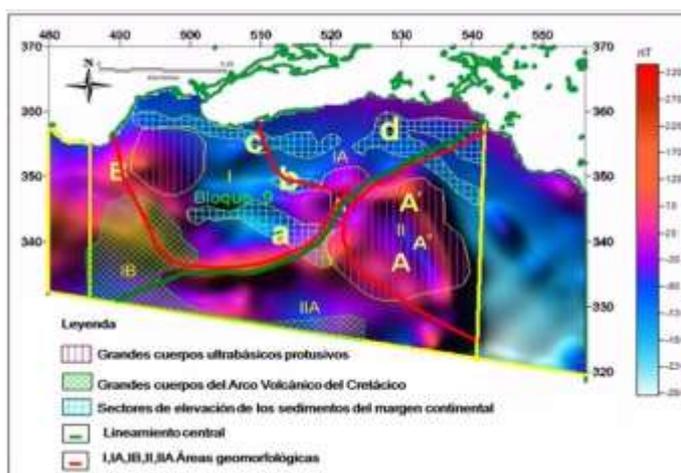


Figura 7. Mapa del campo magnético delta T reducido al polo en relieve sombreado con las áreas geomorfológicas (modificado de Prol, Riffa & Guerra 2009) a escala 1:50 000.

3.5. Interpretación de los datos geólogo-geomorfológicos y geofísicos

A partir del análisis integrado de los datos precedentes, en conjunto con las nuevas evidencias geomorfológicas, estructurales, así como los datos geofísicos (campos potenciales), fue posible determinar las dos áreas principales: I y II, para direccionar los trabajos exploratorios futuros (Figuras 6 y 7).

Teniendo en cuenta las evidencias obtenidas en el campo y en los mapas de drenaje y de morfoisohipsas fue posible establecer el lineamiento principal

como posible falla sinistral, la cual ha provocado estructuras levantadas en el relieve y posteriormente su desplazamiento.

Este aspecto es de gran importancia para la exploración petrolera en el área, debido a que estos movimientos pudieran ser la causa de las grandes dismigraciones que existen hoy en día en rocas de la formación Peñón, de edad Eoceno Medio parte alta.

Los mapas de la quinta generalización de las morfoisohipsas muestran un gran levantamiento en el terreno en la parte central del área I, coincidiendo con una zona de mínimos gravimétricos y magnéticos, lo cual puede asociarse a la presencia de rocas del margen continental en el subsuelo. En esta parte del área es posible tener una mejor preservación de las acumulaciones, debido a que no existen evidencias de dismigraciones ni afectaciones tectónicas significativas.

Como ha sido comprobado en otras áreas donde existen grandes dismigraciones superficiales de hidrocarburos se encuentran también acumulaciones significativas en el subsuelo, aspecto que le confiere grandes perspectivas para encontrar acumulaciones comerciales. En este sentido, teniendo en consideración varios criterios exploratorios, se plantea que el área con mayor potencialidad para la existencia de acumulaciones de hidrocarburos es hacia la parte central y meridional, ubicada dentro del área geomorfológica I.

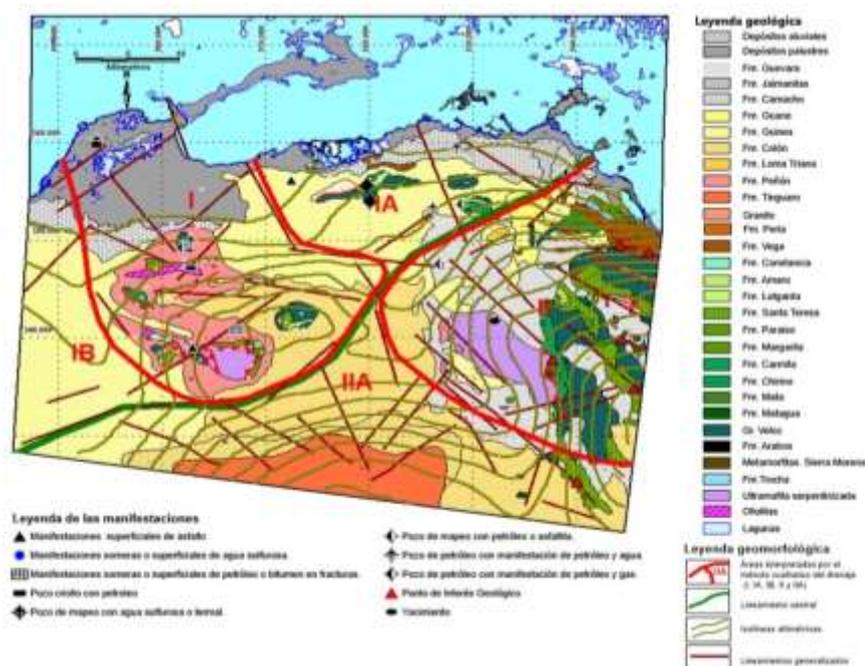


Figura 8. Mapa de integración que muestra la relación entre los datos geológicos y los resultados de los métodos geomorfológicos a escala 1:50 000.

A partir de la combinación de los mapas geológico y geomorfológicos con la geofísica (campos potenciales) se pudo determinar que la división geomorfológica en las cinco áreas (I, IA, IB, II, IIA) tiene una relación directa con la gravimetría, ya que en el mapa residual del campo gravitacional (Prol, Riffa & Guerra 2009) los sectores donde se espera se encuentren los sedimentos del margen continental se ubican en gran medida en el área I y IA. Se destaca hacia la parte meridional del área I esta elevación de los sedimentos mencionados en una división noroeste-sureste, relacionado con la dirección tectónica de los frentes de cabalgamientos señalados por la geología. Se señala, además, la relación directa con las estructuras cerradas detectadas por la quinta generalización de las morfoisohipsas, lo que condiciona un área muy favorable por la coincidencia de indicadores petroleros asociados a manifestaciones en superficie y lineamientos en la dirección noreste, que pueden ser los responsables de la migración de los hidrocarburos y la formación de depósitos a poca profundidad.

4. CONCLUSIONES

- Se corroboran las principales direcciones de lineamientos: (a) noroeste-sureste, asociada a los frentes de cabalgamientos y posibles trampas estructurales, y (b) noreste-suroeste, vinculadas a posibles vías de migración.
- Se evidencia la evolución del relieve, a partir de las cinco generalizaciones de las morfoisohipsas, mostrando una estructura levantada hacia la parte central del sector.
- Se proponen dos áreas geomorfológicas (I y II) estructuralmente levantadas, favorables para la orientar la exploración petrolera.
- Con la integración de los criterios geológicos-geomorfológicos y la relación con la Geofísica se propone el área I como la más perspectiva para la búsqueda de petróleo y gas.

5. REFERENCIAS

- ÁLVAREZ, J.; ABALLÍ, P. & CRUZ, R. 1998: Evaluación de Lead para los bloques 6, 7, 9 y 10. Archivo Técnico CEINPET, La Habana, Cuba.
- CRUZ, R. 2008: *Efectividad de los métodos geomorfológicos en la búsqueda de petróleo y gas desde la región de Bijabos hasta Pina*. Tesis de maestría. Universidad de Pinar del Río. 83 p.
- GARCÍA, D.; LINARES, E. & TOIRAC, R. 2009: Informe del trabajo de Campo en el Bloque 9, Proyecto 6004. Exploración en la Franja Norte de Crudos Pesados. Archivo Técnico CEINPET. La Habana, Cuba.

- LAMADRID, J. & HORTA, R. 1979: *Geomorfología*. Pueblo y Educación, La Habana, 166 p.
- LINARES, E.; GARCÍA, D.; DELGADO, O.; LÓPEZ, G. & STRAZHEVICH, V. 2011: *Yacimientos y manifestaciones de hidrocarburos de la República de Cuba*. Editorial Palcogra, La Habana, 488 p.
- LÓPEZ, J. G.; GARCÍA, D.; GARCÍA R.; DELGADO, O.; DOMÍNGUEZ, Z.; PASCUAL, O.; SOCORRO, R.; PROL, J. L.; RODRÍGUEZ, O.; GARCÍA, N.; OTERO, R. & RODRÍGUEZ, R. 2009: Generalización Geólogo-Petrolera del bloque 9 y su entorno. Archivo Técnico CEINPET, La Habana, Cuba.
- PÉREZ, Y.; CRUZ, R.; JIMÉNEZ, L.; PÉREZ, M. V.; VALDIVIA, C.; MARTÍNEZ, E. & RODRÍGUEZ, O. 2013: Informe anual de avances en los criterios exploratorios en el año 2013. Proyección puntualizada del plan de exploración del año 2014. Archivo Técnico CEINPET. La Habana, Cuba.
- PROL, J. L.; RIFFA, M. & GUERRA, V. 2009: Grado de estudio y resultados alcanzados por la interpretación de los campos potenciales a partir de la década de los 70 en el bloque 9, Archivo Técnico CEINPET, La Habana, Cuba.

María Victoria Pérez-Peña. mvictoria@ceinpet.cupet.cu

Licenciada en Geografía. Especialista III. Centro de Investigaciones del Petróleo
La Habana, Cuba.

Ramón Cruz-Toledo. cruzt@ceinpet.cupet.cu

Máster en Ciencias Geológicas. Investigador Agregado. Centro de Investigaciones del Petróleo
La Habana, Cuba.

José Luís Prol-Betancourt. prol@di.cupet.cu

Doctor en Ciencias Técnicas. Investigador Auxiliar. Centro de Investigaciones del Petróleo
La Habana, Cuba.

Lourdes Jiménez-de la Fuente. lourdes@ceinpet.cupet.cu

Licenciada en Geografía. Especialista III. Centro de Investigaciones del Petróleo
La Habana, Cuba.

Esquematación morfotectónica del sector Guamá, Santiago de Cuba

Sandra Rosabal-Domínguez
Alina Rodríguez-Infante
José A. Zapata-Balanqué

Resumen

Con fines de prevención de desastres se clasificó el relieve y se evaluó el carácter activo de las fallas en el sector Guamá. El esquema morfotectónico a escala 1:25 000, obtenido a través de la aplicación de métodos morfométricos, incluye la caracterización de los bloques morfotectónicos y los posibles fenómenos inducidos por la actividad sísmica de moderada a intensa; elementos no considerados hasta ahora. Se concluye que en el sector Guamá existen condiciones geológicas, geomorfológicas y sismológicas que favorecen el desarrollo de los fenómenos inducidos por la actividad sísmica.

Palabras clave: prevención de desastres; morfotectónica; actividad sísmica; fenómenos inducidos; fallas activas.

Morphotectonic schematization for the sector of Guamá, Santiago de Cuba

Abstract

The relief was classified and the active nature of the faults located in the sector of Guamá was evaluated. The application of morphotectonic methods generated a 1:25 000 morphotectonic scheme. It includes the characterization of morphotectonic blocks and potential phenomena induced by moderate to intense seismic activities, which were not previously considered. It was concluded that there are geological, geomorphological and seismological conditions favoring the occurrence of phenomena induced by seismic activities in the sector of Guamá.

Keywords: disaster prevention; morphotectonic; seismic activity; induced phenomena; active faults.

1. INTRODUCCIÓN

El sector Guamá se localiza en la costa sur del municipio de igual nombre en la provincia de Santiago de Cuba (Figura 1). Abarca un área de 524 45 km², con 52 km aproximadamente de extensión lineal. En su porción sur se ubican la carretera que enlaza las provincias de Santiago de Cuba y Granma y varios asentamientos humanos, como Uvero, Las Cuevas y La Plata.

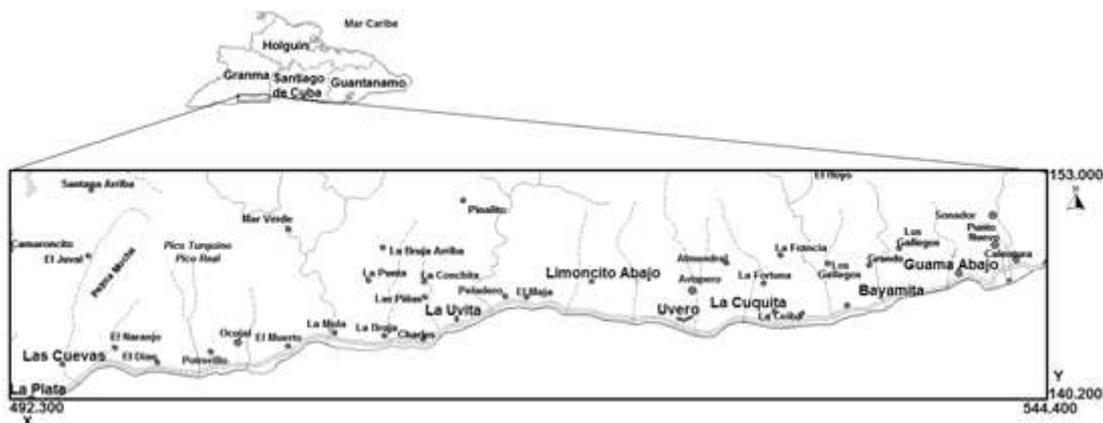


Figura 1. Ubicación geográfica del sector Guamá.

Este sector se encuentra bajo la influencia del sistema de fallas transformantes Bartlett-Caimán, frontera entre las placas tectónicas de Norteamérica y el Caribe, donde se han registrado sismos de gran intensidad que han afectado la región de Cuba Oriental. Su alto nivel de sismicidad y de peligrosidad sísmica (aceleración horizontal efectiva de 350 cm/s² e intensidad a esperar mayor de VIII MSK; Chuy y Álvarez 1995) favorecen la ocurrencia de fenómenos inducidos por terremotos.

Investigaciones morfoestructónicas recientes evalúan índices y evidencias geomorfológicas para identificar fallas activas y contribuir a los estudios de peligro sísmico. Ejemplos de ello son los trabajos de Ordaz y demás investigadores (2012), que revelan la diferenciación morfoestructural en bloques de la falla Pinar en el occidente de Cuba y la existencia de un lomo de presión; Noriega, Caballero & Rendón (2012) demuestran que las fallas (de rumbo) afectaron al cauce actual y los depósitos del río Herradura; Mingorance (2006), con estudios morfométricos y paleosísmicos históricos, indica que la ruptura superficial de la falla La Cal guarda relación con el terremoto de 1861 de Mendoza; Zamorano y otros colaboradores (2000), con la aplicación de métodos de análisis morfoestructural, exponen la existencia de tres sistemas disyuntivos: la meseta de Boniato, el graben Santiago de Cuba y la meseta estratificada Santiago-Siboney.

Varias investigaciones se han realizado a todo lo largo del sector Guamá, entre las que destacan levantamientos geológicos (Kuzovkov et al. 1977; Alioshin et al. 1975); valoraciones morfotectónicas (Hernández et al. 1991 y Hernández et al. 1995); caracterización tectónica (Pérez & García 1997); proyectos territoriales sobre amenazas naturales (Seidedos et al. 2001) y comunitarios (Chuy et al. 2011), las que indican un elevado grado de estudio.

El objetivo principal del trabajo es contribuir con los estudios de prevención de desastres mediante la identificación de las estructuras tectónicas y fallas activas; además, realizar una breve caracterización de los bloques morfotectónicos y de los fenómenos inducidos por la actividad sísmica.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

El esquema geológico digital de Cuba Oriental (IGP 2003) y los mapas topográficos (La Magdalena 4875-IV-c; La Plata 4875-IV-a; Providencia 4876-III-c; Pico Turquino 4875-IV-b; Brazo Malo 4876-III-d; La Uvita 4875-I-a; Pico Botella 4876-II-c; Uvero 4875-I-b; Pico Bayamesa 4876-II-d; Chivirico 4975-IV-a; La Alcarraza 4976-III-c) del sector (Geocuba 1984) sirvieron de base a este trabajo.

Se aplicaron los métodos morfométricos de la red fluvial y su jerarquización, el nivel base de erosión hasta el tercer orden, las pendientes y la disección vertical para obtener los diferentes esquemas homónimos; apoyados en un sistema de información geográfica (SIG) se trazaron los principales alineamientos. El carácter activo de las fallas detectadas por morfometría se evaluó a través del método de Haller, Machette & Dart (1993).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Red del drenaje: se define como paralela y subparalela en el centro y este del sector (Figura 2), mientras que al oeste, en la zona del Pico Turquino, es radial. Los cursos principales de los ríos se disponen paralelos entre sí con orientación NS, NO, NE; en zonas de igual litología se observan tramos rectos y alineados, así como cambios bruscos en el trazado de los cauces fluviales principales, indicando el control tectónico del drenaje.

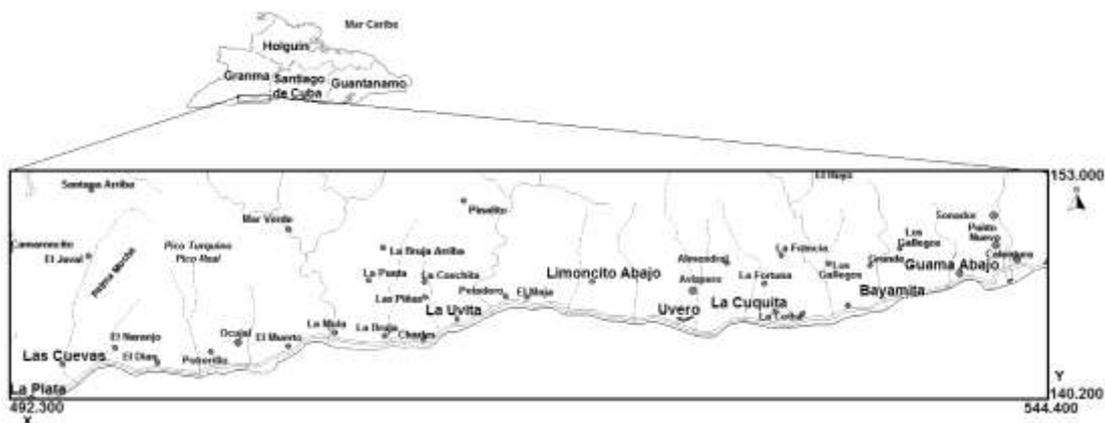


Figura 2. Trazado de la red fluvial.

Jerarquización de la red: de acuerdo con Rodríguez (2000) se determinan el orden de los ríos (Figura 3). En el último tramo de La Mula, situado al oeste, se encuentra el 6^{to} índice.



Figura 3. Jerarquización de la red del drenaje.

Nivel base de erosión de segundo orden: se obtienen ocho cierres positivos máximos (Figura 4), de ellos seis localizados en el oeste y dos en el este. En el contorno de estos sectores, el espaciamiento se comporta con un gradiente más elevado que en su interior, lo que indica la existencia de levantamientos con mayor velocidad. Próximo al litoral, las isolíneas mantienen la misma trayectoria que la línea de costa y las inflexiones negativas conservan una ubicación perpendicular a esta, formando alineaciones que pueden estar dadas por la existencia de estructuras tectónicas. Las direcciones de los morfoalineamientos son NW-SE y NE-SW.



Figura 4. Nivel base de erosión (Isobasitas de segundo orden).

Isobasitas de tercer orden: se obtienen siete cierres positivos máximos (Figura 5), de ellos seis ubicados al oeste y uno al este. Se describe un comportamiento similar a las isobasitas anteriores. Las principales formas alineadas mantienen la orientación de las primeras y hacia el norte. Los criterios para la determinación de los principales alineamientos fueron los cierres de las isobasitas y las curvas de inflexión de las líneas.

Modelo Digital del Terreno (MDT): se distinguen tres categorías básicas del relieve: montañas, lomeríos y llanuras. Las últimas se localizan próximas a la zona costera y se distribuyen de este a oeste. Las llanuras fluviales se sitúan perpendiculares a la línea de costa y se destacan los procesos acumulativos sobre los erosivos, condicionados por las formas del relieve y la dinámica de la costa. Las montañas se localizan hacia el norte del sector de este-oeste.

Al centro y oeste se ubican los picos Martí, Suecia y Cuba y próximo al litoral se encuentran los lomeríos. En el este, predominan las montañas bajas y pequeñas, lomeríos como el Alto de Don Luis (500 m), la Loma de Don Luis (650 m) y El Papayo (200 m). Hacia el oeste se halla el Pico Turquino con más de 1 974 m. El relieve típico de este sector es un indicador de probable ocurrencia de deslizamientos (Galván, Chuy & Vidaud 2012; Galván 2014).

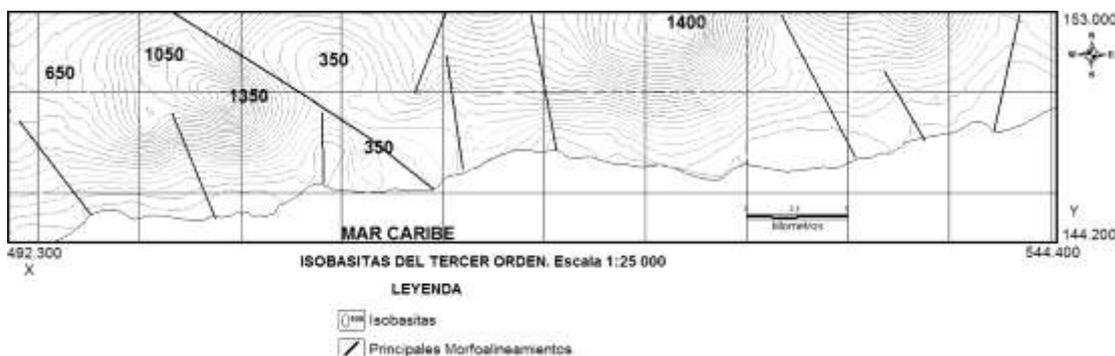


Figura 5. Nivel base de erosión (Isobasitas de tercer orden).

Pendientes: muestran sectores de altos valores de este parámetro que oscilan de 40° - 80° , que indican condiciones favorables para el desarrollo de caídas y desprendimientos de rocas; en zonas de contacto brusco entre inclinaciones altas con las de bajo ángulo pueden ser indicadores de corrientes fluviales. Al sur, próximo a la costa y coincidente con los ríos, los valores disminuyen y oscilan entre 0° - 7° .

Disección vertical: Los máximos valores (Figura 6) se distribuyen al oeste (450 - 650 m/km^2), centro (500 - 650 m/km^2) y al noreste (400 - 550 m/km^2) del sector; muestran inestabilidad en las laderas (Mora y Vahrson 1994), un relieve diseccionado y un ambiente propicio para el desarrollo de movimientos en masa.

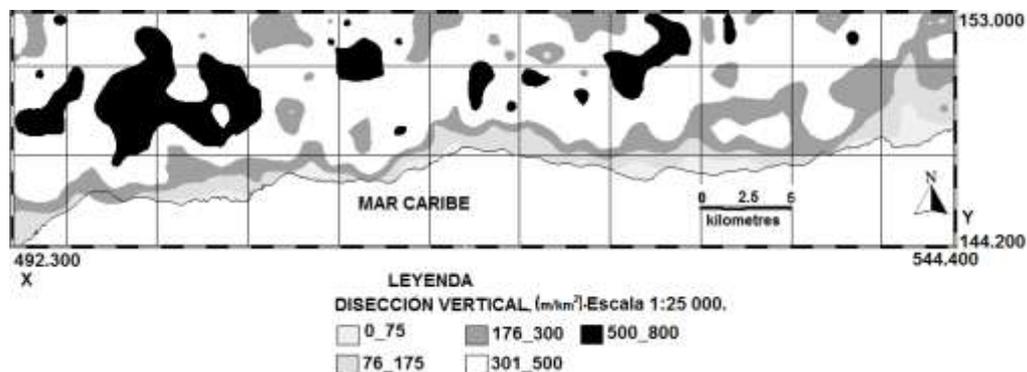


Figura 6. Disección vertical.

Principales alineamientos: se obtuvieron tras la combinación de varios elementos, tales como: zonas de valores de pendientes altas que contactan con suaves, tramos rectos de los ríos, alineación de la red fluvial, sectores de inflexiones negativas de isobasitas de segundo y tercer orden y cierres de las mismas. A partir del mapa de superposición gráfica de los alineamientos se confeccionó el esquema de estructuras tectónicas, quedando cartografiadas aquellas que, sobre la base de la suma de criterios, resultan de importancia dentro del área de estudio.

3.1 Estructuras tectónicas del sector Guamá

Los trabajos precedentes describen las estructuras tectónicas regionales del sector, tales como: Jibacoa (Alioshin *et al.* 1975), Turquino, Vega Grande (Pérez y García 1997) así como Bayamita (Kuzovkov *et al.* 1977; Pérez y García 1997), declaradas con el empleo de técnicas geofísicas y métodos geológicos y geomorfológicos. Basados en criterios de esta última técnica se apoya la actual investigación (Tabla 1, al final del artículo).

Según refieren Haller, Machette & Dart (1993) las fallas pueden clasificarse por sus características como:

- simple falla definida por la edad de ruptura.

- falla con secciones que puede diferenciar la edad o estilo estructural.
- falla con sismicidad o segmentos estructurales que actúan de forma independiente.

Al aplicar este procedimiento se detecta carencia de información, relacionada con la geometría y el desplazamiento. Se manifiesta relativa actividad sísmica en la costa, cercana a Jibacoa (Pérez y García 1997).

Aunque la modernización de la red sísmica cubana ha permitido mejorar la calidad de la determinación y precisión de los parámetros sismológicos de los terremotos (Diez et al. 2014) aún se presentan limitaciones que dificultan la realización de estudios detallados, así como la determinación del potencial sismogénico de la tectónica activa expresada por morfometría. Por estas razones se clasifican a las fallas Jibacoa, Turquino y Bayamita (Tabla 2, al final del artículo) como de "simple falla".

3.2 Bloques morfotectónicos del sector Guamá

El sector se divide en tres bloques morfotectónicos (Turquino, Uvero, Bayamita), los cuales muestran tendencia a los movimientos neotectónicos de ascenso (Figura 7).

Bloque Turquino: abarca el extremo occidental del sector, entre las localidades de La Plata y La Mula. Las estructuras tectónicas que lo limitan son Jibacoa y Turquino. Manifiesta la mayor actividad neotectónica de ascenso (Tabla 3), expresado por el relieve, la disección vertical, las pendientes y la máxima altura presente (Pico Turquino). Predominan las rocas de los arcos volcánicos del Cretácico (formaciones Palma Mocha y Manacal) y del Paleógeno del grupo El Cobre, así como cuerpos intrusivos intemperizados. Hacia la costa afloran depósitos aluviales y calizas de la formación Jaimanitas (IGP 2003).

No existen reportes históricos de licuación de los suelos, pero se evidencian condiciones sismológicas (Chuy & Álvarez 1995), geomorfológicas y geológicas, que favorecen el desarrollo de este fenómeno inducido (Rosabal 2014; Rodríguez & Ortiz 2015). Presencia de sedimentos aluviales de edad Holoceno, relieve de llanuras acumulativas fluviales, valores de pendiente de 0°-7°, intensidad sísmica a esperar mayor de VIII MSK, aceleración horizontal efectiva de $>350 \text{ cm}^2$, bajo estas condiciones es probable su ocurrencia en las desembocaduras de los ríos Jibacoa, Palma Mocha, El Naranjo, El Potrerillo, Ocujal, El Muerto y Turquino. Al norte el escenario es diferente, son suelos coluviales de edad Pleistoceno, en zonas de montañas y no es posible la licuación (TC-4, 1999). La dirección principal del agrietamiento está entre los 320°-330°.

Bloque Uvero: ocupa la parte central, desde el poblado La Mula hasta Bayamita, limitado por las fallas Bayamita y Turquino. Posee movimientos neotectónicos de ascenso (Tabla 3), expresado en el relieve, pendientes, disección vertical (con 501-800 m/km²) e isobasitas de segundo y tercer órdenes. Existen suelos aluviales de edad Holoceno (Rosabal 2014) en la desembocadura de los ríos Peladero, Babujal, Uvero, Avispero, La Fortuna y Bayamita, con alta peligrosidad sísmica, que favorecen la licuación (Chuy y Álvarez 1995; Rodríguez y Ortiz 2015).

Se reportan deslizamientos en Punta Babujal (Seidedos et al. 2001) y en tramos de la carretera aparecen desprendimientos de grandes bloques de rocas. La composición litológica corresponde a los arcos volcánicos del Cretácico (formación Manacal) y del Paleógeno (grupo El Cobre), rocas intrusivas y las formaciones Jaimanitas y Río Macío (IGP 2003). La dirección principal del agrietamiento está entre los 330°-340° (Pérez et al. 1994).

Bloque Bayamita: ocupa el extremo este, desde el asentamiento La Cuquita hasta Guamá Abajo, delimitado por las estructuras Bayamita y Guamá. Presenta movimientos relativos de ascenso, valores morfométricos mínimos en comparación con el resto del área de estudio (Tabla 3).

Suelos aluviales de probable licuación (TC-4 1999; Rosabal 2014), en las desembocaduras de los ríos (Bayamita, Grande y Guamá), con alta peligrosidad sísmica a esperar (Chuy y Álvarez 1995; Rodríguez & Ortiz 2015). Manifestaciones de deslizamientos asociadas a condiciones geológicas, geomorfológicas y antrópicas, así como taludes inestables en la Loma del Papayo, Punta Bayamita, Don Luis y próximo al río Grande (Seidedos et al. 2001). Indicios de inestabilidad tectónica en taludes de la carretera, con el desnivel y agrietamiento de la misma. La dirección principal del agrietamiento está entre los 330-340° (Pérez et al. 1994).

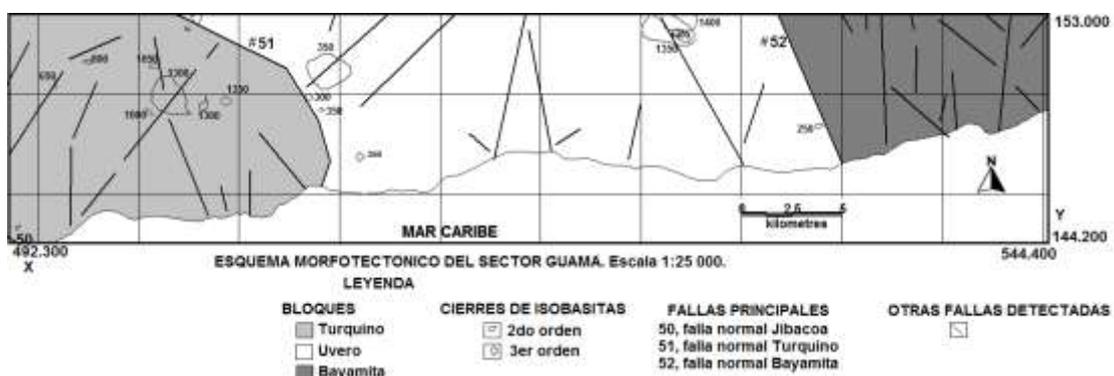


Figura 7. Esquema morfotectónico del sector Guamá a escala 1:25 000.

Tabla 3. Características de los bloques morfotectónicos

Bloques	Red drenaje	Índice	Relieve	Nivel base de erosión 2do orden (m)	Nivel base de erosión 3er orden (m)	Pendiente	Licuación	Mov. en Masa	Tendencia Mov. relativos
Turquino	Radial	6to	Montañas Lomeríos y llanuras	800-1300	1000-1400	80° al N y de 0°-11° al S	Alta	Caídas Deslizamiento	Ascenso
Uvero	Paralela y dendrítica	5to	Montañas Lomeríos y llanuras	1400	900-1400	25° a 80° al N y 0°-11° al S	Alta	Deslizamiento	Ascenso
Bayamita	Paralela y dendrítica	5to	Montañas Lomeríos y llanuras	600-1150	500-1100	80° al N y predomina n de 18°-25°	Alta	Deslizamiento	Ascenso

En los bloques Turquino, Uvero y Bayamita es posible que ocurran deslizamientos inducidos por la actividad sísmica (Tabla 4), demostrado por el criterio magnitud distancia recomendado (ISSMGE 1999), teniendo en cuenta las zonas sismogeneradoras (Oriente, Cauto-Nipe, Bayamo y Baconao), que afectan al sector (Chuy et al. 1997). Pueden ocurrir fallos destructivos de taludes a las distancias epicentrales de 15 km (Bayamo), 20 km (Baconao y Cauto_Nipe), 48 km (Oriente) y fallos de taludes a 75 km (Bayamo), 150 km (Baconao y Cauto-Nipe), 280 km (Oriente), teniendo mayor incidencia los terremotos ubicados en la zona sismogeneradora Oriente.

Tabla 4. Zona de fallo destructivo de taludes (Clase 1) y zona de fallo de taludes (Clase 2), según las zonas sismogeneradoras que afectan el sector Guamá (Chuy et al. 1997)

Zonas	Magnitud máxima	Clase 1 (km)	Clase 2 (km)
Bayamo	6.5	15	75
Baconao	7.0	20	150
Cauto Nipe	7.0	20	150
Oriente 2	7.6	32	210
Oriente 1	8.0	48	280



Figura 8. Foto del deslizamiento de roca asociado al terremoto de Pílon de 1976, en el tramo de la carretera comprendido entre la localidad La Bruja y Palma Mocha.

Se reportó un deslizamiento de roca (Figura 8) asociado al terremoto de Pílon (19 de febrero de 1976; $M_s=5,7$ Richter e $I=8,0$ MSK), entre las localidades La Bruja y Palma Mocha (entre los bloques Turquino y Uvero), sin coordenadas geográficas que permitan la confección de un inventario de deslizamientos. En este recorrido del vial, los taludes poseen altos valores de inclinación.

El sector Guamá está dividido en tres bloques morfotectónicos escalonados, con movimientos neotectónicos de ascenso; el bloque Turquino es el de mayor amplitud y más elevado del país. Es una zona muy inestable debido a la neotectónica, por las condiciones del relieve, la geología, el fracturamiento, la meteorización, la erosión en alto grado producida por la red fluvial y los valores de disección vertical; todos estos factores provocan que los movimientos en masa sean frecuentes. Los altos valores de los parámetros de aceleración horizontal efectiva e intensidad sísmica a esperar, combinado con la presencia de suelos aluviales de edad Holoceno, ubicados en los canales y desembocaduras de los ríos, inducen la licuación de los suelos.

Los bloques Turquino y Uvero se encuentran limitados por fallas activas. Sin embargo, la mayor actividad sísmica de la Sierra Maestra se localiza entre

Uvero y Baconao, donde se sitúa el bloque Bayamita. En este trayecto se registran series de terremotos próximos a la costa, sin destacarse un sismo fuerte predominante. La falla Oriente se encuentra dislocada por fallas de segundo orden, que desplazan a la primera en forma escalonada y la aproximan más a la costa, coincidiendo con una pequeña depresión submarina muy cerca de la localidad de Chivirico (Arango 2014).

4. CONCLUSIONES

- Se obtiene el esquema morfotectónico del sector Guamá, integrado por tres bloques en ascenso: Turquino, Uvero y Bayamita. Las estructuras tectónicas que los limitan son Jibacoa, Bayamita, Guamá y Turquino, determinándose en esta última el criterio de fallamiento activo.
- Por la distancia epicentral a la que se encuentran las zonas generadoras de terremotos que afectan el sector, en los bloques morfotectónicos pueden ocurrir fallos destructivos de taludes y fallos de taludes y, con mayor incidencia, por la actividad en la zona sismogénica Oriente.
- En el sector Guamá existen condiciones geológicas, geomorfológicas y sismológicas que favorecen el desarrollo de los fenómenos inducidos por la actividad sísmica.
- Las fallas Jibacoa, Turquino y Bayamita fueron clasificadas como simple falla por el método de Haller, Machette & Dart (1993).

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas por la ayuda brindada. A los profesores del Departamento de Geología y Minería del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, por las recomendaciones realizadas. A los árbitros anónimos y editores por sus indicaciones y comentarios. Al Dr. Tomas J. Chuy Rodríguez por su valiosa colaboración.

6. REFERENCIAS

- ALIOSHIN, V.; SÁNCHEZ, F.; EGUIPKO, O.; PÉREZ, M.; SHELAGUROV, V.; BUROV, V. 1975: Informe sobre los resultados del levantamiento geológico y su búsqueda a escala 1:100 000 en la parte nororiental de la Sierra Maestra (1972-75). Archivo CNFG.
- ARANGO, E. 2014: *Análisis sismotectónico del territorio oriental de Cuba a partir de la integración del modelo de corteza 3D de datos gravimétricos con datos sismológicos y geodésicos*. Tesis doctoral. Centro de

Investigaciones Científicas y de Educación Superior de Ensenada, Baja California. México. 146 p.

CHUY, T. J. & ÁLVAREZ, J. L. 1995: Peligrosidad sísmica de Cuba con fines de la Norma Sismorresistente Cubana. Reporte de Investigación. Fondos del CENAIIS y del X Forum Nacional de Ciencia y Técnica.

CHUY, T. J.; ORBERA, L.; HERNÁNDEZ, J. R.; MAGAZ, A.; SÁNCHEZ, F.; PÉREZ, C.; GONZÁLEZ, E.; FUNDORA, M.; RUBIO, M.; ÁLVAREZ, J. L.; COTILLA, M.; ARANGO, D.; ITURRALDE-VINENT, M.; RODRÍGUEZ, J.; MARQUETTI, M. C. & RAMÍREZ, R. 1997: Dictamen Conclusivo. Comisión Ad-hoc para la determinación de las Zonas Sismogénicas de la región Oriental de Cuba y zonas aledañas. *Revista Electrónica Ciencia en su PC* 2: 2.

CHUY, T. J.; ROSABAL, S. Y.; OLIVA, R.; ZAPATA, J. A. 2011: Acciones de fortalecimiento de la capacidad local en la gestión para la reducción de riesgos en la provincia Santiago de Cuba. Memorias de VIII Convención Internacional de Medio Ambiente y Desarrollo. Cuba, 11 p. ISBN: 978-959-300-018-5.

DIEZ, E.; CUTIÉ, M.; MONTENEGRO, C.; PALAU, R.; POVEDA, V.; YINXING, Z.; YANG, CH. & FENGXIA, W. 2014: Modernización de la red sísmica cubana. Instalación, calibración y puesta a punto. *Revista de la Facultad de Ingeniería Universidad Central de Venezuela* 29(2): 69-78.

GALVÁN, L.; CHUY, T. & VIDAUD, I. 2012: Indicadores más comunes en la evaluación de riesgos geológicos. Indicadores cualitativos y cuantitativos para la evaluación de peligro, vulnerabilidad y riesgos geológicos. *Editorial Académica Española*. 88 p. ISBN: 978-3-659-02849-6.

GALVÁN, L. 2014: *Procedimiento para la gestión y reducción de riesgos geológicos en la provincia Santiago de Cuba*. Tesis doctoral. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. 263 p.

GEOCUBA. 1984: Mapas topográficos. Escala 1:25 000.

HALLER, K. M.; MACHETTE, M. N. & DART, R. L. 1993: Guidelines for US database and map for the maps of the major active faults, Western Hemisphere, International Lithosphere Program (ILP), Project II-2 US Department of Interior, US Geological Survey, U.S.A. 45 p.

HERNÁNDEZ, J. R.; DÍAZ, J. J.; MAGAZ, A. R.; GONZÁLEZ, R.; PORTELA, A.; ARTEAGA, F. 1991: Criterios geomorfológicos para la clasificación morfotectónica de Cuba Oriental. En: *Morfotectónica de Cuba Oriental* Ed. Academia, La Habana, 43 p.

- HERNÁNDEZ, J. R.; MAGAZ, A. R.; ORTIZ, M. A.; ZAMORANO, J. J. 1995: Clasificación morfoestructural (tipológica) y morfotectónica (regional) del relieve oriental cubano: Modelo insular de transición interplacas. *Investigaciones Geográficas* 3: 13-35.
- IGP. 2003: Mapa Geológico Digital de la República de Cuba a escala 1:100 000. Instituto de Geología y Paleontología.
- KUZOVKOV, G.; ARSENEV, Y.; SÁNCHEZ CRUZ, R. & QUESADA, R. 1977: Informe sobre los resultados del levantamiento geológico a escala 1:1000 000 realizados por la brigada Sierra Maestra en la pendiente sur de la cresta del Turquino en la parte oeste de la provincia de Santiago de Cuba durante los años 1974-1977. Oficina Nacional de Recursos Minerales, MINBAS, La Habana (inédito).
- MINGORANCE, F. 2006: Morfometría de la escarpa de falla histórica identificada al norte del cerro La Cal, Mendoza. *Revista Asociación Geológica de Argentina* 61(4): 620-638.
- MORA, S. & VAHRSON, W. 1994: Macrozonation methodology for landslide hazard determination. *Environmental & Engineering Geoscience* 31(1): 49-58
- NORIEGA, S.; CABALLERO, A. & RENDÓN, R. 2012: Estudio morfotectónico de un tramo del río Herradura entre los municipios de Frontino y Abriaquí, Departamento de Antioquia, Cordillera Occidental de Colombia. *Geología Colombiana* 37(1): 49-50.
- ORDAZ, A.; HERNÁNDEZ, J. R.; COFIÑO, C. E.; MÉNDEZ, A. P. & GALAZ, G. (2013). Análisis estructural y morfotectónico en los municipios de San Cristóbal y Candelaria, Cuba Occidental: contribución a los estudios de peligrosidad sísmica de la Falla Pinar. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía* (82): 7-23.
- PÉREZ, C.; GARCÍA, D.; CAÑETE, C. & SÁNCHEZ, F. 1994: Tectónica de la Sierra Maestra y áreas adyacentes. Informe final del resultado 555. Problema de ciencias naturales: Estudio geológico integral de la Sierra Maestra. Fondos de la Industria Básica. Instituto de Geología y Paleontología. La Habana.
- PÉREZ, C. & GARCÍA, D. 1997: Tectónica de la Sierra Maestra (sureste de Cuba). *Estudios sobre Geología de Cuba*: 464-476. Centro Nacional de Información Geológica. IGP. La Habana.
- RODRÍGUEZ, A. 2000: *Manual de Geomorfología*. Ministerios de Educación Superior. Cuba.

- RODRÍGUEZ, L. G. & ORTIZ, E. Q. 2015: Modeling the specific seismic risk considering the weight of determining variables. Open Access Library Journal, 2:e1157. <http://dx.doi.org/10.4236/oalib.1101157>
- ROSABAL, S.Y. 2014: Zonación preliminar de licuación de los suelos en la región Cuba Oriental. Disponible en: <http://www.monografias.com/trabajos101/zonacion-preliminar-licuacion-suelos-region-cuba-oriental/zonacion-preliminar-licuacion-suelos-region-cuba-oriental.shtml>.
- SEIDEDOS, J.; REYES, C.; GUASCH, F.; AVICH, B.; CHUY, T.; ZAPATA, J.; DESPAIGNE, G.; RIVERA, Z.; DIEZ, E. & PUENTE, G. 2001: Atlas de peligros naturales del municipio de Guamá. Santiago de Cuba. Fondos del CENAIIS.
- ISSMGE 1999: Manual for Zonation on Seismic Geotechnical Hazards (Revised Version). Japanese Geotechnical Society. 114 p.
- ZAMORANO, J. J.; ORTIZ, M. A.; RAMÍREZ, M. T. & HERNÁNDEZ, J. R. 2000: Meseta de Boniato y graben de Santiago de Cuba: un enfoque geomorfológico de su desarrollo morfoestructural. *Investigaciones Geográficas* (41): 1-20.

Sandra Rosabal-Domínguez, sandra@cenais.cu
Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas. Santiago de Cuba

Alina Rodríguez-Infante, rinfante@ismm.edu.cu
Instituto Superior Minero Metalúrgico. Moa, Holguín, Cuba

José A. Zapata-Balanqué
Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas. Santiago de Cuba

Evaluación de un modelo de polidispersión para la caracterización granulométrica de la pulpa laterítica y el cieno carbonatado

Gabriel Hernández-Ramírez
Arístides A. Legrá-Lobaina
Leonel Garcell-Puyans
Rodney Martínez-Rojas

Resumen

Se evaluó la capacidad descriptiva del modelo matemático propuesto por Pérez (2010) para describir la polidispersión en hidromezclas para diversos casos de distribución de frecuencias granulométricas. Se estudió la eficacia del modelo cuando se investigan las materias primas principales del proceso de lixiviación ácida a presión para producir sulfuro de níquel: pulpas lateríticas y cieno carbonatado. Los análisis granulométricos experimentales se realizaron mediante dos técnicas: tamizado convencional y analizador de tamaños de partículas (HORIBA). Los resultados obtenidos, a través de una aplicación informática desarrollada para obtener los modelos matemáticos, demuestran que el modelo es capaz de describir la polidispersión de las hidromezclas estudiadas y se concluye que el cieno carbonatado tiene mayor polidispersión que la pulpa laterítica.

Palabras clave: coeficiente de polidispersión; granulometría; pulpa laterítica; cieno carbonatado; modelos matemáticos.

Evaluation of poly-dispersion models for granulometric characterization of laterite slurries and calcium carbonate mud

Abstract

The capability of the mathematical model proposed by Pérez (2010) to describe poly-dispersion in hydro-mixtures for diverse cases of granulometric frequency distributions was evaluated. The efficacy of the model was assessed when investigating the raw materials required by the acid leach process to produce nickel sulphides: laterite slurries and calcium carbonate mud. The experimental granulometric analysis was conducted by implementing two techniques: conventional screening and particle size analyzer (HORIBA). The results obtained from the application of computer-based techniques to generate mathematical models show that the model is capable to describe poly-dispersion in hydro-mixtures. It was concluded that poly-dispersion in calcium carbonate mud is higher than in laterite slurries.

Keywords: poly-dispersion coefficient; grain sizing; laterite slurries; calcium carbonate mud; mathematical models.

1. INTRODUCCIÓN

La tecnología de lixiviación ácida a presión (LAP), que utiliza la industria hidrometalúrgica cubana para la producción de sulfuro de níquel, manipula y transporta gran variedad de suspensiones de variada naturaleza: laterita, cieno carbonato, yeso y sulfuro de Ni+Co, entre otras; siendo la primera, con un típico color amarillo-parduzco, la materia prima fundamental que se extrae de los yacimientos ferroniquelíferos de Moa.

En la Planta de Preparación de Pulpa se garantiza la distribución de tamaño de partículas minerales, beneficiando el material mediante un proceso de preparación mecánica, hasta obtener la máxima recuperación de las partículas de limonita de un tamaño menor a 0,84 mm. La pulpa, que es enviada a la Planta de Espesadores para su posterior procesamiento, contiene un 25-30 % de sólido.

El cieno carbonatado (coral), procedente de los yacimientos situados en la bahía de Moa, es de color gris claro, con restos de conchas de organismos marinos que son eliminados en un proceso de beneficio, donde se convierte en una pulpa cruda y espesa, con 15-25 % de sólido. Se utiliza para neutralizar el licor crudo (pH=2) que llega de la Planta de Lavaderos y de esta forma garantizar la eficiencia de precipitación, ya que el ácido libre en el licor tiene un efecto negativo en la precipitación de los sulfuros. Las pulpas elaboradas con el cieno se componen de partículas menores de 0,85 mm.

El tamaño de partículas es un factor muy importante en el comportamiento reológico de las suspensiones, probablemente por su contribución a las fuerzas de Van der Waals (Cerpa *et al.* 1996) y esenciales en el diseño y operación de los sistemas de bombeo. Debido a la composición granulométrica de las suspensiones de mineral laterítico, estas deben analizarse como sistemas coloidales que exhiben características reológicas específicas. El desconocimiento que existe en este sentido en los escenarios tecnológicos conlleva a que se tomen decisiones que provocan la inadecuada elección de tuberías y bombas (Madigan, Leong & Ong 2009).

Generalmente las suspensiones de partículas finas exhiben mayores viscosidades que las de partículas gruesas, con excepción de aquellas suspensiones que poseen propiedades magnéticas con las cuales ocurre lo contrario; tal es el caso de las pulpas de maghemita, según lo que reportan Garcell y demás colaboradores (1998). En las suspensiones acuosas de minerales la viscosidad está determinada por el tamaño y la distribución

de las partículas en suspensión (Cerpa *et al.* 1999; Cerpa *et al.* 2001; Pérez 2004; Rivas y Colás 2005).

Existen varios modelos para describir la distribución granulométrica de partículas sólidas en procesos de reducción y de clasificación de tamaño; entre ellos se encuentran los modelos de Gaudin- Schuhmann, de Rosin-Rammler-Sperling, de Gaudin-Meloy y de otros autores como Falcón (2006), pero se ha comprobado que ninguno consigue describir la granulometría de las materias primas de la LAP (Pérez, Cardero & Garcell 2009).

Pérez (2010) en su tesis de doctorado desarrolla un modelo matemático capaz de describir la distribución granulométrica de estas suspensiones y de analizar la polidispersión, aspecto no abordado hasta la fecha. Este modelo, que en lo adelante se denominará Modelo de Garcell-Pérez (MGP) ha sido el elegido para el presente estudio y se expresa por la ecuación:

$$Y_N = \left(\frac{D_N}{(1 - B_N) \cdot D_N + B_N} \right)^s \quad (1)$$

Donde: s es el coeficiente de polidispersión y B_N es un coeficiente de ajuste, ambos adimensionales.

El objetivo principal de este trabajo fue evaluar, mediante una aplicación informática, la eficacia del MGP en el cálculo de la polidispersión en la pulpa laterítica y el cieno carbonatado.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Procedimiento para determinar coeficiente de polidispersión

Pérez (2010) propone para el cálculo del coeficiente de polidispersión el siguiente procedimiento:

1. Realizar el análisis granulométrico experimental del material bajo estudio, mediante un juego de n tamices o mediante un analizador de partículas equivalente. Escribir los resultados en forma de datos ($DP_i; YP_i$).

Donde:

$$i=1, \dots, n$$

DP_i : es la medida en mm de cada abertura de malla;

YP_i : es la frecuencia porcentual de partículas para el valor DP_i .

2. Calcular para cada DP_i la frecuencia acumulada que se denominan YB_i ,

3. Determinar los valores D_{med} y Y_{med} donde el segundo es el valor de YB_i que supera por primer vez al 50 %. D_{med} es el valor de DP_i correspondiente.
4. Obtener un nuevo juego de datos denominado $(DN_i; YN_i)$ donde:

$$DN_i = \frac{DP_i}{D_{med}} \text{ y } YN_i = \frac{YB_i}{Y_{med}}$$
5. Ajustar estos últimos datos al modelo: (Ecuación 1).

En este caso es imposible realizar un Ajuste Mínimo Cuadrado clásico, debido a que ese modelo no se puede transformar en un modelo lineal respecto a s y a B_N . Según Hyams (1997), un método de elección es el de Levenberg-Marquardt.

Este método (de compleja implementación computacional) necesita de asistencia humana permanente para garantizar su convergencia en cada caso; además, es un método muy sensible a los cambios en sus parámetros de aplicación (Hyams 1997).

6. Calcular el valor de $k = s \times B_n$. Según la autora citada el valor de s refleja cuantitativamente la polidispersión del material, es decir, en la medida que todas las partículas sean del mismo tamaño, el valor de s decrecerá, de manera que para los sistemas monodispersos $s=0$.

Se estudia el comportamiento de s , B_N y k para diversas distribuciones granulométricas del material que se investiga con el fin de evaluar en disímiles escenarios la capacidad descriptiva del modelo matemático. Ese es un objetivo preliminar de este trabajo y para cumplirlo se analizarán los resultados de los valores de s , B_N y k , el coeficiente de correlación r (CC) y el error estándar e (ES) (Miller, Freund & Johnson 2005), cuando se ajusta el Modelo de Garcell-Pérez a ciertos datos que muestran variaciones prefijadas.

Para ello se ha desarrollado una aplicación informática cuyo fundamento algorítmico es la discretización de los espacios de soluciones de los parámetros s y B_N y luego la búsqueda exhaustiva de sus valores, tal que maximicen el valor del coeficiente de correlación.

El usuario debe cargar el archivo con los datos $(DN_i; YN_i)$ y definir los parámetros de trabajo:

- sI : Valor inicial de s para la búsqueda exhaustiva
- sF : Valor final de s para la búsqueda
- $sPasoI$: Valor del paso de s para la búsqueda normal

- sPasoF: Valor del paso de **s** para la búsqueda refinada
- CriCC: Valor del coeficiente de correlación a partir del cual la búsqueda se realiza con sPasoF.
- MsMax: Valor máximo de **s** hasta el cual la búsqueda puede extenderse en una cadena de búsquedas.
- BnMax: Valor máximo de **B_N**. El valor mínimo de **B_N** es 0.
- BnPaso: Valor del paso de **B_N** para cualquier búsqueda.

La eficacia del ajuste dependerá de una adecuada selección de los parámetros de trabajo.

Los materiales que se utilizarán son:

- Para el objetivo preliminar:

Considerando la abertura de juegos de tamices se supone que los 7 valores posibles de D_N son: $D_{N1}=0,045$; $D_{N2}=0,1792$; $D_{N3}=0,3133$; $D_{N4}=0,4475$; $D_{N5}=0,5817$; $D_{N6}=0,7158$ y $D_{N7}=0,8487$. Para cada uno de ellos se supone que se puede obtener experimentalmente una frecuencia Y_{Ni} ($i=1,\dots,7$). Estos valores se simularán en tres ocasiones de la siguiente manera:

Para los valores Y_{N1} ($i=1$), Y_{N4} ($i=4$) y Y_{N7} ($i=7$). Se toman los 21 valores Y_{Nij} ($j=1,2,\dots,21$), tal que $Y_{N11}=0$; $Y_{N12}=5$;...; $Y_{N121}=100$. El resto de los valores Y_{N1j} , Y_{N2j},\dots,Y_{N7j} se toman iguales a $\frac{100-Y_{Nij}}{6}$. Para cada juego de 7 datos

$(D_{Ni}; Y_{Nij})$ se obtienen los correspondientes valores de **s**, **B_N**, **k** y **r**. Los resultados aparecen en las columnas 3 a 6, 7 a 10 y 11 a 14 de la Tabla 1.

Estas simulaciones tienen como propósito evaluar si el modelo de Garcell-Pérez es capaz de modelar adecuadamente (según el coeficiente de correlación) la polidispersión de hidromezclas cuando se producen variaciones de granulometría entre las partículas más finas, de diámetro medio y más gruesas. Este aspecto no ha sido tratado hasta el momento.

- Para el objetivo principal:

Las muestras de hidromezclas de pulpas lateríticas y de cieno carbonatado fueron tomadas directamente del proceso tecnológico, en condiciones normales de operación en los puntos de toma muestras.

Estas mediciones de granulometría se realizaron de dos formas:

1. Análisis del tamizado convencional, para determinar la granulometría mayor de 0,045 mm; por tamizado vía húmeda, empleando un juego

de tamices de la serie ASTM con las siguientes aberturas: 0,85; 0,3; 0,15; 0,06; 0,09; 0,075 y 0,045 mm.

2. La determinación del contenido de las partículas menores de 0,045 mm, empleando un analizador de tamaños HORIBA LA-910.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Resultados de la simulación del modelo

Al procesar los juegos de datos que simulan diversos comportamientos granulométricos similares a los que pudieran presentar las hidromezclas se obtienen los siguientes resultados:

Tabla 1. Resultados de la modelación para la variación de las frecuencias para diferentes diámetros

Y _{Nij}	i	D _N =0,038 (i=1)				D _N =0,150 (i=4)				D _N =0,8487 (i=7)			
		S	B _N	k	r	s	B _N	k	R	s	B _N	k	r
Y _{Nj1}	0	2,673	0,2540	0,6791	0,996823	0,7878	0,6954	0,5478	0,993847	2,1837	0,297	0,6486	0,998582
Y _{Nj2}	5	2,007	0,3062	0,6145	0,997806	1,0282	0,5395	0,5547	0,996761	1,9836	0,333	0,6605	0,999041
Y _{Nj3}	10	1,707	0,3913	0,6679	0,998305	1,707	0,3913	0,6679	0,998305	1,7085	0,391	0,6680	0,998305
Y _{Nj4}	15	1,233	0,4762	0,5876	0,998725	2,0501	0,3156	0,647	0,997130	1,2549	0,456	0,5722	0,996830
Y _{Nj5}	20	0,944	0,5479	0,5176	0,999042	12,7899	0,0514	0,6574	0,995642	1,0966	0,538	0,5900	0,994019
Y _{Nj6}	25	0,741	0,6808	0,5049	0,998951	12,1065	0,0515	0,6235	0,989451	0,951	0,635	0,6039	0,989975
Y _{Nj7}	30	0,601	0,7291	0,4383	0,999227	11,5207	0,0516	0,5945	0,978733	0,6952	0,842	0,5854	0,987692
Y _{Nj8}	35	0,494	0,7698	0,3805	0,999442	10,9952	0,0518	0,5696	0,963916	0,6132	0,986	0,6046	0,984005
Y _{Nj9}	40	0,386	0,8765	0,3386	0,999649	10,56	0,0519	0,5481	0,945424	0,4593	1,467	0,6738	0,985799
Y _{Nj10}	45	0,332	0,9225	0,3065	0,999850	10,18	0,052	0,5294	0,923634	0,3238	2,865	0,927687	0,981350
Y _{Nj11}	50	0,2962	0,9432	0,2794	0,999847	9,85	0,0521	0,5132	0,898887	0,3164	3,028	0,958059	0,983691
Y _{Nj12}	55	0,2448	0,9533	0,2334	0,999905	1225,36	0,0004	0,5024	0,878906	0,3708	12,8	4,74624	0,989302
Y _{Nj13}	60	0,2010	0,9623	0,1934	0,999944	73,025	0,0067	0,4893	0,849217	0,3609	19,92	7,189128	0,991171
Y _{Nj14}	65	0,1642	0,9690	0,1591	0,999969	35,64	0,0134	0,4776	0,816975	0,354	31,787	11,25259	0,993069
Y _{Nj15}	70	0,1319	0,9750	0,1286	0,999984	22,785	0,0205	0,4671	0,782278	0,3491	53,046	18,51835	0,994860
Y _{Nj16}	75	0,1032	0,9810	0,1012	0,999993	16,34	0,028	0,4575	0,745151	0,3457	94,864	32,79448	0,996445
Y _{Nj17}	80	0,0779	0,9860	0,0768	0,999997	12,465	0,036	0,4487	0,705513	0,3434	189,107	64,93934	0,997761
Y _{Nj18}	85	0,0557	1,0000	0,0557	0,999999	9,885	0,0446	0,4409	0,663172	0,342	450,615	154,1103	0,998773
Y _{Nj19}	90	0,0357	1,0000	0,0357	0,999999	8,055	0,0538	0,4334	0,617823	0,3419	1481,18	506,4154	0,999473
Y _{Nj20}	95	0,0174	1,0000	0,0174	0,999999	6,67	0,0639	0,4262	0,568852	0,3425	11068,4	3790,957	0,999874
Y _{Nj21}	100	0	1	0	1	5,58	0,0752	0,4196	0,515280	41	0,5	20,6120	1,000000

El comportamiento de s , B_N y k para $D_N=0,038$ se puede observar en la Figura 1.

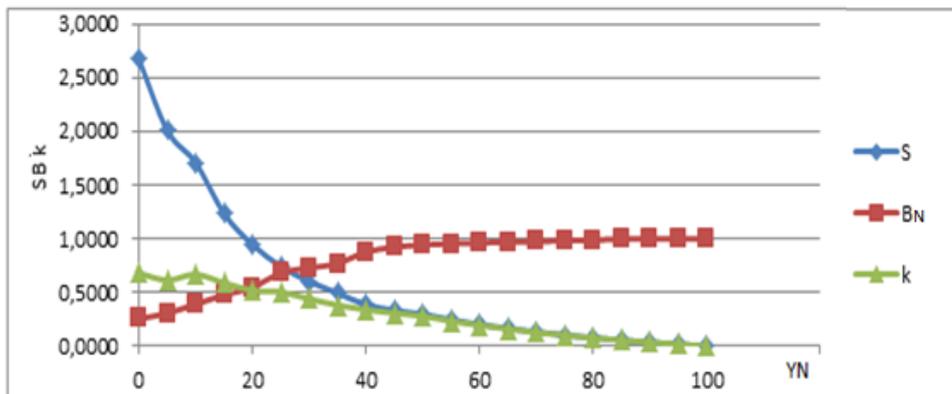


Figura 1. Variación de la frecuencia de los granos con $D_N=0,038$.

El comportamiento de s para las fracciones medias se muestra en la Figura 2 y para las fracciones gruesas en la Figura 3.

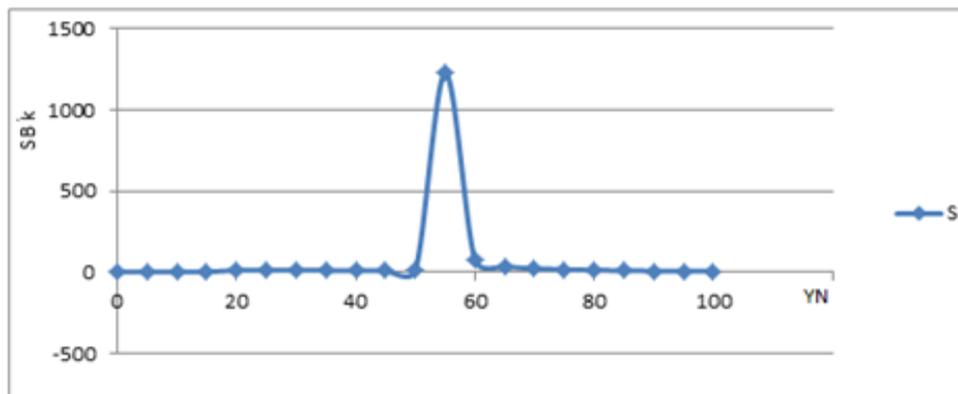


Figura 2. Comportamiento de s para el caso de variación de la frecuencia de los granos con $D_N=0,15$

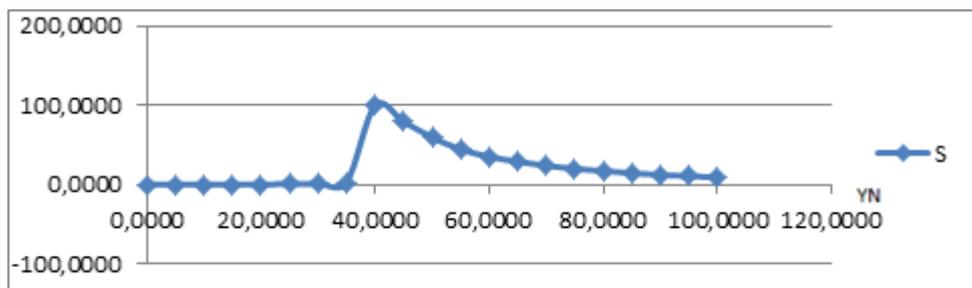


Figura 3. Comportamiento de s para el caso de variación de la frecuencia de los granos de diámetros $D_N=0,8487$.

3.2. Discusión de la simulación del modelo

De los resultados obtenidos en el epígrafe anterior puede observarse que cuando la variación de la frecuencia se produce en las partículas presentes de menor diámetro, el modelo se ajusta muy bien (tal como lo indican los valores del coeficiente de correlación en la Tabla 1, columna 6) y los resultados son numéricamente coherentes (Figura 1).

Algo similar sucede cuando varían las frecuencias de partículas de mayor diámetro, excepto en la última fila donde el valor de s queda fuera de la tendencia que presentan el resto de los valores de ese parámetro.

El resultado de modelar del comportamiento de la dispersión, cuando varía la frecuencia de las partículas de diámetro medio, es deficiente y así lo indican los valores de los coeficientes de correlación en la Tabla 1.

En definitiva, todos esos resultados revelan que, el modelo es perfectamente aplicable a los casos donde la mayor frecuencia esté presente para las partículas de menor diámetro.

Otro aspecto interesante que se puede observar en la Tabla 1 es que, cuando todas las partículas tienen las mismas frecuencias (ver fila 3) y es por tanto el escenario de mayor polidispersión, el valor de s no es el mayor (los valores de s en la dos primeras filas son mayores). Esto indica que cuando varía la frecuencia de las partículas de menor diámetro, el modelo tiene una clara correlación entre el valor de s y la polidispersión, solo si la frecuencia de las partículas más finas es mayor o igual que cualquiera de las frecuencias restantes (en este caso el modelo es adecuado a partir de la tercera fila de la Tabla 1).

Un análisis del diámetro 0,150 revela que el modelo es conveniente solo en las primeras cuatro filas que muestran los casos donde la frecuencia que varía es menor o cercana a las demás. En diámetro 0,8487 se observa que el modelo es representativo de la polidispersión, excepto para la última fila, aunque debe observarse que se produce un salto de monotonía en la fila 13.

3.3. Presentación de datos de los casos de estudio

Como puede observarse en la Tabla 2 la distribución granulométrica en las suspensiones de la pulpa laterítica tiene un comportamiento propio de sistemas polidispersos.

Tabla 2. Distribución granulométrica por tamizado

Dp,mm	Pulpa laterítica			Cieno carbonatado		
	% Retenido	% Cernido	Frecuencia YB	% Retenido	% Cernido	Frecuencia YB
0,85	1,51	98,48	4,65	1,36	98,63	4,19
0,3	4,65	93,82	4,22	4,19	94,44	2,1
0,15	4,22	89,59	3,16	2,1	92,34	1,4
0,106	3,16	86,43	1,63	1,4	90,94	2,58
0,09	1,63	84,79	1,20	2,58	88,36	9,41
0,075	1,20	83,59	4,86	9,41	78,95	10,64
0,045	4,86	78,73	78,73	10,64	68,31	68,31
0	-	-	0	-	-	0

Se pudo determinar por tamizado vía húmeda que la pulpa cruda de laterita posee un 22 % de partículas mayores de 0,045 mm; por tanto, las partículas más finas son mayoritarias y determinan la velocidad de sedimentación de este mineral, lo cual corrobora lo obtenido en trabajos anteriores (Avramidis y Turian 1991; Rivas y Colás 2005; Pérez & Garcell 2006; Hernández *et al.* 2015).

Las pulpas de cieno carbonatado forman sistemas altamente polidispersos. Las partículas mayoritarias corresponden a la clase menor de 0,045 mm, constituyendo el 68,31 % en peso de las fases sólidas en la muestra, lo cual confirma los resultados de Martínez, Izquierdo y Pompa (2014).

Para conocer las partículas contenidas en el 78,73 %, menores a 0,045 mm, se empleó un analizador de tamaños HORIBA, el cual da a conocer todos los diámetros de partículas que tiene la muestra. En las Figuras 4 y 5 se puede apreciar que las partículas más finas son mayoritarias y determinan la velocidad de sedimentación de este mineral, así como su comportamiento reológico.

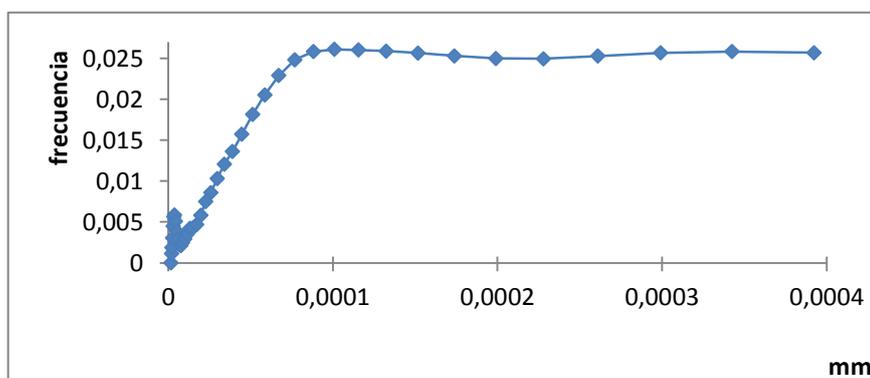


Figura 4. Comportamiento de la frecuencia granulométrica de la pulpa cruda según el análisis por HORIBA.

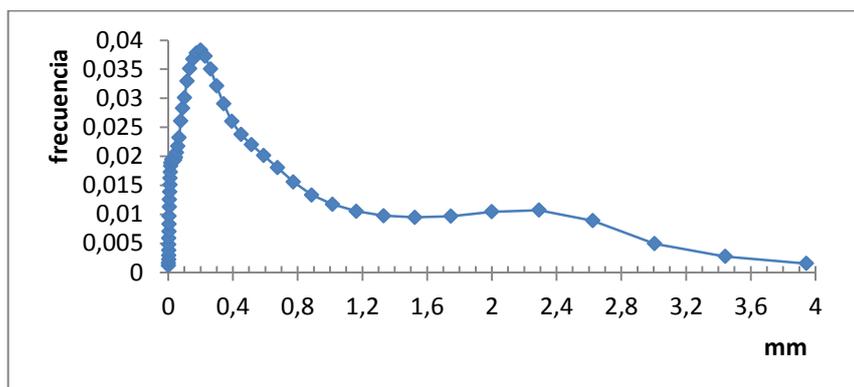


Figura 5. Comportamiento de la frecuencia granulométrica del cieno carbonatado según el análisis por HORIBA.

3.4. Modelación y análisis de los casos de estudio

El procesar los datos con el modelo escogido se obtiene los resultados que aparecen en la Tabla 4.

Tabla 4. Resultados de ajuste del modelo para los casos de estudio

Caso	s	B_N	k	r	Error Estándar
Pulpa laterítica con tamiz	0,144	0,832	0,1198	0,9999	0,0024
Pulpa laterítica con HORIBA	0,80	0,58	0,4640	0,9988	0,0338
Cieno carbonatado con tamiz	2,691	0,144	0,3875	0,9957	0,0476
Cieno carbonatado con HORIBA	0,752	0,599	0,4505	0,9981	0,04325

Respecto a los resultados se observa que:

- Los modelos obtenidos son aceptables en cada caso, tal como se deduce de los valores de los coeficientes de correlación.
- Los valores de s calculados para los datos obtenidos al tamizar el material (en iguales condiciones) reflejan correspondencia respecto a un hecho que se muestra en los datos: el cieno tiene mayor polidispersión que la pulpa laterítica.
- Los valores de s calculados para los datos obtenidos mediante el HORIBA son semejantes a pesar de las diferencias obvias entre los datos. Sin embargo, existe cierto comportamiento análogo entre ambas distribuciones de frecuencia, tal como se muestra en la Tabla 4 y debido al paso 4 del procedimiento descrito en el epígrafe 2.1, los resultados son numéricamente muy semejantes,

a pesar de las diferencias de escalas en el tamaño de las partículas presentes en cada caso.

- Los parámetros de las modelaciones de la misma muestra son diferentes cuando los datos son adquiridos por diferentes vías (Tamiz y HORIBA). Nótese que los valores de k obtenidos de muestras tamizadas son menores que los obtenidos de muestras analizadas con HORIBA. Esto, ni lo contrario, se puede afirmar para s y para B_N .

4. CONCLUSIONES

- El Modelo de Garcell-Pérez es satisfactorio en el sentido de que hay correspondencia entre los valores numéricos de s y las frecuencias en que se distribuyen las partículas, cuando la mayor frecuencia esté presente para las partículas de menor diámetro.
- El Modelo de Garcell-Pérez es adecuado para la modelación de la polispersión de cieno carbonatado y de pulpa laterítica cruda.
- La comparación de los resultados de s obtenidos por el Modelo de Garcell-Pérez solo es posible cuando los datos sean obtenidos bajo las mismas condiciones y se refieren a muestras del mismo material.

5. REFERENCIAS

- AVRAMIDIS, K. S. & TURIAN, R. M. 1991: Yield stress of laterite suspensions. *J. Colloid Interface Sci.* 143(1): 54-62.
- CERPA, A.; TARTAJ, P.; GARCÍA-GONZÁLEZ, M. T.; REQUENA, J.; GARCELL, L. R. & SERNA, C. J. 1996: Rheological properties of concentrated lateritic suspensions. *Progr Colloid Polym Sci.* 100: 266-270.
- CERPA, A.; GARCÍA-GONZÁLEZ, M. T.; SERNA, C. J. & TARTAJ, P. 2001: Relationship between the colloidal and rheological properties of mineral suspensions. *The Canadian Journal of Chemical Engineering* 79(4): 608-611.
- CERPA, A.; TARTAJ, P.; GARCÍA-GONZÁLEZ, M. T.; REQUENA, J.; GARCELL, L. & SERNA, C. J. 1999: Mineral-content and particle size effects on the colloidal properties of concentrate lateritic suspensions. *Clays and Clay Minerals* 47(4): 515-521.
- FALCÓN, J. 2006: El beneficio de minerales y la separación de fases en las tecnologías limpias de la industria minero-metalúrgica. En: VII Clean Technology In The Mining Industry [Memorias]. Buzios, Río de Janeiro Brazil, octubre.
- GARCELL, L.; MORALES, M. P.; ANDRES-VERGÉS, M.; TARTAJ, P. & SERNA, C. J. 1998: Interfacial and Rheological Characteristics of Maghemite Aqueous Suspensions. *Journal of Colloid and Interface Science* 205(2): 470-475.

- HERNÁNDEZ, R. G.; MARTÍNEZ, R. R.; DURÁN, A. C. & PÉREZ, A. O. 2015: Eficiencia energética en sistemas de bombeo de hidromezclas. *Minería & Geología* 31(3): 109-127.
- HYAMS, D. 1997: CurveExpert, Versión 1.34 (Aplicación Informática). USA. <http://web.archive.org/web/http://www.ebicom.net/~dhyams/cftp.htm>
- MADIGAN, C.; LEONG, Y. K. & ONG, B. C. 2009: Surface and rheological properties of as-received colloidal goethite (α -FeOOH) suspensions: pH and polyethylenimine effects. *International Journal of Mineral Processing* 93(1): 41-47.
- MARTÍNEZ, R. R.; IZQUIERDO, I. & POMPA, M. 2014: Pérdida de carga durante el transporte en régimen laminar de pulpas de cieno carbonatado. *Minería & Geología* 30(1): 80-94.
- MILLER, I.; FREUND, J. & JOHNSON, R. 2005: *Probabilidades y Estadísticas para ingenieros*. Volumen I y II. Cuarta Edición. Prentice-Hall Hispanoamericana S.A., México, 624 p. ISBN: 0-13-712-761-8.
- PÉREZ, G. L. 2010: *Modelo matemático que correlaciona los principales factores de influencia sobre el comportamiento reológico de las pulpas lateríticas*. Leonel Garcell (Tutor). Tesis doctoral. Universidad de Oriente. 134 p.
- Pérez, G. L. & Garcell, L. R. 2006: Influencia de la distribución de tamaño de las partículas y de la temperatura sobre la reología de suspensiones lateríticas. *Tecnología Química* 26(1): 88-93.
- PÉREZ, G. L.; CARDERO, Y. & GARCELL, L. R. 2009: Modelo matemático para describir la distribución granulométrica de la fase dispersa de las suspensiones de laterita. *Tecnología Química* 29(2): 84-96.
- RIVAS, S. & COLÁS, E. 2005: *Efecto de la granulometría sobre la reología de suspensiones de cieno carbonatado*. Trabajo de diploma. Universidad de Oriente. 61 p.

Gabriel Hernández-Ramírez, ghdezr@ismm.edu.cu

Ing. Eléctrico. Máster en Electromecánica. Profesor Auxiliar
Instituto Superior Minero Metalúrgico. Moa, Cuba

Aristides A Legrá Lobaina, alegra@ismm.edu.cu

Lic. Matemática. Doctor en Ciencias. Profesor Auxiliar
Instituto Superior Minero Metalúrgico. Moa, Cuba

Leonel Garcell-Puyans, garcell@fiq.uo.edu.cu

Ing. Químico. Doctor en Ciencias. Profesor Titular
Universidad de Oriente, Santiago de Cuba

Rodney Martínez Rojas, rmartinez@ismm.edu.cu

Ing. Mecánico. Máster en Electromecánica. Profesor Asistente
Instituto Superior Minero Metalúrgico. Moa, Cuba

Prospección de aguas subterráneas mediante lógica difusa en Luanda, Angola

Moisés Catanha
Carlos Sacasas-León
José Pérez-Lazo

Resumen

El presente estudio estuvo dirigido a obtener, a partir de la lógica difusa, el mapeo de áreas favorables para la prospección de aguas subterráneas en la provincia de Luanda (Angola). Mediante la integración de seis variables (conductancia longitudinal, delta H, modelo digital de elevación, mapa geológico, cota de nivel estático y resistividad aparente) y utilizando la extensión ArcSDM, del Sig ArcView, con el operador gamma (índice $\gamma=0,7$) se confeccionó el mapa de favorabilidad, mediante el cual se parceló la provincia en tres zonas: poco favorable, favorable y muy favorable para la prospección de acuíferos subterráneos.

Palabras clave: lógica difusa; prospección de agua; aguas subterráneas; mapeo hidrológico.

Groundwater prospecting in Lwanda (Angola) with the application of fuzzy logics

Abstract

This study is aimed at obtaining a map for groundwater prospecting in the province of Lwanda (Angola) applying fuzzy logic. A favorability map was generated by integrating six variables (longitudinal conductance, delta H, digital elevation model, geological map, static elevation and apparent resistivity and using ArcSDM extension of Sig ArcView with gamma operator and index $Y=0,7$. This map made it possible to classify the province into three areas: less favorable, favorable and very favorable for prospecting for underground aquifers.

Keywords: fuzzy logic; groundwater prospecting; hydrological mapping.

1. INTRODUCCIÓN

La lógica difusa, como herramienta matemática, permite tratar y procesar información en la cual se manejan términos inexactos, imprecisos o subjetivos. El presente trabajo está dirigido a obtener, a partir de la lógica difusa, un mapa de zonas favorables para la prospección de agua subterránea en la provincia de Luanda (República de Angola), la cual abarca una parcela territorial de 2 088 km² (Figura 1).

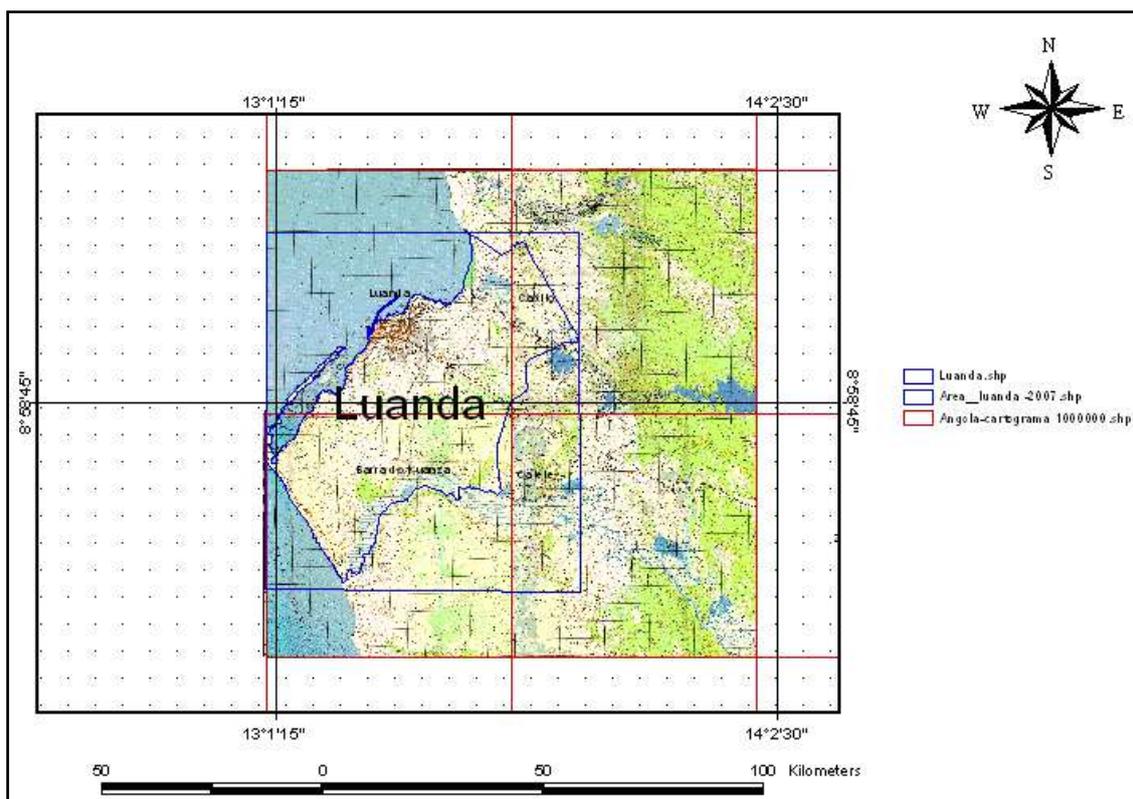


Figura 1. Localización geográfica de la provincia de Luanda.

No se localizaron referencias relacionadas con la prospección de aguas subterráneas aplicando lógica difusa en la República de Angola; sin embargo, a nivel internacional existen algunos trabajos como el de Rather & Andrabi (2012), quienes desarrollan una metodología basada en la lógica difusa para el mapeo de áreas potenciales para agua subterránea. Por otra parte, en Irán Monjezi y otros investigadores (2013) realizan un trabajo sobre la selección de locales apropiados para la recarga artificial de agua subterránea en regiones áridas y semiáridas. Kumar, Kumar & Mallick (2013) la emplean con el objetivo de mapear áreas potenciales de agua subterránea usando mapas temáticos de geología, drenaje, entre otros, a través de imágenes satelitales.

Otros autores (D'ércole, Groves & Knox-Robinson 2000; Shahid, Nath & Maksud-Kamal 2002; Manap *et al.* 2013, 2014; Rahmati *et al.* 2015) han

desarrollado trabajos similares en los que se aplican estos conceptos, de forma eficiente, para la prospección de aguas subterráneas.

El presente estudio estuvo dirigido a mapear, haciendo uso de la lógica difusa, las áreas favorables para la prospección de aguas subterráneas en la provincia de Luanda (Angola).

2. MATERIALES Y MÉTODOS

La Tabla 1 expone los datos de partida de las variables utilizadas para la confección del mapa de probabilidad de ocurrencia del agua subterránea en la provincia de Luanda.

Tabla 1. Variables utilizadas en el estudio

No	Ra (Ω .m)	MDE	Caudal (m ³ /s)	CNE (m)	Delta H (m)	S	Mapa geológico
1	89,03	86,0	7 871,07	18,12	7,1	20 087,86	Quelo
2	112,09	81,0	9 909,5	8,9	5,2	16 863,20	Quelo
3	106,6	84,0	9 997,0	8,0	4,9	16 321,63	Quelo
4	52,8	65,0	11 080,8	5,0	12,3	4 504,39	Quelo
5	49,4	66,0	11 287,6	4,8	13,2	4 104,58	Quelo
6	38,55	65,0	11 877,5	4,6	14,3	3 820,73	Quelo
7	26,7	48,0	11 212,8	4,3	12,0	4 017,92	Quelo-Luanda Cacuaco
8	16,18	57,0	9 975,4	4,6	8,6		Luanda Cacuaco
9	116,0	108,0	8 595,0	23,0	8,2	24 107,93	Quelo
10	127,5	101,0	8 390,5	19,7	8,4	19 677,72	Quelo
11	63,26	66,0	9 065,4	36,5	2,3	143 863,96	Quelo-Luanda Cacuaco
12	61,9	78,0	16 825,8	37,0	21,8	28 557,55	Quelo
13	61,9	77,0	12 060,7	39,9	3,5		Quelo
14	51,0	81,0	1 543,9	63,6	4,0	24 548,01	Quelo
15	44,5	60,0	3 545,8	5,2	11,9	1 549,43	Quelo
16	42,9	72,0	4 235,0	5,8	2,2	11 165,00	Quelo
17	42,6	64,0	4 102,6	4,8	1,2	16 410,40	Quelo
18	38,9	74,0	5 001,0	70,0	13,6		Quelo
19	38,9	75,0	5 044,5	64,0	13,9		Quelo
20	34,0	62,0	6 378,0	5,9	8,6		Quelo
21	29,2	38,0	7 196,7	7,3	8,3	6 329,63	Quelo
22	14,2	63,0	8 239,1	7,6	7,2	8 696,83	Quelo
23	16,18	57,0	8 241,7	6,8	7,0	8 006,22	Quelo-Luanda Cacuaco
24	18,5	67,0	9 746,0	17,5	6,8	25 081,62	Quelo-Luanda Cacuaco
25	17,7	69,0	8 996,7	14,9	4,0	33 512,71	Quelo
26	16,5	51,0	8 796,9	-11,4	7,8		Luanda Cacuaco

27	18,3	30,0	8 560,0	1,4	6,8	1 762,35	Luanda Cacuaco
28	11,2	63,0	8 846,0	1,3	6,8		Quelo-Luanda Cacuaco
29	23,3	63,0	8 857,5	1,2	6,3		Luanda Cacuaco
30	4,75	46,0	8 794,0	1,3	6,6		Quelo-Luanda Cacuaco
31	23,3	65,0	10 149,9	3,2	5,2		Quelo
32	7,31	45,0	8 190,9	2,4	-2,4		Luanda Cacuaco
33	25,3	18,0	8 148,9	1,9	2,9		Luanda Cacuaco
34	26,9	19,0	8 365,0	2,0	2,6		Luanda Cacuaco
35	43,2	57,0	6 240,6	1,9	0,5		Luanda Cacuaco
36	35,2	55,0	9 032,0	1,3	4,3		Luanda Cacuaco
37	38,9	68,0	8 758,0	3,3	3,6		Quelo-Luanda Cacuaco
38	25,9	68,0	10 149,9	3,2	5,2		Quelo
39	50,2	86,0	9 883,0	9,6	4,5		Quelo
40	58,4	97,0	10 935,0	1,9	3,6		Quelo
41	55,9	96,0	10 826,6	11,8	4,6		Quelo
42	33,1	52,0	6 881,5	2,0	3,7	3 719,73	Luanda Cacuaco
43	38,02	55,0	6 199,6	2,0	4,9	2 530,45	Quelo
44	26,8	56,0	5 092,0	2,0	5,9		Quelo
45	39,7	14,0	8 411,6	2,0	2,0		Luanda Cacuaco
46	59,6	34,0	8 649,3	2,0	5,9	2 931,97	Luanda Cacuaco
47	63,2	45,0	8 098,3	3,0	2,0	12 147,45	Luanda Cacuaco
48	60,3	55,0	12 890,9	9,0	0,8		Luanda Cacuaco
49	60,3	59,0	13 327,0	9,1	0,7		Luanda Cacuaco
50	61,8	92,0	9 180,0	9,8	3,1		Quelo-Luanda Cacuaco
51	71,3	90,0	8 801,8	3,2	4,0		Quelo
52	90,3	109,0	17 932,3	12,9	5,6		Quelo
53	111,17	86,0	13 251,4	9,7	6,9		Quelo
54	91,6	74,0	10 084,0	11,7	5,1	23 133,88	Quelo
55	78,0	71,0	3 805,8	11,9	3,7	12 240,28	Quelo
56	102,4	111,0	17 882,0	11,0	7,3	26 945,48	Quelo
57	103,8	106,0	17 933,0	11,9	7,7	27 714,64	Quelo
58	120,5	112,0	6 009,5	5,1	0,3		Quelo-Luanda Cacuaco
59	126,4	109,0	5 981,9	5,0	1,7		Luanda Cacuaco
60	115,6	113,0	5 959,0	4,5	0,8		Quelo
61	119,4	118,0	3 350,0	6,9	8,3		Quelo-Luanda Cacuaco
62	92,4	114,0	8 998,0	5,0	8,9		Quelo
63	92,7	65,0	5 765,0	9,2	4,5		Luanda Cacuaco

S: conductancia longitudinal; **delta H**: diferencia entre la profundidad del nivel dinámico y la profundidad del nivel estático; **MDE**: modelo digital de elevación; **MG**: mapa geológico; **CNE**: cota del nivel estático; **Ra**: resistividad aparente.

2.1. Metodología

Kemp y demás colaboradores (2001) proponen utilizar, para la confección de los modelos difusos, las herramientas de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) con las variables que mejor correlacionan con la favorabilidad de áreas para la prospección del agua subterránea. Ellos desarrollaron una extensión para el sistema *ArcView* nombrada *ArcSpatial Data Modeller (ArcSDM)*, la cual fue diseñada para aplicar técnicas de análisis modernas, como pueden ser las redes neuronales, el peso de la evidencia, la regresión logística y la lógica difusa.

El programa fue perfilado para la prospección de minerales, pero los autores recomiendan también otros usos. En este caso, se adaptan las bondades de la extensión de *ArcView* para utilizar esencialmente la lógica difusa en la confección de mapas de favorabilidad para la prospección de aguas subterráneas. Como parte de la metodología se propone seguir los siguientes pasos para la utilización de la extensión *ArcSDM* en este estudio:

- Crear los mapas raster de cada una de las variables que definirán el modelo.
- Reclassificar los mapas raster de las variables para darle un valor entero a cada intervalo (exigencia de la extensión *ArcSDM*).
- Otorgar a cada intervalo una función de pertenencia, en dependencia del criterio de experto asumido.
- Probar las diferentes combinaciones difusas (and, or, producto, suma y gamma) entre las variables (Fernández-Núñez 2006).

El conjunto difuso que se emplea es “*determinación de zonas de favorabilidad para la prospección del agua subterránea*” y representa, en términos lingüísticos, la incidencia que puede tener una variable geológico-geofísica, de manera directa o indirecta, en una zona específica de favorabilidad, por lo que grados de pertenencia con valor uno (1) representarán los valores de los atributos que más condiciones de favorabilidad poseen para la ocurrencia de agua subterránea y con valor cero (0) los que menos condiciones poseen (Zadeh 1965).

A partir de una plantilla de Microsoft Excel se transformaron los datos en formato *dbf* para ser manipulados en ambiente *Sig ArcView* (ESRI 2002). Con la extensión *Surface* de *ArcView* se hizo la conversión de las variables

en imágenes ráster (matrices). Posteriormente, se reclasificaron los mapas ráster para darle un valor entero a cada intervalo.

Como a priori no se sabe la importancia que cada variable puede tener en relación a la surgencia del agua subterránea en la región de estudio se hizo un análisis estadístico, utilizando el software *Statistica* 12 (2016), que permitió establecer el orden de importancia para cada variable.

Se escogió el caudal como variable dependiente (Tabla 1). Los resultados de la regresión múltiple permitieron definir el orden de importancia de las variables, ubicando como la de mejor relación con el agua subterránea a la conductancia longitudinal (S). Las demás variables le siguen en este orden: delta H, MDE, CNE y Ra.

Tabla 2. Resultado de cálculo de regresión múltiple

Variable	Caudal						
	Beta	Corr. parcial	Corr. Semiparcial	Tolerancia	R-cuad.	T(47)	Nivel p
Ra	-0,051319	-0,035602	-0,032788	0,408214	0,591786	-0,24423	0,808115
MDE	0,193045	0,131541	0,122129	0,400236	0,599764	0,90970	0,367621
CNE	-0,114009	-0,079539	-0,073439	0,414928	0,585072	-0,54702	0,586950
Delta H	0,741765	0,233927	0,221446	0,089126	0,910874	1,64949	0,105716
S	-0,943991	-0,285663	-0,274350	0,084465	0,915535	-2,04356	0,046625

Una vez sabido el orden en que cada variable influye para determinar la existencia del agua subterránea en la región de estudio se establecieron los grados de pertenencia para cada variable, como su contribución al surgimiento del agua subterránea en la región. Como criterio de experto se asume que la conductancia longitudinal, como la variable que más contribuye a la surgencia del agua subterránea, tiene una función de pertenencia igual a 0,9.

Para las otras variables sus valores de pertenencia se calculan usando la siguiente regla:

$$Y/0,9=Y1/X$$

Donde:

Y=0,285663: valor de la variable, en regresión múltiple, que mejor expresa su relación con la surgencia del caudal;

0,9: valor de la función de pertenencia atribuida a la variable Y;

Y1: valor de la variable que se pretende atribuir al nuevo valor de función de pertenencia;

X: función de pertenencia que se busca;

$Y/0,9=$ es una constante.

Así en la Tabla 3 se tienen las funciones de pertenencia para cada variable como su contribución a la búsqueda del agua subterránea.

Tabla 3. Funciones de pertenencia de las variables

Variable	S	Delta H	MDE	MG	CNE	Ra
Función de pertenencia	0,9	0,7	0,4	0,4	0,2	0,1

Las funciones de pertenencia se distribuyeron en los intervalos asumidos para cada variable, lo cual quiere decir que estos valores son los máximos que puede asumir una variable. Conforme concibió la extensión *ArcSDM* cada variable está dividida en nueve intervalos, por lo se tiene que dividir el valor de función de pertenencia de cada variable por el número de intervalos.

Por ejemplo: Para la conductancia longitudinal se tiene $0,9:9=0,1$, valor mínimo que toma el intervalo que menos contribuye dentro de esta variable, en ese caso el intervalo (0-1,213) de la Tabla 4. Después se suma siempre 0,1 a los subsiguientes intervalos.

Tabla 4. Orden de favorabilidad para la conductancia longitudinal)S=

Intervalo	Conteo	Valor de pertenencia
1 (0 - 1,213)	155 399	0,1
2 (1,213 - 2,427)	66 726	0,2
3 (2,427 - 3,64)	26 707	0,3
4 (3,64 - 4,853)	16 135	0,4
5 (4,853 - 6,067)	7 162	0,5
6 (6,067 - 7,28)	3 731	0,6
7 (7,28 - 8,493)	2 179	0,7
8 (8,493 - 9,706)	1 061	0,8
9 (9,706 - 10,92)	5	0,9

El valor de favorabilidad atribuido a S es 0,9 debido a que a mayor conductancia longitudinal, mayor es la probabilidad de encontrar el agua subterránea para un determinado espesor acuífero. El mismo razonamiento se siguió para las otras variables.

Tabla 5. Orden de favorabilidad para delta H

Intervalo	Conteo	Valor de pertenencia
1 (-2,499 - 0,206)	1 485	0,63
2 (0,206 - 2,912)	13 602	0,56
3 (2,912 - 5,617)	115 869	0,49
4 (5,617 - 8,322)	54 383	0,42
5 (8,322 - 11,027)	91 991	0,35
6 (11,027 - 13,732)	1 557	0,28
7 (13,732 - 16,437)	159	0,21
8 (16,437 - 19,143)	33	0,14
9 (19,143 - 21,848)	26	0,07

El valor de la función de pertenencia de la variable delta H es de 0,7. Los valores de pertinencia de esta variable disminuyen según se desciende en el intervalo, lo que justifica que se le otorgue mayor importancia a los valores menores de la diferencia, porque cuanto menor es esta última, mayor es la probabilidad de existencia de agua.

La geomorfología de Luanda está conformada por relieves planos y monótonos, que forman terrazas. A estas terrazas le fueron atribuidos valores para la variable MDE, de acuerdo con la opinión de expertos (Tabla 6).

La primera terraza (de 4to orden) constituye el relieve más bajo, con cotas que van de 0 m hasta 20 m. Están esencialmente constituidas por depósitos de playa del Pleistoceno Superior.

La segunda terraza (de 3er orden) posee cotas comprendidas entre 21 m y 40 m; se trata de un relieve policíclico, resultante de la remodelación en condiciones subaéreas de la superficie de primer orden. Se le atribuye edad pleistocénica media. Esta región tiene un valor mayor, en esta escala, porque es donde existen geomorfológicamente las pequeñas cuencas que pueden acumular mayor cantidad de agua.

La tercera terraza (de 2do orden) formada por superficies con cotas comprendidas entre 40 m y 80 m.

La cuarta terraza es la superficie más alta y más extensa, con cotas que van desde los 80 m a los 208 m sobre el NMM. Esta superficie es resultante de la erosión subaérea que talla las formaciones terciarias (miocénico-pleiocénicas), cuya fase final de aplicación es atribuida al Pleistoceno Inferior. Está cubierta por depósitos sedimentarios del Cuaternario (arenas grises y

rojas) (Miguel 2001-2002). El valor atribuido se debe a que las arenas grises y rojas que cubren toda la superficie tienen alto valor de transmisividad hidráulica del agua pluvial que puede llegar hasta los niveles más bajos del suelo, recargando así los posibles acuíferos existentes en la zona (Tabla 6).

Tabla 6. Orden de favorabilidad para el MDE

No.	1	2	3	4
Terrazas (m)	0-20=0	21-40=20	41-80=40	81-208=80
Valor de pertenencia	0,1	0,2	0,3	0,4

Según resultados de la regresión múltiple (Tabla 2) el MDE es la tercera variable de mayor peso. Le fue atribuido el valor de 0,4 ya que es posible determinar las terrazas existentes en la región de estudio y establecer los locales de posibles cuencas favorables para localizar agua subterránea.

Al mapa geológico se atribuyó el valor de 0,4. Para esta variable no fue posible establecer orden de pesos por estadística, debido al tipo de dato no numérico que lo compone, pero desde el punto de vista del criterio de expertos, se le asigna igual importancia que al MDE.

La variable mapa geológico (MG) es una red que tiene ocho intervalos (Tabla 7), resultantes de la subdivisión del intervalo [0;1], tomando como límites inferior cinco centésimas (0,05) y límite superior de cuatro décimas (0,4). La selección de estos valores obedece a criterios de expertos en función del comportamiento de cada formación, respecto a su potencial de aguas subterráneas. A continuación se describen las formaciones.

Tabla 7. Orden de favorabilidad del mapa geológico

Intervalos	Conteo	S_value	Formaciones geológicas	Valor de pertenencia
1	245	Bj	Bom Jesus	0,2
2	2 880	AL	Aluviales	0,4
3	574	Cu	Cunga	0,05
4	115	Fu	Funda	0,05
5	228	Gr	Gratidao	0,05
6	2 830	LC	Luanda Cacuaco	0,3
7	11 035	Sr	Quelo	0,4
8	1 657	Qu	Quifangondo	0,05

A la variable CNE fue atribuido el valor de 0,2, el tercero en la escala de pesos de la regresión múltiple. Este valor corresponde al hecho de que ella da una idea de la cantidad de agua existente en un pozo. La Tabla 8 muestra que el valor de pertinencia aumenta según el de la cota, presuponiéndose que cuanto mayor es esta última, mayor es la probabilidad de existencia de agua subterránea.

Tabla 8. Orden de favorabilidad de la CNE

Intervalos	Conteo	Valor de pertinencia
1 (-11,408 - 5,429)	4 592	0,02
2 (5,429 - 22,266)	13 506	0,04
3 (22,266 - 39,103)	8 023	0,06
4 (39,103 - 55,94)	5 057	0,08
5 (55,94 - 72,777)	935	0,10
6 (72,777 - 89,614)	523	0,12
7 (89,614 - 106,451)	301	0,14
8 (106,451 - 123,288)	196	0,16
9 (123,288 - 140,125)	139	0,18

A la variable Ra se le atribuyó el valor de 0,1 en la Tabla 2. Este valor fue atribuido por el hecho de que la resistividad varía con el tipo del agua; para aguas saladas y salobres presenta valores bajos, en tanto el agua dulce presenta valores relativamente altos en relación a las otras aguas. Es un medio para diferenciar los tipos de aguas existentes en el subsuelo. Para la variable fueron seleccionados nueve campos de acuerdo con la variación de la misma (Tabla 9).

Tabla 9. Orden de favorabilidad de resistividad aparente

Intervalos	Conteo	Ra	Valores de pertinencia
1	1 149	1,542 - 27,77	0,01
2	1 801	27,77 - 53,999	0,02
3	3 903	53,999 - 80,228	0,03
4	7 611	80,228 - 106,457	0,04
5	2 906	106,457 - 132,686	0,05
6	1 323	132,686 - 158,914	0,06
7	411	158,914 - 185,143	0,07
8	165	185,143 - 211,372	0,08
9	72	211,372 - 237,601	0,09

El valor mínimo atribuido al primer campo fue 0,01. Para saber cuáles son los valores que se tenía que atribuir se dividió 0,1 (que es el valor atribuido, de acuerdo a la tabla de pesos de regresión múltiple) entre nueve (9) que es el número de campos de la variable. El valor obtenido se fue sumando sucesivamente a los otros intervalos. La importancia de las resistividades tiene orden creciente en la Tabla 9. Por ejemplo, el intervalo número 1 corresponde a resistividades más bajas y el intervalo número 9 corresponde a las resistividades más altas. Después de distribuirse los valores de pertenencia a los intervalos se realizó la entrada de los datos al software.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 2 muestra el comportamiento de la variable S en cuanto a la surgencia de agua subterránea. Los valores de S guardan una relación de proporcionalidad directa con los del caudal.

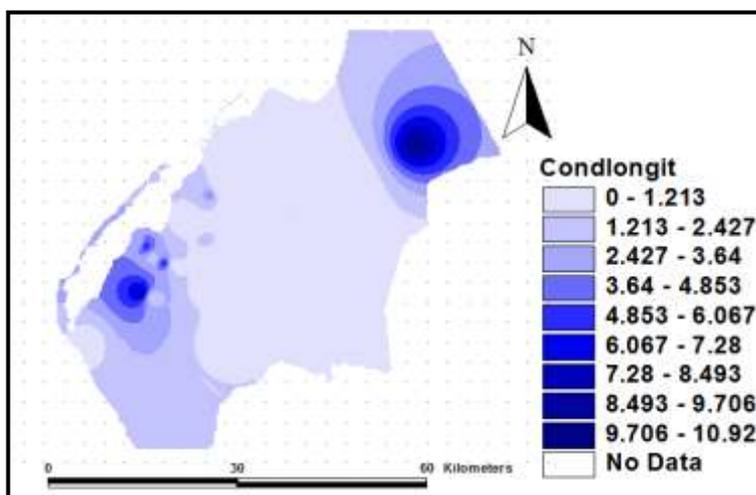


Figura 2. Matriz de la conductancia longitudinal.

La Figura 3 muestra la cantidad de agua que el acuífero puede suministrar. Lo anterior puede ser explicado por el hecho de que un pozo, cuando es bombeado, presenta una disminución del agua del nivel estático hasta alcanzar el nivel dinámico. Si el cono de bombeo es muy profundo indica que hay poca recarga en el acuífero, que la capacidad de reposición del agua del acuífero es muy débil, por tanto, la diferencia entre la profundidad del nivel dinámico y la profundidad del nivel estático es grande y si esa diferencia es pequeña significa que el acuífero es muy productivo. Así, para valores pequeños de delta H el caudal es mayor.

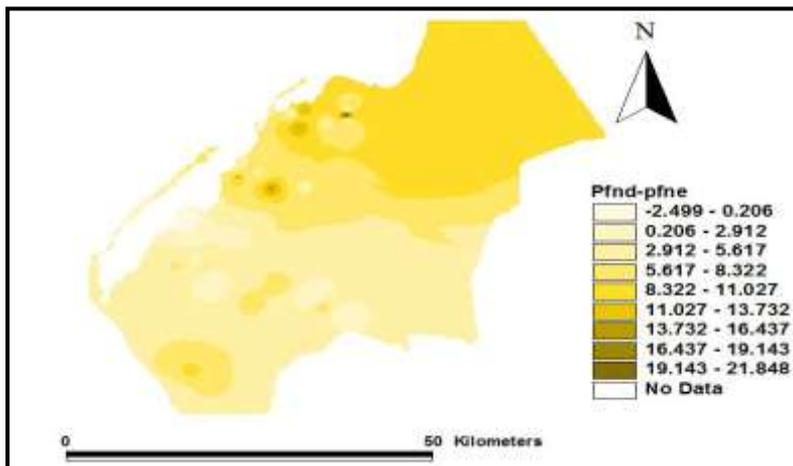


Figura 3. Matriz de delta H.

La Figura 4 muestra la cantidad de agua que puede existir en el pozo, indicando que para mayores valores de la variable representada hay mayor cantidad de agua y viceversa. La CNE es la diferencia entre la cota del suelo y la profundidad del nivel estático del pozo. La cota del suelo es el *datun* para el agua, luego se substrae la profundidad del nivel estático, obteniéndose la CNE.

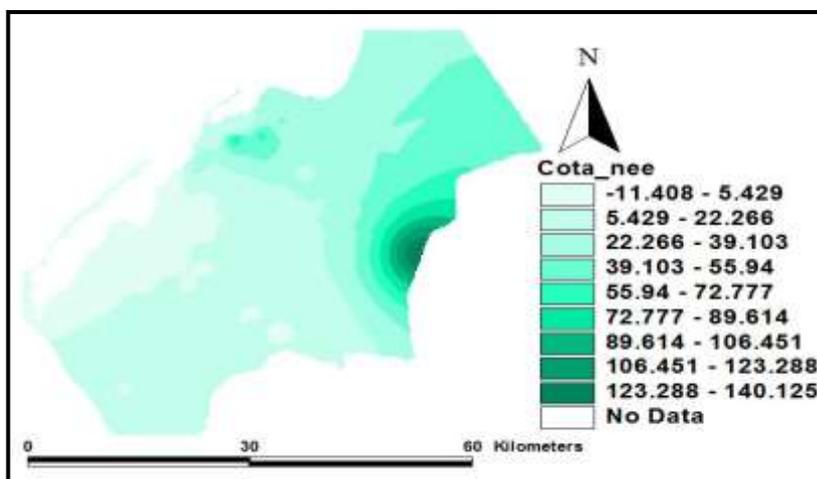


Figura 4. Matriz de la cota del nivel estático.

La matriz del MDE muestra que las terrazas de 1er orden son las más importantes para la prospección del agua subterránea, por eso tienen el peso 0,4, que corresponde a la superficie más alta y más extensa, con cotas que van desde los 80 m a los 208 m sobre el nivel medio del mar y, además, porque las arenas grises y rojas que cubren toda la superficie tienen alto valor de transmisividad hidráulica del agua pluvial que puede llegar hasta las zonas más bajas del suelo, recargando así los posibles acuíferos existentes en la zona (Figura 5).

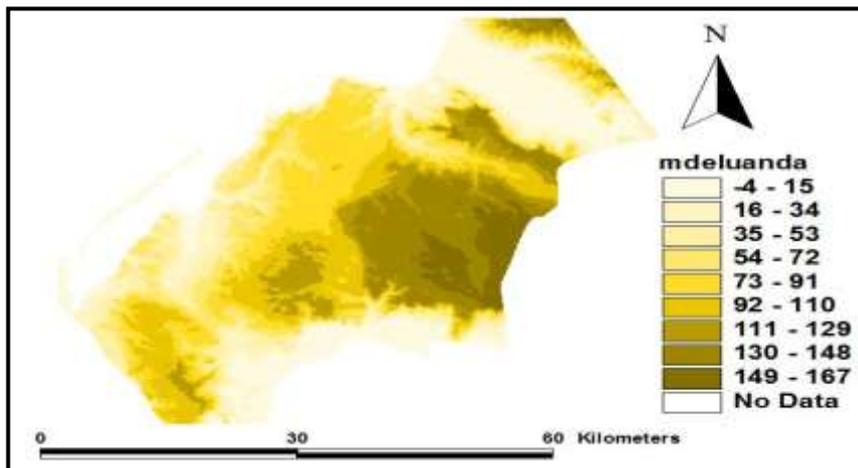


Figura 5. Matriz del modelo digital de elevaciones.

La Fm. Aluviales (AL) está constituida por sedimentos aluviales acumulados de los ríos Bengo y Cuanza y otros ríos intermitentes, constituidos principalmente por arenas. La formación Bom Jesús (BJ) constituye un acuífero debido a que en algunos lugares la roca caliza es la facie más pronunciada. La formación Quelo (Sr), como es conocido, está formada por depósitos de arena fina a tamaño de grano medio. Presentan alta transmisividad hidráulica, permitiendo la filtración para el fondo del subsuelo de las aguas pluviales. La formación Luanda-Cacuaco (LC) es la formación que retiene el agua; constituye el acuífero principal del sistema Quelo-Luanda. Las formaciones Cunga (CU), Funda (Fu), Gratidao (Gr) y Quifangondo (Qu) son, básicamente, formaciones constituidas de arcillas y margas, por lo tanto, forman capas impermeables del sistema acuífero (Figura 6).

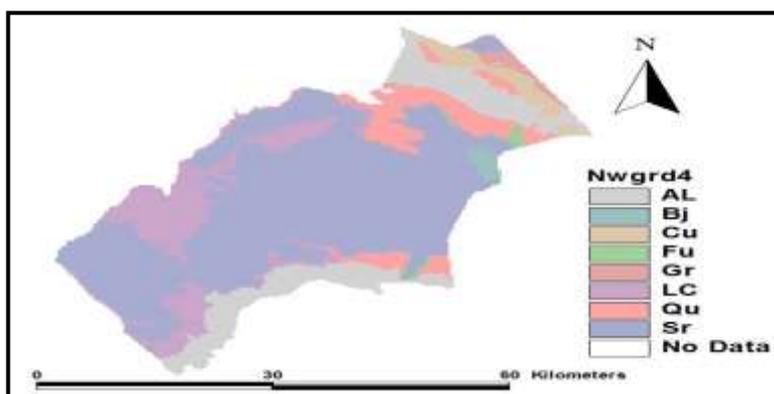


Figura 6. Matriz del mapa geológico del área de estudio.

La resistividad tiene valores menores para agua salada, valores intermedios para el agua salobre y valores relativamente altos para el agua dulce (Figura 7).

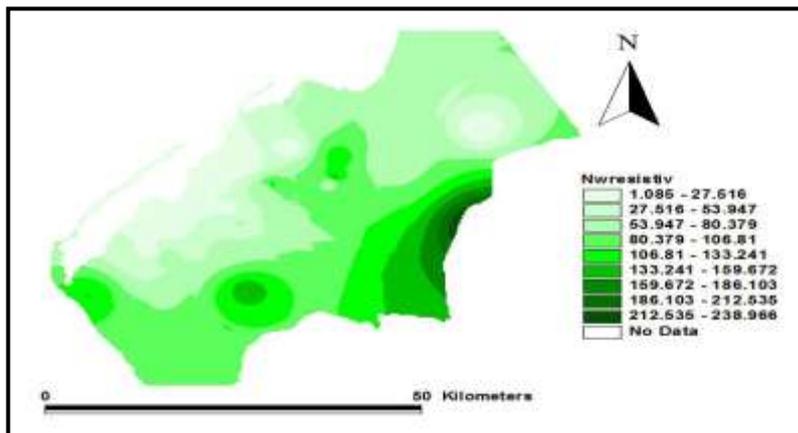


Figura 7. Grid de resistividad de las capas acuíferas.

La integración de todas las matrices en un modelo de lógica difusa dio lugar a la obtención del mapa de favorabilidad. La unidad de decisión lógica realiza operaciones de inferencia para obtener, a partir de la evaluación de los niveles de compatibilidad de las entradas con las condiciones impuestas por la base de reglas, una acción a ser realizada por el sistema (Souza *et al.* 2010).

Según Cox (1994), existe una etapa que es la desfuzzificación, donde los valores *fuzzy* son convertidos en números reales, teniendo así un conjunto de salida matemáticamente definido.

Se calcula la salida con base en la inferencia obtenida en el módulo Unidades de Decisión Lógica, con las funciones de pertinencia de las variables lingüísticas de la parte consecuente de las reglas para obtener una salida no difusa.

En esta etapa las regiones resultantes son convertidas en valores de salida del sistema, los cuales constituyen el modelo procurado, en este caso, el modelo de favorabilidad para la prospección de las aguas subterráneas en el área de estudio, Luanda (Figura 8).

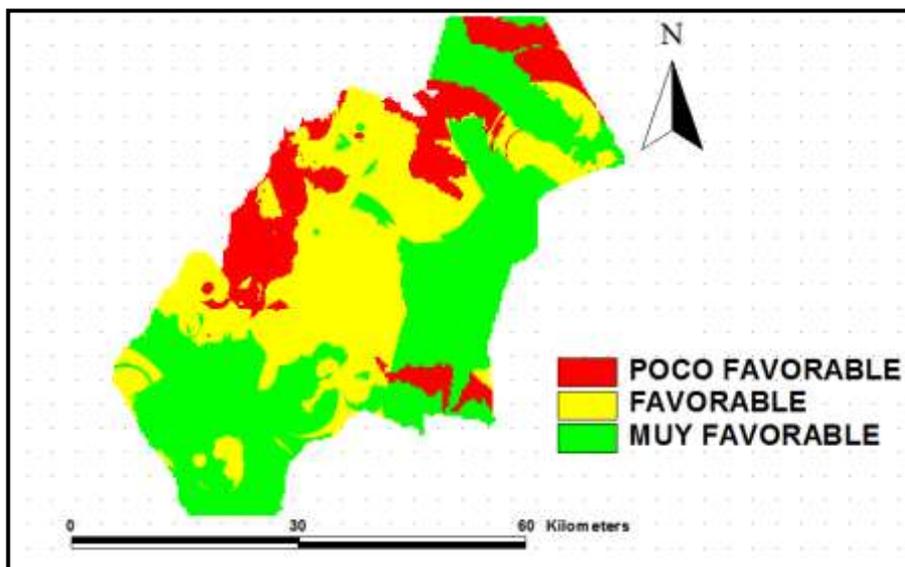


Figura 8. Mapa del modelo de favorabilidad para prospección de aguas subterráneas, Luanda.

La Figura 8 revela que toda la zona cercana a la costa es predominante del agua salada y salobre (color rojo), por lo que los pozos perforados cerca de esta zona tendrán agua salada a salobre, producto de la intrusión salina que los afecta. En la medida que se aleja de la costa, más para el este y sur del área de estudio, el agua va transicionando de salada para salobre y luego se torna más dulce (color verde)

4. CONCLUSIONES

- La metodología basada en técnica difusa permitió determinar zonas de favorabilidad para las condiciones geológicas de la provincia de Luanda, Angola. A partir de la integración de las variables se obtuvo el mapa modelo de favorabilidad de la región; el cual, en virtud de los resultados mostrados, constituye un buen indicador para la cartografía geológica en la prospección de acuíferos subterráneos

5. AGRADECIMIENTOS

A colectivos de profesores y estudiantes del departamento de geofísica de la Universidad Agosto Neto de la República de Angola, por facilitar los materiales, medios disponibles, por su permanente apoyo, intercambio, comprensión y colaboración.

6. REFERENCIAS

Cox, E. 1994: The fuzzy systems handbook: a practitioner's guide to building, using, and maintaining fuzzy systems. AP Professional, New York.

- ESRI 2002: ARCVIEW Gis 3. 3. Copyright © Environmental Systems Research Institute, Inc.
- KEMP, L. D.; BONHAM-CARTER, G. F.; RAINES, G. L. & LOONEY, C. G. 2001: ArcSDM: ArcView extension for spatial data modelling using weights of evidence, logistic regression, fuzzy logic and neural network analysis. Disponible en: http://ntsर्व.gis.nrcan.gc.ca/sdm/default_e.htm.
- KUMAR, U.; KUMAR, B. & MALLICK, N. 2013: Groundwater Prospects Zonation Based on RS and GIS Using Fuzzy Algebra in Khoh River Watershed, Pauri-Garhwal District, Uttarakhand, India. *Global Perspectives on Geography (GPG)* 1(3), August.
- ZADEH, L. A. 1965: Fuzzy Sets. *Information and Control* 8(3): 338-353.
- MAGALHÃNES, A. S.; MORAIS, J. P. & COLOMBO, E. M. M. 2009: Plataforma sig: investigações geoelectricas para a prospecção hidrogeologica na provincia de Luanda. Tesis de diploma. Universidad Agostinho Neto, Angola.
- MIGUEL, G. L. 2001-2002: Sistema Aquífero Quelo, Luanda.
- MONJEZI, N.; RANGZAN, K.; TAGHIZADE, A. & NEYAMADPOUR, A. 2013: Site selection for artificial groundwater recharge using GIS and Fuzzy logic. *International Journal of Engineering & Technology* 1(5): 294-309.
- FERNÁNDEZ-NÚÑEZ, H. M. 2006: Metodología para cartografiar la influencia de factores geoambientales en la distribución espacial de los índices de salud. Tesis doctoral. Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, La Habana.
- RATHER, J. A. & ANDRABI, Z. 2012: Fuzzy Logic Based GIS Modeling for Identification of Ground Water Potential Zones in the Jhagrabaria Watershed of Allahabad District, Uttar Pradesh, India. *International Journal of Advances in Remote Sensing and GIS* 1(2): 218-233.
- SOUZA, A. P. DE; ZOMER, C.; LOCKS, H. LUIZ FERNÁNDES, M. B.; FERNÁNDES, N. J. 2010: Lógica Difusa. Disponible en: http://www.gsigma.ufsc.br/~popov/aulas/icpg/20081/Logica_Difusa_Artigo.pdf
- STATISTICA 12. 2016: USA Headquarters 2300 East 14th Street Tulsa, OK 7410.
- SHAHID, S.; NATH, S. K. & MAKSUD-KAMAL, A. S. M. 2002: GIS integration of remote sensing and topographic data using fuzzy logic for ground water assessment in Midnapur District, India. *Geocarto International* 17(3): 69-74.

- MANAP, M. A.; NAMPAK, H.; PRADHAN, B.; LEE, S.; SULAIMAN, W. N. A. & RAMLI, M. F. 2014: Application of probabilistic-based frequency ratio model in groundwater potential mapping using remote sensing data and GIS. *Arabian Journal of Geosciences* 7(2): 711-724.
- MANAP, M. A.; SULAIMAN, W. N. A.; RAMLI, M. F.; PRADHAN, B. & SURIP, N. 2013: A knowledge-driven GIS modeling technique for groundwater potential mapping at the Upper Langat Basin, Malaysia. *Arabian Journal of Geosciences* 6(5): 1621-1637.
- D'ERCOLE, C.; GROVES, D. I. & KNOX-ROBINSON, C. M. 2000: Using fuzzy logic in a Geographic Information System environment to enhance conceptually based prospectivity analysis of Mississippi Valley-type mineralisation. *Australian Journal of Earth Sciences* 47(5): 913-927.
- RAHMATI, O.; SAMANI, A. N.; MAHDAVI, M.; POURGHASEMI, H. R. & ZEINIVAND, H. 2015: Groundwater potential mapping at Kurdistan region of Iran using analytic hierarchy process and GIS. *Arabian Journal of Geosciences* 8(9): 7059-7071.

Moisés Catanha. moisescatanha@hotmail.com

Universidade Agostino Neto.

Luanda. Angola.

Carlos Sacasas León. cs1@civil.cujae.edu.cu

Instituto Superior Politécnico "José Antonio Echeverría"

La Habana. Cuba.

José Pérez Lazo. jperezl@civil.cujae.edu.cu

Instituto Superior Politécnico "José Antonio Echeverría"

La Habana. Cuba.

Estudio de basaltos mediante espectroscopía de plasma inducido por láser (LIBS) para la fabricación de bloques de lapilli

Ismael De la Viuda-Pérez
Rafael Navarro-Azor
Emmanuel Alexis Lalla
Jose A. Rodríguez-Losada
Roberto Aquilano
Jesús Medina
Fernando Rull-Pérez

Resumen

Se analizaron mediante espectroscopía de plasma inducido por láser (LIBS), espectroscopía Raman y difracción de rayos x (XRD) muestras seleccionadas de diversas zonas de Tenerife, con el objetivo de identificar su composición química elemental y mineralógica. Los resultados mostraron los elementos mayoritarios siguientes: O, F, Na, K, Mg, Al, Si, Ca, Ti y Fe. La identificación de las muestras, mediante espectroscopía Raman y XRD, mostró una mineralogía de tipo basáltica coincidente con los resultados de composición elemental LIBS. Los resultados de los análisis con instrumentación portátil demuestran la aplicabilidad de la espectroscopía LIBS y, en especial, en combinación con la espectroscopía Raman, para su utilización en la detección mineralógica-química en las zonas de extracción de basaltos y picón para la construcción en Tenerife.

Palabras clave: espectroscopía por plasma inducido; basaltos; minería; bloques de lapilli; material de construcción.

Studies of basalt through laser induced breakdown spectroscopy (LIBS) for the manufacturing of lapilli blocks

Abstract

Basaltic samples selected from different areas of Tenerife were analyzed by applying laser induced breakdown spectroscopy (LIBS), Raman spectroscopy and X Ray Diffraction (XRD) in order to identify the basic chemical composition and mineralogy. The basic composition obtained from the analysis was: O, F, Na, K, Mg, Al Si, Ca, Ti and Fe. Raman spectroscopic and XRD analyses indicated a basaltic mineralogy which is consistent with the basic composition results obtained from LIBS. The results of the analyses carried out using portable instrumentation proved the suitability of the LIBS, specially combined with the Raman spectroscopy for their application in the mineralogical-chemical identification in the areas where basalts and lapilli are extracted for construction works in Tenerife.

Keywords: LIBS; basalt; mining; lapilli blocks; construction rocks.

1. INTRODUCCIÓN

Hoy en día, la capacidad de caracterizar adecuadamente la composición química elemental de un material y, más aún, el control de sus posibles modificaciones *in situ* es fundamental durante la etapa de producción y resulta imprescindible a la hora de determinar la calidad de un producto y los métodos industriales a utilizar (Skibsted & Hall 2008). De esta manera, en las últimas décadas ha habido una demanda creciente de nuevas técnicas de caracterización de superficies, en especial, aquellos métodos que presentan rapidez, versatilidad y costos razonables.

Entre los nuevos métodos se pueden destacar los sistemas espectroscópicos y láseres, que debido al avance de la tecnología, tanto en detectores (CCD) como en láseres de estado sólido, han permitido grandes avances en dicho campo (Kim & Hwang 2005; Kim *et al.* 2014).

Uno de los sistemas que ha ganado más aceptación para dichas aplicaciones es la espectroscopía de plasma inducido por láser (*Laser induced breakdown spectroscopy* -LIBS) debido a que presenta las siguientes ventajas: sencillez, no requiere preparación previa de las muestras, no es destructiva y puede implementarse *in situ* en la línea de producción y extracción de minerales (El-Deftar *et al.* 2015; Senesi 2014; El-Deftar *et al.* 2014).

Además, vale resaltar que esta técnica ha encontrado lugar en otros campos como es el estudio del patrimonio histórico y la investigación espacial. Entre ellos cabe destacar el actual sistema LIBS a bordo del Laboratorio analítico del Rover en Marte *Curiosity*-MSL (*Mars Science Laboratory*) de NASA, el cual permite la detección experimental de los afloramientos seleccionados para ser posteriormente analizados con los restantes instrumentos (Anderson *et al.* 2015; Courreges-Lacoste, Ahlers y Rull-Pérez 2007).

El método LIBS está basado en la espectroscopía de emisión atómica, donde un pulso láser con alta energía es capaz de generar un plasma a través del calor de vaporización, atomización y excitación de la superficie del material que se busca analizar (Radziemski & Cremers 2013; Courreges-Lacoste, Ahlers & Rull-Pérez 2007). De esta manera, el haz láser es enfocado sobre la superficie de una muestra, eleva la temperatura induciendo una ablación y formación de plasma. La radiación emitida por el plasma puede ser usada para obtener información cualitativa y semicuantitativa de las especies (Figure 1-a). Además, esta técnica, al pertenecer a la familia de las técnicas espectroscópicas, posibilita la combinación con otras técnicas láseres como la espectroscopía Raman o la espectroscopía infrarroja. La sinergia conjunta Raman-LIBS permite obtener tanto la composición química elemental como

su estructura molecular o mineral, siendo una caracterización *in situ*, rápida y no destructiva. Así, este tipo de análisis podría ser de gran interés en el campo de la industria de la construcción y extracción minera en las Islas Canarias.

Las zonas de interés para su uso son aquellas con alta concentración de materiales volcánicos de tipo lapilli basáltico (llamado "picón" en las Islas Canarias). Este material es un agregado natural, ampliamente utilizado para la construcción debido a su gran abundancia y facilidad de extracción, utilizándose, principalmente, como agregado grueso en bloques de hormigón (Sánchez-Fajardo, Torres & Moreno 2014). Además, su ligera densidad y alta fracción de huecos permiten llamarlos bloques "picón" ya que tienen rangos de densidad de ancho, desde 1 300 kg/m³ hasta 2 000 kg/m³, clasificándose como hormigón ligero (Sánchez-Fajardo, Torres & Moreno 2014).

Aunque la durabilidad y calidad del material viene determinada por la concentración de elementos químicos y composición mineral, siendo los de mejor calidad aquellos que presentan la siguiente composición: (a) mineralógica: óxidos (magnetita, hematite, anatasa, sílice), piroxenos (diópsido y augita), olivino (forsterita), feldespatos (anortoclasa, ortoclasa, microclina, sanidina, anortita, albita, andesina y labradorita) y arcillas; (b) elemental: O, F, Na, K, Mg, Al, Si, Ca, Ti, Fe.

En el presente trabajo se realiza el análisis mediante espectroscopía LIBS de materiales procedentes de diferentes lugares de la isla como posibles zonas potenciales de extracción que presentan distintas mineralogías, asignándose e identificándose las líneas espectrales de los compuestos reportados en la literatura. Además, se busca establecer las ventajas del LIBS para el uso *in situ* de la valoración y extracción de material en la fabricación del ladrillo picón en Canarias como, así también, la posibilidad del uso de un futuro sistema LIBS-Raman en la industria minera canarias. Los análisis elementales y estructurales permitirán obtener información *in situ* de las zonas de extracción más convenientes para la futura fabricación del ladrillo picón, atendiendo a la mineralogía de cada zona.

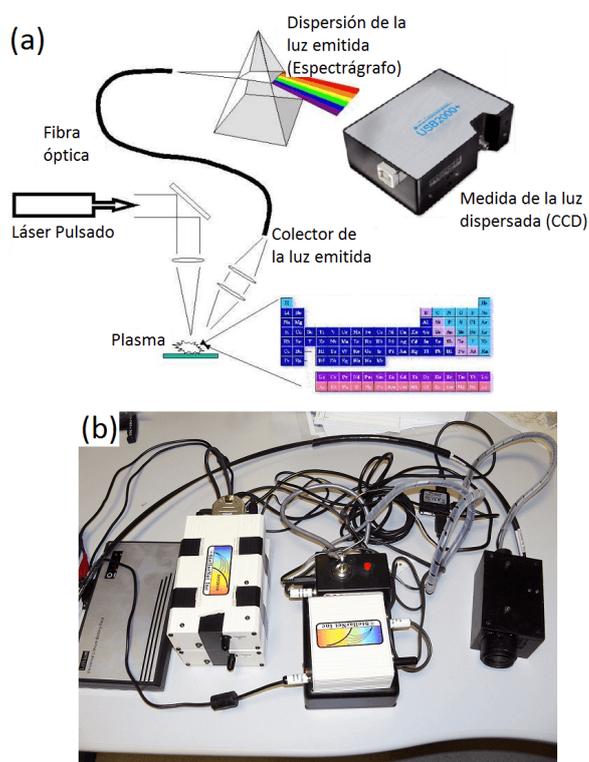


Figura 1. (a) Esquema de funcionamiento del sistema LIBS (Laser Induced Break Down Spectroscopy). (b) Sistema StellarNet disponible en la Unidad Asociada UVA-CSIC al Centro de Astrobiología.

1.1. Breve descripción geológica de la zona de estudio

La zona de estudio se encuentra en el valle de Güimar presentando una morfología constituida por erupciones volcánicas que han producido importantes edificios volcánicos por acumulación de lapilli (roca conocida en Canarias como picón). Entre las erupciones más importantes se encuentran las históricas (como las del volcán de Las Arenas y el volcán del Chinyero) que datan de hace aproximadamente 500 años, estando perfectamente registradas en los libros históricos de la isla de Tenerife (Lalla *et al.* 2015, 2016).

La erupción del volcán de las Arenas tuvo lugar en 1705. La actividad se inició el 2 de febrero y finalizó el 27 de marzo de ese año. Este volcán está localizado en la vertiente meridional de la Caldera de Pedro Gil, a unos 1 525 m de altitud. El fenómeno de Las Arenas, junto con las erupciones de Siete Fuentes (que hizo erupción entre el 31 de diciembre de 1704 y el 5 de enero de 1705) y de Fasnia, se enmarca dentro de una misma dinámica eruptiva, de tipo lineal, desarrollada sobre un eje de dirección NE-SW a lo largo de 13 km, que constituye el último proceso de construcción volcánica de la dorsal de Tenerife (Lalla *et al.* 2010). El tipo de

lava que se produjo es de tipo AA que se caracteriza por presentar una superficie plana, irregular, resultante de la pérdida rápida de gases.

La erupción fue en forma de coladas que se detuvo justo antes de llegar al mar. Desde el punto de vista petrológico este basalto presenta piroxenos con fenocristales idiomorfos (de tamaño milimétrico). El olivino detectado es forsterita 60-80 y los clino-piroxenos son augita. La matriz está compuesta de micro-cristal acicular de plagioclasas, augita, olivinos y opacos idiomorfos de diferente tamaño (Lalla *et al.* 2015, 2016).

Por otro lado, el volcán del Chinyero, que se encuentra en una zona denominada Dorsal Noroeste, en conjunto con otros volcanes como el de las Cuevitas o el de Boca Cangrejo, entró en erupción en 1909 dentro del municipio de Santiago del Teide. Los materiales de este entorno volcánico son íntegramente basálticos, constituidos por conos, lavas y malpaís, que se establecen a modo de islotes (Lalla *et al.* 2015, 2016). Desde el punto de vista petrológico se trata de un basalto constituido por fenocristales de augita diopsídica, cristales de olivino, cristales de feldespatos y plagioclasas idiomorfos (Carracedo 2011). También cabe destacar los volcanes de Abeñamo, Pino de don Tomás, Montaña Colorada, Montaña de las Dos Tetas, Montaña de los Guirres, Montaña de la Mar y la Montaña Grande o Montaña del Socorro. De esta manera, el valle de Güimar presenta una gran variedad mineralógica bastante importante con basaltos, piedra pómez y una gran acumulación de lapilli.

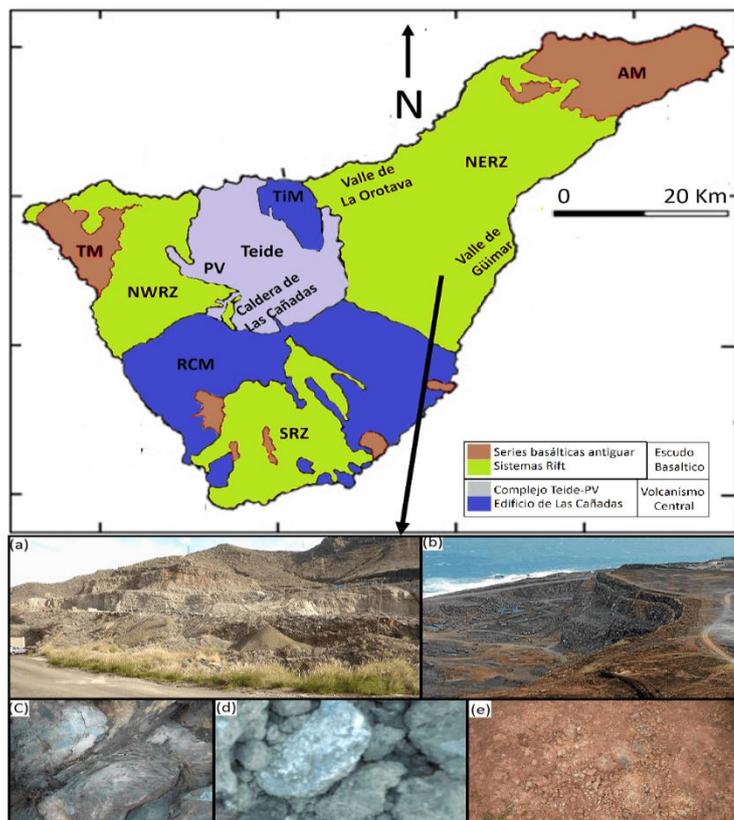


Figura 2. Mapa simplificado de la isla de Tenerife ilustrando los afloramientos de los escudos basálticos y la situación geográfica de las zonas de interés. (a-b) Zonas de muestras recolectadas, (c-e) zonas *in situ* de muestras recolectadas y muestras catalogadas y analizadas. (TM: Macizo de Teno, NWRZ: Zona de rift noroeste, SRZ: Zona de rift sur, NERZ; Zona de rift noreste, TiM: Macizo de Tigaiga, AM: Macizo de Anaga, PV: Pico Viejo, RCM: Macizo roque del Conde)

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Las muestras se obtuvieron de diferentes entornos volcánicos de Tenerife donde algunos podrían utilizarse como posibles canteras de extracción (no pertenecientes a Parques Nacionales o reservas naturales) a través de diversas campañas. El instrumental utilizado para las medidas de LIBS es un equipo completo StellarNet PORTA-LIBS 2000 modelo MK106-10. El láser pulsado es Kigres modelo MK367 Nd:YAG (1064 nm) que cuenta con un módulo trigger modelo MK367TM y una potencia 30 mJ con 6 ns, 1 Hz. El espectrómetro StellarNet es un modelo EPP2000-LSR-VIS4-14, cuenta con dos unidades de redes de difracción fija y unos rangos espectrales de 400 nm a 600 nm (unidad 1) y 600 nm a 850 nm (unidad 2). Además, el equipo cuenta con conexiones USB2EPP en la unidad 1 y 2, respectivamente. Este instrumento pertenece a la Unidad Asociada UVa-CSIC al Centro de Astrobiología, situada en el Parque Tecnológico de Boecillo (Valladolid) y se muestra en la Figura 1-b. Los espectros de los

plasmas se adquirieron con un tiempo de integración estándar del equipo. Para la comparación de las mediciones espectrales se utilizó la base de datos espectrales del NIST. Los sistemas de difracción de rayos X para el análisis de las muestras se encuentran disponibles en la Universidad de Valladolid y en la Unidad Asociada UVA-CSIC al Centro de Astrobiología de la Universidad de Valladolid.

Se utilizó un sistema PANalytical Philips PW1710 equipado con un ánodo de Cu, rendija automática divergente y monocromador de grafito. Las condiciones experimentales fueron las siguientes: radiación $\text{CuK}\alpha$, $\lambda=0,154$ nm, filtro de Ni, portamuestras de Al, tensión del generador 40 kV, corriente del generador 30 mA, relación de intensidades (α_2/α_1) de 0,500 y análisis (2θ) de 50 a 70°. La asignación de los máximos de difracción se realizó mediante comparación con los ficheros JCPDS. Además, se realizaron medidas de espectroscopía Raman en la Unidad Asociada UVA-CSIC al Centro de Astrobiología de la Universidad de Valladolid con equipos comerciales.

Los espectros obtenidos se compararon con los de base de datos propia y muestras estándares. El equipo instrumental de micro-Raman usado está compuesto por: un Láser He-Ne de 632,8 nm, de 35 mW de potencia, modelo LSRP-3501 Research Electro-Optics; un espectrógrafo Kaiser modelo HoloSpec f/1.8i con una red de difracción fijada para 633 nm, trabajando en la zona espectral de 200-3800 cm^{-1} con una resolución máxima de 4 cm^{-1} ; un detector Andor CCD modelo Idus DV420A-OE-130 con una resolución 1 024x128 de pixel con un tamaño de pixel de 26x26 μm ; una pletina motorizada en 3D: Prior Proscan II modelo H3V04 con posibilidad de programación automática; un microscopio Nikon modelo Eclipse E600 con posibilidad de magnificación de 10x, 20x, 50x y 100x; Cabezal Raman Jobin-Yvon 633 nm, UMS type; y una cámara CCD de control: cámara CCD para microscopio JVC modelo TK-C1381EG PAL con una resolución de 768x576.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. LIBS

De acuerdo con las mediciones realizadas para cada una de las muestras se llevaron a cabo variaciones de la distancia del sensor a la cabeza del láser, de la cabeza del láser y del ángulo de incidencia respecto a la normal del plano perpendicular del sensor para obtener las medidas más eficientes y con mayor intensidad. Los resultados de las muestras seleccionadas se recogen en la Tabla 1 (siendo las que presentan diferente morfología), donde se recopilan los elementos identificados en cada una de las muestras,

debido a la gran variedad de muestras analizadas (18 análisis sobre diversos puntos). La composición elemental obtenida a través de los análisis LIBS está en consonancia con la mineralogía detectada en cada una de las muestras realizadas a través de la espectroscopía Raman y difracción de rayos X (DRX).

Los espectros fueron realizados en la región de 400 nm a 850 nm obteniendo los siguientes elementos: C, O, F, Na, Mg, Al, Si, K, Ca, Ti y Fe (Figura 3). Las medidas se hicieron en condiciones ambientales y las bandas de los distintos elementos se han visto solapadas por las producidas por el plasma del oxígeno proveniente de la atmósfera. Estas últimas presentan unas intensidades espectrales altas y se encuentran ubicadas en 715, 747, 770, 794, 822 y 844 nm.

En el caso del carbono y flúor, las bandas podrían tener el mismo origen aunque se han detectado materiales que contienen dichos elementos (Figura 4) mediante otras técnicas (Raman y DRX). Con respecto al tratamiento espectral de los datos obtenidos hay que tener en cuenta que el perfil espectral de las líneas de emisión está fuertemente alterada por la autoabsorción y la temperatura del medio ambiente circundante. Para evitar la ampliación adicional de las líneas es necesario medir con pulsos de láser muy corto (siendo una de las características del equipo). Además, existen otras causas de ampliación de anchura de las líneas espectrales como el efecto Doppler, pero en este caso se han ignorado.

Tabla 1. Composición elemental obtenida en las muestras catalogadas de la Figura 3a través de la tabla NIST y análisis mineral mediante Raman-DRX

Muestra	Composición elemental	Composición mineralógica
Muestra 1	C, O, F, Al, Si, K, Ti, Fe	Feldespatos, óxidos, fosfatos y carbonatos
Muestra 2	O, Na, Mg, Al, Si, K, Ca, Fe	Feldespatos, anfíbol y piroxenos
Muestra 3	C, O, Na, Mg, Al, Si, Ca, Ti, Fe	Feldespatos, plagioclasas, óxidos y carbonatos
Muestra 4	O, F, Na, K, Mg, Al, Si, Ca, Ti, Fe	Feldespato, óxidos, carbonatos y piroxenos
Muestra 5	O, F, Al, Si, K, Ti, Fe	Feldespato, piroxenos, óxidos y olivino
Muestra 6	O, F, Na, K, Mg, Al, Si, Ca, Ti, Fe	Feldepato, fosfato, plagioclasas, piroxenos y óxidos
Muestra 7	O, Na, K, Mg, Al, Si, Ca, Fe	Feldepatos, plagioclasas, piroxenos y óxidos
Muestra 8	O, K, Mg, Al, Si, Ca, Ti, Fe	Plagioclasas, óxidos y olivinos

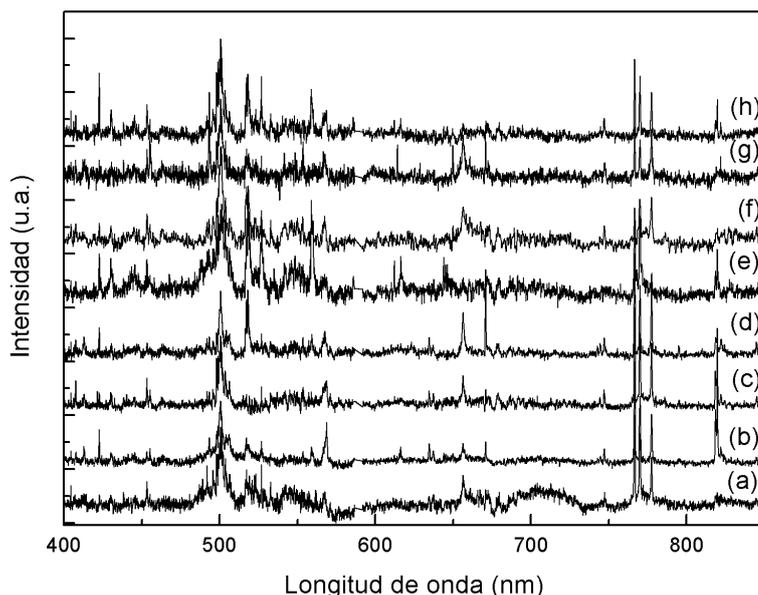


Figura 3. Selección de espectros LIBS de las muestras analizadas: (a) Muestra 1, (b) Muestra 2, (c) Muestra 3, (d) Muestra 4, (e) Muestra 5, (f) Muestra 6, (g) Muestra 7 y (h) Muestra 8.

En la Tabla 2 se reportan las líneas espectrales de los elementos analizados junto con las posiciones de las líneas espectrales, teniendo en cuenta las tablas NIST. Además, las medidas fueron comparadas con el análisis de óxidos que contienen la composición detectada. Algunos elementos como Al, Na, Ti y Fe poseen la mayoría de líneas de emisión por debajo de 400 nm, aunque no son las más intensas y han sido omitidas en la Tabla 2 (*National Institute of Standards and Technology 2016*). Por otra parte, algunas líneas están solapadas debido a la cercanía con otras bandas, las cuales no pueden verse resueltas. Por ejemplo, se pueden destacar las líneas a 500 nm correspondientes al Ca solapadas por las generadas por el plasma del Si a 504-5 y las bandas espectrales del Ti en 430 nm solapadas por las vibraciones del flúor en 427 nm, entre otras (*National Institute of Standards and Technology 2016*).

Tabla 2. Líneas espectrales de los elementos analizados mediante LIBS para el análisis de basaltos.

Elemento químico	Posición de las líneas espectrales más intensas (nm) - NIST
Oxígeno (O)	533, 596, 604, 615, 645, 665, 700, 715, 725, 747, 748, 770, 777, 794, 795, 798, 822, 823, 844
Flúor (F)	424, 427, 442, 500, 517, 558, 575, 601, 604, 609, 614, 624, 634, 641, 669, 677, 679, 685, 703, 731, 739, 775, 780,
Sodio (Na)	588, 589, 818, 819
Magnesio (Mg)	457, 470, 516, 517, 518, 552, 571, 880
Aluminio (Al)	466, 559
Silicio (Si)	413, 504, 505, 520, 546, 570, 595, 597, 634, 637, 728, 742, 785
Calcio (Ca)	500, 530, 645, 760, 813, 820, 824, 825, 849, 854
Titanio (Ti)	430, 453, 498, 499, 500
Hierro (Fe)	404, 438, 516

3.2. Espectroscopía Raman

Los resultados Raman se pueden observar en la Figura 4 y la lista de las especies minerales está compilada en la Tabla 3, teniendo en cuenta la catalogación mineral de Dana y sus vibraciones principales. Además, el sistema Raman ha permitido detectar una gran cantidad de especies minerales en una forma no destructiva. La identificación mineral-estructural se ha realizado mediante las siguientes referencias: óxidos de hierro (Jubb & Allen 2010; Rull-Pérez, Martínez-Frias & Rodríguez-Losada 2007), óxidos de titanio (Sekiya *et al.* 2001; Lukačević *et al.* 2012), sílice y cuarzo (Zotov *et al.* 1999; Karwowski *et al.* 2013), carbonatos (Koura *et al.* 1996; Buzgar & Apopei 2009), sulfatos (Buzgar, Buzatu & Sanislav 2009; Chio, Sharma & Muenow 2005), silicatos (Freeman *et al.* 2008), zeolitas (Frost *et al.* 2014; Chen *et al.* 2007) y arcillas (Frost *et al.* 2001; Martens *et al.* 2002; Haley, Wylie & Koningstein 1982).

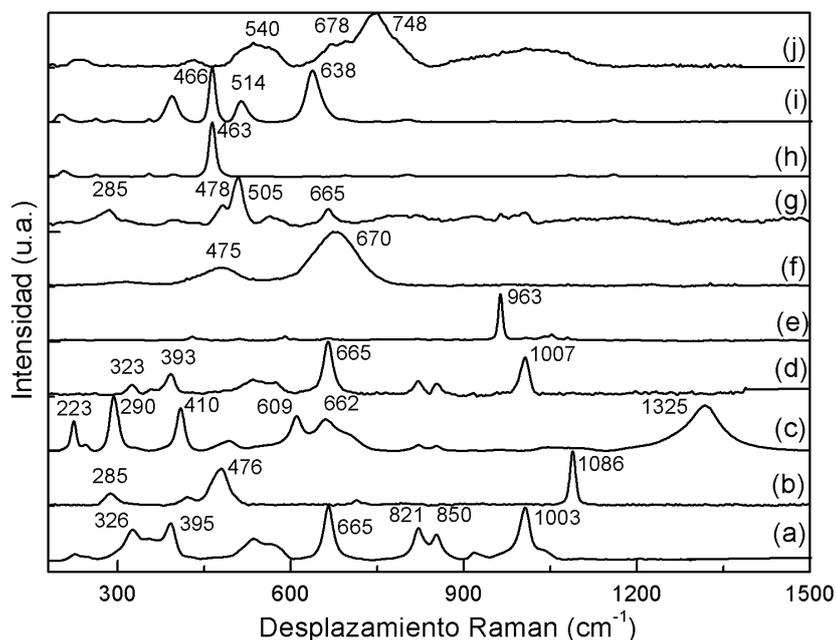


Figura 4. Espectro Raman de algunas especies minerales detectadas en las diferentes muestras. (a) Olivino (forsterita (Mg_2SiO_4)) y piroxenos (diópsido ($MgCaSi_2O_6$) y augita ($(Ca,Mg,Fe)_2(Si,Al)_2O_6$)); (b) Carbonatos (calcita ($CaCO_3$)); (c) Óxidos (hematite (Fe_2O_3)); (d) Feldespatos ($(K,Na,Ca,Ba,NH_4)(Si,Al)_4O_8$) y plagioclasas ($(Na,Ca)(Si,Al)_3O_8$); (e) Sulfatos ($MgSO_4$); (f) Óxidos (magnetita (Fe_3O_4)); (g) Plagioclasas ($(Na,Ca)(Si,Al)_3O_8$); (h) Óxidos (cuarzo (SiO_2)); (i) Oxidos (cuarzo (SiO_2) y anatasa (TiO_2)); y (j) Anfíbol (actinolita ($Ca_2(Mg,Fe^{2+})_5Si_8O_{22}(OH)_2$)), piroxeno y sílice amorfa (SiO_2).

Tabla 3. Lista de minerales caracterizados por espectroscopía Raman y su formulación química

Tipo	Mineral	Fórmula química	Bandas Raman principal (cm^{-1})
Óxidos de Hierro	Magnetita	Fe_3O_4	550, 670
	Hematite	Fe_2O_3	295, 607, 1315
Óxidos de Titanio	Anatasa	TiO_2	393, 512, 635
Carbonato	Calcita	$CaCO_3$	712, 1083, 1370
Fosfato	Apatito	$Ca_5(PO_4)_3(F, Cl, OH)$	433, 587, 963
Silicatos y feldespatos	Cuarzo	SiO_2	463
	Ortoclasa	$KAlSi_3O_8$	280, 454, 473, 512
	Anortoclasa	$(Na,K)AlSi_3O_8$	456, 474, 511
	Sanidina	$(K,Na)(Si,Al)_4O_8$	456, 470, 511
	Oligoclasa	$(Na,Ca)(Si,Al)_4O_8$	480, 508
	Anortita	$CaAl_2Si_2O_8$	471, 487, 509

	Albita	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$	459, 507
Olivino	Forsterita	$(\text{Fe, Mg})\text{SiO}_4$	820,853
Piroxenos	Diópsido	$\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$	323, 388,663, 1009
	Augita	$(\text{Ca,Mg,Fe})_2(\text{Si,Al})_2\text{O}_6$	325, 390,536, 665, 1003
Anfíbol y arcillas	Actinolita	$\text{Ca}_2(\text{Mg,Fe}^{2+})_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$	224,369,393,414, 676
	Moscovita	$\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$	290, 406, 700, 1100

3.3. Análisis XRD

La identificación mineral se ha realizado usando el programa Xpoder (Martin-Ramos 2004) y el programa Match!, la base de datos del *Crystallography Open Database* (COD), el sistema ICDD (*International Centre for Diffraction Data*) en PDF-2 (*Power Diffraction Files*) y los ficheros JCPDS (*Joint Committee on Powder diffraction Standards*). La identificación de los difractogramas de las muestras se encuentra detallada en la Tabla 1 comparativamente donde aparece la mineralogía primaria y secundaria.

4. DISCUSIÓN

Los resultados LIBS han detectado los siguientes elementos químicos: O, F, Na, K, Mg, Al, Si, Ca, Ti, Fe, siendo los compuestos que conforman las especies minerales encontradas mediante espectroscopía Raman. Además, la difracción de rayos X ha confirmado los resultados. Las técnicas por separado han demostrado ser muy eficientes en el campo de la investigación científica, ciencias planetarias, exploración espacial y aplicaciones industriales/tecnológicas, como la industria farmacéutica.

En el caso presentado aquí, el uso de LIBS en minería e industria minera es muy prometedor, siendo un sistema de medida *in situ* no destructivo, rápido y eficaz para realizar medidas preliminares de las zonas de interés para extracción de la materia prima mineral más óptima. Actualmente, hay varias compañías como SciAps, la cual ha creado sistemas LIBS portátiles (Geochem App) para la minería y exploración geológica. Por otro lado, HoneyBee Robotics está realizando *rovers* con sistemas LIBS acoplados como el sistema *Honeybee LIBS Analyzer* o *MAYA-Industry*. Pero, la combinación de las técnicas LIBS-Raman permite la sinergia de la identificación de fases minerales junto con la detección molecular y composición elemental, abriendo un gran campo de aplicaciones para estas técnicas espectroscópicas.

Es de importancia detallar los diversos sistemas que se encuentran en desarrollo tanto remoto como *in situ*. En caso de los sistemas combinados remotos se han probado sistemas Raman-LIBS capaces de

medir hasta 200 m de distancia, especialmente enfocados al análisis de superficie planetaria y, en el caso de las aplicaciones, han sido utilizados para detección de explosivos, como así también de drogas. Los sistemas combinados *in situ* han encontrado más campo de acción en el análisis de pigmentos en patrimonio cultural e histórico, análisis de muestras geológicas y la industria farmacéutica. Pero los sistemas combinados Raman-LIBS para aplicaciones mineras se encuentran en fase de desarrollo, entre ellos caben destacar los prototipos de *FirestarLabs Technologies*.

La investigación continua de estos sistema y las pruebas de futuros prototipos en las islas Canarias podrían abrir un gran abanico de posibilidades tecnológicas en el campo de la geoespectroscopía debido a las ventajas que presentan las islas Canarias en la diversidad geológica, fácil acceso a las zonas y el aprovechamiento de los prototipos que se están llevando a cabo en otros campos como las ciencias planetarias, pero con un posible enfoque en la industria o extracción minera.

5. CONCLUSIONES

- Los resultados preliminares demostraron que la técnica LIBS presenta un gran interés como futura aplicación en la industria de la extracción minera en Canarias para la fabricación del ladrillo picón (cemento ligero) de uso fundamental en la construcción. Se obtuvo, por primera vez, la composición elemental de algunas muestras de zonas basálticas de la isla de Tenerife, procedentes de las zonas de extracción, para la fabricación de bloques de picón. Los elementos identificados C, O, F, Na, K, Mg, Al, Si, Ca, Ti y Fe fueron comparados con las tablas NIST. Además, ciertos elementos, a pesar de haber sido identificados, se encuentran solapados debido a la cercanía de las líneas espectrales de los distintos elementos. Los resultados fueron complementados mediante espectroscopía Raman y difracción de rayos X, permitiendo la sinergia de estos sistemas la identificación estructural y caracterización físico-química de la mineralogía de los afloramientos estudiados. El futuro desarrollo de estos sistemas Raman-LIBS, especialmente enfocados a la minería, podrían establecer un sistema competitivo en Canarias, tanto industrial como tecnológico, para la industria minera.

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer al MINECO por el apoyo económico prestado a través de los proyectos de investigación AYA2008-04529-ES y AYA2011-30291-C02-01. Los autores también desean agradecer a la

Universidad de La Laguna su apoyo y organización en las distintas campañas realizadas.

7. REFERENCIAS

- ANDERSON, R.; et.al. 2015: ChemCam results from the Shaler outcrop in Gale crater, Mars. *Icarus* 249: 2-21.
- BUZGAR, N. & APOPEI, A. I. 2009: The Raman study of certain carbonates. *Analele Stiintifice de Universitatii AI Cuza din Iasi. Sect. 2, Geologie* 55(2): 97.
- BUZGAR, N.; BUZATU, A. & SANISLAV, I. V. 2009: The Raman study on certain sulfates. *Analele Stiintifice de Universitatii AI Cuza din Iasi. Sect. 2, Geologie* 55(1): 5.
- CARRACEDO, J. C. 2011: *Geología de Canarias I (Origen, evolución, edad y volcanismo)*. Editorial Rueda, Santa Cruz de Tenerife.
- CHEN, Y.; et.al. 2007: Discovery of CH₄-rich high-pressure fluid inclusions hosted in analcime from Dongying depression, China. *Journal of Petroleum Science and Engineering* 56(4): 311-314.
- CHIO, C. H.; SHARMA, S. K. & MUENOW, D. W. 2005: Micro-Raman studies of hydrous ferrous sulfates and jarosites. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy* 61(10): 2428-2433.
- COURREGES-LACOSTE, G. B.; AHLERS, B. & PÉREZ, F. R. 2007: Combined Raman spectrometer/laser-induced breakdown spectrometer for the next ESA mission to Mars. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy* 68(4): 1023-1028.
- EL-DEFTAR, M. M.; ROBERTSON, J.; FOSTER, S. & LENNARD, C. 2015: Evaluation of elemental profiling methods, including laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS), for the differentiation of Cannabis plant material grown in different nutrient solutions. *Forensic science international* 251: 95-106.
- EL-DEFTAR, M. M.; et.al. 2014: Assessment and forensic application of laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS) for the discrimination of Australian window glass. *Forensic science international* 241: 46-54.
- FREEMAN, J. J.; WANG, A.; KUEBLER, K. E.; JOLLIFF, B. L. & HASKIN, L. A. 2008: Characterization of natural feldspars by Raman spectroscopy for future planetary exploration. *The Canadian Mineralogist* 46(6): 1477-1500.

- FROST, R. L.; FREDERICKS, P. M.; KLOPROGGE, J. T. & HOPE, G. A. 2001: Raman spectroscopy of kaolinities using different excitation wavelengths. *Journal of Raman Spectroscopy* 32(8): 657-663.
- FROST, R. L.; LÓPEZ, A.; THEISS, F. L.; ROMANO, A. W. & SCHOLZ, R. 2014: A vibrational spectroscopic study of the silicate mineral analcime-Na₂ (Al₄SiO₄O₁₂) · 2H₂O-A natural zeolite. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy* 133: 521-525.
- HALEY, L. V.; WYLIE, I. W. & KONINGSTEIN, J. A. 1982: An investigation of the lattice and interlayer water vibrational spectral regions of muscovite and vermiculite using Raman microscopy. A Raman microscopic study of layer silicates. *Journal of Raman Spectroscopy* 13(2): 203-205.
- JUBB, A. M. & ALLEN, H. C. 2010: Vibrational spectroscopic characterization of hematite, maghemite, and magnetite thin films produced by vapor deposition. *ACS Applied Materials & Interfaces* 2(10): 2804-2812.
- KARWOWSKI, Ł.; HELIOS, K.; KRYZA, R.; MUSZYŃSKI, A. & DROŹDŹEWSKI, P. 2013: Raman spectra of selected mineral phases of the Morasko iron meteorite. *Journal of Raman Spectroscopy* 44(8): 1181-1186.
- KIM, J.; CHOI, K. J.; BAHN, C. B. & KIM, J. H. 2014: In situ Raman spectroscopic analysis of surface oxide films on Ni-base alloy/low alloy steel dissimilar metal weld interfaces in high-temperature water. *Journal of Nuclear Materials* 449(1): 181-187.
- KIM, J. H. & HWANG, I. S. 2005: Development of an in situ Raman spectroscopic system for surface oxide films on metals and alloys in high temperature water. *Nuclear Engineering and Design* 235(9): 1029-1040.
- KOURA, N.; et.al. 1996: Alkali carbonates: Raman spectroscopy, ab initio calculations, and structure. *Journal of molecular structure* 382(3): 163-169.
- LALLA, E. A.; et.al. 2010. Espectroscopía Raman de Basaltos Correspondientes al Volcán de Las Arenas, Tenerife. *Macla* 13(1): 129-130.
- LALLA, E. A.; et.al. 2016: Raman-IR vibrational and XRD characterization of ancient and modern mineralogy from volcanic eruption in Tenerife Island: Implication for Mars. *Geoscience Frontiers* 7(4): 673-681.
- LALLA, E. A.; et.al. 2015: Estudio espectroscópico y DRX de afloramientos terrestres volcánicos en la isla de Tenerife como posibles análogos de la geología marciana. *Estudios Geológicos* 71(2): 1-19.

- LUKAČEVIĆ, I.; GUPTA, S. K.; JHA, P. K. & KIRIN, D. 2012: Lattice dynamics and Raman spectrum of rutile TiO₂: the role of soft phonon modes in pressure induced phase transition. *Materials Chemistry and Physics* 137(1): 282-289.
- MARTENS, W. N.; DING, Z.; FROST, R. L.; KRISTOF, J. & KLOPROGGE, J. T. 2002: Raman spectroscopy of hydrazine-intercalated kaolinite at 77, 298, 323, 343 and 358 K. *Journal of Raman Spectroscopy* 33(1): 31-36.
- MARTIN-RAMOS, J. D. 2004: X Powder: A Software Package for Powder X-Ray Diffraction Analysis Powder Methods. S.l., s.n.
- NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY, 2016: LIBS Spectral bands NIST -Database. [en línea]. Disponible en: <http://www.nist.gov/pml/data/asd.cfm>.
- RADZIEMSKI, L. & CREMERS, D. 2013: A brief history of laser-induced breakdown spectroscopy: from the concept of atoms to LIBS 2012. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy* 87: 3-10.
- RULL-PÉREZ, F.; MARTINEZ-FRIAS, J. & RODRÍGUEZ-LOSADA, J. A. 2007: Micro-Raman spectroscopic study of El Gasco pumice, western Spain. *Journal of Raman Spectroscopy* 38(2): 239-244.
- SÁNCHEZ-FAJARDO, V. M.; TORRES, M. E. & MORENO, A. J. 2014: Study of the pore structure of the lightweight concrete block with lapilli as an aggregate to predict the liquid permeability by dielectric spectroscopy. *Construction and Building Materials* 53: 225-234.
- SEKIYA, T.; OHTA, S.; KAMEI, S.; HANAKAWA, M. & KURITA, S. 2001: Raman spectroscopy and phase transition of anatase TiO₂ under high pressure. *Journal of Physics and Chemistry of Solids* 62(4): 717-721.
- SENESI, G. S. 2014: Laser-Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS) applied to terrestrial and extraterrestrial analogue geomaterials with emphasis to minerals and rocks. *Earth-Science Reviews* 139: 231-267.
- SKIBSTED, J. & HALL, C. 2008: Characterization of cement minerals, cements and their reaction products at the atomic and nano scale. *Cement and Concrete Research* 38(2): 205-225.
- ZOTOV, N.; EBBSJÖ, I.; TIMPEL, D. & KEPPLER, H. 1999: Calculation of Raman spectra and vibrational properties of silicate glasses: comparison between Na₂Si₄O₉ and SiO₂ glasses. *Physical Review B* 60(9): 6383.

Ismael De la Viuda-Pérez, isviuper@gmail.com

Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial – INTA, Madrid, España

Rafael Navarro-Azor, rafael.navarro@cab.inta-csic.es

Unidad Asociada UVa-CSIC al Centro de Astrobiología,
Parque Tecnológico de Boecillo, Valladolid, España

Emmanuel Alexis Lalla, emmanuellalla@gmail.com

Unidad Asociada UVa-CSIC al Centro de Astrobiología,
Parque Tecnológico de Boecillo, Valladolid, España

Jose A. Rodríguez-Losada, jrlosada@ull.es

Departamento de Biología Animal, Edafología y Geología,
Universidad de La Laguna, Tenerife, España

Roberto Aquilano, aquilano@ifir-conicet.gov.ar

Instituto de Física de Rosario – CONICET,
Universidad Nacional de Rosario, Rosario, Argentina

Jesús Medina, medina@fmc.uva.es

Unidad Asociada UVa-CSIC al Centro de Astrobiología,
Parque Tecnológico de Boecillo, Valladolid, España

Fernando Rull-Pérez, frull@fmc.uva.es

Unidad Asociada UVa-CSIC al Centro de Astrobiología,
Parque Tecnológico de Boecillo, Valladolid, España

Evaluación de modelos 2D de variables geo-tecnológicas en un bloque de un yacimiento laterítico cubano. Cuarta parte: método de polinomios locales

Arístides Alejandro Legrá-Lobaina
Dulce María Atanes-Beatón
Oris Ramón Silva-Diéquez

Resumen

El método de polinomios locales (MPL) se basa en suponer que es posible estimar el valor de la variable U para cualquier coordenada P de su dominio, mediante polinomios locales determinados a partir de datos cercanos. En este trabajo se estudia la posibilidad de modelar 2D, mediante polinomios locales, las variables: espesor de la corteza (L) y concentraciones de níquel (Ni), hierro (Fe) y cobalto (Co), en un bloque de un yacimiento laterítico cubano. Finalmente se analiza si las modelaciones de las variables estudiadas dependen del método de estimación que se utilice.

Palabras clave: modelación; lateritas; yacimientos ferroniquelíferos; red de muestreo; estimación; método de polinomios locales.

Assessing the 2D models of geo-technological variables in a block of a cuban laterite ore body. Part IV Local polynomial method

Abstract

The local polynomial method is based on assuming that is possible to estimate the value of a U variable in any of the P coordinate through local polynomials estimated based on approximate data. This investigation analyzes the probability of modeling in two dimensions the thickness and nickel, iron and cobalt concentrations in a block of Cuban laterite ores by using the mentioned method. It was also analyzed if the results of modeling these variables depend on the estimation method that is used.

Keywords: modeling; laterite ore; sampling grid; estimation; local polynomial method.

1. INTRODUCCIÓN

El método de polinomios locales (MPL) es una opción para representar el comportamiento espacial de cierta propiedad U de algún objeto natural o tecnológico que se investigue. MPL se basa en suponer que es posible estimar el valor de la variable U para cualquier coordenada P de su dominio mediante polinomios locales determinados a partir de datos cercanos.

Aquí se estudia la posibilidad de modelar 2D mediante polinomios locales, las variables: espesor de la corteza (L) y las concentraciones de níquel (Ni), hierro (Fe) y cobalto (Co) en un bloque de un yacimiento laterítico cubano.

El yacimiento Punta Gorda para su exploración y explotación ha sido fragmentado administrativamente en 88 bloques cuadrados de $300\text{m} \times 300\text{m}$ (Cuador-Gil 2005; Martínez-Vargas & Pérez-Melo 2006). Cada bloque fue explorado en dos momentos:

- En el primero se realizó un muestreo con la denominada red de exploración (R_1), donde en cada bloque se perforaron hasta 81 pozos equidistantes, a una distancia uno de otro de 33,33 m en cada dirección este-oeste y sur-norte.
- En el segundo se muestreó con la red de explotación (R_2), donde en cada bloque se perforaron hasta 361 pozos, a una distancia uno de otro de 16,16 m en cada dirección este-oeste y sur-norte.

Durante estudio del bloque O48 (agotado en la actualidad) se realizó una nueva red (R_3) de hasta 1 369 pozos equidistantes, a una distancia uno de otro de 8,33 m en cada dirección geográfica.

Los modelos de recursos y de reservas preliminares a la explotación del bloque O48 se obtuvieron considerando R_1 con densidad de red menor que las densidades de R_2 y R_3 . Los métodos de estimación usados han sido el kriging y el inverso de una potencia de la distancia (Ilyas & Koike 2012; Cuador-Gil 2005; Martínez-Vargas & Pérez-Melo 2006; Legrá-Lobaina, Guilarte-Noa & Guevara-Pérez 2015).

Aunque es preferible la modelación 3D (Hillier *et al.* 2014) de una propiedad de interés e en un yacimiento, en ocasiones se realizan modelaciones 2D considerando los valores promedios verticales en cada punto del plano, de manera que la red de puntos generados es $(X_j; Y_j; U_j)$, donde también es de interés el espesor de la corteza (L) (Legrá-Lobaina, Guilarte-Noa & Guevara-Pérez 2015).

Este estudio tuvo los siguientes objetivos:

- Determinar, mediante los errores relativos absolutos, la efectividad del MPL que pronostica 2D los valores de las variables L, Ni, Fe y Co en el bloque O48 del yacimiento Punta Gorda.
- Estudiar la influencia que tiene la selección del método (kriging, inverso de la distancia, funciones básicas radiales y polinomios locales) respecto a la eficacia de la estimación de las variables antes referidas en el bloque O48 del yacimiento Punta Gorda.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Datos

A partir de los datos del Ni, Fe y Co tabulados en R_3 se determinó un archivo que contiene n filas con **6** columnas (Legrá-Lobaina, Guilarte-Noa & Guevara-Pérez 2015):

- X (coordenada en la dirección este-oeste)
- Y (coordenada en la dirección sur-norte)
- L (espesor de la corteza de intemperismo)
- Ni (concentración porcentual del Ni)
- Fe (concentración porcentual del Fe)
- Co (concentración porcentual del Co)

En el archivo se tiene una red de $8,33\text{m} \times 8,33\text{m}$ y a partir de este se han identificado los datos de las redes R_1 y R_2 . Los principales resultados del análisis estadístico de los datos (Legrá-Lobaina, Caballero-Núñez y Jiménez-Roche 2015) aparecen en la Tabla 1.

Tabla 1. Resultados estadísticos básicos de los valores de los datos

Red	Variable	Estadígrafos Básicos				Coeficiente de Variación
		Mínimo	Máximo	Media Aritmética	Desviación Estándar	
R ₁ (D=33,33m) 78 puntos	L	12	42	23,44	6,13	0,26
	Ni	0,63	1,81	1,19	0,17	0,15
	Fe	16,76	45,99	36,89	6,8	0,18
	Co	0,029	0,163	0,075	0,03	0,41
R ₂ (D=16,16m) 308 puntos	L	3	44	19,88	6,00	0,30
	Ni	0,58	1,81	1,13	0,17	0,15
	Fe	16,76	50,4	41,0	5,65	0,14
R ₃ (D=8,33m) 1262 puntos	Co	0,029	0,188	0,088	0,029	0,33
	L	3	44	19,99	5,76	0,29
	Ni	0,43	2,2	1,12	0,18	0,16
	Fe	16,76	50,4	40,58	4,86	0,12
	Co	0,01	0,201	0,078	0,028	0,35

A partir de los datos puede deducirse que la magnitud más variable es la concentración de Co, luego el espesor L y las concentraciones de Ni y Fe.

2.2. Método de polinomios locales (MPL)

Se supone establecida la elipse de búsqueda (Deutsch y Journel 1998) caracterizada por sus radios r_1 y r_2 y el ángulo ϕ así como el valor de la potencia p del método.

Para estimar el valor de U en cualquier coordenada (X;Y) se obtiene del conjunto de datos $(X_j; Y_j; U_j)$, $i=1, \dots, n$ un subconjunto conjunto de datos $(X_i; Y_i; U_i)$, $i=1, 2, \dots, m \leq n$, tal que sus coordenadas $(X_i; Y_i)$ están en el interior de la elipse de búsqueda definida por r_1 , r_2 y ϕ con centro en el punto $(X_e; Y_e)$, donde se estimará el valor U_e .

El procedimiento (Golden Software INC 2012) contiene los siguientes pasos:

1. Calcular:

- $T_{XX} = \frac{\cos(\phi)}{r_1}$; $T_{XY} = \frac{\sin(\phi)}{r_1}$; $T_{YX} = \frac{-\sin(\phi)}{r_2}$; $T_{YY} = \frac{\cos(\phi)}{r_2}$.
- $A_{XX} = T_{XX}^2 + T_{YX}^2$; $A_{XY} = 2(T_{XX}T_{XY} + T_{YX}T_{YY})$; $A_{YY} = T_{YY}^2 + T_{XY}^2$.

2. Determinar el polinomio local, que puede ser de una de las formas:

- Grado 1: $F_i(X; Y) = a + bX + cY$

- Grado 2: $F_i(X; Y) = a + bX + cY + dXY + eX^2 + fY^2$
- Grado 3: $F_i(X; Y) = a + bX + cY + dXY + eX^2 + fY^2 + gX^2Y + hXY^2 + iX^3 + jY^3$

Las acciones prácticas son las siguientes:

Para cada punto $(X_i; Y_i)$, vecino de $(X_e; Y_e)$, se calculan: $dX_i = X_i - X_e$ y $dY_i = Y_i - Y_e$

Luego se calcula: $R_i = \sqrt{A_{XX}dX_i^2 + A_{XY}dX_idY_i + A_{YY}dY_i^2}$

También se calcula el peso (ponderador) del punto de índice j: $W_i = (1 - R_i)^p$

Para encontrar el polinomio $F_i(X; Y)$ se debe minimizar la función

$\psi(a, b, c, \dots) = \sum_{i=1}^N W_i [F(X_i; Y_i) - Z_i]^2$ donde a, b, c, \dots son los coeficientes

desconocidos del polinomio. Para ello:

Se calculan las derivadas: $\frac{\partial \psi}{\partial a}, \frac{\partial \psi}{\partial b}, \frac{\partial \psi}{\partial c}, \dots$

Estas derivadas se igualan a cero y se obtienen un sistema de ecuaciones lineales, cuyas incógnitas son a, b, c, \dots

Resolviendo el sistema de ecuaciones (Bronshtein *et al.* 2007) se puede determinar el polinomio local $F_i(X; Y)$.

3. La estimación U_e en las coordenadas $(X_e; Y_e)$ consiste en evaluar el polinomio local correspondiente $F_i(X_e; Y_e)$.

Debe puntualizarse que el método MPL no es un interpolador exacto.

2.3. Procedimiento para aplicar el método MPL

En el presente trabajo a partir de los datos de la red R_1 se estimaron, por el método MPL, los valores de cada magnitud U de interés (L, Ni, Fe y Co) en los puntos P_i de la red R_3 . Se tomó un polinomio de grado 3 y $p=3$; $r_1=r_2=120$ y $\phi=0$.

Luego se estudiaron, mediante estadígrafos descriptivos elementales, los comportamientos del error absoluto relativo de los valores estimados (expresadas porcentualmente en la ecuación 1) y denominados V_{MER} (Miller, Freund & Johnson 2005):

$$V_{MER_i} = 100 \frac{|U_i - S(P_i)|}{|U_i|} \quad (1)$$

Para el procesamiento informático se usó el software Tierra, versión 2.1 (Legrá-Lobaina 2014) y el software Surfer, versión 11.0.642 (Golden Software INC. 2012)

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los estadígrafos calculados para el índice VMER son:

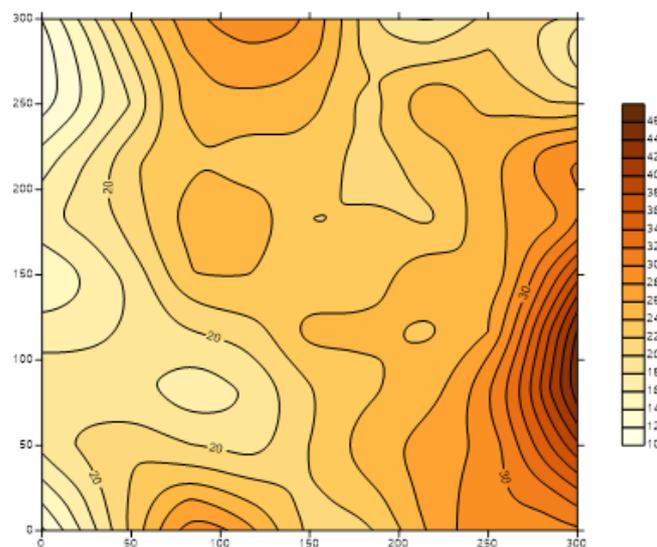
- Valor mínimo (Vi)
- Valor máximo (Vm)
- Rango ($R=V_m-V_i$)
- Media aritmética (MA)
- Desviación estándar (DE)
- Coeficiente de variación ($CV=DS/MA$)

3.1. Comportamiento de las variables

Las Figuras de la 1 a la 4 recogen, en su parte superior, el comportamiento de cada variable dentro de la frontera de los datos de R3, y debajo, los resultados estadísticos básicos y el histograma de distribución de frecuencias de los valores VMER en el modelo MPL, obtenido para cada una de ellas.

3.1.1. Espesor de la corteza de intemperismo (L)

El histograma de distribución de frecuencias (Figura 1) de los valores VMER en el modelo MPL, obtenido para L, revela que, aproximadamente, el 68 % de los valores son menores del 30 %.



Vi	Vm	R	MA	DE	CV
0,000459	683,24903	683,24857	28,095787	36,118845	1,285561

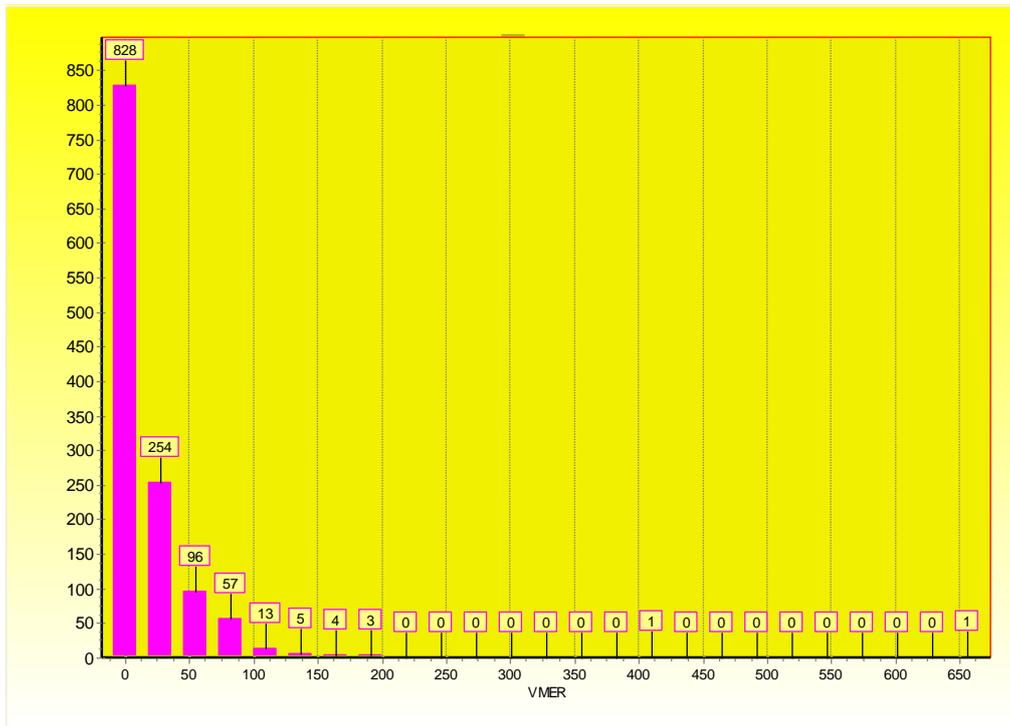
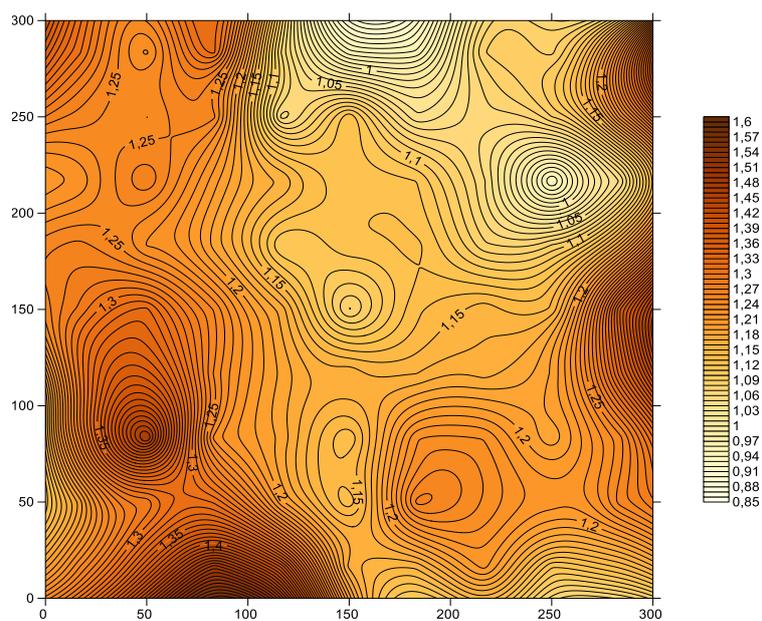


Figura 1. Modelación del comportamiento dentro de la frontera de los datos de R_3 según el MPL, estadística básica y distribución de frecuencias de VMER para la variable L.

3.1.2. Concentración porcentual del Ni

Las estimaciones de Ni, según el método MPL, dentro de la frontera de los datos de R_3 se muestra en la Figura 2. Aproximadamente el 90 % de los valores VMER son menores del 30 %.



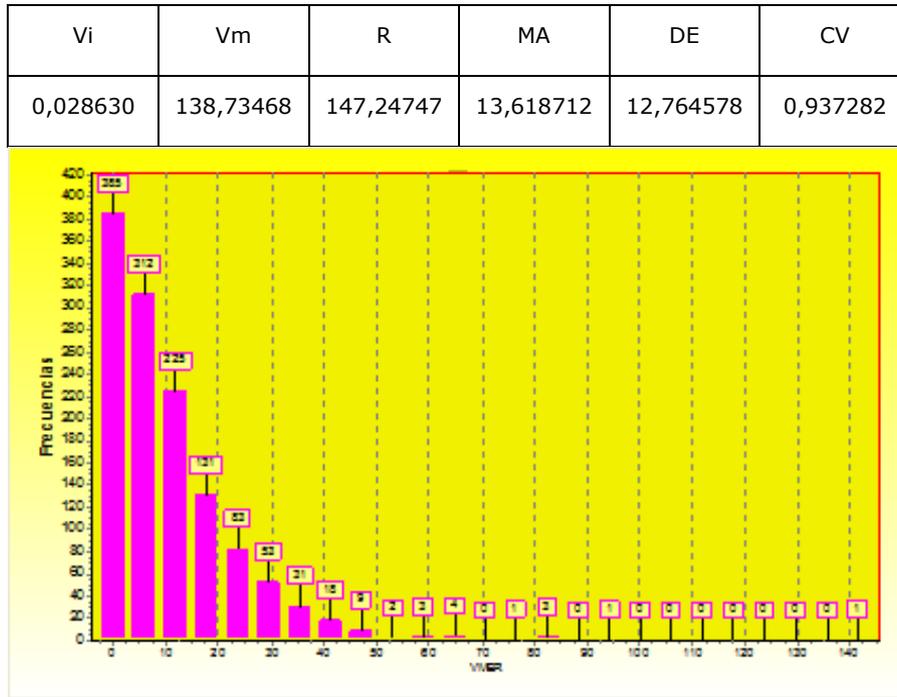
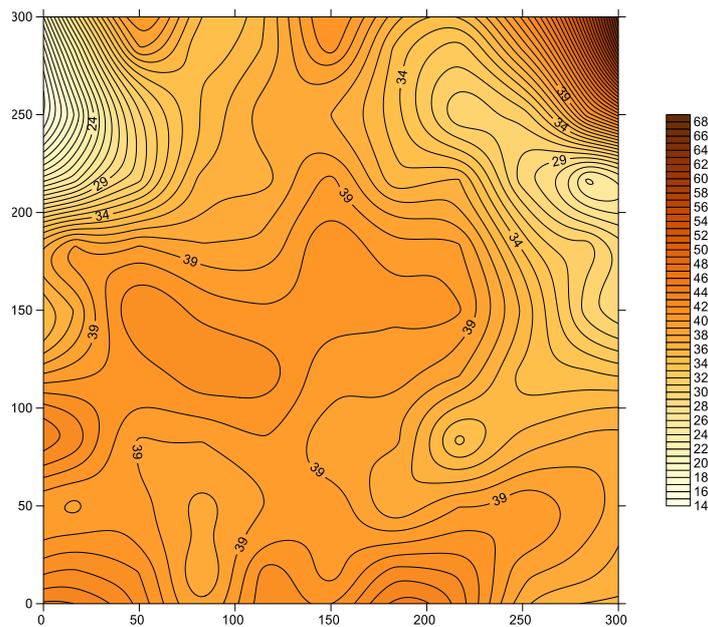


Figura 2. Modelación del comportamiento dentro de la frontera de R3, según MPL, estadística básica y distribución de frecuencias de VMER para la variable Ni.

3.1.3. Concentración porcentual de Fe

Para el caso de esta variable (Figura 3) aproximadamente el 93 % de los valores VMER son menores del 30 %.



Vi	Vm	R	MA	DE	CV
0,020195	149,42144	149,40124	13,054519	11,972257	0,917097

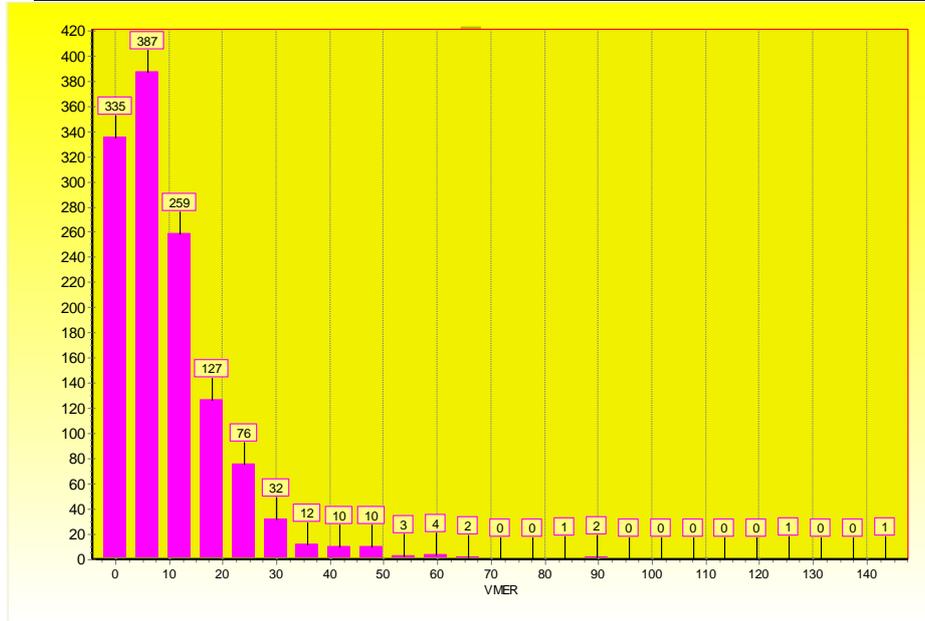
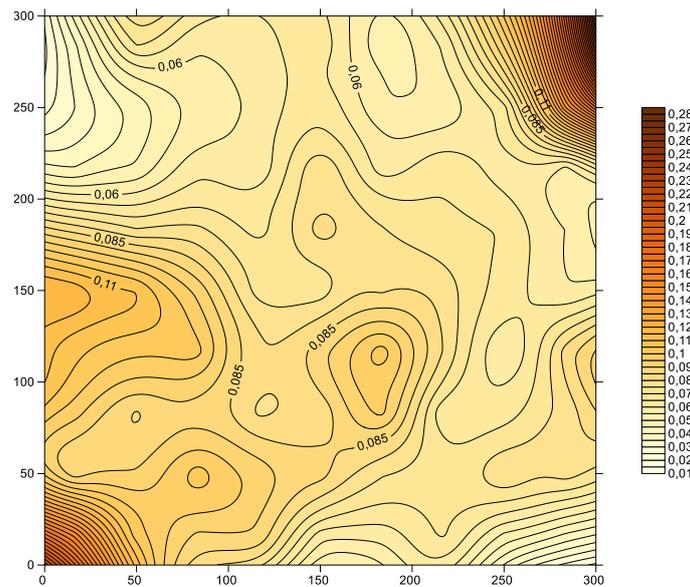


Figura 3. Modelación dentro de la frontera de R3, estadística básica e histograma de VMER para la variable Fe.

3.1.4. Concentración porcentual de Co

Los resultados para el Co (Tabla 4) mostraron que, aproximadamente, el 65 % de los valores VMER son menores del 30 %.



Vi	Vm	R	MA	DE	CV
0,046523	1044,686 3	1044,639 8	31,48234 3	51,50699 0	1,63606

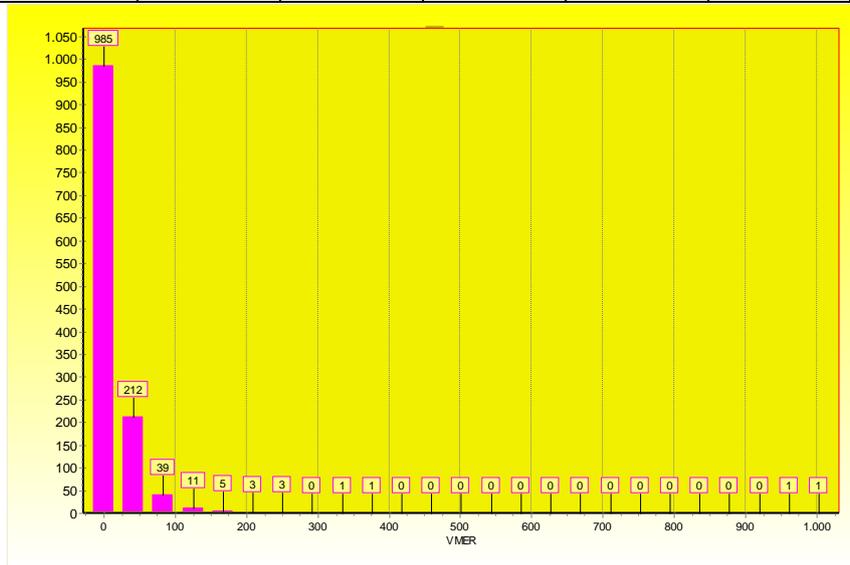


Figura 4. Modelación dentro de la frontera de R3, estadística básica e histograma de VMER para la variable Co.

3.1.5. Comparación de resultados por cuatro métodos

A partir de los resultados del presente trabajo y otros precedentes (Legrá-Lobaina, Guilarte-Noa & Guevara-Pérez 2015); Legrá-Lobaina, Quevedo-Mejías & Pupo-Mulgado 2015), la Tabla 2 resume los parámetros estadísticos básicos de los valores de los errores absolutos relativos en porcentaje para los métodos de kriging (K), inverso del cuadrado de la distancia (ID), funciones básicas radiales, según el modelo multicuadrático (FBR) y MPL, tal como se ha explicado en la presente investigación.

Tabla 2. Resumen de los parámetros estadísticos obtenidos por cuatro métodos para las variables L, Ni, Fe y Co (agrupados por variable)

Variable	Modelo	Parámetros Estadísticos				
		Mínimo	Máximo	Media Aritmética	Desviación Estándar	Coficiente de Variación
L	K	0	696,25	28,72	36,62	1,38
	ID	0	668,27	29,33	40,13	1,36
	FBR (MC)	0	734,33	28,26	38,72	1,37
	MPL	0,00046	683,25	28,096	36,12	1,29
Ni	K	0	138,84	13,52	13,09	0,96
	ID	0	144,32	13,14	13,03	0,99
	FBR (MC)	0	133,5	14,02	13,47	0,96

Fe	MPL	0,029	138,74	13,62	12,77	0,94
	K	0	94,77	12,96	11,81	0,91
	ID	0	90,47	11,83	9,52	0,81
	FBR (MC)	0	105,65	13,66	12,86	0,94
Co	MPL	0,0201	149,42	13,06	11,97	0,92
	K	0	891,02	27,24	40,91	1,5
	ID	0	926,69	27,21	42,62	1,57
	FBR (MC)	0	1169,31	32,86	53,16	1,62
	MPL	0,047	1044,69	31,48	51,51	1,64

Un análisis de los resultados que se muestran en la tabla anterior indica que:

1. Respecto a los valores máximos de V_{MER} :

- El método de ID es el mejor para L y Fe. Para L y para Co el peor es FBR. El método K es el mejor para el Co y el peor para Fe es MPL.
- El Método FBR es el mejor para el Ni. El peor es ID.

2. Respecto a las medias aritméticas de V_{MER} :

- El MPL es el mejor para L. El peor para esta variable es ID.
- Para el Ni el mejor es MPL y el peor FBR. Lo mismo para el Fe y el Co.

3. Respecto al coeficiente de variación de V_{MER} :

- El MPL es el mejor para L. El peor es K.
- El MPL es el mejor para el Ni. El peor es ID.
- El método de ID es el mejor para Fe. El peor es FBR.
- El método de K es el mejor para Co. El peor es MPL.

Es bastante difícil poder determinar cuál de estos métodos es, en general, el más conveniente (Zimmerman *et al.* 1999) considerando solo dichos resultados. Entonces, resulta conveniente realizar alguna prueba de inferencia para evaluar para cada variable las hipótesis referidas a si hay o no relaciones entre los resultados de V_{MER} y el método que se utilice.

Para ello se considera para cada variable una tabla de frecuencias de aparición de valores "buenos" ($V_{MER} \leq 30$), "regulares" ($30 < V_{MER} \leq 66$) y "malos" ($V_{MER} > 66$). La prueba χ^2_α correspondiente se realiza con un nivel de significación $\alpha = 0,01$ (99 % de nivel de confianza).

En primer lugar se presenta en la Tabla 3 los resultados de las frecuencias o de resultados malos, regulares y buenos para cada variable.

Tabla 3. Frecuencias \mathbf{o} de resultados malos, regulares y buenos para las variables L, Ni, Fe y Co.

Variable	Resultado Método	Malos	Regulares	Buenos	Total
L	K	134	268	860 (68,15 %)	1 262
	ID	146	265	851 (67,43 %)	1 262
	FBR	126	272	864 (68,46 %)	1 262
	MPL	152	248	862 (68,3 %)	1 262
	Total	558	1 053	3 437 (68,09 %)	5 048
Ni	K	9	118	1 135 (89,94 %)	1 262
	ID	10	106	1 146 (90,81 %)	1 262
	FBR	9	125	1 128 (89,38 %)	1 262
	MPL	13	108	1 141 (90,41 %)	1 262
	Total	41	457	4 550 (90,14 %)	5 048
Fe	K	3	111	1 148 (90,97 %)	1 262
	ID	2	47	1 213 (96,12 %)	1 262
	FBR	5	138	1 119 (88,69 %)	1 262
	MPL	10	68	1 184 (93,82 %)	1 262
	Total	38	417	4 593 (90,99 %)	5 048
Co	K	81	338	843 (66,80 %)	1 262
	ID	79	329	854 (67,67 %)	1 262
	FBR	119	413	730 (57,85 %)	1 262
	MPL	134	307	821 (65,06 %)	1 262
	Total	413	1 387	3 248 (64,34 %)	5 048

En la Tabla 4 se presentan las frecuencias esperadas \mathbf{e} de resultados malos, regulares y buenos para cada variable.

Tabla 4. Frecuencias esperadas e para las variables L, Ni, Fe y Co

Variable	Resultado Método	Malos	Regulares	Buenos	Total
L	K	139,5	263,25	859,25	1 262
	ID	139,5	263,25	859,25	1 262
	FBR	139,5	263,25	859,25	1 262
	MPL	139,5	263,25	859,25	1 262
	Total	558	1053	3 437	5 048
Ni	K	10,25	114,25	1 137,5	1 262
	ID	10,25	114,25	1 137,5	1 262
	FBR	10,25	114,25	1 137,5	1 262
	MPL	10,25	114,25	1 137,5	1 262
	Total	41	457	4 550	5 048
Fe	K	9,5	104,25	1 148,25	1 262
	ID	9,5	104,25	1 148,25	1 262
	FBR	9,5	104,25	1 148,25	1 262
	MPL	9,5	104,25	1 148,25	1 262
	Total	38	417	4 593	5 048
Co	K	97	364	801	1 262
	ID	97	364	801	1 262
	FBR	97	364	801	1 262
	MPL	97	364	801	1 262
	Total	388	1 456	3 204	5 048

Siguiendo las ideas de Miller, Freund & Johnson (2005, p. 295) para cada variable se definen las hipótesis:

H_0 : La selección del método y los resultados de VMER para L son independientes.

H_1 : La selección del método y los resultados de VMER para L son dependientes.

Para el caso de la variable L se calcula:

$$\chi_c^2 = \sum_{i=1}^R \sum_{j=1}^C \frac{(o_{ij} - e_{ij})^2}{e_{ij}} = 4,332767305$$

Se determina χ_α^2 con $(R-1)(C-1)=6$ grados de libertad y se obtiene

$$\chi_{0,01;6}^2 = 16,8119.$$

La regla de decisión es que se rechaza la hipótesis H_0 si $\chi_c^2 > \chi_\alpha^2$. Dado que $\chi_c^2 < \chi_{0,01}^2$, entonces puede afirmarse con un 99 % de confianza que se acepta que la selección del método no influye en que los resultados de la estimación de L sean "Malos, "Regulares" o "Buenos".

Para la variable Ni se calcula:

$$\chi_c^2 = \sum_{i=1}^R \sum_{j=1}^C \frac{(o_{ij} - e_{ij})^2}{e_{ij}} = 3,280111433$$

Dado que $\chi_c^2 < \chi_{0,01}^2$, entonces puede afirmarse que se acepta con 99 % de confianza que la selección del método no influye en que los resultados de la estimación de Ni sean "Malos, "Regulares" o "Buenos".

Para la variable Fe se calcula:

$$\chi_c^2 = \sum_{i=1}^R \sum_{j=1}^C \frac{(o_{ij} - e_{ij})^2}{e_{ij}} = 20,3106774$$

En este caso se cumple que $\chi_c^2 > \chi_{0,01}^2$, entonces puede afirmarse que se acepta con un 99 % de confianza que la selección del método sí influye en que los resultados de la estimación de Fe sean "Malos, "Regulares" o "Buenos"; aunque no hay grandes diferencias entre los resultados de la misma clase obtenidos por diferentes métodos.

Nótese que en este caso las estimaciones realizadas por IPD han sido más eficaces que las que se realizaron con los otros métodos (más del 96 % de las estimaciones fueron buenas) y el método FBR tuvo un 88,69 % de estimaciones buenas. Para la variable Fe el método kriging y MPL tuvieron más del 90 % de estimaciones buenas.

Para el Co se calcula:

$$\chi_c^2 = \sum_{i=1}^R \sum_{j=1}^C \frac{(o_{ij} - e_{ij})^2}{e_{ij}} = 52,13120837$$

Puesto que $\chi_c^2 > \chi_{0,01}^2$, entonces puede afirmarse que se acepta con un 99 % de confianza que la selección del método sí influye en que los resultados de la estimación de Fe sean "Malos, "Regulares" o "Buenos"; aunque para esta variable tampoco hay grandes diferencias entre los resultados de la misma clase obtenidos por diferentes métodos.

En esta oportunidad la estimación por FBR ha sido mucho menos eficaz que las que se realizaron con los otros métodos.

4. CONCLUSIONES

- Los resultados muestran que el método de polinomio local es capaz de estimar adecuadamente las magnitudes L, Ni, Fe y Co.
- El resumen que se muestra en la Tabla 2 caracteriza la calidad de los resultados obtenidos por MPL a un nivel comparable con la calidad de los otros métodos estudiados.
- Las Tablas 3 y 4 muestran que a pesar de que hay ciertos métodos que en particular obtienen mejores o peores resultados, los valores porcentuales de estimar bien dependen, en cierta medida, de la variabilidad del L, Ni, Fe y Co expresadas por sus respectivos coeficientes de variación descritos en la Tabla 1.
- A partir de los resultados de las pruebas χ^2_α puede establecerse que en los casos de L y Ni la selección del método no influye en la calidad de los resultados pero sí influye en los casos de Fe y Co.

Una recomendación práctica para los que estudian los recursos y reservas de estos yacimientos es que al seleccionar el método de estimación consideren la simplicidad, la eficacia y la eficiencia del método, estudiando previamente sus parámetros estadísticos, de modo que, en alguna medida, se optimice su potencial de pronóstico.

5. REFERENCIAS

- BRONSHTEIN, I. N.; SEMENDYAYEV, K. A.; MUSIOL, G. & MÜHLIG, H. 2007: Handbook of Mathematics. Springer-Verlag, Berlin, 1163 p. ISBN: 978-3-540-72121-5.
- CUADOR-GIL, J. Q. 2005: Estudios de estimación y simulación geoestadística para la caracterización de parámetros geólogo-industriales en el yacimiento laterítico Punta Gorda. *Minería y Geología* 21(4): 1-48.
- DEUTSCH, C. V. & JOURNEL, A. G. 1998: *GSLIB: Geoestatistical software library and User's Guide*. Oxford University Press, New York, 369 p.
- HILLIER, M. J.; SCHETSELAAR, E. M.; DE KEMP, E. A. & PERRON, G. 2014: Three-dimensional modelling of geological surface using generalized interpolation with Radial Basis Function. *Mathematical Geosciences* 46(8): 931-953.

- ILYAS, A. & KOIKE, K. 2012: Geostatistical Modeling of Ore Grade Distribution from Geomorphic Characterization in a Laterite Nickel Deposit. *Natural Resource Research* 21(2): 177-191.
- GOLDEN SOFTWARE, INC, 2012: Surfer. Versión 11.0.642. Golden, Colorado, USA.
- LEGRÁ-LOBAINA, A. A. 2014: Software Tierra. Versión 2.2. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa.
- LEGRÁ-LOBAINA, A. A.; QUEVEDO-MEJÍAS, R.; PUPO-MULGADO; M. 2015: Evaluación de modelos de variables geo-tecnológicas en un bloque de un yacimiento laterítico cubano: Tercera parte: funciones básicas radiales. *Minería y Geología* 31(3): 11-25.
- LEGRÁ-LOBAINA, A. A.; GUILARTE-NOA, A. M. & GUEVARA-PÉREZ, T. 2015: Evaluación de modelos de variables geo-tecnológicas en un bloque de un yacimiento laterítico cubano: Primera parte: kriging e inverso de la distancia. *Minería y Geología* 31(1): 29-51.
- LEGRÁ-LOBAINA, A. A.; CABALLERO-NÚÑEZ, J. L.; JIMÉNEZ-ROCHE; K. 2015: Evaluación de modelos de variables geo-tecnológicas en un bloque de un yacimiento laterítico cubano: Segunda parte: Influencia de la densidad de la red de muestreo en el variograma. *Minería y Geología* 31(2): 1-20.
- MARTÍNEZ-VARGAS, A. & PÉREZ-MELO, N. 2006: ¿Cuál es el mejor método para estimar variables en yacimientos lateríticos de níquel y cobalto? *Minería y Geología* 22(3): 1-21.
- MILLER, I.; FREUND, J. & JOHNSON, R. 2005: *Probabilidades y Estadísticas para ingenieros*. Volumen I y II. Cuarta Edición. Prentice-Hall Hispanoamericana S.A., México, 624 p. ISBN: 0-13-712-761-8
- ZIMMERMAN, D.; PAVLIK, C.; RUGGLES, A. & ARMSTRONG, M. P. 1999: Experimental Comparison of Ordinary and Universal Kriging and Inverse Distance Weighting. *Mathematical Geology* 31(4): 375-390.

Arístides Alejandro Legrá Lobaina. alegra@ismm.edu.cu

Doctor en Ciencias Técnicas. Profesor Auxiliar. Departamento de Matemáticas
Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa

Dulce María Atanes Beatón. atanes@fco.uo.edu.cu

Máster en Ciencias. Profesor Asistente. Departamento de Matemáticas Aplicadas
Universidad de Oriente

Oris Ramón Silva Diéguez. oriss@ismm.edu.cu

Máster en Ciencias. Profesor Asistente. Departamento de Matemáticas
Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa

Influencia de la inclinación de las pilas en el secado natural de la mena laterítica

Yoalbys Retirado-Mediaceja
Aristides Alejandro Legrá-Lobaina
Amauris Gilbert-Hernández
Edison Patricio Salazar-Cueva
Jorge Rubén Salazar-Cueva
Magaly Alexandra Mendoza-Vaca

Resumen

En la industria cubana del níquel el secado natural se implementa almacenando la mena laterítica a granel y a la intemperie. La conformación de las pilas se realiza sin valorar rigurosamente la incidencia que tiene, en el comportamiento energético del proceso, la inclinación de la superficie de secado. En la presente investigación se demuestra, a través de simulaciones, que el incremento de la inclinación en pilas triangulares reduce notablemente el rendimiento del secado natural y se llega a establecer que la inclinación de 45 grados sexagesimales, respecto al plano horizontal, posibilita exponer obtener grandes volúmenes de material al secado natural y garantiza adecuados rendimientos térmicos en el proceso.

Palabras clave: mena laterítica; pilas triangulares; secado natural; rendimiento energético.

Influence of stockpile angle in natural drying of laterite ore

Abstract

Natural drying is performed at Cuban nickel plants by depositing bulk ore in the open. The ore is currently being stockpiled without much consideration for the impact of the drying surface angle on the process power behavior. Simulations were carried out in this investigation, which prove that an increased triangular stockpile angle considerably reduces natural drying efficiency. A 45 sexagesimal degree angle to the horizontal plane results in exposure of a large volume of ore to natural drying and guarantees adequate energy performance.

Keywords: Laterite ore; triangular stockpile; natural drying; energy performance.

1. INTRODUCCIÓN

El secado natural de la mena laterítica, desde el punto de vista científico-técnico, ha suscitado interés en los investigadores de la industria cubana del níquel y, en particular, del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa (ISMMM). En los estudios realizados se identifican dos tendencias en el análisis del proceso.

Unos investigadores esencialmente se enfocan al diseño y desarrollo de una tecnología de secado solar. Ellos parten de la determinación de los criterios técnico-prácticos de la minería, que influyen en el manejo integral y eficiente de las pilas de mena laterítica en los depósitos mineros de las empresas productoras de níquel y cobalto (Estenoz 2001; Estenoz et al. 2007; Estenoz 2009; Vinardell 2011).

Otro grupo aborda la evaluación térmica del proceso. En una primera etapa, se prioriza el análisis teórico-experimental de la desorción de la humedad en la mena laterítica, en función de las variables climatológicas y las propiedades termofísicas del material que más influyen en el secado natural (Retirado et al. 2011). Posteriormente, se desarrolla la modelación físico-matemática y la optimización de los parámetros fundamentales del proceso, considerando las condiciones de explotación en la industria cubana del níquel (Retirado & Legrá 2011; Retirado et al. 2012a).

En ambos casos, los investigadores cubanos coinciden con la literatura internacional en que un análisis riguroso del proceso de secado, sea convencional o natural, transita necesariamente por la determinación de sus parámetros fundamentales (Sunil & Sharma 2013; Borah, Hazarika & Khayer 2015; Olawale et al. 2015; Reza & Reza 2015; Sallam et al. 2015).

En el proceso analizado estos parámetros se pueden integrar en uno: la distribución de humedad en el material. La misma depende del área de exposición y el volumen de las pilas, la radiación solar que incide en la superficie de secado, los flujos de calor transferidos y la distribución de temperatura del material. Estas variables son en función de múltiples factores, entre los que se destaca la inclinación de la superficie de secado de las pilas.

La distribución de humedad en la mena laterítica durante el secado natural se ha determinado previamente (Retirado et al. 2015). Los cálculos fueron desarrollados para pilas con una inclinación de 61 grados sexagesimales, respecto al plano horizontal, por ser la utilizada empíricamente en la implementación del proceso en las empresas niquelíferas.

Sin embargo, en el secado natural de la mena laterítica la captación de la energía solar está influenciada por los efectos de sombra que se producen debido a la combinación de la inclinación de la superficie y el movimiento del sol. Teniendo en cuenta lo anterior, se considera de utilidad práctica calcular y simular la distribución de humedad que tiene lugar en el material para diferentes inclinaciones de la superficie de secado de las pilas.

El objetivo del presente trabajo es determinar la influencia que tiene, en el proceso de secado natural de la mena laterítica, la inclinación de la superficie de las pilas.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Se empleó la modelación matemática desarrollada por Retirado (2012b) y se incorporó la sistematización del cálculo de los parámetros siguientes: flujos de calor transferidos y distribución de temperatura y humedad que experimenta el material en las pilas.

Las simulaciones se realizaron para pilas de 140 m y 5,49 m de longitud y ancho de la base, respectivamente; con sección transversal triangular e inclinaciones de la superficie de secado de 30; 45; 60 y 75 grados sexagesimales, respecto al plano horizontal. Se utilizó la aplicación informática "SecSolar", la cual es útil para el análisis energético del proceso investigado (Retirado *et al.* 2012a).

3. PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO

3.1. Flujos de calor transferidos

En el secado solar natural la transmisión de calor ocurre por convección, radiación y conducción (Duffie & Beckman 1991; Mujumdar 2006; Abdel-Rehim & Nagib 2007). Por su parte, el intercambio de calor convectivo entre la corriente de aire y la superficie de secado de las pilas de mena laterítica, en el referido proceso, se produce indistintamente por convección libre, forzada y mixta (Retirado *et al.* 2011).

En la Figura 1 se muestran las ecuaciones necesarias para calcular el coeficiente convectivo del aire, a partir del número de Nusselt (Nu), los flujos de calor por convección (q_{Conv}) y radiación (q_{Rad}), así como el calor total disponible para el secado natural (q_{Total}).

Nótese que el parámetro q_{Total} se calcula de forma dinámica como una función de los flujos de calor transferidos por radiación y convección. A continuación se sistematiza el procedimiento de cálculo (Figura 1).

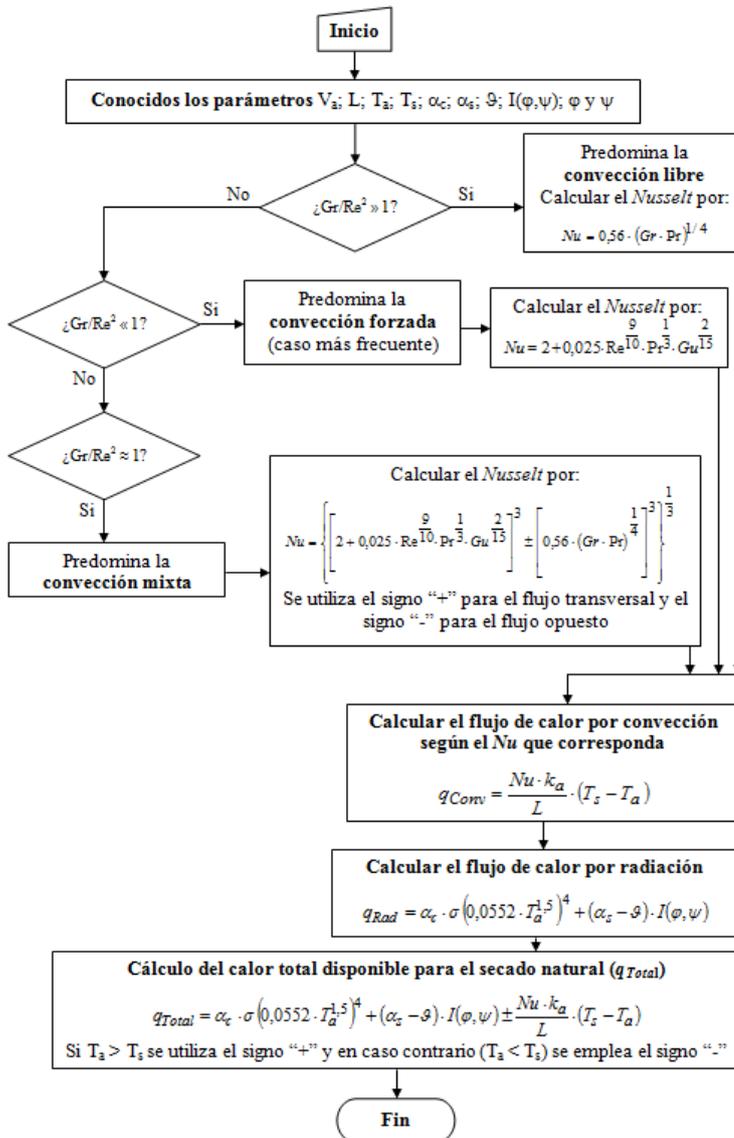


Figura 1. Flujograma que sistematiza el cálculo del calor total disponible para el proceso de secado natural.

Siendo:

V_a : velocidad del aire, m/s;

L : longitud característica de la superficie de secado, m;

T_a : temperatura del aire, K;

T_s : temperatura de la superficie de secado de la pila, K;

α_c : absorptividad del cielo, adimensional;

α_s : absorptividad solar de la mena laterítica, adimensional;

ϑ : reflectividad de la mena laterítica, adimensional;

$I(\varphi, \psi)$: radiación solar global que incide sobre la superficie de secado de la pila, W/m^2 ;

φ : inclinación de la superficie de la pila respecto al plano horizontal, grados sexagesimales;

ψ : orientación de la superficie de la pila respecto al eje norte-sur, grados sexagesimales;

Gr ; Re ; Nu ; Pr y Gu : números de Grashof, Reynolds, Nusselt, Prandtl y Gujman, respectivamente, adimensionales;

q_{Conv} : flujo de calor por convección que intercambian el aire y la superficie de secado de la pila, W/m^2 ;

k_a : conductividad térmica del aire, $W/m \cdot K$;

q_{Rad} : flujo de calor por radiación que se aprovecha en el secado natural de la mena laterítica, W/m^2 ;

σ : constante de Stefan-Boltzman ($5,67 \cdot 10^{-8}$), $W/m^2 \cdot K^4$;

q_{Total} : calor total disponible para el proceso de secado natural, W/m^2 .

El flujo de calor transferido por conducción (q_{Cond}), desde la superficie de secado hacia el interior de la pila de minerales, puede ser calculado mediante el procedimiento que se sistematiza en el flujograma de la Figura 2. Como se aprecia, este parámetro depende de otras variables, entre las que se destacan la temperatura de la mena laterítica en la superficie de la pila [$T_s(\tau)$] y la temperatura en el interior de la pila en el espesor ξ [$T(\xi, \tau)$].

De acuerdo con Retirado y otros investigadores (2014), la primera se calcula como una función de dos parámetros principales: la radiación solar global incidente en la superficie de secado de la pila [$I(\varphi, \psi)$] y el calor transmitido por convección (q_{Conv}). La segunda se determina obteniendo la distribución de temperatura [$T(y, \tau)$], para ello fue necesario resolver la ecuación de difusión del calor reportada en la literatura (Bergman *et al.* 2011), con las condiciones iniciales y de frontera propias del proceso investigado.

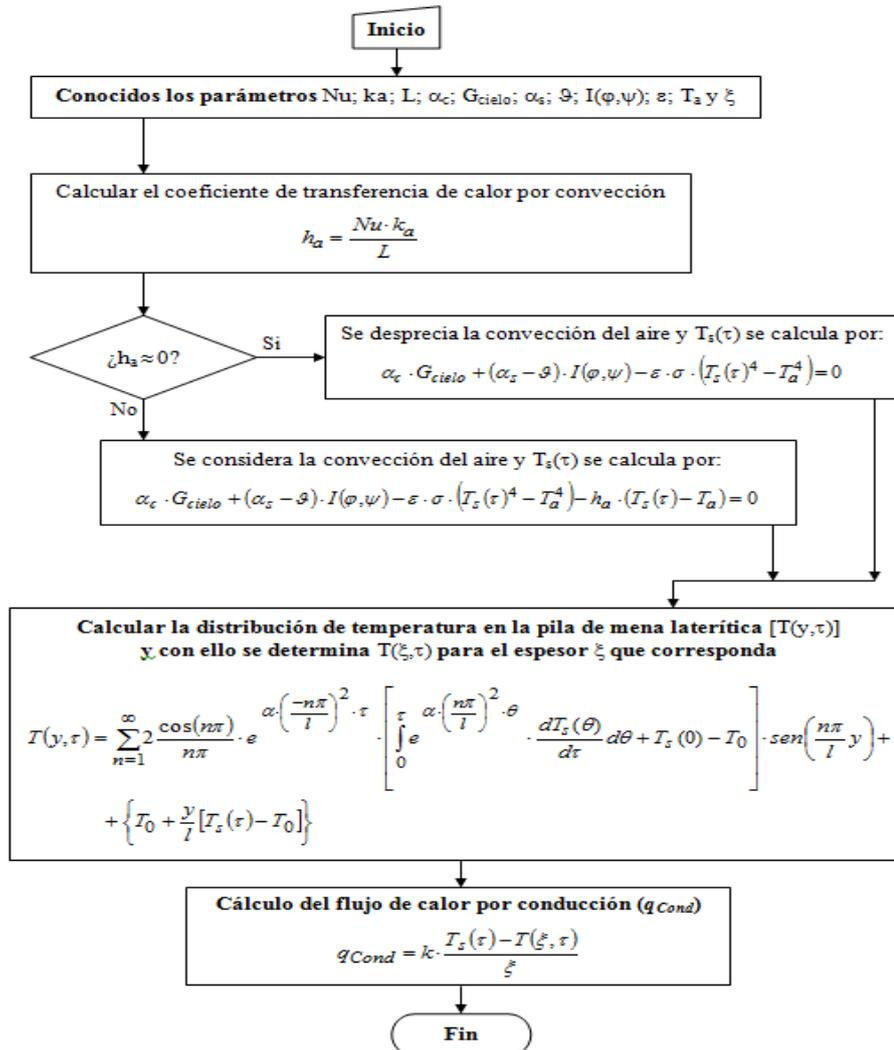


Figura 2. Flujograma que sistematiza el cálculo de la distribución de temperatura del material y el flujo de calor por conducción.

Siendo:

G_{cielo} : irradiación del cielo, W/m^2 ;

ϵ : emisividad de la mena laterítica, adimensional;

h_a : coeficiente de transferencia de calor por convección, $W/m^2 \cdot K$;

$T_s(\tau)$: temperatura en la superficie de la pila en el instante τ , K;

$T(y, \tau)$: distribución de temperatura del material en la pila, K;

q_{Cond} : calor transferido por conducción hacia el interior de la pila, W/m^2 ;

k : conductividad térmica de la mena laterítica, $W/m \cdot K$;

$T(\xi, \tau)$: temperatura en el interior de la pila en el espesor ξ , K.

3.2. Distribución de humedad

La distribución de humedad en la mena laterítica $[H(y, \tau)]$, en una pila expuesta a secado natural, puede ser determinada mediante el modelo que se expone en la Figura 3 (Retirado *et al.* 2012b). Nótese que este parámetro depende del término $H_s(\tau)$, el cual se calcula en función del régimen de secado (N) que predomine.

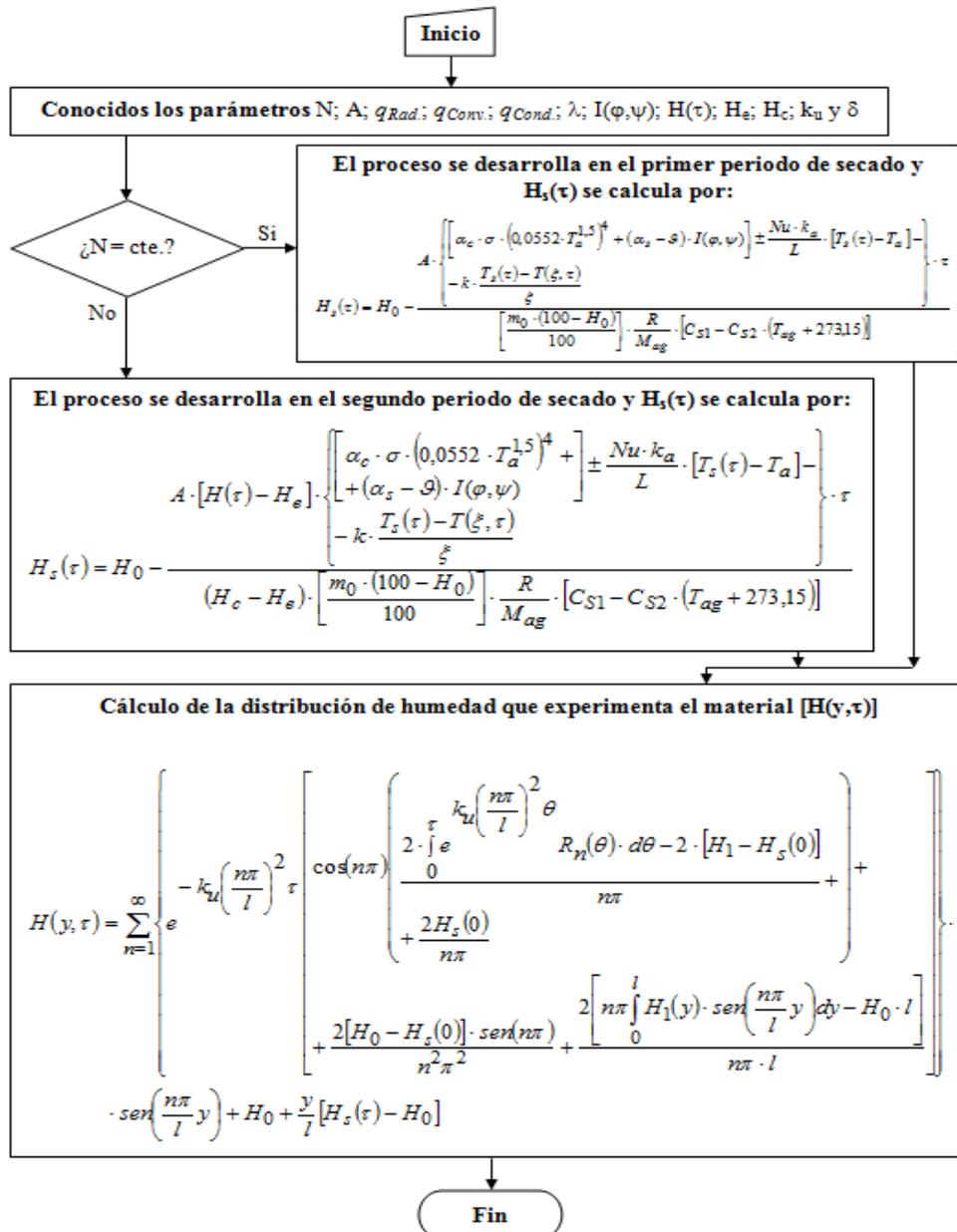


Figura 3. Flujoograma que sistematiza el cálculo de la distribución de humedad que experimenta el material.

Siendo:

N: régimen de secado, $\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$;

A : área de exposición de la pila, m^2 ;

λ : calor latente de vaporización del agua, J/kg ;

H_e : humedad de equilibrio del material, kg/kg ;

H_c : humedad del material al finalizar el régimen de velocidad de secado constante, kg/kg ;

δ : coeficiente térmico de conducción de humedad, $1/^\circ C$;

m_0 : masa inicial de material sin secar, kg ;

R : constante de los gases, $J/kmol \cdot K$;

M_{ag} : peso molecular del agua, $kg/kmol$;

C_{S1} y C_{S2} : constantes experimentales, adimensionales;

T_{ag} : temperatura del agua, $^\circ C$;

k_u : coeficiente de conducción de humedad, m^2/s ;

H_0 : humedad inicial del material, kg/kg ;

$H_s(\tau)$: humedad del material en la superficie de secado de la pila (para $y=l$) en el instante τ , kg/kg .

Como se aprecia, en la Figura 3 se ha sistematizado el procedimiento para el cálculo de la distribución de humedad. En el mismo se integran los anteriores (Figuras 1 y 2), por cuanto para desarrollar este cálculo se requiere de los resultados precedentes.

4. SIMULACIONES

4.1. Distribución de temperatura

Los comportamientos mostrados para la distribución de temperatura (Figuras 4 y 5) evidencian que la superficie de secado de la pila (para altura $h=1,52$ m) incrementa su temperatura después de las 7:00 horas. Los valores adecuados para el secado (superiores a 50 $^\circ C$) se obtienen entre las 10:00 y las 16:00-16:30 horas, en los taludes este (E) y oeste (O) de la pila, respectivamente.

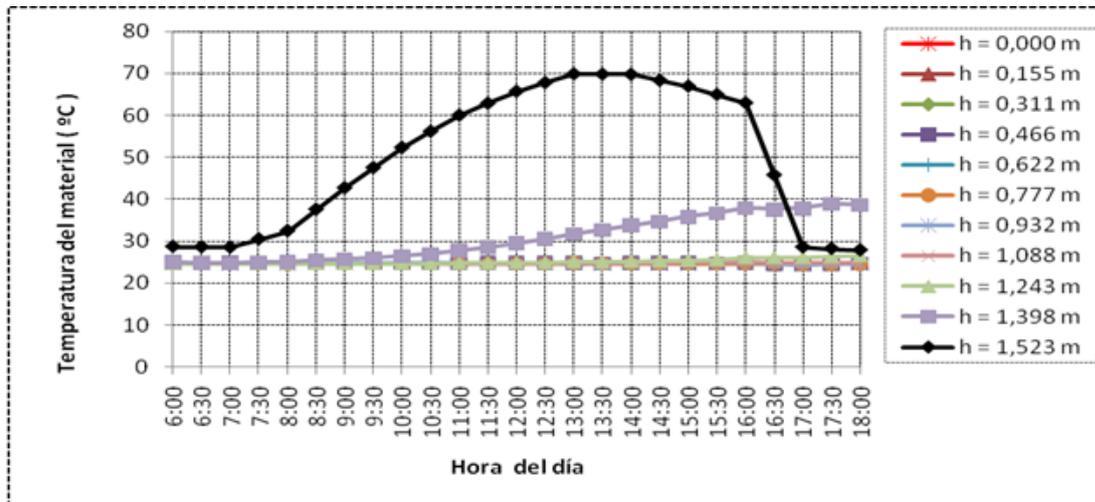


Figura 4. Distribución de temperatura en el talud E de la pila, para 30° de inclinación de la superficie.

En ambos taludes, para la altura $h=1,39$ m, se alcanzan valores superiores a los 30 °C, a partir de las 13:00 horas, aunque el calentamiento del material se produce desde las 9:30 horas. En las restantes alturas consideradas la temperatura tiene un comportamiento aproximadamente constante e igual al valor inicial (24,7 °C). Lo anterior evidencia que la mena laterítica es un material mal conductor del calor, por cuanto la conducción térmica solo alcanza a las capas de material ubicadas a distancias iguales o inferiores a 12,5 cm (Figuras 4 y 5).

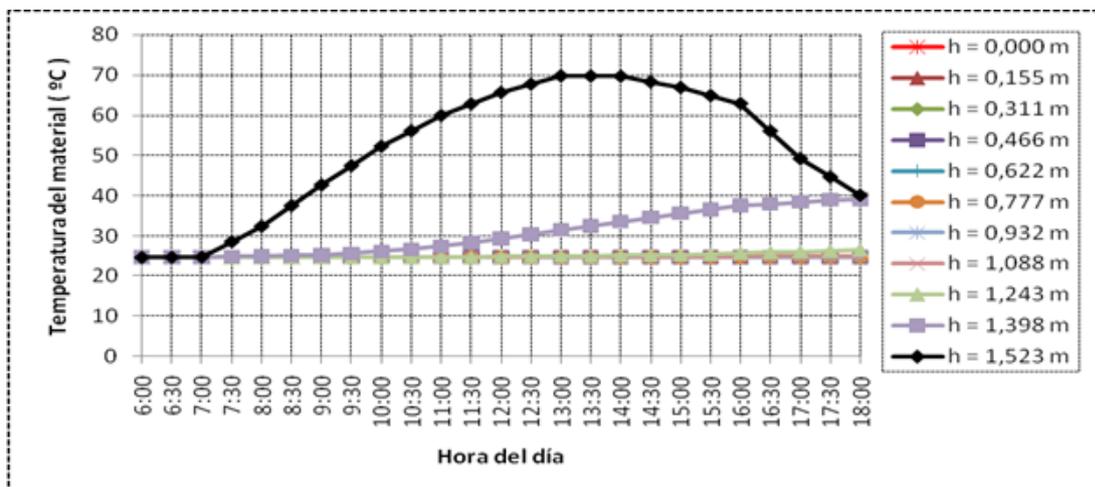


Figura 5. Distribución de temperatura en el talud O de la pila, para 30° de inclinación de la superficie.

En ninguno de los taludes se logran incrementos significativos en la temperatura del material en la primera hora de secado, lo cual puede estar determinado por los bajos regímenes de radiación solar que inciden sobre la superficie de secado. Sin embargo, el enfriamiento superficial de la pila de

mena laterítica, a partir de las 16:00 horas, tiene diferentes comportamientos (Figuras 4 y 5, para $h=1,52$ m).

En el talud E el sólido de la superficie entrega calor bruscamente hasta valores cercanos a la temperatura inicial (Figura 4), esto puede ser atribuido al efecto de sombra que se produce debido a la combinación de la inclinación de la superficie de secado de la pila y la posición del sol en ese horario. En el talud O la disminución de la temperatura es más moderada y el material a las 18:00 horas tiene alrededor de 40 °C (Figura 5). El comportamiento es lógico porque en ese horario el talud estuvo recibiendo radiación solar, a diferencia del lado E de la pila.

Otro aspecto relevante a destacar es que en ambos taludes se produce almacenamiento de energía en forma de calor en la capa de material adyacente a la superficie (Figuras 4 y 5, para $h=1,39$ m). La tendencia es prácticamente idéntica, lo cual puede ser asociado al hecho de que una variación en los regímenes de radiación solar no produce, a corto y mediano plazo, cambios significativos en la temperatura de material que se encuentra en el interior de la pila.

4.2. Distribución de humedad

En general, se observan reducciones en el contenido de humedad en las pilas de mena laterítica. Estas fueron de 5 % y 5,5 % en los taludes este y oeste, respectivamente (Figuras 6 y 7). Las mismas están determinadas por el comportamiento descrito para la distribución de la temperatura en ambos taludes.

En el talud este de la pila se obtienen reducciones en la humedad del material a partir de las 8:30 y hasta las 16:30 horas. Sin embargo, en los restantes horarios la humedad de la mena laterítica permanece prácticamente invariable (Figura 6). En el talud oeste la disminución del parámetro es continua entre las 8:30 y las 18:00 horas (Figura 7).

Las capas de material ubicadas entre la base de la pila y $h=1,24$ m, en los taludes este y oeste, reducen sus respectivos valores de humedad en un 4 % y 4,5 %, respectivamente. Por su parte, en las capas de lateritas más cercanas a la superficie de la pila (desde $h=1,39$ m hasta 1,52 m) los niveles de reducción de la humedad en los taludes oscilan entre 4,5 % y 5 %.

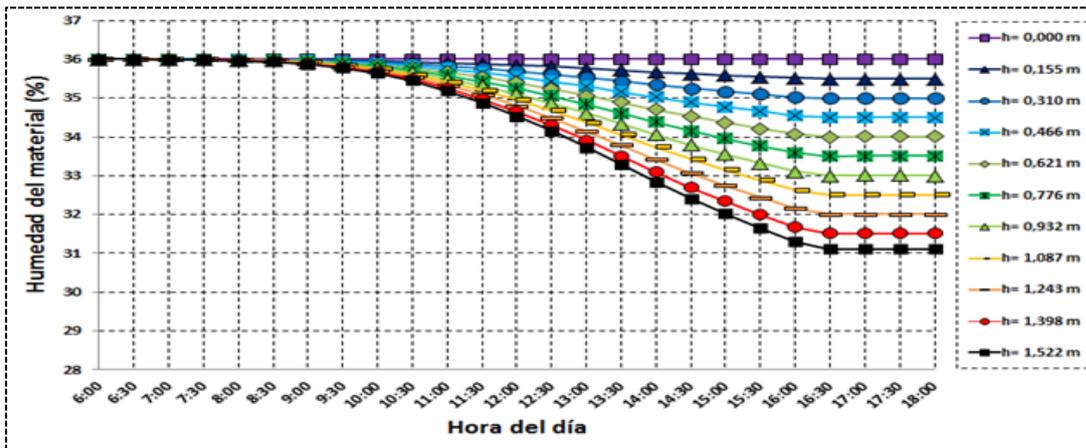


Figura 6. Distribución de humedad en el talud este de la pila, para 30° de inclinación de la superficie.

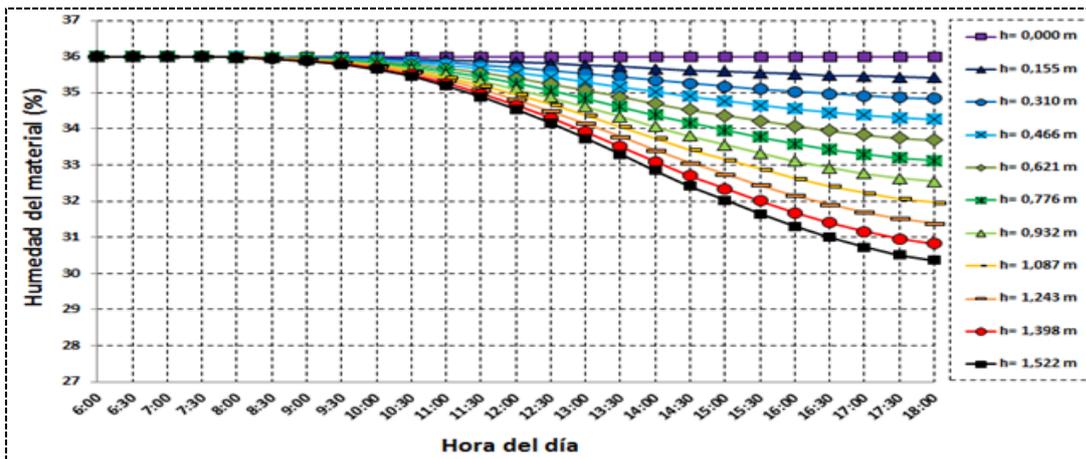


Figura 7. Distribución de humedad en el talud oeste de la pila, para 30° de inclinación de la superficie.

4.3. Influencia de la inclinación en el secado

Al valorar los comportamientos de la distribución de temperatura en pilas expuestas a secado natural, pero con diferentes inclinaciones de la superficie (45°; 60° y 75°, respecto al plano horizontal), se aprecia que los incrementos significativos en la temperatura de la mena laterítica (hasta 68 °C; 65 °C y 60 °C, respectivamente) se obtienen en la superficie de secado, al igual que ocurrió para la inclinación de 30 grados sexagesimales.

Las pilas que tienen la superficie de secado inclinadas a 45° y 60° captan una cantidad de energía térmica que provoca que la conducción del calor alcance a las capas de material que se encuentran a distancias iguales o inferiores a 10,7 cm y 9,3 cm, respectivamente. En la pila inclinada en 75° la energía térmica captada solo induce un incremento de temperatura en la superficie y hacia el interior de la pila de la conducción de calor es prácticamente nula.

Estas tendencias son lógicas y demuestran que, al incrementar la inclinación de la pila de 30° a 75°, la temperatura máxima de la superficie de secado disminuye de 70 °C a 60 °C y, por tanto, se reduce el efecto de secado que se produce en la mena laterítica.

La distribución de humedad que experimenta el material, como se ha indicado, estuvo determinada por el comportamiento de la temperatura en cada inclinación estudiada. En las pilas con las superficies inclinadas a 45°; 60° y 75° la mena laterítica disminuyó la humedad promedio en 2,75 %; 1,7 % y 1,25 % en el talud este; mientras que en el lado oeste la disminución fue de 3,75 %; 2,75 % y 2,25 %, respectivamente.

Los comportamientos descritos constituyen las regularidades del secado natural de la mena laterítica en pilas con diferentes inclinaciones de la superficie de secado. Estos sugieren que para la implementación del proceso en la empresa niquelífera debe evaluarse rigurosamente la inclinación que deben tener las pilas, porque ello influirá sobremanera en el rendimiento del secado. Lo anterior es congruente con los resultados obtenidos por Retirado y demás colaboradores (2012a) en la optimización del proceso.

5. CONCLUSIONES

- La inclinación de la superficie de secado, en pilas con sección transversal triangular, tiene una influencia notable en el comportamiento energético del secado natural de la mena laterítica. El incremento de la misma de 30 a 75 grados sexagesimales, respecto a la horizontal, redujo el rendimiento térmico del proceso de 14,58 % a 4,86 %.
- Las pilas de sección transversal triangular empleadas en la implementación del secado natural de la mena laterítica deben tener sus superficies de secado inclinadas en, aproximadamente, 45° sobre el plano horizontal. Lo anterior posibilita obtener grandes volúmenes de material expuesto a secado y adecuados rendimientos térmicos en el proceso.

6. REFERENCIAS

- ABDEL-REHIM, Z. & NAGIB, Z. 2007: Solar drying of Bagasse Pulp. *Journal of Applied Sciences Research* 3(4): 300-306.
- BERGMAN, T.; LAVINE, A.; INCROPERA, F. & DEWIT, D. 2011: *Fundamentals of heat and mass transfer*. New Jersey, John Wiley & Sons, 1077 p.
- BORAH, A.; HAZARIKA, K. & KHAYER, S. 2015: Drying kinetics of whole and sliced turmeric rhizomes (*Curcuma longa* L.) in a solar conduction dryer.

Information Processing in Agriculture 2(2): 85-92.

- DUFFIE, J. & BECKMAN, W. 1991: *Solar engineering of thermal processes*. New York, Wiley Institution, 919 p.
- ESTENOZ, S. 2001: Desarrollo sostenible en la minería a través del aprovechamiento integral de los yacimientos lateríticos. *Tecnología Química* 21(3): 54-60.
- ESTENOZ, S. 2009: Sistema integral de explotación minera para desarrollo sostenible de recursos naturales y su procesamiento tecnológico. Casos de estudio. En: Memorias del III Congreso Cubano de Minería. La Habana.
- ESTENOZ, S.; ALDERÍ, A.; BATISTA, N.; DONATIÉN, A. & PÉREZ, N. 2007: Aplicación del secado solar y la homogeneización en la industria niquelífera Comandante Ernesto Che Guevara. En: II Congreso Cubano de Minería. La Habana.
- MUJUMDAR, A. 2006: *Handbook of Industrial Drying*. Singapore, Taylor & Francis Group, LLC, 1286 p.
- OLAWALE, D.; ADEWOLE, A.; OLAYEMI, A.; IBUKUN, O. & TOLULOPE, S. 2015: Solar drying kinetics of Cassava Slices in a mixed flow dryer. *Acta Technologica Agriculturae* 18(4): 102-107.
- RETIRADO, Y. & LEGRÁ, A. 2011: Modelación matemática del área de exposición y del volumen de las pilas de menas lateríticas expuestas a secado solar natural. *Minería y Geología* 27(2): 84-108. Consultado: 18 ene 2015. Disponible en: www.ismm.edu.cu/revistamg.
- RETIRADO, Y.; GÓNGORA, E.; TORRES, E.; LAMORÚ, M. & LEYVA, B. 2011: Transferencia de calor en el secado solar a la intemperie de menas ferroniquelíferas. *Minería y Geología* 27(1): 1-21. Consultado: 1 may 2015. Disponible en: www.ismm.edu.cu/revistamg.
- RETIRADO, Y.; LEGRÁ, A.; LAMORÚ, M.; TORRES, E. & LAURENCIO, H. 2012a: Optimización del secado solar de la mena laterítica en la industria cubana del níquel. *Minería y Geología* 28(2): 30-46. Consultado: 10 dic 2015. Disponible en: www.ismm.edu.cu/revistamg.
- RETIRADO, Y.; LEGRÁ, A.; LAMORÚ, M.; TORRES, E.; LAURENCIO, H. & GÓNGORA, E. 2012b: Modelación y simulación del proceso de secado natural de la mena laterítica. *Minería y Geología* 28(4): 1-19. Consultado: 21 ene 2015. Disponible en: www.ismm.edu.cu/revistamg.
- RETIRADO, Y.; LEGRÁ, A.; LAMORÚ, M.; TORRES, E.; LAURENCIO, H. & GÓNGORA, E. 2014: Distribución de temperatura en pilas de mena laterítica expuestas a secado natural. *Minería y Geología* 30(1): 33-50. Consultado: 1 abril

2015. Disponible en: www.ismm.edu.cu/revistamg.
- RETIRADO, Y.; LEGRÁ, A.; LAMORÚ, M.; TORRES, E.; LAURENCIO, H. & GÓNGORA, E. 2015: Velocidad de secado en pilas de mena laterítica almacenadas a la intemperie. *Minería y Geología* 31(3): 45-61. Consultado: 5 feb 2016. Disponible en: www.ismm.edu.cu/revistamg.
- REZA, O. & REZA, H. 2015: Influence Collector inclination of solar dryer on Apple 'Golab' Chips drying. *Agriculturae Conspectus Scientificus* 80(2): 101-108.
- SALLAM, Y.; ALY, M.; NASSAR, A. & MOHAMED, E. 2015: Solar drying of whole mint plant under natural and forced convection. *Journal of Advanced Research* 6(2): 171-178.
- SUNIL, V. & SHARMA, N. 2013: Modelling the drying kinetics of green peas in a solar dryer and under open sun. *International Journal of Energy and Environment* 4(4): 663-676.
- VINARDELL, J. 2011: *Implementación del secado solar natural de las menas lateríticas en las empresas niquelíferas cubanas*. Tesis de maestría. Instituto Superior Minero Metalúrgico. 63 h.

Yoalby Retirado-Mediaceja, retirado@ismm.edu.cu

Profesor Titular. Doctor en Ciencias Técnicas. Centro de Estudio de Energía y Tecnología Avanzada de Moa. Instituto Superior Minero Metalúrgico. Moa, Holguín, Cuba.

Aristides Alejandro Legrá-Lobaina, alegra@ismm.edu.cu

Profesor Auxiliar. Doctor en Ciencias Técnicas. Departamento de Matemática. Instituto Superior Minero Metalúrgico. Moa, Holguín, Cuba.

Amauris Gilbert-Hernández, aghernandez@ismm.edu.cu

Asistente. Master en Metalurgia. Departamento de Ingeniería Mecánica. Instituto Superior Minero Metalúrgico. Moa, Holguín, Cuba.

Edison Patricio Salazar-Cueva, edison.salazar@utc.edu.ec

Ingeniero Industrial. Magister en Seguridad y Prevención de Riesgos Laborales. Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas. Universidad Técnica de Cotopaxi, Ecuador

Jorge Rubén Salazar-Cueva, seprytsacapacitacion@gmail.com

Ingeniero Civil. Magister en Sistemas de Gestión Ambiental. SEPRYTSA S.A. (Econstrucciones, Riesgo y Seguridad Industrial). Ecuador

Magaly Alexandra Mendoza-Vaca, magiame2000@hotmail.com

Ingeniera en Comercio Exterior. Magister en Gestión de la Producción. SEPRYTSA S.A (Econstrucciones, Riesgo y Seguridad Industrial). Ecuador

Dinámica de las burbujas de cavitación en fluidos amoniacales trasegados con bombas centrífugas

Jorge Luis Reyes-Cruz
Gerardo Ruiz-Chavarría
Roilber Lambert-Sánchez
Alberto Turro-Breff
Enrique Torres-Tamayo
Sergio Hernández Zapata

Resumen

Con el fin de obtener el comportamiento dinámico de la presión de formación de las burbujas y de su movimiento al inducir el fenómeno de la cavitación en bombas centrífugas, se experimentó con agua y licor amoniacal a dos concentraciones de amoníaco (27 % y 34 %). El comportamiento dinámico de las burbujas se solucionó numéricamente con la aplicación de la ecuación de Rayleigh-Plesset, por medio de los radios de las burbujas y el tiempo de crecimiento de estas. Se concluye que cuando se induce la cavitación, la presión de formación de las burbujas a 22 °C es de $10,135.10^3$ Pa para el agua; de $45,468.10^3$ Pa para el licor amoniacal al 27 % de concentración y de $69,951.10^3$ Pa para una concentración de 34 %. Los radios alcanzados por las burbujas en el licor amoniacal son del orden de 30 a 120 veces su radio inicial, mientras que para las burbujas formadas en el agua son del orden de 15 veces solamente.

Palabras clave: bombas centrífugas; cavitación; formación de burbujas; patrones de flujo; licor amoniacal.

Cavitation bubble dynamics in ammoniacal fluids transferred by centrifugal pumps

Abstract

An experiment with water and ammoniacal liquor at 27% and 34% concentrations of ammonia was carried out in order to determine the pressure dynamics during the formation of bubbles and their movement when causing cavitations in centrifugal pumps. The dynamics of bubbles was calculated numerically by applying the Rayleigh-Plesset equation using the bubble radius and the bubble build-up time. It is concluded that the pressure to form the bubbles at 22 °C is 10,135.103 Pa for water and 45,468.103 Pa for the ammoniacal liquor at a concentration of 34 %. The radius of the bubbles found in ammoniacal liquor is in the range of 30 to 120 times the original bubble radius while the bubbles formed in water are only in the range of 15 times the original radius value.

Keywords: centrifugal pumps; cavitation; bubble formation; flow patterns; ammoniacal liquor.

1. INTRODUCCIÓN

Durante el trasiego de un fluido por una bomba centrífuga, a través de una instalación hidráulica, como es el caso del agua y los licores amoniacales utilizados en la producción de níquel en Moa, no son observadas las peculiaridades de la circulación de estos fluidos por las tuberías, generalmente metálicas, que se acoplan a estas bombas. Para poder visualizar y evaluar las presiones de formación y el comportamiento dinámico de las burbujas durante la ocurrencia del fenómeno de cavitación se requerirían tuberías transparentes.

El fenómeno de la cavitación implica la formación y presencia de burbujas debido al cambio de fase de la sustancia desde su estado líquido al estado de vapor (González 1983; Pérez 2004; Reyes 2010 y Brennen 2011). En los líquidos es posible obtener una presión muy baja debido al movimiento del fluido; cuando se forman burbujas de vapor que se dirigen a regiones de mayor presión, estas burbujas rompen con intensidad suficiente e implosionan en el interior de las bombas, provocando daños estructurales graves e irreversibles en sus partes, además de provocar una disminución en la eficiencia y la potencia de la bomba.

Como consecuencia de la formación, crecimiento e implosión de las burbujas puede producirse erosión y desprendimiento en el material de los álabes del impelente. Según Lauterborn (1998), el origen de la formación de burbujas de cavitación puede ser provocada por variación de presión (hidrodinámica o acústica) o por deposición de energía (óptica o partículas elementales, protón o ruptura del líquido). Cuando se forma una burbuja dentro de la cual puede haber gas, vapor o una combinación de ambos, a una temperatura constante, la evolución de la burbuja hasta su colapso puede ocurrir más o menos rápido en función de la propiedad del fluido que la origina.

Dopazo (2008) plantea la unión indisoluble entre cavitación y formación de burbujas, puntualizando la dificultad que existe para obtener la medida detallada y el diagnóstico de sistemas cavitantes debido a las pequeñas escalas espaciales y temporales involucradas.

Durante el fenómeno de la cavitación en las bombas centrífugas se presentan cavidades en el fluido. Se da un proceso dinámico, el cual consta de crecimiento, decrecimiento y colapso, donde la presión sufre variaciones rápidas y el tamaño de la burbuja varía de forma constante (Ramírez, Jácome y Giraldo 2013), siguiendo una trayectoria descrita por la ecuación de Rayleigh-Plesset (RP). El crecimiento y colapso de burbujas es asimétrico, lo que prueba que su evolución se realiza de forma no lineal.

La evolución de burbujas, en función del tiempo durante el crecimiento, no es brusca si se compara con el de colapso. Durante el colapso las burbujas logran alcanzar velocidades sónicas que en el agua, a 20 °C, es aproximadamente 1 500 m/s. La evolución desarrollada por las burbujas depende de algunas variables como el tamaño inicial, tamaño alcanzado, volúmenes de gases disueltos, densidad o viscosidad, entre otras.

La característica principal que manifiesta la evolución de las burbujas es el tamaño alcanzado por las mismas en el flujo y el tiempo de vida de estas, las cuales pueden presentar cambios experimentales en la presión a nivel local y en las fluctuaciones de las variables termodinámicas. Principalmente las oscilaciones son debidas a procesos de carácter irreversible, asociados al cambio de fase que se presenta nuevamente en el flujo, en este estadio de gas a líquido en que la variación de parámetros (como la presión y la energía) presentan saltos, al igual que en la interfase de la burbuja.

1.2 Comportamiento de la presión durante la formación de burbujas en licor amoniacal

La cavitación en bombas centrífugas ha sido tratada en varias investigaciones en las que se ha estudiado el comportamiento transitorio de la cavitación cuando se modifican las condiciones de operación, llámese cierre o apertura de la válvula de impulsión, o bien arranque o parada de la bomba. En este sentido se destacan los estudios realizados por Tanaka y Tsukamoto (1999a, 1999b, 1999c), los cuales demuestran que las fluctuaciones de presión y caudal están causadas por una oscilación de la dinámica de la cavitación en su interior, que al variar el flujo de manera súbita, estas fluctuaciones producen la separación del flujo del líquido y la formación de burbujas que colapsan entre sí, proporcionando inestabilidades al fluido. En estas investigaciones no se precisan los radios y tiempos de duración de las burbujas formadas durante la cavitación y no se determinan las velocidades que alcanzan estas.

El daño por cavitación en las bombas centrífugas se produce por la aparición de las ondas de choque durante el colapso de las burbujas que implosionan a determinadas velocidades, siendo altas durante los intervalos en que el radio de las burbujas se acerca a los máximos locales de presión. La velocidad del fluido alrededor de la burbuja toma valores, incluso de Mach 2, según Ferziger y Perić (2002); esto ocurre alrededor de los primeros mínimos locales. Para valores menores a este la velocidad supersónica no se alcanza y no se produce el colapso de las burbujas ni la onda de choque como resultado de este.

En la industria química y en algunos procesos metalúrgicos se emplean bombas centrífugas para trasegar sustancias o fluidos a las diferentes etapas del proceso. Durante la lixiviación del carbonato amoniacal para la obtención del níquel, mediante la tecnología CARON, el fluido que contiene los licores amoniacaes a diferentes concentraciones es manejado desde su vertimiento hasta la salida del fluido; estos licores amoniacaes, por sus características físico-químicas, exhiben un escenario muy favorable para la ocurrencia de la cavitación en las bombas centrífugas.

El licor amoniacal es una mezcla de agua y amoníaco con presencia de sólidos disueltos y en suspensión. Se trasiega a temperaturas que van desde 20 °C hasta 94 °C. Según el principio de Gibbs, esta mezcla de dos sustancias en estado de saturación puede presentarse como una función de dos variables: la temperatura de saturación y la concentración, a las cuales corresponde un único valor de presión de saturación, varían de acuerdo con las concentraciones. Por ejemplo, la presión de saturación para el agua a 20 °C es 4 240 Pa, mientras que para una mezcla de amoníaco-agua, que contiene una concentración de 27 % de soluciones de amoníaco, es de 87 400 Pa (Conde 2004).

La presión de saturación para el agua a 24,20 °C es de $2,468 \cdot 10^3$ Pa; para el licor amoniacal, con una concentración de 27 % de solución de amoníaco, la presión de saturación es $45,6 \cdot 10^3$ Pa a 22,15 °C; para licor amoniacal, a una concentración de 34 % de solución de amoníaco, la presión de saturación es 69,505 Pa a 22,15 °C (Reyes *et al.* 2015).

Estos valores significan que cuando se produce la cavitación en las bombas centrífugas que trasiegan fluidos, como el agua, la presión de saturación es inferior a cuando se trasiega licor amoniacal, por lo que la formación de burbujas en el licor amoniacal ocurre de forma más rápida que en el agua.

Relacionado con la concentración del licor amoniacal, a mayor concentración del producto volátil (amoníaco) existe mayor probabilidad de ocurrencia de cavitación y formación de burbujas de mayor radio.

Para la determinación de la formación de burbujas en una sustancia existen modelos de cavitación, los cuales parten de la relación existente entre el crecimiento de una burbuja típica en el fluido y la evolución del tamaño de las burbujas que se formen. En la región donde la presión en el interior de la burbuja (p_b) se iguala a la presión de vapor del fluido (p_v) la burbuja alcanza el radio máximo, ocurriendo el colapso de la misma. Ramírez, Jácome y Giraldo (2013) plantean que las oscilaciones en el radio permiten evidenciar el efecto de un campo de presión dependiente del tiempo, que sería un indicio de la influencia de la presión sobre la frontera de la burbuja

y lo soluciona matemáticamente mediante el método de elementos finitos (MEF).

Desde el punto de vista dinámico, las burbujas de cavitación experimentan un comportamiento típico de formación y colapso (Torres 2010). Esta descripción dinámica aparece representada en la Figura 1. El crecimiento y colapso de burbujas es asimétrico, lo que supone que su evolución se realiza de forma no lineal.

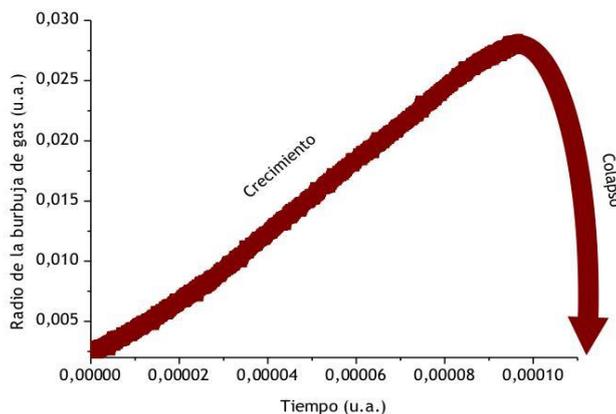


Figura **iError! No hay texto con el estilo especificado en el documento..** Dinámica de las burbujas de cavitación. Fuente: Torres (2010).

En la Figura 1 se observa que la velocidad de formación y colapso de la burbuja en el fluido aumenta, provocando una disminución de presión que genera burbujas en la interfase, caracterizada por una velocidad de implosión mayor que la velocidad de crecimiento de la burbuja.

La evolución de las burbujas en función del tiempo durante el crecimiento no es brusco, si se compara con el tiempo de colapso (Barnes & Rieckhoff 1968); durante el colapso las burbujas logran alcanzar sobre una superficie velocidades sónicas de aproximadamente 1 500 m/s para el agua a 20 °C. La evolución de las burbujas depende de variables como el tamaño inicial, tamaño máximo, volúmenes de gases disueltos, la densidad o viscosidad, entre otras.

La característica principal que manifiesta la evolución de una burbuja es el tamaño alcanzado dentro del flujo y el tiempo de vida de estas. Esta característica puede ser obtenida experimentalmente. Las presiones del fluido a la entrada y a la salida de la voluta han sido ya obtenidas (Reyes 2015) observando que este valor permanece por debajo de la presión de saturación, por lo que las burbujas formadas no experimentan un nuevo cambio de fase de vapor a líquido dentro de la bomba; se supone que se mantienen hasta salir de la arista de los álabes y de la bomba.

El fenómeno de la cavitación es un tema de alerta en las investigaciones, lo cual ha generado rápidos desarrollos en la mecánica de los fluidos, más aún por el progreso simultáneo de las computadoras y de métodos experimentales. Sin embargo, dada la complejidad del fenómeno todavía no es posible tener una teoría bien consolidada que describa en gran detalle cada aspecto de la cavitación, principalmente por la cantidad de fenómenos involucrados, como cambios de fase, cambios abruptos en las variables termodinámicas, condiciones que favorecen o desfavorecen el desarrollo de cavidades.

Para describir el fenómeno de la cavitación, debido a la influencia de la caída de presión a nivel local, se asume que los cambios en la dinámica de la burbuja se presentan esencialmente en los tiempos de vida y en la máxima dimensión alcanzada por el radio de las burbujas que pudieran describir la ocurrencia o no de la cavitación.

En la literatura consultada no se reportan datos sobre las presiones de formación de las burbujas y el movimiento de estas cuando se produce la cavitación a partir de las propiedades termodinámicas para el licor amoniacal al 27 % y 34 % de concentración de amoníaco. Por tal motivo es necesario estudiar las características de la cavitación y la incidencia de la presión de saturación del licor amoniacal en la formación de burbujas, así como el comportamiento de la variación de sus radios y el tiempo de duración de estas.

Esta investigación tuvo el objetivo de evaluar experimentalmente el comportamiento de la presión de formación de las burbujas y su movimiento para el agua y para el licor amoniacal a 27 % y 34 % de concentración de amoníaco, así obtener los patrones de flujo para el agua en la instalación cuando se induce el fenómeno de la cavitación en la bomba centrífuga.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

El desarrollo del experimento (Reyes 2010) se realizó en la instalación de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), la cual cumple con las normas establecidas para este tipo de ensayos (NTC 4990 y el Código ASME, *Performance Test Code, Centrifugal Pumps* 8.2. -1965).

2.1. Características de la instalación

Se empleó un circuito hidráulico de tuberías transparentes de acrílico de 0,021 m de diámetro, con el objetivo de visualizar el flujo del fluido y las formaciones de burbujas de vapor producido por la cavitación. El comportamiento de las presiones fue tratada a través del procesamiento

digital de señales emitidas por transductores piezoeléctricos y su registro con una tarjeta de adquisición de datos de cuatro canales de 14 bits de resolución y una frecuencia de muestreo de 200 Hz; se utilizaron cuatro captosres del tipo P-51 (psi de presión): uno en las tuberías de succión, dos en la entrada y salida de la voluta y el otro en la tubería de descarga.

La alimentación de los circuitos eléctricos utilizados se realizó con una fuente tipo GW INSTER, con un voltaje de 10 volt y 0,1 A de intensidad, para la amplificación y filtrado de las señales emitidas a los captosres se utilizó el equipo Stanford Research Systems, modelo SR 630, con una ganancia de 20 Hz. El esquema del circuito hidráulico y la ubicación de los captosres piezoeléctrico es el utilizado y representado en el esquema de la instalación descrita por Reyes y colaboradores (2015).

2.2. Características de los captosres piezoeléctricos utilizados en la inducción de la cavitación

Los ensayos se realizaron midiendo simultáneamente la presión en cuatro puntos donde se ubicaron los captosres piezoeléctricos. El caudal del flujo fue regulado en la instalación mediante el estrangulamiento gradualmente por una válvula de globo conectada en la succión que conduce el flujo a la bomba; este caudal se registró con un medidor de flujo volumétrico de la marca GPI, del tipo turbina, con lectura digital.

El almacenamiento de los datos obtenidos en los ensayos emitidos por los captosres de presión de las variables de salida se realizó mediante la interface de la tarjeta de adquisición de datos conectada al ordenador y almacenado en un archivo de la PC. El comportamiento de las señales de presión fueron procesadas a través del programa scilab-5.1.1; es posible obtener el comportamiento gráfico de la señal periódica emitida por los captosres de piezoeléctricos durante la caída de la presión producto de la cavitación, así como la visualización del movimiento de las burbujas tomadas con una cámara rápida de 500 cuadros por segundo, mostrado ambos procesos en el monitor de la PC.

2.3. Dedución de la ecuación de Rayleigh-Plesset

Una herramienta importante para el estudio de cavitación es la ecuación de Rayleigh-Plesset, considerado el primer acercamiento al estudio de dinámica de la burbuja realizado por Rayleigh en 1917. Según Rayleigh (1917), Plesset (1949) y Leighton (2007), es una ecuación diferencial ordinaria que gobierna la mecánica de una burbuja de gas inmersa en un líquido infinito, donde utiliza algunas ideas básicas para deducir una ecuación para el tamaño R de una burbuja esférica; en la ecuación de Rayleigh no fueron contemplados algunos elementos, tales como: la tensión de la superficie y

la viscosidad, obteniendo el modelo simplificado de pulsaciones de las burbujas. Esta ecuación permite determinar el tiempo típico para el colapso de las burbujas en el orden de 10^{-6} s, apreciando además que durante el colapso de la burbuja se alcanzan velocidades altas.

La ecuación de Rayleigh–Plesset se deriva de las ecuaciones de Navier-Stokes donde se asume simetría esférica de las burbujas, esta fue obtenida por primera vez por John Strutt, según Rayleigh, en 1917, sin efectos de viscosidad ni tensión superficial. Fue usada por primera vez en el estudio de burbujas viajeras en fenómenos de cavitación por Plesset en 1949 (Brennen 2011, 2013).

En las burbujas formadas en la sustancia en estado gaseoso pudieran existir fragmentos de gases disueltos, como el nitrógeno y oxígeno, los cuales no son considerados restos del vapor a la presión constante, asumiendo que estos gases disueltos siguen otras conductas. Si se asume que el proceso se desarrolla a temperatura constante, entonces la presión de la burbuja P_b se determina por:

$$P_b = P_v + P_g 0 \left(\frac{R_0}{R} \right)^3 \quad (1)$$

Siendo: P_v la presión de vapor, $P_g 0$ la presión del gas de referencia cuando rebasa el radio inicial R_0 , R es el radio de la burbuja.

Si se considera que el fluido alrededor de la burbuja es completamente simétrica, basada en la ley de conservación de masa, la velocidad inducida $u(r)$ por el movimiento de una burbuja de radio R_0 y velocidad de la interfaz U , resultando que: $u(r) = U \times (R_0/r)^3$.

Por consiguiente la energía cinética del flujo es dada por un volumen íntegro alrededor del espacio entero:

$$\frac{1}{2} \int_R^\alpha u^3 4\pi r^2 dr = 2\pi\rho U^2 R^3 \quad (2)$$

Esta energía cinética viene del trabajo realizado de la burbuja para cambiar su tamaño de un radio inicial R_0 a uno presente R ; este trabajo se refiere a la presión de la superficie de la burbuja (P_l) y la presión del líquido fuera de la burbuja es (P_a), donde la ecuación toma la forma de:

$$\int_{R_0}^R (P_l - P_a) 4\pi r^2 dr = 2\pi\rho U^2 R^3 \quad (3)$$

Si la longitud típica para las variaciones de presión es grande, comparado con el tamaño de la burbuja, se puede realizar la integral de la ecuación precedente, llegando al resultado siguiente:

$$(P_l - P_a) \frac{4}{3} (R^3 - R_0^3) = 2\pi\rho U^2 R^3 \quad (4)$$

Para despejar el término que contiene R_0 al lado izquierdo, tomamos la derivada con respecto a R , donde $U = dR/dt$ y el $dU^2/dr = 2 d^2R/dt^2$. Esto conduce a la ecuación simplificada de Rayleigh-Plesset:

$$\rho \left[R \frac{d^2R}{dt^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{dR}{dt} \right)^2 \right] = (P_l - P_\alpha) \quad (5)$$

El término P_l incluye la presión de vapor y la presión asociada con la presión de gases disueltos.

2.4. Solución numérica del comportamiento de las burbujas durante la cavitación para el licor amoniacal aplicando la ecuación de Rayleigh-Plesset

La ecuación que describe la pulsación de una burbuja esférica en un medio infinito es aplicada a las características del fluido asumiendo como hipótesis que:

- La burbuja permanece esférica en todo momento.
- La densidad del fluido circundante es mucho mayor que la del gas.
- El contenido del gas dentro de la burbuja permanece constante.
- No actúan fuerzas de cuerpo.
- El fluido es incompresible.

Si se consideran los parámetros que pueden caracterizar la capilaridad del fluido, entonces podemos agregar otras contribuciones teniendo en cuenta la densidad, viscosidad y tensión superficial; la ecuación de Rayleigh-Plesset toma la forma de la ecuación (6) (Leighton 2007).

$$\rho \left[R \frac{d^2R}{dt^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{dR}{dt} \right)^2 \right] = P_b - P_\alpha - \frac{2\sigma}{R} - \frac{4\mu}{R} \frac{dR}{dt} \quad (6)$$

Esta es una ecuación no lineal que gobierna el tamaño de burbujas en el líquido, donde: R es el radio de la burbuja, ρ es la densidad del líquido, σ es la tensión superficial, μ es la viscosidad dinámica, P_b es la presión del gas dentro de la burbuja y el P_α es la presión del líquido alrededor de la burbuja.

Si sustituimos la ecuación (1), representada por la ecuación de la burbuja P_b en la ecuación (6), obtenemos la ecuación parametrizada para el fluido, que adopta la forma final:

$$\rho \left[R \frac{d^2R}{dt^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{dR}{dt} \right)^2 \right] = P_v + P_{go} \left(\frac{R_0}{R} \right)^3 - P_\alpha - \frac{2\sigma}{R} - \frac{4\mu}{R} \frac{dR}{dt} \quad (7)$$

Esta ecuación se ajusta a las características del fluido, teniendo una dependencia fundamental de la presión de vapor del fluido (P_v), de la presión del gas (P_{go}) y de los demás parámetros que caracterizan al fluido.

Para darle solución numérica a la ecuación parametrizada para el fluido (7) se utilizó el método para ecuaciones diferenciales con paso variable Runge-Kutta de cuarto orden y escogiendo un paso variable de tal manera que el cociente $\frac{\Delta R}{R}$ siempre sea menor de 0,02; donde la variable de paso se reduce cuando la variación de radio R alcanza su máxima dimensión en función del tiempo, suministrándole los datos de campos de presión y con los resultados del programa escrito en Fortran, el cual toma en cuenta las variaciones que se producen cuando el radio de la burbuja cambia describiendo una trayectoria no lineal.

Los experimentos se realizaron para el agua y el licor amoniacal a dos concentraciones de amoníaco (27 % y 34 %), donde el modelo de cavitación en el flujo se consideró la presión del fluido igual a su presión de saturación. La curva de saturación se aplicó para una temperatura fija, en el cual su valor es marcado por la presión de saturación, siendo esta la presión de formación de las burbujas cuando se induce la cavitación, que para el licor amoniacal al 27 % ocurre a partir de la disminución de la presión en la entrada del impulsor de $59,7 \cdot 10^3$ Pa a $45,468 \cdot 10^3$ Pa a la temperatura de 22,15 °C, para una concentración de 34 % ocurre cuando la presión desciende de $89,995 \cdot 10^3$ Pa a $69,951 \cdot 10^3$ Pa a la temperatura de 22,15 °C y para una concentración de 38 % la presión disminuye hasta $87,248 \cdot 10^3$ Pa. De esta manera quedan establecidos los valores límites de presión de vapor para diferentes concentraciones, estos valores aparecen representado en la Tabla 1.

Tabla 1. Valores de la presión de vapor experimentales (Fuente: Reyes e investigadores 2015)

No	Valores de presión de vapor	Unidad	% de concentración de amoníaco a 22 °C
3	45 468	(Pa)	27
4	69 951	(Pa)	34

Las presiones iniciales del gas para el agua es de 11 700 Pa y para el licor amoniacal es de 7 500 Pa, este valor es invariable para las diferentes concentraciones, para valores menores de presión del gas indefinen la solución de la ecuación. Al programa se le ingresan los datos contenidos en la Tabla 2, donde a través de procesos iterativos se obtienen el resultado del tiempo de evolución de la burbuja (t), el radio de la burbuja (R) y las derivadas del radio de la burbuja (R') de la ecuación parametrizada (7).

Tabla 2. Datos de entrada al programa correspondiente a los fluidos del agua y el licor amoniacal a diferentes concentraciones

No	Número de iteraciones	Presión de saturación (Pv, Pa)	Presión inicial del gas (Po, Pa)	Densidad (ρ , kg/m ³)	Tensión Superficial (σ , N/m)	Viscosidad Dinámica (μ , Pa.s)	Tipo de fluido
1	20 000	10 135	11 700	998	0,0727	0,000798	Agua
2	20 000	45 468	7 500	870	0,0055	0,0013	LA 27 %
3	20 000	69 951	7 500	870	0,0055	0,0013	LA 34 %

LA= Licor amoniacal

Los patrones de flujo para el agua y los ensayos en la instalación experimental se realizaron para los mismos fluidos e idénticas concentraciones (27 % y 34 %). Las regulaciones de los flujos se realizaron mediante la válvula de estrangulación en la succión, las cuales, al regular los flujos, producen cambios en los caudales y el movimiento de las burbujas.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Comportamiento de la presión de formación de las burbujas y su movimiento

La solución de la ecuación de Rayleigh-Plesset parametrizada para el fluido permitió evaluar el comportamiento de la presión, el radio de la burbuja y su tiempo de duración, a partir de la presión de saturación; para ello se toma el tamaño inicial $R_0 = 1 \times 10^{-5} \text{ m} = 10 \text{ } \mu\text{m}$ y el $dR/dt = 0$. El resultado obtenido en la gráfica de la Figura 2 describe el comportamiento de las burbujas para los fluidos de agua y licor amoniacal a concentraciones de 27 % y 34 %, en el que las curvas experimentan una trayectoria del radio de las burbujas desde su formación, crecimiento y colapso, en función del tiempo de duración de las burbujas. Los resultados numéricos se ilustran seguidamente:

	Radio de la burbuja	Tiempo de implosión
Agua	$2,8 \cdot 10^{-5} \text{ m}$	de $2 \cdot 10^{-5} \text{ s}$ a $1,6 \cdot 10^{-4} \text{ s}$
Licor a 27 %	$6 \cdot 10^{-5} \text{ m}$	$2 \cdot 10^{-5} \text{ s}$ a $2,5 \cdot 10^{-5} \text{ s}$
Licor a 34 %	$1,0 \cdot 10^{-4} \text{ m}$	$1,0 \cdot 10^{-4} \text{ m}$

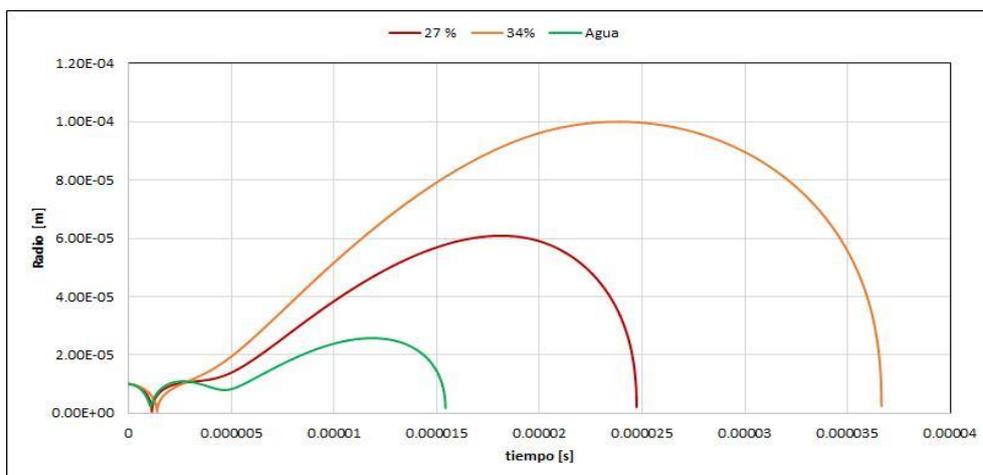


Figura 2. Evolución del radio de la burbuja para un medio estático.

La evolución del tiempo de duración de las burbujas y el radio de las burbujas es menor en el agua que para el licor amoniacal a las concentraciones estudiadas. Este comportamiento de las gráficas representadas con la solución de la ecuación de Rayleigh- Plesset es válido en un medio estático, cuando la presión de los fluidos se encuentra en el límite de la presión de saturación, donde el cambio de fase ocurre de manera casi instantánea.

El comportamiento gráfico de las curvas que representan la soluciones de la ecuación de Rayleigh- Plesset del agua y el licor amoniacal a la concentraciones de 27 % y 34 %, para un medio dinámico (Figura 3), donde las curvas experimentan una trayectoria creciente desde su formación y crecimiento de las burbujas, sin que se produzca la implosión de estas. En estos tiempos las burbujas no implosionan y logran alcanzar la salida del impelente y de la voluta de la bomba, formando un oscilador de burbujas en la tubería de descarga; donde para el agua la burbuja tiene un radio de $2,8 \cdot 10^{-5}$ m, para licor amoniacal a 27 % de concentración de amoníaco el radio de la burbuja es de $6 \cdot 10^{-5}$ m, y para licor amoniacal a 34 % de concentración de amoníaco el radio de la burbuja es de $1,0 \cdot 10^{-4}$ m.

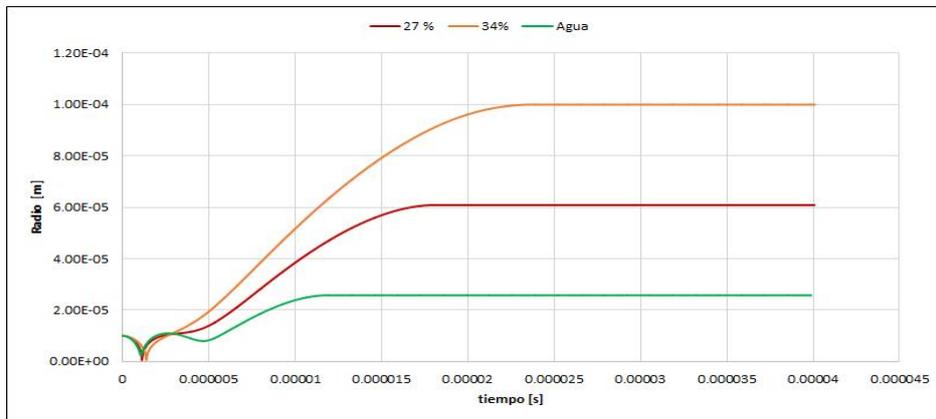


Figura 3. Evolución del radio de la burbuja para un medio dinámico.

El comportamiento gráfico de las velocidades de formación y crecimiento de las burbujas aparecen representadas en la Figura 4, donde la velocidad de formación de la burbuja se corresponde con la primera derivada del radio en función del tiempo; las burbujas experimentan un tiempo de duración que va desde $2,5 \cdot 10^{-5}$ s hasta $6 \cdot 10^{-5}$ s, en este tiempo la burbuja implosiona antes de alcanzar la salida del impelente.

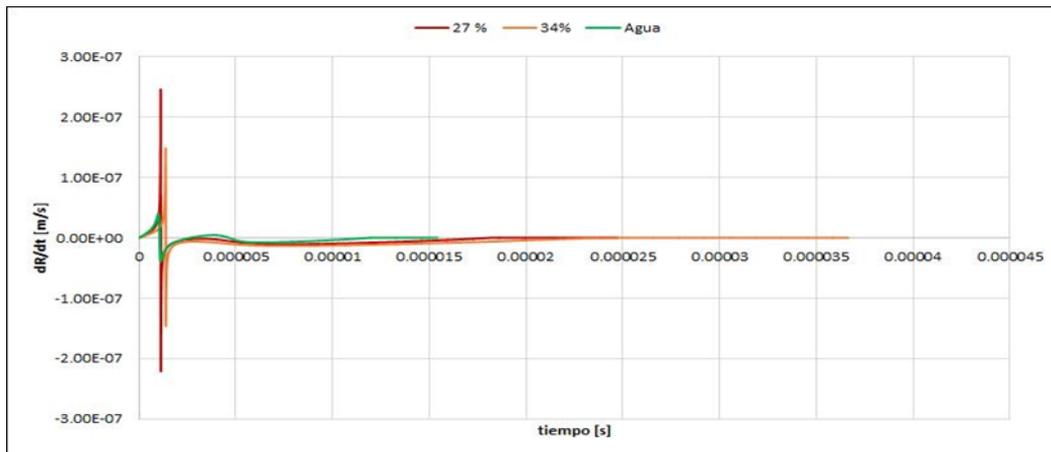


Figura 4. Velocidad del radio de la burbuja.

Las burbujas que se producen en el licor amoniacal alcanzan menores velocidades que las que se forman en el agua, debido a que tienen mayores radios. Cuando en el licor amoniacal se producen burbujas, la formación de estas tendrá menor velocidad en la medida que aumenta su radio y estas velocidades serán siempre menores que cuando se forman en el agua. La velocidad de formación de las burbujas es de $2,5 \cdot 10^{-7}$ m/s para el agua en su máximo local, mientras que va desde $0,3 \cdot 10^{-7}$ m/s para el licor amoniacal al 34 % de concentración hasta $1,5 \cdot 10^{-7}$ m/s en el licor amoniacal a 27 % de concentración de amoníaco.

El resultado de las velocidades de crecimiento de las burbujas evidencia que cuando estas alcanzan un radio pequeño su velocidad es máxima y produce

su implosión en la superficie sólida del álabe de impelente, de manera que no se forma el oscilador de burbujas en la tubería de descarga.

3.2. Patrones de flujo

Se observa el comportamiento del fluido (agua y la formación del oscilador en la salida de la voluta de la bomba y en la tubería de impulsión o descarga producida por la cavitación, así como la formación de los patrones de flujo (Figura 5).

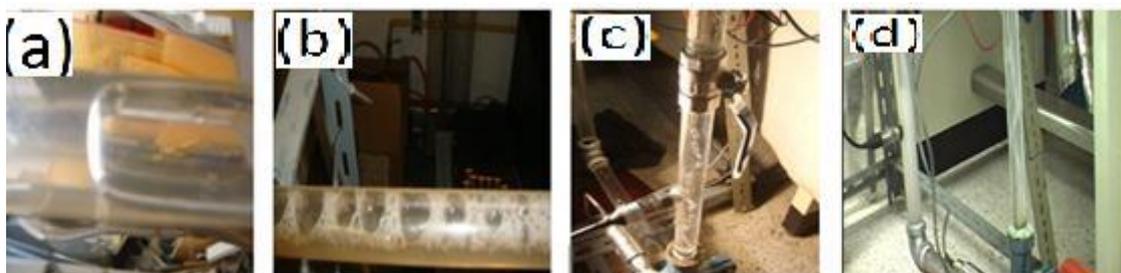


Figura 5. Patrones de flujo durante la ocurrencia de la cavitación. a) Flujo intermitente; (b) Flujo burbuja; (c) flujo intermitente en forma de un oscilador; (d) Flujo revuelto turbulento.

En el flujo intermitente (a) aparecen burbujas largas con forma de pistón o bala, con un diámetro casi igual al diámetro de la tubería. Cuando el flujo es de burbuja (b) ocurren entre los espacios vacíos de menor presión. En el tercer patrón (c) el flujo es intermitente en forma de un oscilador en dirección de su movimiento alternativo. El patrón (d) es generado en las diferentes secciones de la instalación al someterse el fluido a regulación.

Las características de las tuberías utilizadas en el experimento permitieron visualizar de manera clara el comportamiento del fluido al circular por la tubería de descarga durante la cavitación. Mediante la utilización de una cámara rápida de 500 cuadros/segundo fue posible captar este comportamiento como aparece en las imágenes de la Figura 6.

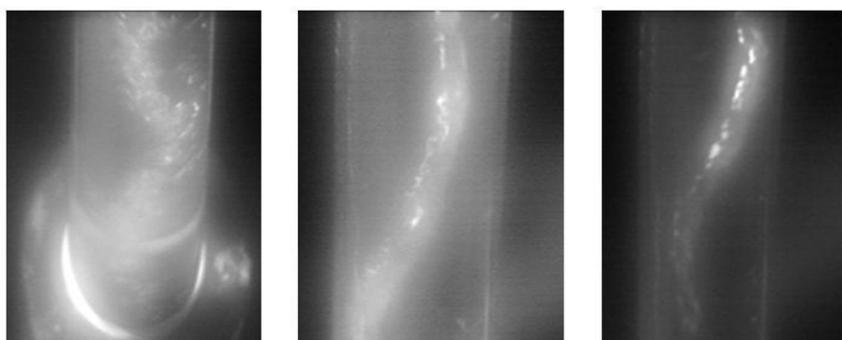


Figura 6. Secuencia de imagen del fluido en la tubería de descarga de la instalación y el oscilador que forman las burbujas durante la cavitación para regulaciones del fluido de 75 %, 50 % y 25 % (de izquierda a derecha).

En la Figura 6 se presenta la secuencia de imagen del fluido en la salida de la bomba y el comportamiento de las burbujas en el fluido en la tubería de descarga durante la cavitación, observando el oscilador formando por las burbujas al variar el caudal a través de la abertura de la válvula de regulación al 75 %, 50 % y al 25 % que, además, se hace más estable y definido con la regulación menor del caudal.

Las oscilaciones generadas por las formaciones de burbujas están asociadas al proceso dinámico y a las colisiones de las burbujas en el fluido con otras burbujas o pequeñas partículas presentes, así como a los cambios bruscos producidos en las variables termodinámicas de la burbuja.

Para el licor amoniacal, a concentraciones de 27 % y 34 %, no fueron observados estos patrones por la coloración oscura de este fluido, pero si fueron visualizadas y medidas por los captosres piezoelétricos las caídas de presiones cuando ocurría la cavitación en el interior de la bomba centrífuga.

A partir de los experimentos, las mediciones realizadas, el procesamiento de las informaciones y los resultados obtenidos, se deduce que para evaluar la evolución de las burbujas formadas por la cavitación, la presión de saturación es la presión a la cual comienza la formación de burbujas, obteniendo que:

- Para valores de presión del gas menores de 11 700 Pa en el agua y de 7 500 Pa en el licor amoniacal a diferentes concentraciones no se forman las burbujas y no es posible obtener resultado aplicando la ecuación parametrizada, ya que el comportamiento no lineal que proyecta la función no converge para presiones menores.
- Para los valores iniciales del tiempo, en el inicio de la curva, hay un comportamiento decreciente al igualarse la presión del fluido a la presión de saturación, la ecuación comienza a tomar valores buscando convergencia del método y a partir de esta su comportamiento es creciente hasta alcanzar el radio máximo de la burbuja, luego comienza a decrecer hasta desaparecer del valor de su radio, ocurriendo la implosión.
- El tiempo de duración de las burbujas es proporcional a la concentración del licor amoniacal; para una concentración de 27 % el tiempo de duración es menor que para una concentración del 34 %.
- Cuando se produce la cavitación, la velocidad de crecimiento de las burbujas aumenta con la concentración del licor amoniacal y es menor para las burbujas formadas en el agua.

- En los ensayos realizados en la instalación se encontró que los patrones de flujo coinciden con la dirección y sentido del flujo, observándose que cuando se hace intensa la cavitación, el patrón intermitente predomina en la tubería de impulsión vertical, mientras que los patrones de flujo de burbujas y revuelto turbulento predominan en la tubería de succión e impulsión de forma horizontal y aparecen indistintamente, dependiendo de la regulación del caudal a través de la válvula de regulación de flujo. El patrón revuelto turbulento aparece siempre que el caudal se regule a valores muy pequeños (25 % de regulación).
- Cuando se experimenta con agua las burbujas formadas en un sistema dinámico no implosionan y logran salir del álabe, del impelente y de la voluta de la bomba y son las que forman el oscilador que aparece representado en la tubería de descarga de la instalación reflejada en la Figura 6.

4. CONCLUSIONES

- La presión de formación de las burbujas a 22 °C, cuando se induce la cavitación para el agua, es igual a $10,135 \cdot 10^3$ Pa para el licor amoniacal al 27 % de concentración $45,468 \cdot 10^3$ Pa y de $69,951 \cdot 10^3$ Pa para una concentración de 34 %.
- Los radios alcanzados por las burbujas en el licor amoniacal son del orden de 30 a 120 veces el radio inicial, en un tiempo de duración de formación de las burbujas de $0,5 \cdot 10^{-5}$ s para 27 % de concentración y $1,5 \cdot 10^{-5}$ s para 34 % de la misma. Para las burbujas formadas en el agua el radio es del orden de 15 veces el radio inicial, en un tiempo de duración de formación de las burbujas de $0,2 \cdot 10^{-5}$ s.
- Se logra visualizar, para las burbujas formadas en el agua, los cuatro patrones de flujo: intermitente, de burbuja, oscilador y revuelto turbulento; predominando el oscilador en flujos verticales y el de burbuja y revuelto turbulento en las tuberías horizontales.

5. REFERENCIAS

- BARNES, P. A. & RIECKHOFF, K. E. 1968: Laser induced underwater sparks. *Applied Physics Letters* 13(8): 282-284.
- BRENNEN, C. E. 2011: *Hidrodynamics of Pumps*. Cambridge University Press.
- BRENNEN, C. E. 2013: *Cavitation and bubble dynamics*. Cambridge University Press.
- CONDE, M. R. 2004: Thermophysical Properties of $\text{NH}_3 + \text{H}_2\text{O}$ Solutions for the Industrial Design of Absorption Refrigeration Equipment. *Revista Engineering* 1-34 p.

- DOPAZO, G. C. 2008: *¿Cavitar o no cavitar? La inevitable ubicuidad de las burbujas*. Real Academia de España. Universidad de Zaragoza. Madrid. 50 p.
- GONZÁLEZ, V. 1983: *Hidráulica, bombas y compresores*. Pueblo y Educación, Ciudad de La Habana.
- FERZIGER, F. H. & PERÍC, M. 2002: *Computational Methods for Fluid Dynamic*. 3ra edition. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg. 423 p.
- REYES, J. L. 2010: Un experimento de enseñanza e investigación de la cavitación en bombas centrífugas. *Asociación Americana de Profesores de Física* 4(1): 2-18.
- REYES, J. L.; RUIZ, G.; TORRES, E.; LAMBERT, R. & MATOS, M. 2015: Presión de saturación del licor amoniacal y su relación con el fenómeno de cavitación en bombas centrífugas. *Minería y Geología* 31(1): 111-129.
- RAMÍREZ, R. G.; JÁCOME, M. & GIRALDO, A. J. 2013: Solución de la ecuación de Rayleigh-Plesset por medio del método del elemento finito. *Ingeniería y Ciencia* 9(17): 147-162.
- PÉREZ, B. R. 2004: Cavitación y materiales de construcción en las Bombas Centrífugas. *Minería y Geología* 20(3-4): 114-118.
- LEIGHTON, T. G. 2007: *Derivation of the Rayleigh-Plesset equation in terms of volume*. Institute of Sound and Vibration Research. University of Southampton.
- LAUTERBORN, W. 1998: Termo cavitación y algunas aplicaciones. En: XIX Verano de la Investigación Científica de la Academia Mexicana de Ciencia. Instituto Nacional de Astrofísica y Electrónica. México.
- RAYLEIGH, L. 1917: On the pressure developed in a liquid during the collapse of a spherical cavity. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science* 34(200): 94-98.
- PLESSET, M. S. 1949: The dynamics of cavitation bubbles. *Journal of applied mechanics* 16: 277-282.
- TANAKA, T. & TSUKAMOTO, H. 1999a: Transient behavior of a cavitating centrifugal pump at rapid change in operating conditions—Part 1: Transient phenomena at opening/closure of discharge valve. *Journal of fluids engineering* 121(4): 841-849.
- TANAKA, T. & TSUKAMOTO, H. 1999b: Transient behavior of a cavitating centrifugal pump at rapid change in operating conditions—Part 2: Transient phenomena at pump startup/shutdown. *Journal of fluids engineering* 121(4): 850-856.
- TANAKA, T. & TSUKAMOTO, H. 1999c: Transient behavior of a cavitating centrifugal pump at rapid change in operating conditions—Part 3: Classifications of transient phenomena. *Journal of fluids engineering* 121(4): 857-865.

TORRES, S. 2010: *Generación de burbujas de cavitación con láser continuo para la formación de microagujeros en películas metálicas delgadas*. Tesis doctoral.

Jorge Luis Reyes-Cruz, jreyes@ismm.edu.cu
Ms. C. Instituto Superior Minero Metalúrgico

Gerardo Ruiz-Chavarría, gruiz@unam.mx
Doctor en Ciencias. Universidad Nacional Autónoma de México, México

Roilber Lambert-Sánchez, rlamberts@ismm.edu.cu
Máster en Ciencias. Instituto Superior Minero Metalúrgico, Moa, Holguín, Cuba

Alberto Turro-Breff, aturrob@cug.co.cu
Doctor en Ciencias. Centro Universitario de Guantánamo, Cuba

Enrique Torres-Tamayo
Doctor en Ciencias.

Sergio Hernández Zapata, shernandezzapata@yahoo.com.mx
Universidad Nacional Autónoma de México, México

Comportamiento de la sedimentación utilizando floculantes a escala de laboratorio en pulpas lixiviadas en la Empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”, Cuba

Eluberto Espinosa-Espinosa
Pedro E. Beyris-Mazar

Resumen

El objetivo de esta investigación fue evaluar, a escala de laboratorio y en pulpas lixiviadas y magnetizadas, el comportamiento de la sedimentación al añadir los floculantes: PICIZ 7010, AN 910SH y Quimifloc N-30. La evaluación se realizó por el método comparativo aplicando la norma NRBI-579 que utiliza el método de Talmage y Fitch. Al usar floculante Quimifloc N-30, en dosis de 6 g/t de mineral reducido, se incrementó la densidad de la pulpa en 5,9 %; mejoró la clarificación de los licores al disminuir los sólidos en suspensión hasta un 75 % y disminuyó ligeramente el área unitaria requerida.

Palabras clave: proceso Caron; lixiviación carbonato-amoniaca; sedimentación; floculación química; pulpas lateríticas.

Sedimentation effects of adding flocculants to leached slurries at lab scale in the “Comandante Ernesto Che Guevara” plant in Cuba

Abstract

The objective of this investigation was to evaluate the effects of adding PICIZ 7010, AN 910SH and Quimifloc N-30 flocculants to leached and magnetized slurries at lab scale. The evaluation was completed through the comparative method in accordance to the NRBI-579 Standard: Sedimentation Tests which use Talmage and Fitch method. The addition of Quimifloc N-30 flocculants to 6 g/t of reduced ore increased slurry density by 5,9 %, improved liquor clarification as result of a reduction of up to 75 % in suspended solids and slightly reduced the required unit area.

Keywords: Caron process; ammonium carbonate leaching; sedimentation; chemical flocculation; laterite slurries.

1. INTRODUCCIÓN

En la Planta de Lixiviación y Lavado de la empresa "Comandante Ernesto Che Guevara" la sedimentación es el proceso por el cual se separan la fase sólida, mineral reducido y el licor rico en los metales valiosos extraídos. La operación de los sedimentadores con una densidad de fondo estable, de 1650 g/L a 1750 g/L, incide en los indicadores de eficiencia de la planta, evitando el incremento de la concentración de níquel en solución en las etapas que le siguen, por una disminución del flujo de licor contenido en la pulpa espesada que se extrae del mismo.

La explotación de nuevos yacimientos, con composición química y mineralógica variable, bajo contenido de Fe y altos de SiO₂ y MgO, provocan crisis de sedimentación con baja velocidad de sedimentación, inferiores a 1,0 m/h; la aparición de transversos en los sedimentadores y altos porcentajes de sólidos en suspensión en el licor de reboso, que incrementan las costras que se incrustan en los enfriadores de placas. Esto ocasiona una disminución en su eficiencia de enfriamiento. Por diseño, a la pulpa lixiviada se le aplica la floculación magnética a la entrada del sedimentador.

Investigaciones previas de otros autores han analizado el comportamiento de la sedimentación. Cubillet, Chaviano y Espinosa (1990) desarrollaron evaluaciones a escala de laboratorio con una poliacrilamida en forma de gel, logrando altas velocidades de sedimentación. Al aplicarse este producto a escala industrial los resultados no fueron los esperados: se seleccionó un floculante de alto peso molecular que provocó incrementos en los amperajes de los sedimentadores y, además, la evaluación en la industria se desarrolló sin un sistema automático para la preparación y dosificación del floculante, que incidió negativamente en la misma.

Lalande y Espinosa (1995) realizan evaluaciones a escala de Laboratorio con pulpa de la primera etapa de lixiviación y 15 tipos de floculantes del tipo Percol, determinando que el Percol 338, un polímero aniónico de alto peso molecular, fue el de mejor resultado al lograr mayor velocidad de sedimentación y mayor compactación de la pulpa sedimentada; a escala industrial este floculante no fue efectivo, se ignoró en la selección del polímero el diseño del sedimentador con bajo torque en el mecanismo de accionamiento, lo que provocó altos amperajes en el motor de este equipo.

Morales, Ganzó y Espinosa (2000) evalúan 12 floculantes en la pulpa lixiviada de la primera etapa de lixiviación, magnetizada y sin magnetizar. El de mejor resultados fue el Quimifloc N-30; este floculante tiene carácter aniónico a base de poliacrilamida de alto peso molecular. Logró resultados

superiores en la velocidad de sedimentación y en la densidad final de la pulpa y menores porcentajes de sólidos en suspensión. Se aplicó la norma NRBI-579.

Landrau, Martín y Espinosa (2001) aplican 14 floculantes, en pulpa magnetizada y sin magnetizar, de la primera etapa de lixiviación. De ellos el mejor fue el AM10-THU, alcanzándose velocidad de sedimentación superior al compararla con la que se logró con la pulpa en blanco, menor porcentaje de sólidos en suspensión y mayor compactación de la pulpa. Se aplicó la norma NRBI-579.

Nicolini (2004) evalúa 13 floculantes, en pulpa de la primera y tercera etapas de lixiviación y para la última etapa de lavado: FA 920 SHR, AH 91 AN 905 SH, AN 910 SH, AN 913 SH, AN 923 SH, AN 934 SH, AN 945 SH, AN 113 SH, AN 118 SH, AN 125 SH y AN 132 SH, a concentración de 0,5 g/L. Determinó que el floculante AN910-SH fue el de mejores resultados; durante la evaluación a escala de laboratorio no aplicó la norma NRBI-579, sino una metodología en la que detuvo la sedimentación al cabo de los diez minutos de iniciada la experimentación. Por otra parte, las dosis y las velocidades referidas que reportó no se corresponden al tiempo de sedimentación y a la altura de la cama final del sólido sedimentado y que mostró en el Informe. Al aplicar este floculante a escala industrial no consideró los cambios en la composición mineralógica del mineral alimentado al proceso.

Alavés-Bolaños (2005) evalúa en pulpa de la primera etapa de lixiviación, magnetizada y no magnetizada, los floculantes Quimifloc C-300, A-100, C-30HMW, C-13, C-11 y C-85. Los mejores resultados para las pulpas sin magnetizar se lograron con el Quimifloc C-30HMW, alcanzando velocidad de sedimentación de 1,39 m/h y para la pulpa magnetizada, el mejor fue el Quimifloc C-12, con una velocidad de 2,11 m/h. Aplicó en la experimentación una dosis de 3 g/t hasta 8 g/t, logró buena clarificación del licor y buena compactación de la pulpa, con ambas dosis; no logró que estos resultados se implementaran a escala industrial por lo que se desconoce los posibles resultados que se obtendrían con los mismos.

García y Rojas (2006) en la Empresa "René Ramos Latourt" evalúan, en pulpa de mineral reducido y pulpa de sulfuro de níquel, cinco floculantes, los CHEMADD A-41, 42 y 43 de la firma CHEMATEK, con el IP-600 de la firma ZAR CIA y el Percol, versión canadiense del MAGNAFLOC R-155. En los experimentos se reportó incremento en la velocidad de sedimentación y una disminución del porcentaje de los sólidos en suspensión en el licor, pero no identifican el de mejor resultado; todos los floculantes se comportaron de

forma similar. No se tiene conocimiento de similar comportamiento de la sedimentación para floculantes con diferentes formulaciones al aplicarlos en esta pulpa.

Jiménez (2012) evalúa para la pulpa lixiviada el floculante PICIZ 7010, a escala industrial, en un sedimentador de alta capacidad, de la primera etapa de lixiviación, logrando densidades bajas en la pulpa espesada (de 1,640 kg/L a 1,715 kg/L) y el contenido de los sólidos en suspensión en el licor de reboso fueron altos, oscilando de 160 mg/L a 200 mg/L; valores que son similares a los que se alcanzan sin la aplicación de floculante.

Rivas (2012a) evalúa siete floculantes en pulpa lixiviada y magnetizadas de la primera etapa de lixiviación: AN-910SH, A-110HMW, A-100 HMW, A-115V, A-120V, N-100 y N-300. Aplicó la norma NRBI-579; de estos polímeros, seis lograron los mejores resultados con una dosis de 9 g/t, muy elevada para el estado técnico de los sedimentadores instalados, a 6 g/t logró los mejores resultados con el floculante A-100HMW.

Rivas (2012b) realiza nuevas evaluaciones con los floculantes AN-910SH, A-115V y el PICIZ 7010 para pulpa lixiviada de la primera etapa de lixiviación; identificó como el mejor el floculante AN-910SH, aplicando una dosis de 3 g/t a escala de laboratorio, logrando una velocidad de sedimentación de 2,03 m/h. El área unitaria fue de 0,33 m²·t/d pero no logró disminuir los porcentajes de sólidos en suspensión a menos de 120 mg/L.

En las investigaciones antes relacionadas no se ha encontrado un floculante que logre mejorar el comportamiento de la sedimentación para el proceso de lixiviación, con velocidades de 1,0 m/h a 1,5 m/h, densidades de 1,65 kg/L a 1,75 kg/L, sólidos en suspensión menores a 100 mg/L, sin incrementar el torque del mecanismo del sedimentador. Por ello esta investigación tiene como objetivo evaluar el comportamiento de la sedimentación a escala de laboratorio, para muestras de pulpas lixiviadas y magnetizadas, en la Empresa "Ernesto Che Guevara" con tres tipos de floculantes: PICIZ 7010, AN-910SH y el Quimifloc N-30.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Para el desarrollo del trabajo se empleó:

- Pulpa de mineral reducido magnetizada de la primera etapa de lixiviación, compuesta por una fase líquida, solución carbonato amoniacal, y la sólida, por el mineral reducido. En la Tabla 1 se presenta la composición química y las propiedades de la pulpa.

Tabla 1: Composición química y propiedades de la pulpa, lixiviada y magnetizada, de mineral reducido

Elementos	UM	Solución carbonato amoniacal	Elementos	UM	Mineral reducido
NH ₃		68,00	Ni		0,33
CO ₂		32,00	Co	%	0,05
Ni	g/L	8,50	Fe		42,00
Co		0,2	Densidad	t/m ³	4,17
MgO		0,05	Tamaño	<200 mesh	85,00
S		3,80	(%)	>100 mesh	7,00
Densidad	t/m ³	1,025			
Temperatura	°C	ambiente		-	
pH	-	8 a 9			

- Floculante: solución preparada a 0,05 %
- Aparatos y utensilios: probetas graduadas de 1 000 mL de capacidad, bastón metálico, con cilindro de goma, para la agitación de la pulpa dentro de la probeta; balanza digital, con precisión de 0,1 g, de 3 000 g de capacidad, balanza analítica, vidrio reloj, espátulas, agitador de velocidad variable; frascos plásticos de 100 mL, 250 mL y 500 mL; cronómetro; jeringuillas plásticas graduadas, de 1,0 mL y 2,5 mL de capacidad; linterna.
- Norma NRBI-579: Pruebas de sedimentación. En esta norma se utiliza el método de Talmage y Fitch para el cálculo de los parámetros de funcionamiento de los sedimentadores o espesadores, que consiste en la confección de la curva de sedimentación característica de la pulpa investigada. A partir de las lecturas de la altura de la cama de sólidos, en suspensión en función del tiempo, y valiéndose de construcciones gráficas, se determinan los factores necesarios para el cálculo de la velocidad de sedimentación y el área unitaria de sedimentación.

2.1. Metodología de trabajo

La muestra de pulpa lixiviada se tomó en la primera etapa de la Planta de Lixiviación, posterior a la magnetización; la experimentación se realizó con la pulpa a temperatura ambiente. Se determinaron las densidades y el contenido de sólidos para calcular la dosis de floculante para cada uno de los experimentos.

Se prepararon las soluciones de floculantes, a concentraciones de 0,05 %, aplicando dosis de 3,0 g/t y 6,0 g/t para definir a escala de laboratorio el comportamiento de la sedimentación con cada uno de los floculantes empleados.

Se aplicó un diseño de experimento factorial 2^3 , se determinó el número de experimentos de ocho con tres réplicas para un total de 24 ensayos; se tomó la lectura final de la altura del sólido al cabo de los 60 min. Para cada una de las réplicas se evaluó una muestra en blanco, para comparar el comportamiento de la sedimentación, compactación de la pulpa y la clarificación del licor, con las que se le aplicó floculante. A cada uno de los experimentos se le tomó muestras de licor para determinar el contenido de sólidos en suspensión.

Los resultados experimentales se trataron a través del EXCEL y el software Visio 2010 para determinar el tiempo unitario y la altura unitaria, que permite mayor precisión en el trazado de las líneas.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con los datos obtenidos durante las experimentaciones se realizaron los cálculos en una hoja de EXCEL, tabulados los resultados de las lecturas se graficaron, calculándose la velocidad de sedimentación; los resultados medios obtenidos se muestran en la Tabla 2, para cada uno de los floculantes evaluados.

Con el floculante Quimifloc N-30 no se incrementaron las densidades finales de las pulpas para las dosis de 3 g/t y 6 g/t, comparadas con las muestras en blanco; superó las velocidades de sedimentación en un 34,7 % y 54,2 %, respectivamente, para ambas dosis. El área unitaria es superior, por la formación de los flóculos en la pulpa espesada y la ausencia de agitación dentro de la probeta, el volumen final de la pulpa es mayor. Disminuyó el porcentaje de sólidos en suspensión al cabo de los 30 min en un 58 % y 62 %, respectivamente, para cada una de las dosis.

Los resultados obtenidos en la densidad final de la pulpa, con el floculante PICIZ 7010, aplicando la dosis de 3 g/t, fue ligeramente inferior, comparado el comportamiento de la sedimentación para la muestra de pulpa en blanco; mientras que para la dosis de 6 g/t fue superior esta densidad. Se incrementó la velocidad de sedimentación en un 15,9 % y 27,8 %, respectivamente, para ambas dosis. El área unitaria fue superior en ambos casos, disminuyendo el contenido de sólidos en suspensión en el licor clarificado, al cabo de 30 min, en un 42 % y 50 %, respectivamente, para cada una de las dosis.

Con el floculante AN-910SH, la densidad final de la pulpa, comparada con la muestra en blanco, para dosis de 3 g/t, es inferior y para dosis de 6 g/t es superior; incrementó las velocidades de sedimentación en un 1,4 % y 34,9 %, respectivamente, para ambas dosis. El área unitaria es superior en ambos casos, al compararla con la muestra en blanco, disminuye el contenido de los sólidos en suspensión al cabo de 30 min, en un 44 %, para cada una de las dosis.

En la Figura 1 se observa el comportamiento de las densidades finales de las pulpas, para cada polímero, a cada una de las dosis evaluadas, estas se incrementaron proporcionalmente al incrementarse las dosis del polímero; el de mejores resultados es el Quimifloc N-30.

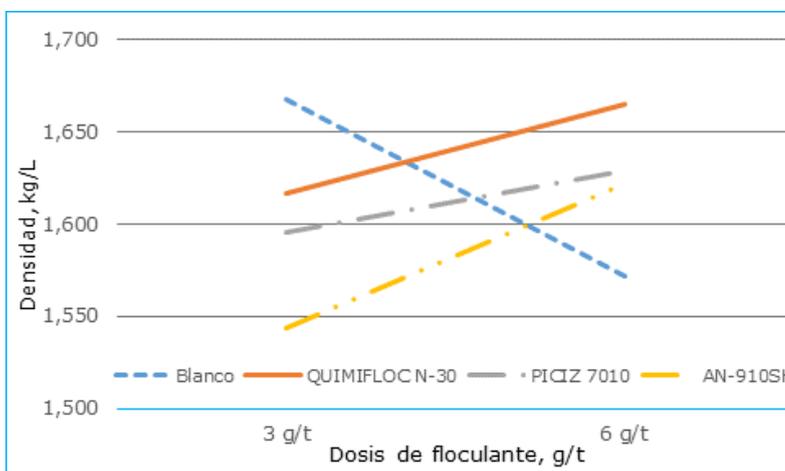


Figura 1. Densidad final de la pulpa para cada dosis evaluada.

El comportamiento del área unitaria, aplicando el floculante QUIMIFLOC N-30, con la dosis de 3 g/t, se requiere de 3,15 % y 3,58 % área unitaria inferior a la requerida al aplicar los floculantes PICIZ 7010 y AN-910HS, respectivamente, tal y como se observa en la Figura 2.

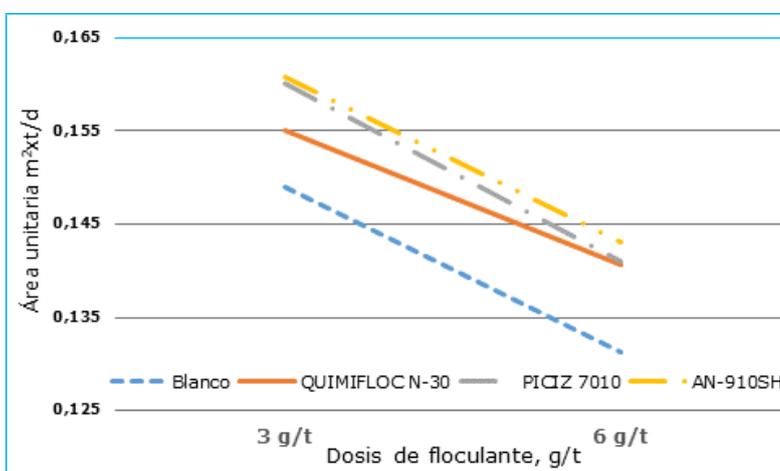


Figura 2. Área unitaria requerida para cada polímero en las dosis evaluadas.

En la Figura 3 se observan las velocidades de sedimentación obtenidas para cada uno de los floculante evaluados, para cada una de las dosis; el floculante de mejor resultado fue el QUIMIFLOC N-30 que alcanzó los valores mayores.

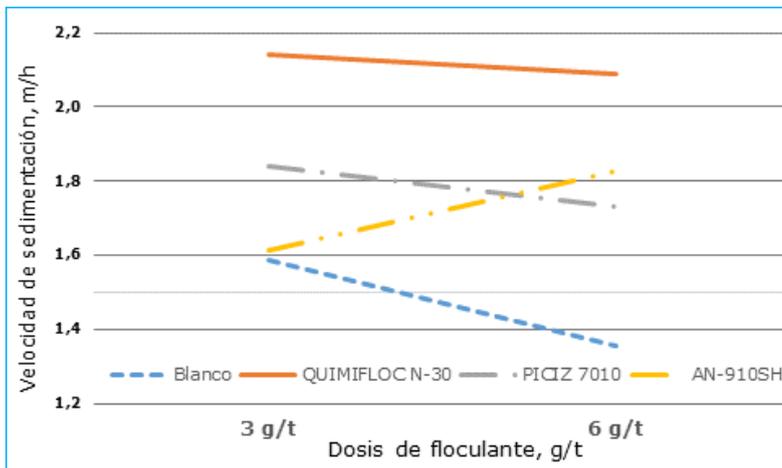


Figura 3. Velocidad de sedimentación calculada para el tiempo unitario y la altura unitaria.

En los sólidos en suspensión, para cada uno de los polímeros evaluados, no se logran diferencias significativas al incrementar las dosis para cada uno de los floculantes; los valores más bajos se alcanzan con el Quimifloc N-30 (Figura 4).

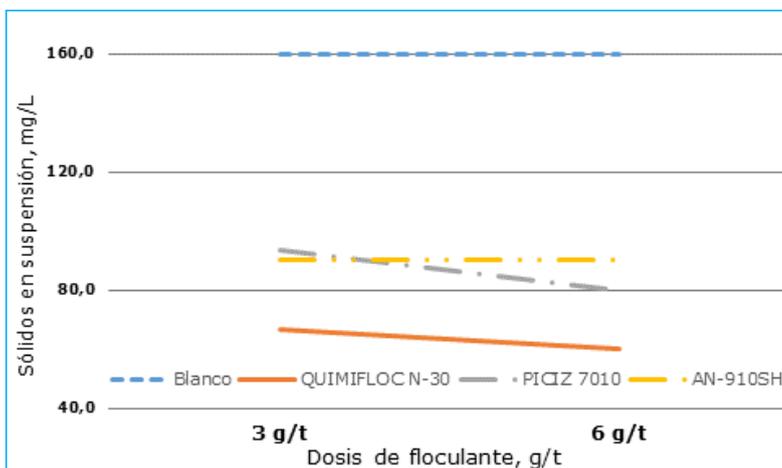


Figura 4. Contenido de sólidos en suspensión para cada polímero.

En la Tabla 2 se muestra la estadística descriptiva de la composición química del mineral alimentado durante la etapa de evaluación de los floculantes; el contenido de Fe estuvo en los valores normales de operación, oscilando de 39,4 % hasta 41,2 %; mientras que la SiO₂ osciló de 10,3 % hasta 12,8 %, valores altos que provocan baja velocidad de sedimentación a la pulpa y se incrementa la altura de la cama de sólidos en el

sedimentador. Se considera que esta composición pudo tener influencia en los resultados obtenidos durante la evaluación.

Tabla No, 2: Estadística descriptiva, composición química de los minerales alimentados durante la evaluación

	Ni HR-1	Co	Fe	H ₂ O	SiO ₂	MgO	Número de mineral
Media	1,161	0,104	40,458	3,019	11,380	3,224	1,319
Error típico	0,009	0,002	0,234	0,061	0,318	0,175	0,106
Mediana	1,161	0,104	40,354	3,050	11,613	3,360	1,192
Desviación estándar	0,024	0,005	0,620	0,161	0,841	0,463	0,280
Varianza de la muestra	0,001	0,000	0,384	0,026	0,707	0,214	0,078
Curtosis	-1,220	-0,393	-0,787	0,847	0,057	-0,396	-1,373
Coefficiente de asimetría	-0,051	-0,773	-0,292	-0,779	0,596	0,581	0,014
Rango	0,064	0,014	1,764	0,500	2,465	1,244	0,776
Mínimo	1,129	0,095	39,485	2,733	10,362	2,764	0,916
Máximo	1,193	0,109	41,249	3,233	12,827	4,008	1,692
Cuenta	7	7	7	7	7	7	7

Tal y como se observa en la Figura 5, en la medida que disminuye el contenido de Fe en el mineral alimentado se incrementa el contenido de SiO₂, con un coeficiente de correlación fuerte: $R^2=0,9817$.

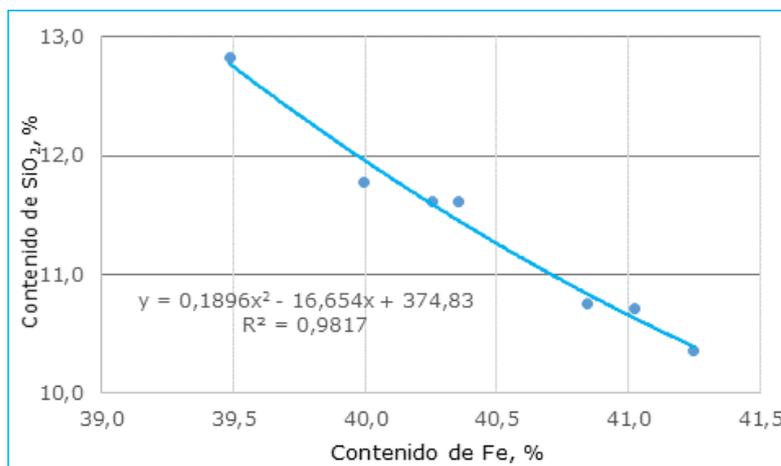


Figura 5: Correlación contenido de Fe & contenido de SiO₂.

Beyris y Falcón (2007) demostraron que la composición mineralógica de las menas lateríticas tiene una incidencia significativa en el comportamiento de la sedimentación de las pulpas. Estableció el criterio de que la presencia de determinadas fases favorece el proceso de sedimentación o lo afecta. Las muestras de buena sedimentación se caracterizan por presentar en las fases minerales secundarias a la magnetita, maghemita y hematita, los cuales le aportan a los minerales lateríticos alta densidad y favorecen el proceso de

sedimentación. Mientras que las muestras de pulpas con mala sedimentación, las fases minerales secundarias que se destacan son la gibbsita, clorita, cuarzo y antigorita, silicatos de aluminio y magnesio de baja densidad, lo cual pudiera ser la causa de la mala sedimentación, provocando la obtención de un producto espesado con baja concentración de sólido.

Al aplicarse la floculación química en la planta de Lixiviación y Lavado debe mejorar la eficiencia de la extracción de los metales valiosos, al lograrse la operación con densidades en valores de 1 650 g/L a 1 750 g/L, de forma estable, por lo que el flujo de licor hacia las etapas posteriores es menor y, en esa misma medida, menor la masa de níquel en solución que se desplaza en sentido contrario al proceso. La operación con un solo sedimentador en la primera etapa, en lugar de los tres que operan actualmente, es beneficioso al proceso, pues disminuye los inventarios pasivos de níquel y amoniaco en solución; reduce el porcentaje de los sólidos en suspensión del licor de recirculación a los tanques de contactos, disminuyendo los ciclos de limpieza de los enfriadores de placas, empleados para el enfriamiento de estos licores.

4. CONCLUSIONES

- El floculante Quimifloc N-30, en dosis de 6 g/t, mostró el mejor resultado al incrementar la densidad de la pulpa hasta 1,665 kg/L y mejorar la clarificación de los licores, disminuyendo los sólidos en suspensión hasta 60 mg/L. El área unitaria es similar a la que alcanza el PICIZ 7010 e inferior a la del AN-910HS.

5. AGRADECIMIENTOS

Al Dr. en Ciencias Técnicas Serapio Morales Márquez y al Ing. Oscar Ganzó Pérez, Especialistas Técnicos, por las experiencias, informaciones técnicas y recomendaciones transmitidas en las evaluaciones de floculantes y tratamiento de sus resultados; al personal técnico del Laboratorio Central de la Empresa "Ernesto Che Guevara", en Moa, por su ayuda en el desarrollo de los experimentos en sus instalaciones; a los profesores del Instituto Superior Minero Metalúrgico por la formación técnico-profesional transmitida durante años de trabajos.

6. REFERENCIAS

ALAVÉS-BOLAÑO, M. 2005: Pruebas de Laboratorio para la primera etapa de Lixiviación con diferentes floculantes. Informe Técnico, Producción, ECG.

- BEYRIS, M. P. & FALCÓN, H. J. 2007: Sedimentación de pulpas minerales lateríticas en la tecnología de lixiviación ácida a presión: incidencia de la composición mineralógica. *Minería y Geología* 23(1).
- CUBILLET, S. M.; CHAVIANO, R. L. & ESPINOSA, E. 1990: Evaluación a escala de laboratorio de la poliacrilamida en forma de gel para pulpas de mineral de la primera etapa de Lixiviación en la Empresa "Ernesto Che Guevara". Informe Técnico, Producción, ECG.
- GARCÍA, P. A. & ROJAS, V. A. 2006: Comparación de los floculantes CHEMADD A-41, 42 Y 43 de la Firma CHEMATEK, el IP-600 de la Firma ZAR CIA y el PERCOL, versión canadiense del MAGNAFLOC R-155. *Tecnología Química* 26(3): 41-47.
- JIMÉNEZ, N. W. 2012: Evaluación del floculante PICIZ 7010 en la operación del SD 109 A. Reporte Técnico. Dirección Técnica, ECG.
- LALANDE, R. & ESPINOSA, E. 1995: Evaluación de muestras de floculante de la firma CIBA para muestras de pulpas lixiviadas de la ECG, Reporte Técnico, Dirección Técnica, ECG.
- LANDRAU, C.; MARTÍN, Y. & ESPINOSA, E. 2001: Evaluación de muestras de floculantes de la firma SNF en la Empresa "Ernesto Che Guevara". Reporte Técnico, Dirección Técnica, ECG.
- MORALES, S.; GANZÓ, O. & ESPINOSA, E. 2000: Evaluaciones a escala de laboratorio de muestras de floculantes para pulpas magnetizadas de la planta de Lixiviación y Lavado de la Empresa "Ernesto Che Guevara". Reporte Técnico, Producción, ECG.
- NICOLINI, D. 2004: Pruebas de Laboratorios con muestras de la primera etapa de Lixiviación, tercera etapa de Lixiviación y última de Lavado. SNF do Brasil Ltda. Informe Técnico. Producción, ECG.
- RIVAS, S. 2012a: Evaluación de nuevos floculantes a escala de Laboratorio. CEDINIQ, Reporte Técnico. Producción, ECG. Agosto 2012.
- RIVAS, S. 2012b: Evaluación de nuevos floculantes a escala de Laboratorio. CEDINIQ, Reporte Técnico, Producción, ECG. Septiembre 2012.

Eluberto Espinosa-Espinosa, eespinosa@ecg.moa.minem.cu
Empresa Productora de Níquel "Ernesto Che Guevara", Moa, Cuba

Pedro E. Beyris-Mazar, pbeyris@ismm.edu.cu
Doctor en Ciencias Técnicas. Instituto Superior Minero Metalúrgico, Moa, Cuba

Deposición de un recubrimiento base níquel para la unión metalúrgica del acero al carbono y el hierro fundido

Tomás Fernández-Columbié
Dayanis Alcántara-Borges
Isnel Rodríguez-González
Leónides Sablón-Pérez

Resumen

El propósito fue establecer el comportamiento microestructural de una unión disímil realizada entre el hierro fundido y el acero al carbono a través de una deposición de un sustrato base níquel en el acero al carbono. El recubrimiento se hizo con el electrodo recubierto Castec 3099 (UTP 8) y soldadura SMAW, mientras que con el proceso GTAW y el electrodo desnudo ER 70S-A1 se realizó la unión entre ambos materiales. La composición química de los cordones resultantes se analizó mediante el diagrama de Schaeffler. El análisis microestructural de la zona fundida y de la zona de influencia térmica permitió establecer que durante este tipo de soldadura, cerca de la línea de fusión, se obtienen estructuras aciculares cuando se suelda con electrodo Castec 3099 y en la ZAT morfologías de ferrita esquelética; con el electrodo ER 70S-A1 se obtiene una mezcla de austenita.

Palabras clave: soldadura; microestructura; acero al carbono; hierro fundido; recubrimiento base níquel.

Depositing nickel-based hardfacing to join carbon steel and cast iron

Abstract

The objective of this investigation is to determine the micro-structural behavior of a joint between cast iron and carbon steel by depositing a nickel-based substrate in the carbon steel. The filler was added through Shielded Metal Arc Welding using Castec 3099 (UTP 8) electrodes while the base materials were joined through Gas Tungsten Arc Welding with ER 70S – A1 bare electrodes. The Schaeffler diagram was used to analyze the chemical composition of the resulting weld beads. The results of the analysis performed on the welded area and the heat influence zone indicated the formation of acicular structures near the welded line when Castec 3099 electrodes are used and the formation of skeletal ferrite on the heat influence zone during the application of this welding process. An austenitic mixture is formed when ER 70S – A1 electrodes are used.

Keywords: welding; microstructure; carbon Steel; cast iron; nickel based hardfacing.

1. INTRODUCCIÓN

En la soldadura de mantenimiento o recuperación, en ocasiones, por las características que se quiere lograr, se acude a técnicas que permitan una unión metalúrgica con características que garanticen la durabilidad de la junta soldada. En el caso del hierro fundido, para soldarlo con el acero al carbono, se recurre a la aplicación de un sustrato o recubrimiento llamado enmantequillado.

Las reparaciones en fundición de hierro gris o hierro maleable son trabajos comúnmente encontrados en la práctica diaria y considerada entre los más difíciles. Cuando se suelda hierro fundido hay una capa dura y frágil adyacente a la soldadura; esta capa consiste en hierro endurecido superficialmente como resultado del rápido enfriamiento desde una alta temperatura. Por lo antes expuesto se considera que cada fundición debe analizarse por su propia composición química, particularmente en soldadura de reparación y de mantenimiento (Zhang, Elmer & Debroy 2005).

Según Alfonso y demás colaboradores (2005) un recubrimiento es un acabado delgado, generalmente de un pequeño espesor, que tiene como propósito mejorar la resistencia a la corrosión a las altas temperaturas, al desgaste, la lubricación o cambiar la apariencia externa del material. Existe una infinidad de técnicas diferentes para fabricar un recubrimiento; estas pueden clasificarse a grandes rasgos, como recubrimientos químicos, electroquímicos, deposición química y física de vapor, proyección térmica y soldadura (Zapata & Mesa 2005), todos los cuales pueden ser aplicados de manera líquida, gaseosa o sólida.

Plantean Villanueva y otros investigadores (2006) que la soldadura al arco con electrodos revestidos base níquel son ampliamente utilizados para soldar el hierro fundido, incluso sin la aplicación de precalentamiento, normalmente puede maquinarse (la zona afectada por el calor puede que no sea maquinable). Este tipo de soldadura es rápida cuando se compara con el proceso de oxidante. Aunque con estos materiales de aporte solo se exige soldar en posición plana, según los requerimientos de la especificación A 5,15 de la AWS, algunos electrodos pueden ser utilizados en otras posiciones, donde las propiedades de tensión no son especificadas para estos electrodos y la tensión y el límite elástico pueden variar entre fabricantes.

Reddy, Rao & Sekhar (2008) y Facchini y otros investigadores (2010) encontraron que para una serie de depósitos de soldadura de aceros de baja aleación, cuando el manganeso o el níquel exceden desde el 1,5 % hasta el 2,9 %, respectivamente, las microestructuras del metal de

soldadura exhiben significativas cantidades de bainita. En particular, en el caso de los aceros con níquel, la tenacidad aumenta ya que este elemento, en solución sólida, tiene un efecto beneficioso intrínseco en la tenacidad del hierro.

1.1. Soldadura disímil

Arivazhagan y demás colaboradores (2008) consideran que la adopción de combinación de distintos materiales provee posibilidades para un diseño flexible de un producto para el uso eficiente de cada uno de ellos, beneficia las propiedades específicas de cada material en una forma funcional; en la soldadura de aleaciones disímiles el material de aporte y uno de los materiales base presentan una diferencia significativa en la composición química en comparación al otro material y diferentes efectos durante la unión.

La unión por soldadura de aleaciones metálicas disímiles es más complicada por la diferencia que se presenta en las características físicas, mecánicas y metalúrgicas de los metales base que se unirán. Según las características de diversos metales es necesario producir uniones de alta calidad entre ellos, de esta manera, se puede usar la mayoría de los materiales convenientes para cada parte de una estructura dada, la mayor disponibilidad de nuevos materiales y de requisitos más exigentes en ellos que permita la creación de una mayor necesidad de uniones de metales distintos (Villanueva *et al.* 2006).

Según Madhusudan y Srinivasa (2009) existen diferentes combinaciones de aleaciones metálicas, las cuales, algunas de ellas, han sido especificadas en la actualidad. Los aceros inoxidable austeníticos, ferríticos o martensíticos pueden ser soldados por fusión fácilmente con acero al carbono o aceros de baja aleación con el empleo de un metal de aporte que pueda sobrellevar la dilución de ambos metales base sin la formación de fallas en la unión. La selección de procesos y aleaciones metálicas distintas depende de la aplicación y las condiciones de servicio.

En estudios recientes sobre uniones disímiles hierro fundido/acero refractario Fernández y demás colaboradores (2014) plantean que, a diferencia del metal de soldadura, la zona afectada térmica solo es influenciada por los ciclos térmicos del proceso de soldadura, ya que la composición química se afecta notablemente debido a que no existe similitud con el metal de aporte, lo cual está en función de las transformaciones en estado sólido. La soldadura puede causar transformación difusional de la ferrita a austenita en áreas recalentadas, así como también la precipitación de fases intermetálicas si la velocidad de

enfriamiento es lenta y la temperatura alcanzada en la zona recalentada es de 700 °C a 800 °C, aproximadamente; existe la formación de fase austenita secundaria o la formación de fase sigma.

Por otro lado, Samal y otros investigadores (2009) consideran que la evolución microestructural, a lo largo del borde de la línea de fusión en soldadura de materiales disímiles fabricadas con aceros inoxidable/aceros al carbono, posee características y morfologías diferentes a las uniones similares. Cuando el metal base presenta una microestructura ferrítica a temperaturas cercanas al punto de fusión y el metal de soldadura tiene una microestructura austenítica, entonces el crecimiento epitaxial puede ser suprimido. Esto da origen a la formación conocida como borde de grano tipo II, que se presenta paralelo a la línea de fusión. Esto último es una característica que lo diferencia con el borde de grano tipo I, el cual es el resultado del crecimiento columnar desde el metal base dentro del metal de soldadura y es orientado perpendicular a la línea de fusión (Nelson, Lippold & Mills 1999 y Van-Xuan & Jwo 2010).

Este trabajo tiene como objetivo establecer el comportamiento microestructural de una unión disímil realizada entre el hierro fundido y el acero al carbono, a través de una deposición de un sustrato base níquel en el acero al carbono con electrodo recubierto Castec 3099 (UTP 8) y unido con un electrodo desnudo ER 70S-A1 por el proceso GTAW.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Análisis de la composición química

La composición química de los materiales se determinó mediante análisis espectral, para ello se utilizó un espectrómetro de masa cuántico, ESPECTROLAB 230, con electrodo de carbón bajo arco sumergido en atmósfera de argón. En las Tablas 1 y 2 se muestra la composición química de los materiales a unir.

Tabla 1. Composición química del hierro fundido (%)

C	Si	Mn	P	S
3,15	2,22	0,52	0,11	0,012

La composición química del acero ASTM A 36 aparece en la Tabla 2.

Tabla 2. Composición química nominal del acero al carbono(%)

C	Si	Mn	Cr	Ni
0,08	0,26	0,49	0,14	0,11

Según la composición química de ambos materiales para la unión soldada estamos en presencia de una soldadura disímil, donde puede aparecer el

fenómeno de la fisuración, por lo que se realizará la deposición de un sustrato base de níquel en el hierro fundido para minimizar la formación de fase intermetálica durante el proceso de soldadura.

2.2. Características de los metales de aporte

El electrodo CasTec 3099 (UTP 8) es recomendable para la soldadura y reparación en frío de las fundiciones grises y maleables, acero fundido; para unir estos materiales con acero, cobre y sus aleaciones los depósitos obtenidos son maquinables. En la Tabla 3 se muestra la composición química.

Tabla 3. Composición química típica del metal depositado (%)

AWS	C	Mn	Al	Si	Mo	Fe	S	Cu	Ni
E Ni-CI	2,0	2,5	1,0	4,0	0,02	8,0	0,03	2,5	85

El electrodo AWS ER 70S-A1 es un alambre sólido empleado en proceso GMAW/GTAW; le confiere al depósito una mejor resistencia a la fisuración en frío y buena resistencia a la fluencia y a la tracción. En la Tabla 4 se muestra la composición química.

Tabla 4. Composición química típica del metal depositado (%)

C	Mn	Si	P	S	Mo
0,08	1,0	0,6	0,025 máx	0,025 máx	0,5

En el empleo de este material de aporte, según el material base, es recomendable realizar precalentamiento, mantener una temperatura de interfase y tratamiento térmico postsoldadura.

2.3. Plan experimental

Para el desarrollo del plan experimental se prepararon tres probetas de las aleaciones disímil hierro fundido y acero al carbono. La unión se elaboró a tope con preparación de los bordes a 60°; se efectuó primeramente el depósito del sustrato base níquel en el hierro fundido por proceso SMAW y luego se realizó la unión de la soldadura con alambre continuo con el proceso GTAW. El diseño aparece en la Tabla 5.

Tabla 5. Parámetros para la soldadura de las muestras

No	Electrodo	Diámetro(mm)	I(A)	U (V)
1	UTP 8 FN	3,2	110	18
2	UTP 8 FN	3,2	110	18
3	UTP 8 FN	3,2	110	18
4	ER 70S-6	2,4	110	16
5	ER 70S-6	2,4	110	16
6	ER 70S-6	2,4	110	16

Las diferentes probetas se prepararon con longitud de 100 mm y un ancho de 50 mm y se cortaron longitudinalmente en una fresadora; después de cortada y antes de soldarla se procedió a puntearla en ambos extremos para de esta forma evitar alabeo y distorsiones.

2.4. Proceso de unión por soldadura

La soldadura entre el hierro fundido y el acero al carbono se muestra en la Figura 1. En la misma se observa la disposición cada uno de los elementos luego de la unión.



Figura 1. Preparación y soldadura de los materiales.

Como se observa en la Figura 1 el hierro fundido presenta un diámetro mayor que el del acero al carbono; se realizó un proceso de esmerilado y de esta manera se logró un espesor con similitud a la del tubo de acero.

2.5. Análisis de las microestructuras

Para el análisis microestructural se analizó la muestra patrón del hierro fundido (Figura 2) y la del acero al carbono (Figura 3). Se realizó para obtener una muestra sin afectación en su estructura cristalina que nos

permitiera determinar posibles cambios ocurridos, tanto en la zona fundida (ZF) como en la influencia térmica.

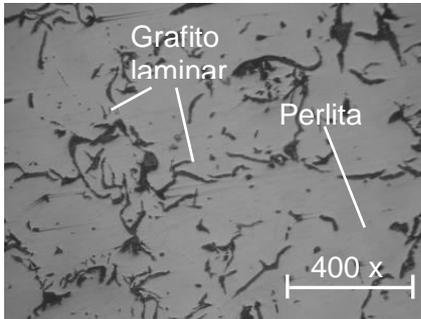


Figura 2. Estructura del hierro fundido al carbono.

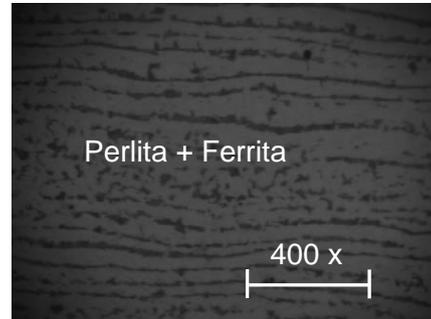


Figura 3. Estructura del acero al carbono.

En la estructura del hierro fundido se observa que está constituida de grafito laminar en una matriz de perlita y la del acero al carbono está compuesta por una estructura de ferrita alineada en el sentido que se realizó el proceso de laminación.

Para el análisis del cordón resultante en la unión disímil se empleó el diagrama de Schaeffler, aunque se emplean electrodos base inoxidable, la utilización del diagrama no se limita solamente a los aceros austeníticos, sino que permite predecir otras estructuras derivadas de la composición química del material.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Parámetros del ciclo térmico de soldadura

El conocimiento del ciclo térmico nos permite, en función del "*heat input*" (energía aportada), determinar los cambios microestructurales, así como las tensiones residuales, condiciones necesarias para poder predecir la variación de la tenacidad. Con una intensidad de corriente de 110 A, la tensión de 16 V, la energía lineal del proceso de 18 892,52 J/mm, el consumo de gas determinado fue de 0,12 m³/s y con una energía aportada de 84 480 W se estableció el proceso de soldadura de la unión disímil.

En correspondencia con los parámetros establecidos se puede plantear que durante la unión disímil los efectos más graves en el material base serán en las zonas cercanas al cordón, debido a la disipación del calor. Esta zona alcanza temperaturas mayores a la de fusión del propio material y la estructura de la unión varía proporcionalmente en la zona afectada por el calor.

3.2. Análisis del depósito por el diagrama de Schaeffler

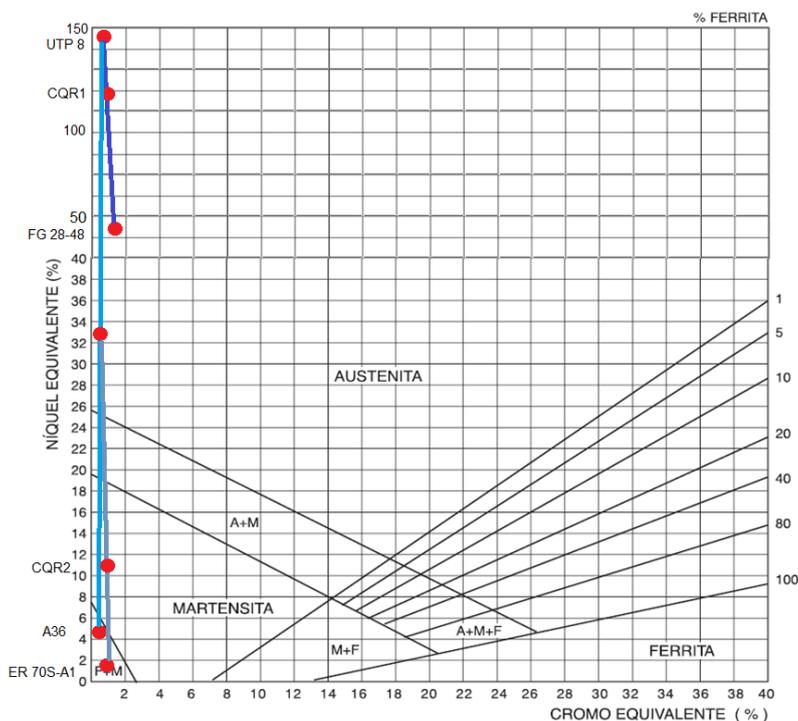
Al determinar la composición del depósito del cordón de soldadura se analizó la composición química del material de aporte. Los elementos

fundamentales, como el carbono y el cromo, son: C-0,45 % y Cr-0,06 %; en este caso el carbono está en los límites permisibles para evitar la precipitación de carburos de cromo y hacer frágil y quebradiza la soldadura. En la Tabla 6 se muestra la composición química obtenida del sustrato de níquel depositado en el hierro fundido.

Tabla 6. Composición química del sustrato base níquel (%)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Fe
0,45	0,69	0,85	0,013	0,040	0,06	0,29	15,64	81,80

Los resultados obtenidos de la composición química del cordón resultante de la deposición de los materiales de aporte, el Castec 3099 y el ER 70 S-A1, empleados en la soldadura disímil, se muestran en la Figura 4.



*CQR 1 y CQR 2: Composición química resultante.

Figura 4. Resultados de los depósitos con electrodos Castec 3099 y el ER 70 S-A1.

De acuerdo con el diagrama se puede observar que con la realización de la capa colchón o depósito del electrodo Castec 3099, como sustrato en el acero al carbono, se obtiene el punto CQR1 (composición química resultante 1) con una estructura cristalina austenítica, en la cual puede ocurrir una posible fisuración en caliente por encima de 1 250 °C y ausencia de ferrita (F). El punto CQR2 (composición química resultante 2) resulta de la unión disímil de las aleaciones fundición gris (FG)-Castec 3099 y A 36 con material de aporte ER 70S-A1, donde según el diagrama, en este campo se

revela una estructura martensítica, la cual induce a la fisuración en frío o por temple por debajo de 400 °C.

Ospina, Aguirre & Parra (2007) plantean que cuando la fracción Creq/Nieq es de 1,48-1,95 permite formar al final del proceso ferrita y austenita. La solidificación se inicia a partir de la formación de ferrita como fase primaria. En el enfriamiento, con la evolución de la solidificación, el líquido remanente está enriquecido con elementos estabilizadores de austenita. Tal fenómeno lleva a este líquido a transformarse en austenita. Así, en la microestructura final, la fase primaria permanece en el núcleo de los ramos dendríticos, con forma vermicular, envuelta por la austenita.

3.3. Análisis del comportamiento microestructural

Se observó gráficamente la coalescencia que presenta cada uno de los recubrimientos al ser depositados en el material base. Se analizó el comportamiento de la zona fundida y de la zona de influencia térmica del depósito con el electrodo Castec 3099 (UTP 8); las microestructuras que se observan en las Figuras 5(a) y 5(b) se corresponden con la zona de fusión.

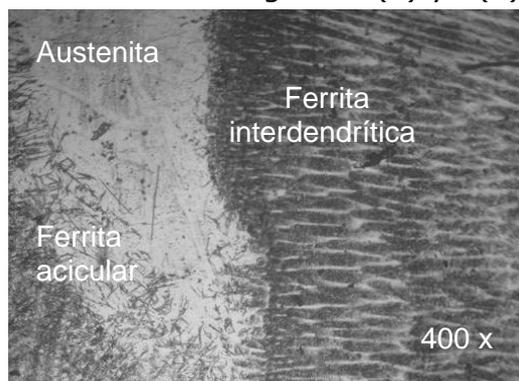


Figura 5(a). Zona fundida.

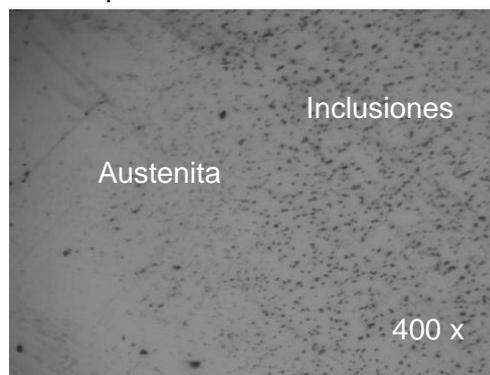


Figura 5(b). Zona fundida.

Luego del ciclo térmico de soldadura en la unión disímil, en la Figura 5(a) se ha obtenido una en el lado derecho, solidificación del tipo ferrita austenita, con una solidificación de ferrita con morfología interdendrítica en el límite del grano, lo cual puede estar atribuido al contenido de carbono presente en el hierro fundido. En este caso, la dendrita tiende a seguir la dirección del gradiente de temperatura máxima durante el proceso de solidificación y por eso crece en una dirección perpendicular de la interfase; también se aprecia la presencia de una capa interdendrítica de austenita. En la franja central, surgida como producto del depósito con electrodo Castec 3099 (85 % Ni), se observa una estructura austenítica con la presencia de ferrita acicular.

En la Figura 5(b), que es la zona fundida que se corresponde con la deposición del sustrato base níquel, se ha obtenido la formación de una estructura de austenita con la presencia de inclusiones de carbono. La

estructura austenítica del material base (sustrato) no se ve afectada por las altas temperaturas que se alcanzan durante la aplicación del ciclo térmico de soldadura.

3.4. Zona afectada térmicamente con depósito de electrodo Castec 3099

En las Figuras 6(a) y 6(b) se muestran las microestructuras de la zona afectada térmicamente (ZAT). La deposición del material de aporte (Castec 3099) sobre el material base (acero al carbono) se realizó con una capa de soldadura.

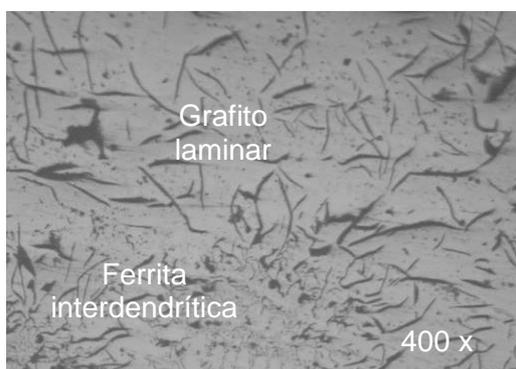


Figura 6(a). ZAT.

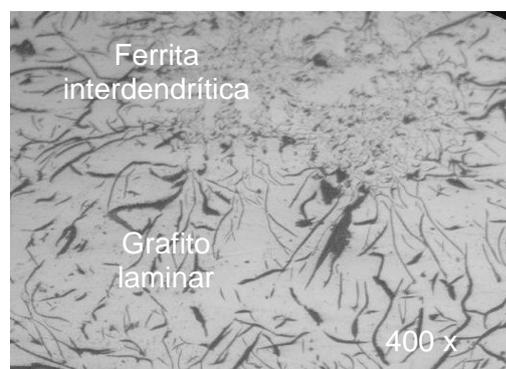


Figura 6(b). ZAT.

En el sustrato de la unión soldada presenta transformaciones de fase en la zona afectada térmicamente, diferentes a las encontradas en el paso de raíz. Se puede observar la estructura típica del hierro fundido, consistente en una estructura de grafito laminar en una matriz ferrítica, así como la formación de la estructura interdendrítica con orientación aleatoria (borde inferior Figura 6(a) y borde superior Figura 6(b)). Estas microestructuras se caracterizan por presentar un elevado contenido de carbono debido a las velocidades de enfriamiento a las que se forman.

Cuando el carbono alcanza su máxima concentración se transforma en cementita, lo cual brinda la morfología característica de plumas, como se observa en el borde inferior de la Figura 6(a) y el borde superior de la Figura 6(b); mientras que la ferrita Widmanstätten se caracteriza por contener una elevada concentración de carbono a los lados de sus placas.

3.5. Zona de fusión para el electrodo del tipo ER 70 S-A1

La solidificación del pozo de fusión es caracterizada por un crecimiento competitivo entre los granos de forma similar a lo que ocurre en la región columnar de piezas fundidas. En las Figuras 7(a) y 7(b) se muestran las microestructuras de la zona de fusión entre material base (HF) y el material de aporte (ER 70 S-A1) con una capa de soldadura.

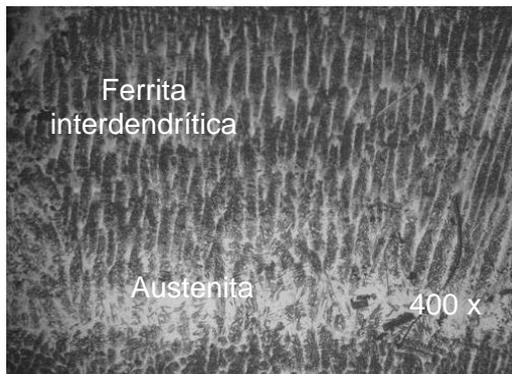


Figura 7(a). Zona fundida.

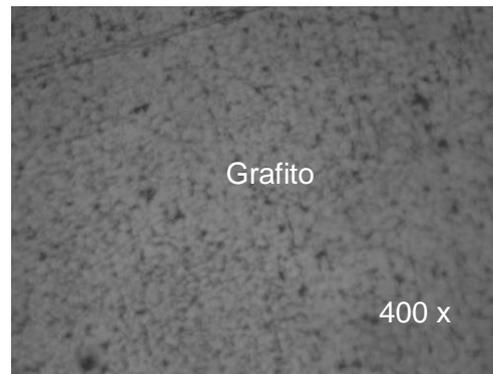


Figura 7(b). Zona fundida.

En la zona fundida para el metal de aporte ER 70 S-A1, empleado para la unión metalúrgica entre el hierro fundido y el sustrato base níquel, se ha obtenido en la Figura 7(a) una microestructura de ferrita con morfología interdendrítica, en una matriz austenítica, donde el hierro fundido sometido a 850 °C experimentó temperaturas cercanas a la temperatura de austenitización, caracterizado por la estructura típica del sustrato totalmente austenítico; con estas estructuras se puede formar grafito a la temperatura eutéctica de 1 154 °C, aproximadamente. A esa temperatura eutéctica, de acuerdo con el diagrama estable, se forma austenita saturada y grafito (en proporciones eutécticas).

La Figura 7(b) está precedida por la formación de una microestructura de grafito tipo E; se suele presentar cuando la fundición es hipoeutéctica (< 4,3), el del hierro fundido soldado es de 3,15 %. Esta distribución predominante de grafito se debe a su contenido de silicio, lo cual evitará el blanqueo o aparición de ledeburita; formándose también cuando la temperatura de colada es elevada, como consecuencia de los fenómenos de subenfriamiento.

3.6. Zona afectada térmicamente depositada con electrodo ER 70 S-A1

En la Figura 8 se muestra la microestructura de la zona afectada térmicamente, que resulta de la deposición del material de aporte sobre el material base, con una capa de soldadura.

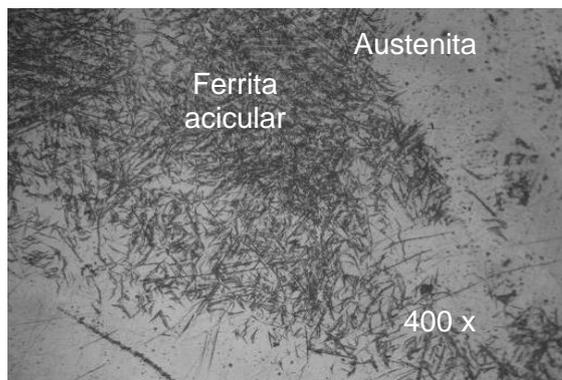


Figura 8. Zona Afectada Térmicamente.

En la zona afectada térmicamente se puede distinguir una banda de ferrita acicular; se caracteriza por ser una línea en la zona de fusión que funciona como interfase entre el hierro fundido y el metal de soldadura, tal como se muestra en la Figura 8. En esta zona la soldadura puede causar transformación difusional de la ferrita a austenita en áreas recalentadas, así como también la precipitación de fases intermetálicas si la velocidad de enfriamiento es lenta y la temperatura alcanzada en la zona recalentada es de 700 °C a 800 °C, aproximadamente; existe la formación de fase austenita secundaria o la formación de fase sigma.

La banda de estructura ferrita que se presenta en la zona afectada térmicamente del hierro fundido y el metal de soldadura se forma al solidificar la austenita, en la cual aparece una combinación de elementos como resultado de la mezcla de las aleaciones a elevadas temperaturas, que provoca el emblanquecimiento en el cordón (fundición blanca), siendo muy difícil atenuar las tensiones ocurridas en esta zona.

3.7. Interfase de la unión disímil

Se caracterizó microestructuralmente la unión disímil a partir de los depósitos realizados; se tuvo en cuenta la dilución de los tres materiales en esta zona (hierro fundido-sustrato base níquel y el acero al carbono). La Figura 9(a) se corresponde con la unión metalúrgica entre el hierro fundido y el electrodo ER 70 S-A1 y la Figura 9(b) es la fusión del sustrato (Castec 3099), el acero al carbono y el hierro fundido.

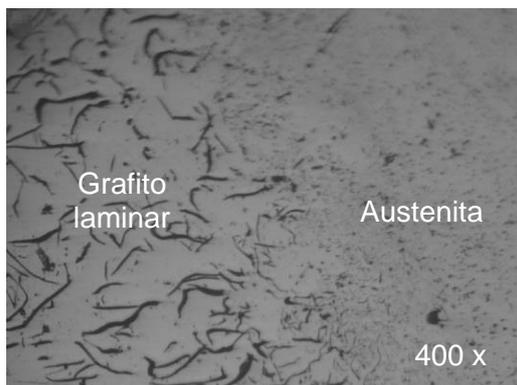


Figura 9(a). Interfase.

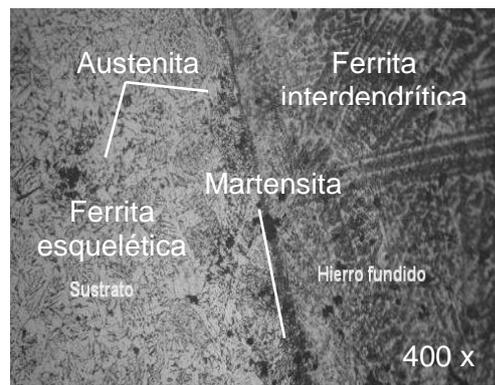


Figura 9(b). Interfase.

La Figura 9(a) exhibe la unión del hierro fundido con el sustrato base níquel, que en esta área presenta una estructura tipo austenítica completa. Este cambio de microestructura se debe a que en la transformación de la unión soldada en condiciones fuera de equilibrio la estructura austenita sobresaturada de carbono debe transformar su estructura FCC a estructura BCT, la cual es mostrada como la interfase entre el metal de soldadura y el hierro fundido a temperatura ambiente. A elevadas temperaturas el grano de ferrita inicia un crecimiento debido a que no existen segundas fases, como la austenita o precipitados que inhiban su crecimiento hasta que, durante el enfriamiento, la austenita nuclea y crece, dando inicio al proceso de transformación, el cual dependerá de las velocidades de enfriamiento.

La microestructura 9(b) revela que el sustrato base níquel está precedido por la formación de una ferrita esquelética o de listonsillo en una matriz austenítica. En el material base se ha obtenido una ferrita esquelética y una línea bien definida de martensita, lo cual está asociado a que durante la transformación la ferrita se torna más rica en cromo y más pobre de níquel, comparado con los valores antes de la transformación.

Durante el proceso de soldadura disímil la austenita que se forma tiene una concentración de carbono relativamente más alta, debido al aumento en la solubilidad de carbono en la austenita con la disminución de la temperatura. La parte que no se transforma dentro de la austenita alcanza a ser revenida. Cuando el pico de temperatura llega a ser menor de la temperatura de transformación, el efecto del calor de entrada es solo revenir la microestructura; el grado de revenido disminuye con la distancia del límite de fusión.

4. CONCLUSIONES

- Se estableció el comportamiento microestructural de la unión disímil hierro fundido–acero al carbono mediante la deposición de un sustrato base níquel, a partir de un electrodo recubierto Castec 3099

y con un electrodo desnudo ER 70S-A1. Se caracterizó por el proceso GTAW por presentar una unión metalúrgica con solidificación ferrita austenita.

- El análisis metalográfico realizado evidencia que en la unión soldada disímil se obtienen estructuras del tipo ferrítico y austenítico en la zona fundida y en la zona de influencia térmica, pero con la formación de martensita en la interfase luego del depósito con el electrodo ER 70 S-A1.
- La relación entre las microestructuras y las propiedades, realizadas bajo el proceso SMAW y GTAW, presentan buenas soldabilidad al efectuar la unión metalúrgica entre el hierro fundido y el acero al carbono mediante la deposición de un sustrato con estructura austenítica, ya que el níquel promueve la uniformidad del grano, la dureza y la resistencia a través de la secciones de espesores considerables o desiguales.

5. REFERENCIAS

- ALFONSO, J.; PACHECO, F.; CASTRO, A. & TORRES, J. 2005: Influence of the substrate bias voltaje on the crystallographic structure and mechanical properties of Ti6Al4V coatings deposited by rf magnetron. *Phys.stat.sol.* 2(10): 3786-3789.
- ARIVAZHAGAN, N.; SINGH, S.; PRAKASH, S. & REDDY, G. 2008: An assessment of hardness, impact strength, and hot corrosion behaviour of friction-welded dissimilar weldments between AISI 4140 and AISI 304. *International Journal of advance manufacturing technology* 39(12): 679-689.
- FACCHINI, L.; VICENTE, N.; LONARDELLI, I.; MAGALINI, E.; ROBOTTI, P. & MOLINARI, A. 2010: Metastable austenite in 17-4 precipitation-hardening stainless steel produced by selective laser melting. *Adv Eng Mater.* 12(3): 18-28.
- FERNÁNDEZ, T.; RODRÍGUEZ, I.; CORREA, R. & ALCÁNTARA, D. 2014: Junta de soldadura disímil de la aleación HK-40 y del hierro fundido 24. *Ingeniería Mecánica* 17(2): 98-107.
- MADHUSUDAN, G. & SRINIVASA, R. 2009: Microstructure and mechanical properties of similar and dissimilar stainless steel electron beam and friction welds. *International Journal of advance manufacturing technology* 45(12): 875-888.

- NELSON, T.; LIPPOLD, J. & MILLS, M. 1999: Nature and evolution of the fusion boundary in ferritic-austenitic dissimilar weld metals, part 2: on cooling transformation. *Welding Journal* 79(10): 267-277.
- OSPINA, R.; AGUIRRE, H. & PARRA, H. 2007: Soldabilidad en aceros inoxidable y aceros disimiles. *Scientia et Technica* XIII(34): 273-278.
- REDDY, G.; RAO, K. & SEKHAR, T. 2008: Microstructure and pitting corrosion of similar and dissimilar stainless steel welds. *Science and technology of welding and joining* 13(4): 363-377.
- SAMAL, M.; BALANI, K.; SEIDENFUSS, M. & ROSS, E. 2009: An experimental and numerical investigation of fracture resistance behaviour of a dissimilar metal welded joint. *Journal of Mechanical Engineering Science* 223(25): 1502-1523.
- VAN-XUAN, T. & JWO, P. 2010: Analytical stress intensity factor solutions for resistance and friction stir spot welds in lap-shear specimens of different materials and thicknesses. *Engineering Fracture Mechanics* 77(11): 2611-2639.
- VILLANUEVA, D.; JUNIO, F.; PLAUT, R. & PADILHA, A. 2006: Comparative Study on Sigma Phase Precipitation of Three types of Stainless Steels: Austenitic, Superferritic and Duplex. *Material Science and Technology* 22(9): 1098-1104.
- ZAPATA, A. & MESA, H. 2005: Terología: tecnología de la reconstrucción. *Scientia et Technica* XI(29): 133-138.
- ZHANG, W.; ELMER, J. & DEBROY, T. 2005: Integrated modelling of thermal cycles, austenite formation, grain growth and decomposition in the heat affected zone of carbon steel. *Science and Technology of Welding and Joining* 10(5): 574-582.

Tomás Fernández-Columbié tfernandez@ismm.edu.cu

Doctor en ciencias e ingeniería de materiales. Profesor Titular. Departamento de Mecánica.
Instituto Superior Minero Metalúrgico, Moa, Cuba.

Dayanis Alcántara Borges dalcantara@ismm.edu.cu

Ingeniera mecánica. Profesora Asistente. Departamento de Mecánica.
Instituto Superior Minero Metalúrgico, Moa, Cuba.

Isnel Rodríguez González, irgonzales@ismm.edu.cu

Doctor en Ciencias Técnicas. Profesor Auxiliar Departamento de Mecánica. Instituto Superior Minero Metalúrgico, Moa, Cuba

Leonides Sablón Pérez lsablon@ecg.moa.minem.cu

Empresa Productora de Níquel y Cobalto "Ernesto Guevara", Moa Holguín, Cuba