

Evaluación del trabajo de un hidrociclón para el espesamiento de la pulpa de yeso

Evaluation of the work of a hydrocyclone for the thickening of the gypsum pulp

*Ing. María Eugenia Peña-Durán^I, mpduran@moanickel.com.cu,
Dra. Margarita Rivera-Soto^{II}, Ing. Junior Ramón Vega-Cala^{III}, Ing. Luís R. Gendis-Díaz^I*

^I Empresa Pedro Sotto Alba, Moa, Holguín, Cuba, ^{II} Carrera de Ingeniería Química, Universidad de Oriente, Santiago de Cuba, Cuba; ^{III} Centro de Desarrollo e Investigaciones del Níquel, Moa, Holguín, Cuba

Resumen

El trabajo presenta los resultados obtenidos en un estudio realizado a escala de laboratorio, utilizando un hidrociclón, con la finalidad de identificar las condiciones de operación más favorables para incrementar el porcentaje de sólido en la pulpa de yeso obtenida en la neutralización, una de las etapas del procesamiento de lateritas níquelíferas. Para los ensayos se utilizó una instalación piloto compuesta por: un hidrociclón, un tanque para el almacenaje de la pulpa y una bomba centrífuga, seleccionando como parámetros de estudio: concentración de sólido a la entrada y presión de trabajo, para analizar la influencia de estas variables sobre el porcentaje de sólido a la salida del hidrociclón. Los experimentos se realizaron a tres niveles aplicando un diseño de experimento factorial multinivel completo, resultando nueve experimentos, con dos réplicas cada uno para garantizar la fiabilidad de los resultados. Se determinaron las condiciones de operación del hidrociclón a las que se alcanza el porcentaje de sólido deseado y se realizó el procesamiento estadístico utilizando el programa profesional **STATGRAPHICS.Centurion.XV.v15.2.14**, comprobando que la presión de trabajo fue la variable que influyó significativamente con un efecto positivo en el porcentaje de sólidos a la descarga del hidrociclón. En los resultados se observó que para el nivel alto de presión de trabajo (262 kPa) se obtuvo el mayor porcentaje de sólidos para cada uno de los porcentajes de sólidos en el alimentado, aspecto confirmado en el modelo estadístico que denota en términos de cuantía la influencia de las variables medidas.

Palabras clave: *hidrociclones, pulpa de yeso, espesamiento de pulpa de yeso.*

Abstract

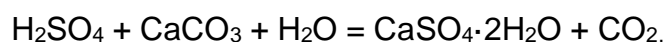
The work presents the results obtained in a laboratory scale study, using a hydrocyclone, in order to identify the most favorable operating conditions to increase the percentage of solid in the gypsum pulp obtained in the neutralization, one of the stages processing of nickel laterites. For the tests, a pilot plant was used: a hydrocyclone, a pulp storage tank and a centrifugal pump, selecting as study parameters: solid concentration at the entrance and working pressure, to analyze the influence of these Variables on the percentage of solid at the hydrocyclone outlet. The experiments were carried out at three levels applying a complete multilevel factorial experiment design, resulting in nine experiments, with two replicates each to guarantee the reliability of the results. The operating conditions of the hydrocyclone at which the desired percentage of solid

was reached were determined and the statistical processing was performed using the professional program **STATGRAPHICS.Centurion.XV.v15.2.14**, proving that the working pressure was the variable that significantly influenced with a positive effect on the solids percentage at the discharge of the hydrocyclone. In the results it was observed that for the high level of working pressure (262 kPa) the highest percentage of solids was obtained for each of the percent of solids in the feed, confirmed aspect in the statistical model that denotes in terms of amount Influence of the measured variables.

Keywords: *hydrocyclones, gypsum pulp, gypsum pulp thickening.*

Introducción

El procesamiento de las lateritas níquelíferas mediante la tecnología de lixiviación ácida a presión es única en su tipo en Cuba y líder en rendimiento en el mundo. Los licores de este proceso contienen ácido sulfúrico libre, por lo que deben neutralizarse parcialmente para que, con posterioridad, ocurra la precipitación del níquel y el cobalto con sulfuro de hidrógeno. La neutralización se realiza con cienos carbonatados (Coral), extraídos de un yacimiento situado en la Bahía y muy rico en carbonato de calcio (CaCO_3) [2,7]. El proceso de neutralización ocurre en los reactores y se lleva a cabo según la siguiente ecuación:



En la reacción de neutralización se produce sulfato de calcio dihidratado: ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (yeso)), que primeramente se envía a los sedimentadores para su concentración y luego una parte de la pulpa se recircula a los reactores y la otra parte es enviada a la planta de Lavaderos, con el objetivo de recuperar el licor rico en níquel y cobalto presente en la pulpa.

La pulpa de yeso actualmente se envía a la planta de lavaderos con un 18% de sólidos. A menor porcentaje de sólidos en la pulpa de yeso, es mayor el flujo de licor con contenido de níquel que se envía a recuperar en el circuito de lavaderos, por lo que: el incremento del porcentaje de sólidos en esta pulpa aumenta la eficiencia del proceso de forma general, contribuyendo además en la operación de los tanques de lavaderos en los que se alimente el yeso, mejorando la clarificación en el tanque por bajo balance de sólidos.

La técnica de hidrociclones fue originalmente diseñada para promover la separación sólido-líquido, sin embargo, actualmente son también utilizados para separación de sólido – sólido, líquido – líquido y/o gas – líquido. La industria minera es el principal usuario de estos equipos, siendo aplicados en: clasificación, espesamiento, ordenamiento de partículas por densidad o tamaño y lavado de sólidos, [4]. Se plantea que los mismos ofrecen mejor eficiencia de separación en comparación con los equipos convencionales. Cuando se combina con equipos de proceso complementarios convencionales, el sistema de tratamiento de agua con los hidrociclones es más pequeño que un sistema convencional equivalente. Esto trae consigo un aumento en la eficiencia del proceso por volumen utilizado, [5].

Se han investigado las características de configuración de un hidrociclón de alta eficiencia y su aplicación con buenos resultados de separación en el proceso de concentración del yeso, [6]. Otros estudios experimentales realizados con un hidrociclón de laboratorio, empleando pulpa de cienos carbonatados, han demostrado que la presión de trabajo es la variable que influye de manera positiva y significativamente en la obtención del porcentaje de sólido requerido a la descarga del hidrociclón [1].

En la búsqueda bibliográfica realizada se pudo concluir que se han realizado pocas investigaciones en cuanto a la utilización de hidrociclones con pulpas de yeso. La mayoría han sido en China, y se han ejecutado para la optimización del rendimiento teniendo en cuenta: la influencia de la presión de entrada [10]; la pérdida de presión [12] y el flujo de entrada y presión [8].

Todo lo antes explicado indica la necesidad de perfeccionar el sistema de espesamiento de la pulpa de yeso en la Planta de Neutralización, para lo cual puede ser esencial la selección del equipamiento tecnológico que brinde los resultados adecuados. Estas insuficiencias en cuanto a las investigaciones con pulpa de yeso motivan a continuar profundizando en el estudio de la separación sólido- líquido al emplear la tecnología de hidrociclones.

El presente trabajo va encaminado a determinar experimentalmente si es posible incrementar el porcentaje de sólidos en la pulpa de yeso que es enviada a la Planta de Lavaderos utilizando un hidrociclón de laboratorio con dimensiones

predefinidas, a diferentes presiones de trabajo y porcentos de sólidos en la alimentación. Además de identificar el efecto que ejercen las variables estudiadas: concentración de sólidos en la alimentación y presión de trabajo, sobre el porcentaje de sólidos de la pulpa de yeso en la descarga, identificando los niveles de operación favorables para estas, empleando un hidrociclón de laboratorio.

Materiales y métodos

Se han utilizado métodos de análisis físico-químicos, así como los métodos estadísticos para el análisis del proceso, en particular se empleó el programa STATGRAPHICS. Centurion. XV. Como herramienta de trabajo para la planificación de los experimentos y análisis de los resultados.

Para la caracterización físico-química y granulométrica de la pulpa de yeso y las corridas experimentales se extrajeron 200 L de pulpa de yeso por un drenaje ubicado en la descarga de la bomba en las líneas provenientes de los tanques espesadores de la Planta de Neutralización, que fueron transportados en tanquetas plásticas de 20 L hacia la instalación experimental.

Para la caracterización física de la pulpa de yeso se empleó un analizador granulométrico marca "Horiba" que se utiliza para la determinación de fracciones de tamaño, en diferentes tipos de muestra. Para la caracterización química de las muestras se emplearon métodos de análisis químicos (volumétricos).

Las tareas de investigación incluyeron además:

1. Ajuste y puesta en marcha de la instalación experimental.
2. Diseño y planificación de experimentos.
3. Desarrollo de las corridas experimentales.

Instalación experimental y características de los equipos

En la figura 1 se muestra el diagrama de trabajo de la instalación experimental.

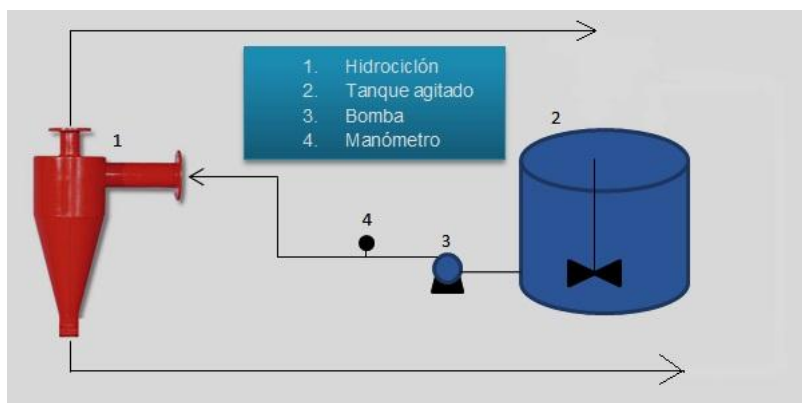


Fig. 1 Diagrama de la instalación experimental.

La instalación experimental cuenta con:

1. Un hidrociclón con una altura de 42,00 cm, diámetro de entrada igual a 3,88 cm, diámetro de salida superior de 4,07 cm y diámetro de salida inferior: 1,20 cm.
2. Un tanque agitado de 250 L de capacidad, una altura de 1,10 m, un diámetro de 0,60 m y 4 baffles.
3. Una bomba centrífuga de acero al carbono que genera un flujo (3 - 254) m³/h Tiene una altura de descarga de 35,21 m, una potencia de 5 kW y un voltaje de 440 V
4. Un manómetro de marca Ashcroft que mide hasta 160 psia (1103 kPa), el cual se encuentra colocado en la descarga de la bomba permitiendo conocer la presión de operación del sistema y mangueras engomadas.

Diseño de experimentos. Metodología experimental

Para el desarrollo de las corridas experimentales se procedió primeramente a determinar las variables que se consideraron con influencia sobre el porcentaje de sólidos a la salida del hidrociclón y estas resultaron: la presión de trabajo (kPa), y el porcentaje de sólidos del alimentado (% en peso). El diseño se ejecutó en tres bloques, con un orden de los experimentos totalmente aleatorizado.

Se prepararon las muestras correspondientes para establecer las siguientes condiciones de las variables experimentales, reflejadas en la tabla 1.

Tabla 1
Valores experimentales

Variable	Nivel máximo	Nivel central	Nivel mínimo
Porcentaje de sólidos en el alimentado (% en peso)	23,05	19,57	16,09
Presión de trabajo (kPa)	262,0	186,16	110,32

Los experimentos se desarrollaron a tres niveles, de modo que al aplicar un diseño factorial 3^k con dos factores experimentales resultaron nueve experimentos, con dos réplicas cada uno. En la tabla 2 se muestra la planificación de los experimentos.

Para los experimentos se consideraron fijos los parámetros siguientes:

- Densidad del sólido seco para el yeso: 2,32 g/cm³
- Densidad del licor: 1,060 g/cm³
- Distribución granulométrica y forma de las partículas.
- Dispersión de la suspensión y uniformidad.
-

Para lograr la dispersión de la suspensión y uniformidad en la pulpa se instaló un tanque con un agitador y cuatro deflectores espaciados desde el cual se alimentaba la pulpa a la instalación experimental [11].

Tabla 2
Planificación de experimento

Experimentos	Porcentaje de sólidos en el alimentado (% en peso)	Presión de trabajo (kPa)
1	23,05	186,16
2	16,09	186,16
3	19,57	262
4	23,05	110,32
5	19,57	186,16
6	16,09	262
7	16,09	110,32
8	23,05	262
9	19,57	110,32
10	23,05	262
11	19,57	110,32
12	23,05	186,16
13	23,05	110,32
14	19,57	186,16
15	19,57	262
16	16,09	186,16
17	16,09	110,32
18	16,09	262
19	16,09	186,16
20	23,05	262
21	23,05	186,16
22	23,05	110,32
23	19,57	110,32
24	16,09	262
25	19,57	186,16
26	16,09	110,32
27	19,57	262

Resultados y discusión

Para la caracterización física de la pulpa de yeso se empleó un analizador granulométrico marca "Horiba". En la tabla. 3 se muestran los valores: mínimo, medio y máximo del tamaño de partícula obtenido en el análisis granulométrico.

Tabla 3
Resultados del análisis granulométrico de la pulpa de yeso

Tamaño de partícula	Diámetro (µm)	Frecuencia (%)	Mayor tamaño (%)
Mínimo	0,226	0,145	100
	0,259		99,855
Medio	394,244	1,303	5,532
	451,556		4,229
Máximo	777,141	0,449	0,449
	890,116		0

Los resultados del análisis químico realizado para el licor neutralizado contenido en la pulpa de yeso, se muestran a continuación en la tabla. 4.

Tabla 4
Resultados del análisis químico del licor neutralizado contenido en la pulpa de yeso

Muestra	pH	Al (g/L)	Ni (g/L)	Co (g/L)	Fe (g/L)	Mn (g/L)	Cu (g/L)
Licor Neutralizado	2,06	1,69	4,35	0,44	1,11	2,29	0,000 7

Resultados de las corridas experimentales

Los experimentos desarrollados a escala piloto siguiendo el diseño del experimento (3²) demostraron que con la utilización de hidrociclones se obtiene una pulpa con el porcentaje de sólidos requerido para el proceso industrial.

En las corridas experimentales se pudo demostrar la influencia que tienen los factores estudiados: porcentaje de sólidos en el alimentado (% Co) y la presión de trabajo (P) sobre la variable respuesta: el porcentaje de sólidos obtenido en la descarga (%Cf).

En la figura 2 se muestra el comportamiento del porcentaje de sólidos en la descarga (% Cf) al variar la presión de trabajo, en las diferentes corridas experimentales realizadas. Se puede observar que los máximos valores se obtuvieron en las corridas 3, 6, 8, 10, 15, 18, 20, 24 y 27, coincidiendo con la mayor presión de trabajo (262 kPa). Esto evidencia que el aumento de la presión provoca una mayor separación en el hidrociclón, dando lugar a una mayor concentración de la pulpa de yeso en la descarga de dicho equipo.

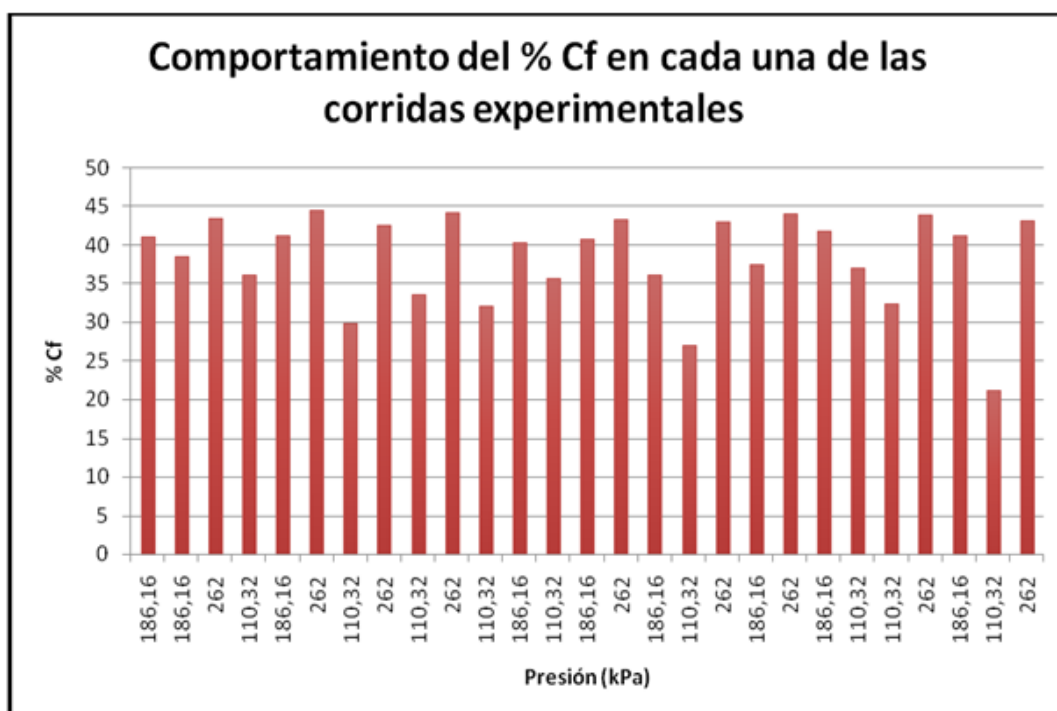


Fig. 2 Comportamiento del % Cf en cada una de las corridas experimentales.

Análisis estadístico de los resultados

El análisis estadístico de los resultados fue realizado aplicando el programa profesional STATGRAPHICS Plus 5.1.

Este análisis se desarrolló con el objetivo de obtener un comportamiento o una tendencia del porcentaje de sólidos en la descarga (variable respuesta), con respecto a las variables independientes (presión de trabajo y porcentaje de sólidos en el alimentado).

Para una mejor comprensión de cómo influyen en la variable respuesta las variables seleccionadas, se analizan los diagramas, tablas y gráficos que a continuación se muestran.

La figura 3 muestra el gráfico de Pareto y el de Efectos principales para el % Cf de los cuales se puede apreciar que la presión es la variable más influyente en el porcentaje sólidos en la descarga. En el gráfico de efectos principales (figura 3) se muestra cómo el porcentaje de sólido en la descarga (% Cf) varía a medida que los factores cambian del nivel bajo al alto, quedando demostrado que la presión de trabajo es el factor más influyente en la variable respuesta.

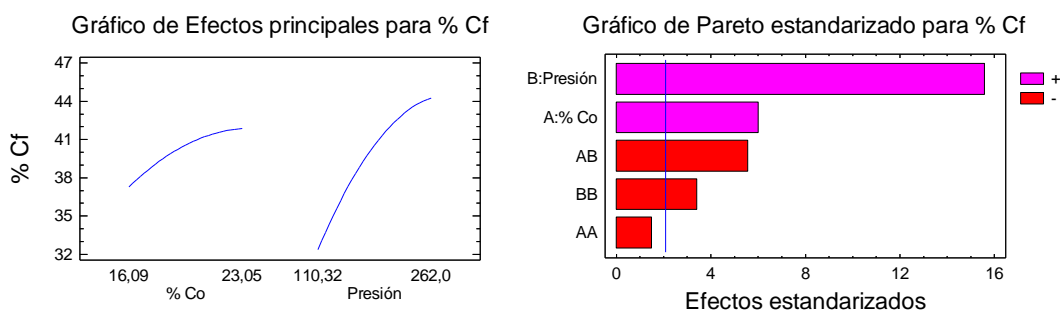


Fig. 3 Diagrama de Pareto Estandarizado y de Efectos principales para % Cf.

En la figura 4 se observa la interacción para el porcentaje de sólidos en la descarga. En ella se representa la respuesta predicha para cada combinación de los niveles bajo y alto de los dos factores del diseño, la que se presenta al final de cada segmento de línea, siendo 262 y 110,32 kPa el valor alto y mínimo de presión de trabajo respectivamente. Se puede apreciar en esta figura que el efecto del factor % Co dependerá del nivel de la presión de trabajo ya que los dos factores (P, % Co) interactúan. Esto se evidencia en la diferencia del salto en la variable respuesta para cada una de las dos líneas sobre la figura 4.

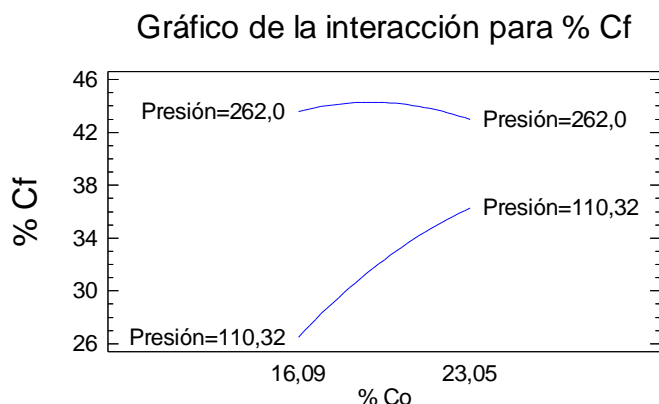


Fig. 4 Gráfico de la interacción para % Cf.

En la figura 4 se hace evidente la existencia de interacciones entre las variables analizadas. Se puede apreciar cómo el porcentaje de sólidos en la descarga depende del nivel en que se encuentra la presión de trabajo, siendo más marcado el efecto de la presión de trabajo sobre la variable respuesta (% Cf), cuando la concentración inicial de sólidos (% Co) se encuentra en un nivel inferior.

Obtención del modelo estadístico

La ecuación obtenida como modelo estadístico (ec. 1), está basada en la relación existente entre las variables independientes y la respuesta, en el procesamiento de los datos. En la tabla 6 se muestran los valores usados en el modelo.

Tabla 6
Coefficiente de regresión para % Cf

Coefficiente	Estimado
Constante	-67,641
% Co (A)	5,691 46
Presión (P)	0,416 719
AA	0,081 793 8
AB	-0,009 841 88
BB	-0,000 391 575

$$\% Cf = -67,641 + 5,69146 \cdot (\% Co) + 0,416719 \cdot P - 0,0817938 \cdot (\% Co)^2 - 0,00984188 \cdot (\% Co) \cdot P + (-0,000391575) \cdot P^2 \quad (1)$$

donde

$$R^2 = 94,50 \%$$

P = Presión

%Co = porcentaje de sólidos en el alimentado

El modelo matemático ajustado es un modelo empírico y como tal, su validez se limita al rango de valores que tienen las variables de trabajo en el período que se investiga, presentando una influencia significativamente mayor la del porcentaje de sólidos inicial (% Co).

Conclusiones

- 1. Los resultados experimentales obtenidos en el desarrollo de las corridas experimentales, a partir de la instalación constituida por un tanque, una bomba centrífuga y un hidrociclón con una altura de 42,00 cm, diámetro de entrada igual a 3,88 cm, diámetro de salida superior de 4,07 cm y diámetro de salida inferior: 1,20 cm, demostraron que estos equipos pueden ser utilizados para el incremento del porcentaje de sólidos de la pulpa de yeso que es enviada a la Planta de Lavaderos.**
- 2. Mediante el procesamiento estadístico realizado, se demostró que las variables: concentración de sólidos en la alimentación y presión de trabajo, tienen un efecto positivo sobre el porcentaje de sólidos de la pulpa de yeso en la descarga, más significativamente en el caso de la presión de trabajo, resultando 262 kPa un nivel de operación favorable, con independencia de la concentración inicial de sólidos.**
- 3. Los resultados de los experimentos, considerando como factores: la concentración de sólidos en la alimentación (%Co) y la presión de trabajo (P) se correlacionan mediante la siguiente ecuación matemática, ajustada con un coeficiente de regresión ($R^2 = 94,5 \%$), para determinar el porcentaje de sólidos de la pulpa de yeso en la descarga (%Cf):**

$$\% Cf = -67,641 + 5,69146.(\% Co) + 0,416719. P - 0,0817938. (\% Co)^2 + \\ + [-0,00984188. (\% Co) . P] + (-0,000391575). P^2$$

Nomenclatura

Al: Aluminio

Co: Concentración de sólidos en el alimentado (% Co)

Co: En la tabla 4 se refiere al metal Cobalto.

Cf: Concentración de sólidos en la descarga (%Cf)

Cu : Cobre

Fe: Hierro

Mn: Manganeso

Ni: Níquel

P: Presión, en kPa.

R: Coeficiente de regresión

Bibliografía

1. CALDERIN, Z. Incremento del porcentaje de sólido en la pulpa de cienos carbonatados con un hidrociclón”, tesis en opción al título de ingeniero químico, Facultad de Ingeniería Química, Universidad de Oriente. Cuba, 2015.
2. CAMPOS, G.M. Nuevos datos acerca de la naturaleza y génesis de los sedimentos del yacimiento de cieno carbonatado en la bahía de Gayo Moa Grande. Holguín. Informe inédito. 2001. p. 8-15. Holguín, Cuba.
3. CUELLO, E. M; PINEDA, J. G. Estudio reológico de pulpa minerales de yeso mina “la namuca”-Santander, Informe final de diploma, Universidad industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia, 2010. disponible en: <http://repositorio.uis.edu.co/jspui/bitstream/123456789/1326/2/134941.pdf>
4. CUEVAS, J.; TORRES, F., 2010. Diseño de Hidrociclón, Informe final, ME56B Taller de diseño mecánico. 2010. disponible en: https://www.u-cursos.cl/ingenieria/2010/2/ME56B/1/material_docente/bajar?id_material=310413
5. DITRIA, J.C.; HOYACK, M.E 1994. The separation of solids and liquids with hydrocyclone-based technology for water treatment and crude processing. Energy Technology Data Exchange (etdeweb). disponible en: <http://worldwidescience.org/topicpages/h/hydrocyclone+separation+efficiency.html>
6. LIU, P.; WANG, X.; WANG L.; SUN, Y.; YAN W. & LIU Q., 2011. Application of new high-efficiency hydrocyclone in gypsum concentration process. journal of filtration & separation 2011-02. (weihaihaiwanghydrocyclone

- co.,ltd.,weihai 264209, china). disponible en: http://en.cnki.com.cn/article_en/cjfdtotal-glyf201102012.htm
7. NEDVED. M. Informe final sobre los trabajos de búsqueda de fangos coralinos al sur de Cayo Moa Grande. Informe inédito. Moa. Cuba, 1966. p. 2-4.
 8. QIANG, Y; HUALIN, W; ZHISHAN, B. & YI, L., 2010. Experimental study on separation of gypsum slurry hydrocyclone. chinese journal of environmental engineering. 2010-02. (state key laboratory of chemical engineering, east china university of science and technology, shanghai 200237, china). disponible en: http://en.cnki.com.cn/article_en/cjfdtotal-hjjz201002046.htm
 9. ROSABAL VEGA, J.; VALLE, M.: Hidrodinámica y Separaciones Mecánicas, Editorial pueblo y educación, La Habana, 1988. p. 317.
 10. SHEN, G.; YANG Y.; AN L. & CAO, y., 2012. Study on separation performance of gypsum hydro-cyclone in wet limestone-gypsum fgd systems. journal of chinese society of power engineering. 2012-08. (moe's key lab of condition monitoring and control for power plant equipment, north china electric power university, beijing 102206,china; tianjincheng'an thermal power co.,ltd., tianjin 300204,china; tianjin thermal power company, tianjin 300161, china). disponible en: http://en.cnki.com.cn/article_en/cjfdtotal-dong201208013.htm
 11. CRUZ V., L.; PONS H. A.: Introducción a la Ingeniería Química. T I y II. Editorial pueblo y educación. La Habana, 1985. p. 210-214.
 12. XUECHENG, J.; GUILIN, W.; YONG, Z; WEI WANG & XUEZHEN, J., 2009 Optimized combination of hydrocyclone experimental research optimized combination of hydrocyclone experimental research. Disponible en: <http://www.oalib.com/paper/1606124#.vdk1kaeo7jg>