

INFLUENCIA DE PROCESOS HIDROGEOLÓGICOS EN LA HUMEDAD Y MINERALIZACIÓN DE YACIMIENTOS COBALTO – NIQUELIFEROS EN LATERITAS, CÁLCULOS DEL DRENAJE Y EFECTO ECONÓMICO.

Constantino de Miguel Fernández
Sociedad Cubana de Geología

cdemiguel@ismm.edu.cu

RESUMEN:

En el trabajo se presentan los resultados de un estudio hidrogeológico realizado en el yacimiento cobalto-niquelífero de Punta Gorda, en Moa, Holguín, Cuba.

Se exponen las características hidrogeológicas por componentes de la corteza de intemperismo que forma el yacimiento, la calidad de las aguas subterráneas y cálculos que establecen las características de los procesos de movimiento del agua en las lateritas del yacimiento, con flujo vertical originado por las altas propiedades de ascensos capilares de las lateritas y presiones existentes en el acuífero de las peridotitas que las subyacen.

En función de los resultados obtenidos se establece por primera vez en este trabajo tanto a nivel nacional como internacional una hipótesis que nos caracteriza procesos hidrogeológicos que si no representan el principal factor de formación de estos yacimientos, si son de los principales factores que influyen tanto en la formación de los mismos como en su posterior enriquecimiento mineral. También se establece un procedimiento para cálculo del drenaje de las lateritas con un significativo aporte económico.

ABSTRACT.

In this Project, the hydro – geological characteristics are expounded in components of the weathered layer that form the cobalt – nickel site at Punta Gorda in Moa, Holguin, Cuba. The chemical composition of the grounds waters and calculations that establish the characteristics of the processes of water movement in the upper soil layers of the site with vertical flow originating from the high properties of capillary ascents in the upper layers of the soil and existent pressures in the aquifer in the peridotites that underlie them.

In function of the obtained results, a new theory was established that characterizes the hydro –geological

processes or moreover, represents the main factors of formation of this site if those factors were the main ones that influenced greatly in the formation of the site, like in its later mineral enrichment.

INTRODUCCIÓN:

El yacimiento niquelífero Punta Gorda con un área de unos 8 Km², ubicado en el extremo nororiental de Cuba, tiene en la actualidad mas de un 60% de sus reservas explotadas, cuenta con diversos estudios geológicos y también hidrogeológicos, que hasta el año 2004 tenían establecido parcialmente las características hidrogeológicas.

Los estudios realizados no aportaban la información necesaria para el establecimiento de la complejidad hidrogeológica de forma que permita racionalizar la minería y obtener una metalurgia efectiva en lo que a las afectaciones por condiciones hidrogeológicas se refiere.

De tal forma se propuso y ejecutó una investigación hidrogeológica en los aspectos que directamente afectan el proceso de explotación minera y el proceso metalúrgico con salida de resultados reflejados en mapas escala 1: 10 000. Con los resultados obtenidos se dio solución a la problemática de humedad de las lateritas principalmente con propuesta de drenaje y además se estableció una nueva teoría sobre la influencia de procesos hidrogeológicos en la humedad y contenido mineral de las lateritas del yacimiento estudiado, válida para yacimientos con condiciones similares.

DESARROLLO.

Metodología del estudio y trabajos ejecutados.

La metodología de la investigación se basó en el análisis de datos aportados por diferentes estudios desarrollados con anterioridad en el territorio, selección de datos y procesamiento de ellos con la ejecución de trabajos complementarios en un área de unos 8 Km² del yacimiento en las siguientes etapas:

1. Levantamiento hidrogeológico del área.

2. Ejecución de trabajos de perforación, pruebas de permeabilidad y tomas de muestras de rocas en pozos.
3. Ensayos de rocas en laboratorio.
4. Procesamiento de datos y elaboración de mapas.
5. Confección del informe final.

Se trabajo principalmente con los resultados de los nuevos trabajos ejecutados en el yacimiento Punta Gorda en Moa en el que se realizó un gran volumen de trabajos de campo y laboratorio (ver Tabla No. 1).

Tabla 1. Trabajos ejecutados.

Actividad	U.M.	Real
Perforación	Pozos	43
	m.l.	905
Vertimientos	U	20
Cubeteos	U	31
Toma de muestras de lateritas	Sacos	180
	Pomos	236
	Shelbys	35
Ensayos de laboratorio	Humedad natural	226
	Peso específico nat.	219
	Granulometría	177
	Límite de plasticidad	176
	Hinchamiento controlado	33

Características hidrogeológicas del Yacimiento Punta Gorda.

Afloramiento y profundidad del nivel del agua.

En la mayoría de los pozos perforados (70 %) el agua subterránea aparece en las peridotitas lixiviadas y serpentinizadas agrietadas y su profundidad de afloramiento oscila en el yacimiento entre 0 y 27,4 m, en dependencia del relieve del terreno, de la profundidad de yacencia de las peridotitas y espesor de las lateritas (De Miguel, 2002, 2004).

En la gran mayoría de los pozos perforados se observó un ascenso lento del agua, hasta estabilizarse el nivel a distintas alturas de su cota de aparición.

El lento ascenso del agua en las calas demuestra la existencia de artesianismo en las rocas acuíferas representadas por las peridotitas, baja permeabilidad, conductividad de nivel y trasmisividad de estas rocas (De Miguel, 2004).

Los niveles en las calas se estabilizaron a profundidades que oscilan entre 4,1 y 29,2 m, en correspondencia con las presiones puntuales y locales del acuífero, relieve del terreno y ubicación

en perfil del techo de las peridotitas (De Miguel, 2004).

Dirección del flujo subterráneo y gradiente del nivel de las aguas.

Hasta las profundidades estudiadas el flujo de las aguas subterráneas y su dirección están influenciadas por el relieve del terreno, cauces de ríos y otras depresiones del terreno, así como por el relieve del techo las peridotitas (ver Fig. 1). Existe una dirección del flujo predominantemente en dirección Norte, hacia el río Moa, con desviaciones locales en los extremos del yacimiento en dirección al río Yagrumaje, río Los Lirios, depresiones del terreno con afluencia de agua (manantiales) y en la parte central del yacimiento existe un flujo radial en dirección a la zona en que el yacimiento se encuentra explotado hasta las rocas peridotitas (De Miguel, 1973; 2004).

El gradiente del nivel piezométrico de las aguas subterráneas oscila entre 0,0004 y 0,0232. Los valores mas bajos caracterizan el área del yacimiento con menores pendientes del terreno, los valores más altos caracterizan las áreas de mayores pendientes (De Miguel, 1998; 2004).

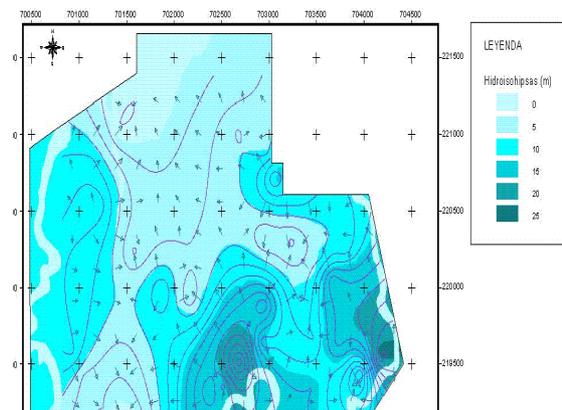


Figura 1.-Mapa de hidroisopiezas. Isolinias cada un metro y tonalidad de colores cada 5 m.

Espesor acuífero.

En las perforaciones ejecutadas los espesores saturados y acuíferos fueron totalmente perforados a excepción del acuífero de las peridotitas agrietadas, en los que en correspondencia con el Programa de Investigación, solo se perforó 5 m bajo el techo de las peridotitas con la aparición del agua en cotas superiores y hasta unos 3 m bajo la cota de aparición del agua en las peridotitas (De Miguel, 2004).

En el territorio los espesores de las peridotitas alteradas es de unos 30 m como valor medio.

En las lateritas la zona saturada no representa como tal un acuífero, ya que debido a la litología existente, prácticamente no existe circulación lateral del agua, por lo que esta zona la podemos considerar como un "acuitardo". Los espesores saturados perforados en las lateritas oscilan desde 0 m hasta 27,6 m y los mismos dependen del relieve del terreno y base de erosión del mismo (De Miguel, 2004).

Los mayores espesores de las lateritas se encuentran en las áreas más altas del yacimiento.

Permeabilidad.

La permeabilidad representada por el coeficiente de filtración es variable tanto en las lateritas como en las peridotitas. En las lateritas el coeficiente de filtración oscila entre 0,006 y 0,21 m / día. Y por capas (ver Tabla No.2) sus valores medios son como sigue: Capa 1- 0,106 m /día, Capa 2 – 0,043 m / día (Almaguer, 2004; Blanco y Llorente, 2004)). En las peridotitas la permeabilidad oscila en valores entre 0,004 y 0,43, aunque en zonas de fallas se encuentran valores superiores a 3 m / día.

Por capas en las peridotitas la permeabilidad representada por el coeficiente de filtración alcanza los siguientes valores medios: Capa 3 –0,044 m / día, Capa 4, sin considerar las zonas de fallas- 0,14 m / día (Blanco y Llorente, 2004).

Como puede observarse, la permeabilidad en la Capa 4 (peridotitas agrietadas) es tres veces mayor que la permeabilidad de las lixiviadas (Capa 3) y que el de las lateritas (Capa 2) y 1,3 veces mayor que la permeabilidad del estrato de cubierta de las lateritas (Capa 1 estrato de "perdigones").

Tabla 2.- Características litológicas de yacimientos cobalto-niquelíferos en ofiolitas.

Horizontes acuíferos	Litología
Lateritas (acuitardo)	Arena gravo-limosa con fracciones gruesas constituidas por concreciones de óxido de hierro, con baja plasticidad (Capa 1)
	Limo arcilloso de alta plasticidad (Capa 2)
Peridotitas serpentinizadas. (acuífero)	Roca muy lixiviada, presente en forma de arena limo-gravosa con arcilla y fracciones de peridotita (Capa 3.)
	Roca peridotita piroxenica serpentinizada, agrietada (Capa 4.)

Acuosidad.

La acuosidad determinada es referida a las lateritas por su importancia en el proceso minero- industrial, sus valores son bajos y expresados en l. s / m de

abatimiento presenta valores menores de 0,1 l.s/m. (De Miguel 2004)

En la mayoría del área de distribución de las lateritas la acuosidad es predominantemente de origen capilar por saturación debido a procesos de ascensos capilares desde mayores profundidades y teniendo como fuente las peridotitas acuíferas, las que subyacen a las lateritas (De Miguel 2004).

En períodos de lluvia se desarrolla la sobresaturación de espesores de lateritas en la parte superior del corte motivado por la infiltración de las aguas de lluvia hasta profundidades en que la infiltración desde la superficie se equilibra con la saturación presente por los ascensos capilares y subpresión desde las peridotitas agrietadas.

Ascensos capilares.

Las propiedades de ascenso capilar de las lateritas fueron determinadas según metodología basada en la granulometría de los sedimentos analizados y su porosidad (Makcímov, 1980), para su determinación se ejecutó 177 cálculos de ascensos capilares de igual número de ensayos granulométricos.

Como resultado de los cálculos efectuados tenemos que los ascensos capilares en las lateritas oscilan entre 0 y 25,5 m (ver Fig.2). Los menores valores coinciden con espesores lateríticos de la Capa 1 que presenta la granulometría más gruesa, con ascensos que oscilan entre 0 y 3,4 m (Blanco y Llorente 2004).

En la Capa 2 la granulometría es más fina, correspondiendo con ella los ascensos capilares oscilan entre 20 y 32,8 m Con valores medios de 26,0 m (Blanco y Llorente 2004).

En la mayor parte del territorio del yacimiento Punta Gorda las lateritas yacen directamente sobre las peridotitas lixiviadas y las agrietadas acuíferas, siendo la zona de contacto entre estas diferencias litológicas la mayor vía de circulación de las aguas subterráneas en las lateritas, por lo que las posibilidades determinadas de ascensos capilares en las lateritas por su granulometría se hacen efectivas al estar estos sedimentos en contacto directo con el agua en su basamento.

Los ascensos capilares propiamente son efectivos a partir del nivel de estabilización de las aguas (por saturación) en estos sedimentos debido a las subpresiones desde su basamento en las peridotitas agrietadas donde existen aguas confinadas con presiones moderadas (De Miguel, 2004).

Por la granulometría presente en las lateritas estudiadas, en las que el diámetro efectivo (De) oscila entre 0,0018 y 0,0022 mm (1) correspondiente al diámetro del 10% del peso de las muestras analizadas y asumiendo la media de 0,0020 mm para los cálculos y la porosidad media

de 60% (n=0,6), los ascensos capilares medios que pueden producirse en el territorio del yacimiento, calculados por tres métodos distintos presentan un valor de $H_c = 17,14$ m.

En el territorio del yacimiento Punta Gorda los mayores ascensos capilares se registran en aquellas zonas donde en la parte inferior del corte de las lateritas la litología predominante es de granos muy finos. Esto a su vez se confirma por la presencia en estas zonas de las mayores presiones en las aguas de las peridotitas agrietadas.

En campo los ascensos capilares se detectan visualmente representados en la humedad de las lateritas, teniéndose que en las paredes de los pozos de explotación mineral se observa el drenaje de las lateritas saturadas en forma de "goteo" desde alturas sobre el fondo de los pozos (en la roca peridotita alterada) en muchos casos superiores a los 15 m.

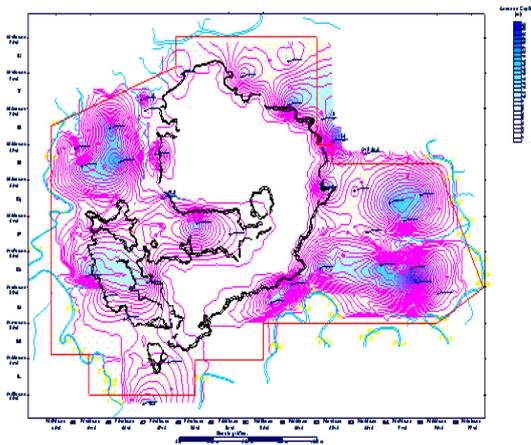


Figura 2. - Mapa de ascensos capilares en las lateritas. Desde 0 hasta más de 26 m, con isolíneas e intensidad de color cada 1 m.

Humedad de las lateritas.

La humedad en las lateritas (ver Fig. 3) en la Capa 1 oscila entre 17,1 y 47,3 %, en la Capa 2 oscila entre valores de 31,4 y 94,9 % (Almaguer, 2004; Blanco y Llorente 2004). Esta diferencia de valores entre estas capas es debido a que en la Capa 1 la granulometría es más gruesa y sobre ella actúa directamente el proceso de evaporación al ser la primera Capa a partir de la superficie del terreno.

En la Capa 2 los mayores valores de humedad se registran a mayores profundidades y contactando la Capa 3 y 4 (peridotitas acuíferas). La humedad de estas capas está influenciada directamente por las presiones existentes en las aguas contenidas y que circulan por las peridotitas, hasta niveles de equilibrio de esas presiones. Sobre la cota de acción de las subpresiones, la saturación y humedad de las lateritas está influenciada

directamente por los procesos de ascensos capilares a través de las lateritas desde la zona de humedad por presiones subyacentes o directamente desde las aguas contenidas en las peridotitas.

Otro aspecto que influye en la humedad de las lateritas lo representa la rugosidad del techo de las peridotitas agrietadas acuíferas, ya que en aquellos puntos donde presenta descensos con relleno de lateritas (bolsones), estas se presentan con alta saturación, pudiendo en algunos casos encontrarse el agua a pequeñas profundidades (nivel piezométrico).

En general en todo el espesor de las lateritas la humedad presente, de forma predominante hasta la superficie del terreno es originada por el ascenso de las aguas desde las peridotitas, por las presiones existentes en esas aguas y por los procesos de ascensos capilares que se desarrollan constantemente en las lateritas (De Miguel, 2004).

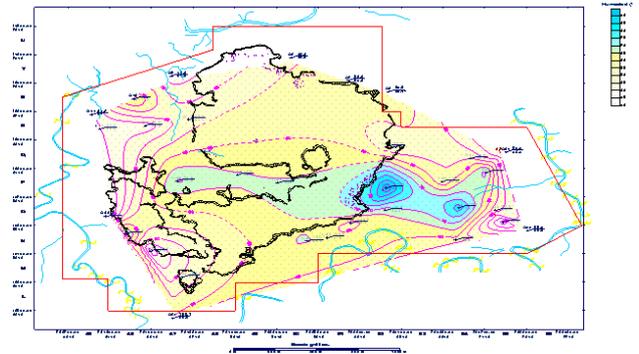


Figura 3.- Mapa de humedad en las lateritas. De 30 a más del 90 %, con tonalidad de colores cada 5 % de humedad

Régimen de las aguas subterráneas.

Las aguas subterráneas del yacimiento Punta Gorda, las podemos diferenciar en los dos horizontes acuíferos que forman el complejo acuífero en las ofiolitas.

El primer horizonte acuífero está desarrollado en las lateritas y formado por las dos capas que caracterizan los sedimentos en ellos presentes (Capa 1 y Capa 2, en Tabla No. 2).

En la Capa 1 con espesor variado de 0 a 5 m la presencia de agua de circulación libre se limita a los períodos de lluvia, cuando parte del agua que se precipita se infiltra y circula hacia las zonas de drenaje de la capa, ocurriendo a la vez la evaporación de esta agua en partes o totalmente en zonas donde esta capa forma "bolsones" sobre los sedimentos arcillosos de las lateritas.

Durante períodos de lluvia desde esta capa ocurre la infiltración de las aguas a la Capa 2

estabilizándose la infiltración hasta profundidades en que las aguas saturan espesores no totalmente saturados por aguas que ascienden por los procesos de ascensos capilares y subpresiones de las aguas desde las peridotitas agrietadas, de tal forma su régimen de funcionamiento es esporádico y su alimentación proviene principalmente de las aguas de lluvia que se infiltran en una proporción mínima, teniendo como segunda fuente de alimentación las aguas que desde las lateritas de la Capa 2 llegan a ella por ascensos capilares y luego se evaporan.

En el primer horizonte acuífero y bajo la Capa 1 yace la Capa 2 con espesor saturado que oscila entre 0 y 8 m. En esta capa como acuífero está presente un "acuitardo", debido a que la circulación lateral de las aguas en el mismo es muy débil o no existe, motivado por la fina granulometría de los sedimentos presentes que no permite la libre circulación de las aguas. Sin embargo las propiedades acuíferas las determina el alto grado de saturación de las lateritas por procesos de ascensos capilares que se desarrollan en ella y que provocan una muy lenta circulación de las aguas, en este caso en sentido vertical ascendente, hasta la superficie del terreno o hasta la Capa 1 que forma la cubierta del yacimiento, donde el agua se evapora (De Miguel 2004).

De tal forma el régimen de flujo en esta capa es permanente y predominantemente ascendente, teniendo como zona de drenaje la Capa 1 y la superficie del terreno desde donde se evaporan las aguas. Durante los períodos de lluvia existe un régimen vertical descendente de infiltración y este en tiempo depende también de la duración de este período y del tiempo que demore la saturación de la parte superior de las lateritas.

La Capa 3 formada por peridotita lixiviada presenta un espesor que puede alcanzar en partes los 10 m. Se encuentra totalmente saturada debido principalmente a las aguas provenientes de las peridotitas agrietadas que las subyacen y por las presiones que existen en las mismas. En esta Capa igual que en la Capa 2 el movimiento lateral del agua es despreciable y el movimiento que existe es vertical por las subpresiones y propiedades de ascenso capilar de la litología aquí presente.

La Capa 4 esta formada por peridotita piroxenica serpentizada y agrietada con espesor máximo de unos 30 m, esta Capa es la de mayor acuosidad en el complejo acuífero de las ofiolitas por tener una mayor permeabilidad y libre circulación del agua. Por estas condiciones y su yacencia bajo sedimentos de permeabilidad muy inferior presenta régimen de acuífero semiconfinado a confinado, con presiones notables, aunque no sobrepasan 1 atmósfera (10 m de columna de agua).

La alimentación de la Capa 4 se debe a la infiltración de las aguas de lluvia en aquellas zonas

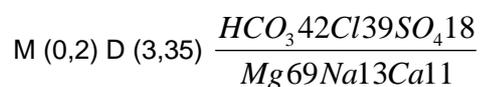
donde aflora a la superficie del terreno y por infiltración de las aguas de fuentes fluviales representadas por cauces de los ríos Yagrumaje, Los Lirios y otros con cauce en estas rocas. El drenaje de esta Capa se produce predominantemente por su escurrimiento hacia zonas bajas, hacia los ríos Moa y Yagrumaje donde estos escurren en cotas mas bajas. En segundo orden y en pequeñas proporciones esta Capa presenta un drenaje vertical ascendente desde su techo, causado por los procesos de ascensos capilares de las lateritas que "absorben" las aguas desde las peridotitas y con su posterior evaporación desde la superficie del terreno.

COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN PERIDOTITAS DEL YACIMIENTO.

Las aguas subterráneas en el yacimiento Punta Gorda al igual que en todo el territorio, presentan una composición química relacionada con las fuentes de alimentación de las mismas (infiltración de las aguas de lluvias y de las aguas de ríos) y tipo de rocas por donde circulan. Los elementos químicos contenidos que se relacionan con las rocas acuíferas y por donde circula el agua (ver Tabla No. 4), dependen directamente de la mineralogía de las rocas, en este caso las rocas acuíferas que las representan las peridotitas y que presentan alto contenido de Magnesio y otros macro componentes, también elementos pesados (micro componentes) como el hierro, níquel, cobalto y otros, en este caso también relacionado con el enriquecimiento de las rocas con minerales que han dado lugar a la formación de los yacimientos cobalto-niquelíferos y otros presentes en el territorio de Moa.

La captación por las aguas subterráneas de los elementos químicos derivados de minerales de las rocas se debe a diversos procesos que se producen durante la circulación del agua a través de ellas, principalmente por disolución de las rocas y minerales en ellas presentes como consecuencia de procesos físico-químicos que se desarrollan en la matriz rocosa influenciados por el flujo de las aguas (Lago y Romero, 2004; Palacios y Montes de Oca, 2004), prácticamente desde el momento en que estas se infiltran en las mismas.

Por su composición química en por cientos equivalentes de los macro componentes las aguas según Kurlov (Maxcímov, 1980) las podemos exponer en su formula como sigue:



Por el predominio de macro componentes las aguas son Bicarbonatadas Magnésicas.

Por su mineralización predominante (M= 0,2 gr. / l) según Clasificación de Aliokin las aguas son muy dulces (Makcímov, 1980).

Por su dureza total (Ca + Mg = 3,35 mg.eq / l), las aguas por Clasificación de Aliokin son algo duras (Makcímov, 1980).

Tabla 4.- Composición química media de las aguas subterráneas en peridotitas agrietadas en el territorio del yacimiento Punta Gorda y zonas aledañas.

Elemento	Contenido		
	mg. / l	mg. eq. / l	% eq.
Macro componentes			
Cl	41,7	1,176	39,25
HCO ₃	76,66	1,257	41,95
SO ₄	26,25	0,546	18,22
NO ₃ +NO ₂	0,9	0,017	0,6
Suma	145,52	2,996	100
Ca	8,0	0,399	10,87
Mg	33,0	2,71	69,33
Na	6,9	0,5	12,79
K	2,3	0,06	1,5
Suma	55,0	3,9	100
Micro componentes en mg /l.			
Al	1,04	-	-
Fe	0,768	-	-
Mn	0,22	-	-

Zn	0,03	-	-
Ni	0,24	-	-
Co	0,033	-	-
Cr	0,06	-	-
Cd	< 5x10 ⁻³	-	-
Cu	< 0,01	-	-
Pb	< 0,02	-	-
Ba	< 5,8x10 ⁻³	-	-

NUEVA TEORÍA:

En las condiciones del yacimiento Punta Gorda y otros yacimientos con estas condiciones se presentan procesos que en síntesis podemos describirlos de la siguiente forma:

Permanentemente parte del agua que circula por las peridotitas agrietadas bajo presión son vertidas a las peridotitas lixiviadas y las lateritas que yacen sobre ellas. Sobre la columna saturada por la subpresión en las peridotitas lixiviadas, las lateritas continúan "absorbiendo" agua debido a la capacidad de capilaridad y ascensos capilares de estos sedimentos.

Las aguas que ascienden por las lateritas alcanzan la superficie del terreno o son drenadas por la capa de lateritas con concreciones que yace en la superficie. Aquí estas aguas son drenadas o evaporadas por las propiedades de granulometría gruesa y pequeños espesores de esta capa, bajo la influencia de las condiciones climáticas y relieve del territorio.

Durante el proceso de circulación del agua por ascensos capilares a través de las lateritas parte del níquel y cobalto, en menor proporción el hierro y otros elementos químicos son retenidos en la base de la columna laterítica bajo la influencia de procesos físicos y geoquímicas que se desarrollan al paso del agua, pH, temperatura, etc. Otra parte de estos elementos junto con el hierro llega a la superficie, aquí bajo procesos de evaporación, físicos, químicos (oxidación - reducción) y otros, el hierro se deposita y forma la abundante acumulación de los óxidos de hierro aquí presentes en forma de concreciones (perdigones),

el níquel, cobalto y otros elementos aunque se depositan temporalmente, en periodos de lluvia parte son lavados de esta capa por el flujo de agua que se infiltra y es drenada por las condiciones del relieve y drenaje subterráneo existentes, pasando al escurrimiento superficial hasta territorios fuera del yacimiento, otra parte se infiltra con el agua que satura la parte superior de las lateritas que aunque con humedad no esta totalmente saturada y de tal forma se produce un incremento de deposición de esos metales en este caso por infiltración. Estos procesos son continuos.

Análisis de los procesos descritos, en el Yacimiento Punta Gorda.

Si supuestamente consideramos que las condiciones actuales de las lateritas en el Yacimiento Punta Gorda existen desde hace un millón de años con la existencia de las altas propiedades de ascenso capilar en las lateritas que permiten el ascenso del agua hasta la superficie del terreno, con la correspondiente evaporación de la misma, y considerando además el contenido del Níquel en las aguas subterráneas, que varía entre 0,01 y 0,6 mg / l, el Cobalto entre 0,001 y 0,08, el Hierro entre 0,004 y 2,56 con un contenido medio en el territorio: Níquel, Ni = 0,24 mg / l (0,24 g / m³). Cobalto, Co = 0,033 mg / l (0,033 gr/ m³) y Hierro, Fe = 0,8 mg / l (0,8 g/ m³), podemos ejecutar un cálculo (pronóstico) aproximado del volumen de estos elementos depositados en las lateritas o que han transitado a través de ellas en el perfil o columna laterítica productiva con determinada deposición en las mismas durante el millón de años considerado,

Para este pronóstico estimamos el caudal del agua en ascenso por capilaridad, considerando una sección horizontal de 1 m² y una columna laterítica media de 12 m, y de la capa superior con perdigones un espesor medio de 5 m y para ello utilizamos la expresión siguiente:

$$Q = K H B I p^{-1} \quad (\text{formula de Dupuit transformada})$$

Q- Caudal o volumen de agua que circula verticalmente a través de las lateritas por una columna de 12 m (espesor medio de las lateritas productivas en Ni y Co en el Yacimiento) y 5 m en la capa con perdigones de hierro (Fe), m³ / día.m².

K – Coeficiente de filtración medio de las lateritas = 0,043 m / día.

H – Espesor (sección vertical) de la columna de lateritas por donde asciende el agua = 1 m.

B - Ancho de la sección de filtración del agua (ascenso capilar vertical) = 1 m.

I - Gradiente (pendiente) del flujo del agua, vertical ascendente = 1

p – Coeficiente que caracteriza la presión atmosférica que hace resistencia al ascenso del agua por capilaridad (1 atmósfera es equivalente a 10 m en columna de agua) = 1 x 10⁻¹

de donde:

$$Q = 0,043 \times 1 \times 1 \times 1 \times 10^{-1} = 0,0043 \text{ m}^3 / \text{día. m}^2 = 4.3 \text{ l/día.m}^2$$

Considerando que el agua que llega a la superficie se evapora, el caudal resultante es equiparable a una lámina de evaporación media en la superficie del terreno de 4,3 mm / día o 1 569,5 mm / año, menor que la evaporación en el territorio que es de unos 1800 mm /año (González, 1986).

El volumen de Ni, Co, y Fe contenido en el agua, que puede haber transitado a través de una columna de lateritas con sección de 1 m² lo estimamos considerando para los cálculos el período de tiempo de 1 x 10⁶ años de donde:

$$V = b \times Q \times 365 \times 1 \times 10^6 \times \frac{1}{1000}$$

V- Volumen del elemento analizado que ha transitado a través de las lateritas Kg / m².

b- Contenido del elemento en gr / m³ de agua.

Q- Caudal de agua que transita en ascenso vertical por sección de 1 m² de las lateritas = 0,0043 m³ / día. m².

1 x 10⁶ – Tiempo en años considerado para los cálculos (un millón de años).

365- Días que tiene el año.

$$\frac{1}{1000} - \text{Conversión de g / m}^3 \text{ a Kg. / m}^3.$$

Para la determinación de la posible deposición de los minerales en las lateritas, se considera el cálculo del contenido de Níquel y Cobalto en las lateritas productivas con espesor medio de 12 m. y del Hierro en la capa superficial con perdigones de espesor medio 5 m para toda la columna y por metro de espesor.

1- En toda la columna.

2- Por metro de espesor = 1 m³.

De donde:

$$1- V \text{ Ni} = \frac{0,24 \times 0,0043 \times 365 \times 1 \times 10^6}{1000} = 376,68 \text{ Kg / m}^2.$$

$$2- V \text{ Ni} = \frac{376,68}{12} = 31,39 \text{ Kg / m}^3 \text{ de laterita.}$$

$$1- V \text{ Co} = \frac{0,033 \times 0,0043 \times 365 \times 1 \times 10^6}{1000} = 51,793 \text{ Kg / m}^2$$

$$2- V \text{ Co} = \frac{51,793}{12} = 4,316 \text{ Kg / m}^3 \text{ de laterita.}$$

$$1- V \text{ Fe} = \frac{0,8 \times 0,0043 \times 365 \times 1 \times 10^6}{1000} = 1255,6 \text{ Kg / m}^2$$

$$2- V_{Fe} = \frac{1255,6}{5} = 251,12 \text{ Kg / m}^3 \text{ de laterita.}$$

Para los cálculos aproximados del porcentaje que representa el volumen de los elementos químicos que han transitado por las lateritas, asumiendo la deposición de los mismos en estas, se tomo un peso volumétrico medio de las lateritas de 1 800 Kg / m³.

Los porcentajes de volúmenes determinados de Ni; Co y Fe representan en 1 m³ de la masa laterítica los siguientes valores:

Ni = 1,74 %; **Co** = 0,24 %; **Fe** = 13,95 %

Los contenidos en porcentaje de los distintos elementos por m³ de la masa laterítica resultantes, son aproximados al contenido de estos elementos actualmente en los minerales de las lateritas, lo que coincide con la hipótesis presentada, pero debemos considerar que se ha asumido un tiempo de tránsito del agua a través de las lateritas de un millón de años y en realidad la edad del yacimiento es mucho mayor. Por lo que el volumen de estos elementos que ha transitado por las lateritas en flujo ascendente es muy superior al pronosticado, lo que permite considerar que el contenido mineral de las lateritas está plenamente justificado por el tránsito del agua a través de ellas por propiedades de ascenso capilar.

Esta teoría, con los resultados obtenidos en su análisis puede ser considerada como novedosa en el estudio de los yacimientos hierro - cobalto - níquelíferos de las ofiolitas, ya que sobre los mismos no se reportan antecedentes en la bibliografía nacional tampoco en la internacional.

ANÁLISIS DEL DRENAJE PARA DESECAMIENTO DEL YACIMIENTO.

Considerando que el yacimiento de estudio se explota a cielo abierto (desde la superficie del terreno), las condiciones hidrogeológicas existentes y sobre todo la baja permeabilidad tanto de las lateritas como de las peridotitas y las altas propiedades de ascenso capilar de las lateritas, no es recomendable drenaje vertical ni horizontal soterrado, dado el alto costo de la inversión ya que se requeriría de una red de drenaje muy densa para lograr cierta efectividad, inversión que no sería amortizada, dado el tiempo en que se explotara el yacimiento en su totalidad (<10 años).

De tal forma el drenaje más recomendable es un drenaje abierto, desde la superficie del terreno hasta cortar no menos de 2m. el lecho en las peridotitas, que representa a un acuífero agrietado y que aunque con muy baja permeabilidad, la misma es unas 8 veces mayor que la permeabilidad de las lateritas.

Este tipo de drenaje requerirá de drenes principales y drenes secundarios. Los drenes principales deberán estar orientados en perfiles longitudinales por los parte aguas superiores, que coinciden con los parte aguas superficiales (ver mapa de hidroisohipsas Figura I), con el objetivo de drenar el flujo subterráneo desde las cotas mas altas y con ello disminuir el flujo hacia cotas mas bajas. Además estos drenes principales servirán de colector de las aguas que drenaran los drenes secundarios, los cuales deberán ser construidos formando una red por bloques, con distancia entre ellos en correspondencia con sus radios de influencia durante su funcionamiento y orientados de forma transversal al flujo subterráneo, con pendientes hacia los drenes principales.

En la practica minera está demostrado que las distintas rocas y sedimentos en dependencia de su granulometría, permeabilidad y trasmisividad, presentan determinados gradientes (I) del nivel de las aguas subterráneas hacia los drenes, dentro del radio de acción (R) de los drenes, teniéndose que mientras mayor sea la trasmisividad, mayor será la influencia (R) y menor el gradiente (I) del cono depresivo.

Considerando el tipo de roca presente en el yacimiento de estudio que deben ser drenadas (lateritas de granulometría y textura arcillosa), los gradientes que deben producirse serán aproximadamente I= 0.15 (de literatura Sedenko-Skavalanovich-1980).

De tal forma para poder pronosticar aproximadamente el radio de influencia de los drenes que proponemos, considerando el significado de gradiente: tangente del ángulo que se forma con plano horizontal en el punto limite de influencia del dren (R) con un abatimiento en el dren (S), tendríamos:

$$\text{tag } \theta = I = \frac{S}{R} \quad \text{de donde} \quad R = \frac{S}{I}$$

S- Abatimiento en el dren (m).- (cateto opuesto del ángulo)

R- Radio de influencia del dren (m.) - (cateto adyacente del ángulo)

Por datos de las perforaciones ejecutadas el nivel del agua en las lateritas yace entre 5 y 25 m. sobre las peridotitas, de tal forma considerando un valor medio de la potencia acuífera en las lateritas H=15 m., el objetivo del dren será, obtener un abatimiento en su trazado de unos 15 m. como promedio de aquí que el radio de influencia sea:

$$R = \frac{15}{0.15} = 100 \text{ m.}$$

Este radio calculado como valor medio para el yacimiento será el que corresponda a los drenes principales.

Los drenes secundarios deberán ser construidos a 100 m. uno de otro para mayor eficacia de su funcionamiento al producirse la influencia entre los drenes en la mitad de la longitud de su radio de influencia de tal forma podemos asumir el radio de influencia de los drenes secundarios de 50 m. El cálculo del tiempo en que demorara en desarrollarse la influencia máxima de los drenes principales y secundarios los determinaremos aplicando el método de K. E. Lembke, donde:

$$R = 1.73 \sqrt{\frac{K * H * t}{\mu}}$$

R - Radio de influencia, m.
 K - Coeficiente de filtración, m. /día.
 H - Potencia acuífera en los límites de influencia del dren , m.
 t - Tiempo de funcionamiento del dren, días.
 μ - Entrega de agua de las lateritas.

Despejando t de la formula anterior tenemos:

$$t = \frac{0.334 * R^2 * \mu}{K * H} \quad (\text{días})$$

Para un dren con valores medios de los parámetros hidrogeológicos presentes en el macizo laterítico tendríamos:

1-Dren principal.
 K=0.0097 m /día (valor medio).
 H=15 m.
 μ=0.0015
 R=100 m.

Sustituyendo valores para t, tenemos t=34.4 días.

2-Drenes secundarios.
 K=0.0097 m /día.
 H=1 m.
 μ=0.0015
 R=50 m.

En este caso H representa la potencia acuífera que asumimos existirá durante el funcionamiento de los drenes principales, en la intercepción de los radios de influencia de los drenes vecinos, con el desecamiento de las lateritas en magnitudes de 4 a 29 m. según sus potencias.

Sustituyendo valores tenemos t=129,12 días.

Los resultados obtenidos nos definen que en los drenes principales a los 34,4 días de funcionamiento, el radio de influencia de los mismos habrá alcanzado su máximo desarrollo, considerando el dren unitario, sin los drenes

secundarios, por lo que con la existencia de los drenes secundarios ese tiempo y la potencia acuífera en los extremos de su influencia serán menores.

En los drenes secundarios, considerando el desecamiento de los bloques entre drenes en magnitudes de 80 y 95%, el mismo se obtendrá en un período de tiempo no mayor de 130 días, funcionando ambos drenes y a distancias no mayores de 200 m. uno de otro.

Para lograr una mayor efectividad de los drenes, se deberá construir inicialmente los drenes principales y luego los secundarios. En la ejecución de la red de drenaje el material laterítico que se excavara se procesara industrialmente.

Posterior a la construcción del drenaje se deberá explotar el yacimiento por bloques, delimitados por los drenes principales y secundarios, siempre comenzando por los bloques de cotas mas altas del yacimiento.

Pronóstico del caudal de los drenes.

Para este cálculo nos basaremos en metodología de S.F. Averianov, donde el gasto se determina por 1m. de longitud del dren, para drenes cuyo fondo yace sobre rocas permeables (en nuestro caso las peridotitas poco agrietadas),La expresión de cálculo será:

$$Q = \frac{K * H^2}{\sqrt{a * t}} + q \quad \text{m}^3/\text{día.}$$

Q- Gasto de 1m. de longitud del dren, m³/ día.
 K- Coeficiente de filtración del estrato que se drena, m. /día.
 H- Potencia acuífera, m.
 a- coeficiente de conductividad del nivel, m² /día.
 t- Tiempo que se asume para el cálculo, días.
 q- Gasto natural, lateral del flujo subterráneo (medio entre lateritas y peridotitas), m³ /día.

q = KHI
 I- gradiente hidráulico natural de las aguas subterráneas.
 K=0.014 m /día.
 H =15 m.
 a=97 m² /día.
 t=1día.
 I=0.06
 q = 0,0126. m³ / día. m.
 Sustituyendo en la formula tenemos Q=0,307 m³ /día. m.

ARGUMENTACIÓN DEL EFECTO ECONÓMICO DEL DRENAJE.

Para los cálculos del efecto económico se consideraron los siguientes aspectos:

1. Producción media anual de Sinter de Ni. Tm.
2. Humedad de materia prima mineral a la entrada de los hornos de secado: 37,5 %.
3. Cantidad de materia prima mineral para la obtención de 1 Tm de Sinter de Ni. Tm.
4. Consumo de materia prima mineral anual: Tm./año
5. Consumo actual de petróleo por cada Tm de materia prima secada en hornos: Kg.
6. Consumo actual de petróleo en secado de materia prima mineral anual: Tm.
7. Costo asumido del petróleo 90,00 USD/ Barril.
8. Gasto anual actual por consumo de petróleo en secado de materia prima mineral: USSD/año.
9. Espesor medio de las lateritas en el yacimiento, 12 m.
10. Área de cálculo para referencia, 1 Km².
11. Volumen total de materia prima mineral por Km² de yacimiento: 12 000 000 m³ = 21 600 000 Tm.
12. Consumo de petróleo en secado mineral por Km² de yacimiento en condiciones actuales: Tm/Km².
13. Gasto en consumo de petróleo por secado de materia prima mineral por Km² de yacimiento en condiciones actuales: USD/Km² (3, 213 años)
14. Longitud total de drenes a construir por Km² de yacimiento: 12 000 m.
15. Volumen de roca a excavar con retroexcavadora formando el drenaje en peridotita con profundidad 2 m y ancho 1 m = 24 000 m³ / Km².
(para este cálculo el costo medio por cada m³ de excavación = 50,00 USD, considerando la explanación del trazado con Bulldozer, transportación del material extrido, uso de explosivo y topografía del trazado).
16. Costo de construcción del drenaje por excavación con retroexcavadora: 1 200 000 USD/km².
17. Volumen de materia prima mineral a excavar durante la construcción del drenaje 6 480 000 Tm/km²
18. Consumo de petróleo en secado de materia prima mineral durante la construcción del drenaje: Tm/Km².
19. Gasto por petróleo en secado de materia prima durante la construcción de los drenes por cada km²: USD/Km²
20. Volumen de materia prima mineral a explotar posterior a la construcción de los drenes por Km² de yacimiento: 15 120 000,00 Tm/Km².
21. Consumo de petróleo en secado de materia prima mineral por Km² de yacimiento posterior a la construcción del drenaje: Tm/Km².
(se considero una eficiencia del drenaje de un 50 %, considerando el período de lluvia en el territorio de unos 182 días /año).
22. Gasto por consumo de petróleo en secado de materia prima mineral posterior a la construcción del drenaje: USD/Km².
23. Consumo total de petróleo en secado de materia prima mineral durante la construcción y explotación con drenaje funcionando: (18 + 21): Tm/Km².
24. Gasto total por construcción del sistema de drenaje y secado de materia prima durante la construcción del drenaje y con funcionamiento de este por Km² (16 + 19 + 22): USD/Km².
25. Ahorro de combustible por explotación mediante la construcción de sistema de drenaje: 244 208 Tm/Km².
26. Efecto económico por ahorro de combustible mediante la explotación del yacimiento con drenaje (13 – 24): 138 780 382,17 USD/Km².
27. El ahorro de combustible en el secado de la materia prima mineral es de unas 42 250,52 Tm/año que representa una disminución de 132 092 Tm/año del CO₂ que actualmente se vierte a la atmósfera por petróleo utilizado en los hornos de la industria.
28. Tiempo de construcción del drenaje = 1,73 años y tiempo de explotación de 1 Km² de yacimiento con drenaje construido = 4,05 años. Total 5,78 años.

El efecto económico calculado por explotación de yacimientos con drenaje propuesto a mediano plazo durante la explotación de 1 Km² de yacimiento es de: **138 780 382,17 USD / Km²**. Lo que representa un efecto económico medio anual por ahorro de combustible en secado de materia prima mineral de unos: **24 010 446,74 USD / año**, o lo que es igual a unos: **65 782,64 USD / día**. En los cálculos se consideró la construcción total de la red de drenaje antes de explotar bloques desecados, por lo que con la construcción de la red paralela a la explotación de bloques ya desecados el tiempo de explotación de 1 Km² se podrá reducir y con ello se incrementará el efecto económico. Además se tendrá un incremento del efecto económico no calculado por el secado de la materia prima sobre la superficie del terreno. Los yacimientos de lateritas níquelíferas como regla tienen varios Km², por lo que durante la explotación de cada yacimiento el efecto económico se incrementará en función del área de los

yacimientos, espesor de las lateritas niquelíferas y método de explotación, ya que con menor espesor y métodos de explotación diferentes a los utilizados en el yacimiento Punta Gorda (menor diámetro de los pozos de explotación) el área de los Bloques a crear pueden ser menores y con ello se incrementa la efectividad del drenaje.

CONCLUSIONES:

1. Desde el punto de vista Hidrogeológico las condiciones existentes en el yacimiento Punta Gorda son poco complejas. Existe un complejo acuífero formado por dos horizontes, el primero en las lateritas (Capa 1 y Capa 2), que se caracterizan por poseer propiedades de "acuitardo", el segundo horizonte acuífero está formado por las capas 3 y 4 en las peridotitas siendo este el principal acuífero en el yacimiento, con un régimen de acuífero semiconfinado, con presiones que alcanzan hasta los 8,4 m (en algunos puntos puede ser mayor) en columna de agua. La profundidad de afloramiento del agua subterránea varía en función del relieve del terreno y profundidad del techo del acuífero en las peridotitas agrietadas y oscila entre 1 y 27,4 m. La dirección del flujo subterráneo general es en dirección al Norte, con desviaciones locales hacia ríos y pozos de explotación mineral existentes. El gradiente de las aguas subterráneas varía en dependencia del relieve del terreno su valor medio en el territorio es de 0,018. La permeabilidad de las lateritas expresada por el coeficiente de filtración presenta un valor medio de 0,043 m / día.

2. El trabajo como tal presenta un alto efecto económico y social, ya que establece procesos de ascensos capilares a través de las lateritas con deposición mineral en ellas que las han enriquecido durante el proceso de formación de las condiciones actuales de los yacimientos. Se establece un procedimiento de cálculos que sirve de base para la ejecución de Proyectos de Explotación Minera en los yacimientos lateríticos que incluyan sistemas de drenaje de estos, de forma que permitan el desecamiento de los yacimientos a mediano y largo plazo, también aporta datos (mapas) que permiten seleccionar las áreas para Plataformas de secado de la materia prima antes de su ingreso a la industria, con lo que se podrá obtener una considerable reducción de la humedad en las lateritas (hasta más de un 50 %) y con ello reducir considerablemente el consumo de combustible (Petróleo) durante el proceso de secado de mineral en hornos de las Industrias, pudiéndose alcanzar un ahorro total

en más de: **65 000 USD / día, 23 millones USD anualmente y más de 138 millones de USD por cada Km²** de yacimiento en unos 5,8 años de explotación con el ritmo actual del yacimiento analizado, ya que de incrementarse el ritmo de explotación mineral el efecto económico será mayor por año y por Km² de yacimiento. Paralelo al efecto económico se produce un efecto ambiental positivo al disminuirse en **132 092 Tm/año de CO₂** el vertimiento a la atmósfera por la combustión del petróleo que se economiza.

3. Las distancias entre drenes y dimensiones de los Bloques corresponden a las condiciones de espesor, permeabilidad y método de explotación del yacimiento Punta Gorda, para yacimientos con otras características de espesor, permeabilidad y método de explotación las distancias entre drenes y magnitud de los bloques que se formen deberán ser calculadas, partiendo del principio de que mientras menor sea el área de los bloques y menor el diámetro de los pozos de explotación mineral, menor espesor de lateritas niquelíferas, mayor eficiencia se tendrá en el drenaje y menor tiempo del desecado.

BIBLIOGRAFÍA.

1. Almaguer, Y. Interpretación de las propiedades físico- mecánicas de las lateritas. ISMM, Moa. (2004).
2. Blanco, J.L. y C. Llorente . Investigaciones ingeniero geológicas e hidrogeológicas de la Base Minera Punta Gorda. INRH, Holguín. (2004).
3. De Miguel, F. Informe conclusivo de las investigaciones hidrogeológicas e ingeniero geológicas del yacimiento Punta Gorda. ISMM, Moa. . (2004).
4. **De Miguel, F. C.** Proyecto Hidrogeología Yacimiento Punta Gorda. (Programa General de Trabajos Hidrogeológicos). ISMM, Moa. (2002).
5. **Lago, P. y M, Romero.** Impactos ambientales de la explotación del yacimiento Yagrumaje Norte al acuífero. Minbas, Moa. (2004).
6. **Maxímov, V.** Guía practica del Hidrogeólogo. ed. NIEDRA, San Petersburgo. (1980).
7. **Palacios, A. y L. Montes de Oca.** Caracterización de las aguas subterráneas en el área industrial de la Empresa Ernesto Che Guevara. MINBAS, Moa. (2004).