



CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA E INGENIERO GEOLÓGICA DEL YACIMIENTO PUNTA GORDA, MOA

Yumisleidys Sánchez Sánchez ⁽¹⁾, **Yuri Almaguer Carmenates** ⁽¹⁾, **Constantino de Miguel Fernández** ⁽¹⁾

(1) *Departamento de Geología. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. S/N Las Coloradas Moa. Holguín. Cuba. C.P. 83329, E-mail: ysanchezs@ismm.edu.cu; yalmaguer@ismm.edu.cu; cdemiguel@ismm.edu.cu*

RESUMEN

El presente trabajo refleja los resultados de una investigación compleja que obtuvo una nueva generalización hidrogeológica e ingeniero geológica del yacimiento Punta Gorda, dados a partir de exploraciones realizadas a nivel de detalle, que incluyeron trabajos de campo y gabinete recientes. El estudio ofrece la determinación del régimen de las aguas subterráneas, el establecimiento de las particularidades de los acuíferos existentes, que denota al complejo acuífero de las ofiolitas, el cual se encuentra subdividido en dos horizontes, el primero en las lateritas (Capa 1 y Capa 2), que se caracterizan por poseer propiedades de acuitardo, el segundo y principal horizonte acuífero formado por las capas 3 y 4, de serpentinitas agrietadas, con régimen de acuífero semiconfinado.

Se realizó la caracterización geotécnica de los horizontes lateríticos, basada en la clasificación del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), y el comportamiento de las propiedades físico – mecánicas; así como, el análisis del factor de seguridad en la corteza. Se obtuvieron e interpretaron planos de cohesión, ángulo de fricción y peso específico, mediante análisis estadísticos, para determinar el comportamiento de los suelos lateríticos según sus propiedades resistentes.

Con los resultados descritos acerca de la temática abordada, se puede inferir que con el diseño de sistemas de drenes naturales, se lograría disminuir la humedad presente en las lateritas; y a su vez, se podrían identificar las áreas más vulnerables a la ocurrencia de movimientos de masas durante el desarrollo de actividades mineras.

ABSTRACT

The present paper is about the results of the complex investigation obtaining a new hydrogeological generalization and geological engineering of Punta Gorda deposits, resulting of realized explorations to detail level, it includes theoretical and field work recently. The study offers the determination of groundwaters regime, it established the particularities of being aquifers that denote to complex aquifer of ofiolites, which is subdivided in two horizons, the first on laterites (Layer 1 and layer 2), characterized for having aquitard properties, the second and main aquifer horizon formed for layers 3 and 4, of fractured serpentinites, with regime of semiconfined aquifer.

The geotechnical characterization of laterites horizons was realized based on the classification of Unificated System of Soils Clasification (USSC), and the behaviour of chemistry and physical properties; as soon as, the analysis of security factors in the crust. Cohesion, friction angle and specific weight planes were interpreted and obtained, mediant stadistics analysis, for to determinate behaviour of laterits soils according to resistant properties.

With described results about the text, it can be infered with the design of naturals drainage, it could be possible to decrease the present humidity laterits, at the same time we could identified the over vulnerable areas to mass movements occurrence during the mine activities.

INTRODUCCIÓN

Millones de años reflejados en tiempo geológico han trascurrido y a su vez formado los yacimientos de ferroniquelíferos a partir de las rocas serpentinizadas del macizo ofiolítico. Su génesis, de



particularidades geológicas muy complejas, revela la notable influencia de las condiciones hidrológicas e hidrogeológicas durante su formación.

A pesar de la experiencia acumulada en la explotación mineral e industrial de estos singulares yacimientos, aún existe pérdida y empobrecimiento de la materia prima mineral durante su extracción, debido precisamente a las características naturales de estos suelos, así como, a la influencia antrópica.

El desarrollo de las técnicas computacionales con la creación de nuevos software permiten, con el trabajo de bases de datos, obtener planos que caracterizan los complejos acuíferos con sus horizontes y las particularidades ingeniero geológicas de las cortezas lateríticas de estos yacimientos.

Las empresas de la Unión del Níquel, en proyectos de desarrollo minero, afrontan dificultades ante las condicionantes que imponen los agentes naturales. Precisamente, dirigido a elevar el conocimiento ante estas interrogantes, la presente investigación, permite profundizar en la caracterización ingeniero-geológica e hidrogeológica, siendo una útil herramienta durante la planificación minera en dicha entidad.

METODOLOGÍA EMPLEADA EN LA INVESTIGACIÓN

La metodología aplicada en la investigación (Figura 1) para el análisis y establecimiento de las características hidrogeológicas e ingeniero geológicas del yacimiento Punta Gorda, parte de la recopilación bibliográfica a partir de la búsqueda de materiales y datos de trabajos ejecutados en el mismo (De Miguel C., 2004; Blanco et al, 2004), describiéndose el procedimiento utilizado en el procesamiento de las bases de datos, así como, para el análisis de la estabilidad de taludes y laderas, nos auxiliamos de dos métodos: según el Coeficiente de Correlación y el método de rotura planar, el cual es utilizado en zonas tropicales (Dos Santos y Augusto Filho, 2005). Este último es un método que se sustenta en el cálculo del factor de seguridad, tomando en cuenta variables como cohesión, peso específico, ángulo de fricción (tangente), inclinación de la pendiente (seno, coseno) y profundidad de ruptura.

Finalmente, con toda la información procesada e interpretación de los resultados obtenidos, podemos alegar que el método de rotura planar facilita la identificación de las zonas más vulnerables a la ocurrencia de deslizamientos, así como, determinar quizás con anticipo el riesgo que puedan presentar determinadas obras, sectores económicos o sociales, según el comportamiento que reflejen las variables anteriormente expuestas; así como, con el análisis del coeficiente de correlación se puede identificar de forma areal el comportamiento de las propiedades utilizadas. De ahí que, con toda la información obtenida durante la investigación realizada se haya llegado a una fundamentación más acertada acerca de la estabilidad del macizo rocoso, y conjuntamente concluido en la generalización hidrogeológica e ingeniero geológica del yacimiento Punta Gorda.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización hidrogeológica

En el yacimiento Punta Gorda existe un complejo acuífero formado por dos horizontes acuíferos estratificados o con capas (De Miguel, 2004), las que para mejor comprensión hidrogeológica, ingeniero - geológica y minero, es resumida su litología en la tabla I. Se encuentra el primer horizonte

representado por las lateritas, formada por dos capas, la primera denominada OICP (ocres inestructurales con perdigones) y la segunda subdividida en OII (ocres inestructurales iniciales), OEF (ocres estructurales finales) y OEI (ocres estructurales iniciales). En el caso del horizonte acuífero más profundo, es decir, el horizonte de las serpentinitas, está representado por las capas 3 (roca muy lixiviada) y capa 4 (roca agrietada).

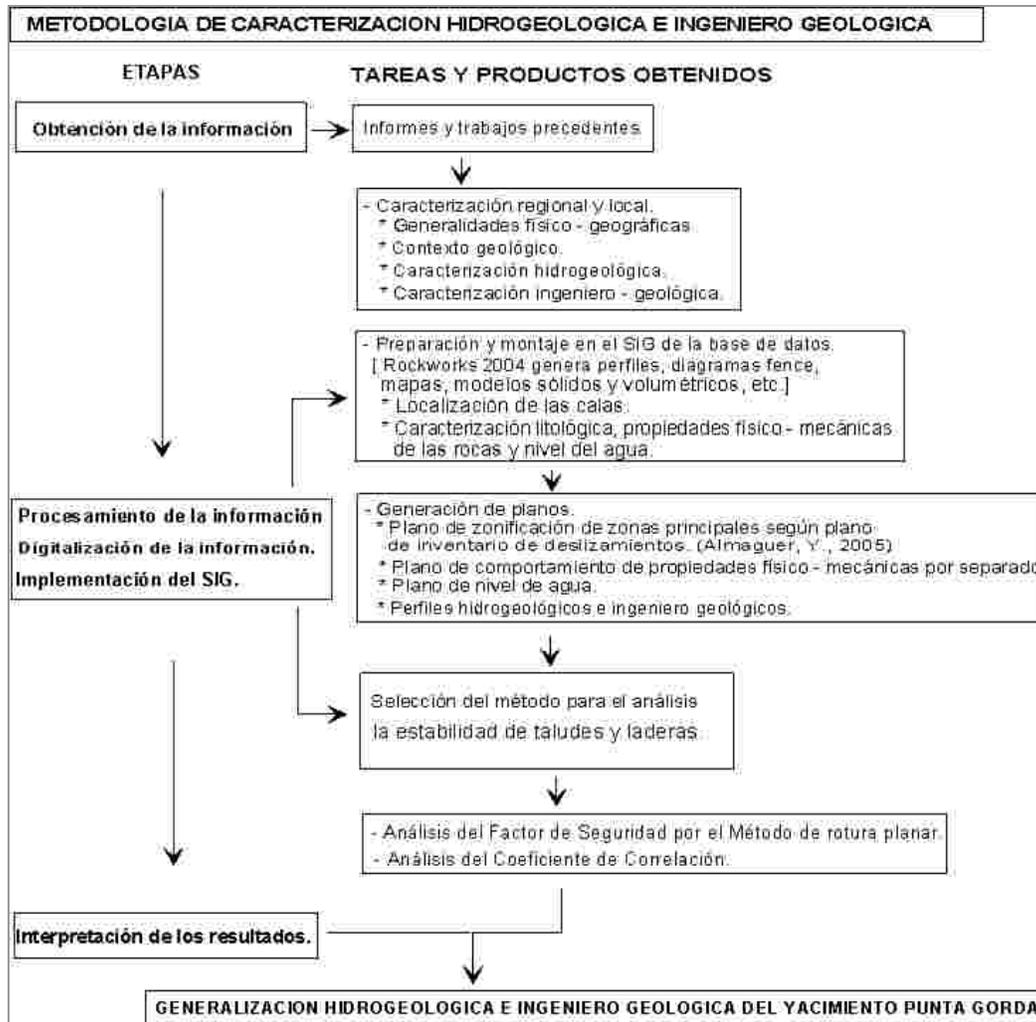


Figura 1: Organigrama que resume la metodología de la investigación.

El agua subterránea generalmente se detecta en las serpentinitas lixiviadas y serpentinitas 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 estas rocas y espesor de las lateritas; siendo el ascenso del agua lento, hasta estabilizarse el nivel a distintas alturas de su cota de aparición. Este ascenso demuestra la existencia de presión de agua en las rocas acuíferas representadas por las serpentinitas, baja permeabilidad, conductividad de nivel y transmisividad de estas rocas.

Tabla I. Caracterización del complejo acuífero del yacimiento Punta Gorda. (De Miguel, 2004).

Horizontes acuíferos	Litología
----------------------	-----------

Lateritas	Arena gravo - limosa con fracciones gruesas constituidas por perdigones de hierro, con baja plasticidad (Capa 1 - OIP)
	Limo arcilloso de alta plasticidad (Capa 2 - OII, OEF, OEI)
Serpentinitas	Roca muy lixiviada, presente en forma de arena limo - gravosa con arcilla y fracciones de serpentinitas (Capa 3)
	Roca agrietada (Capa 4)

Los niveles de aguas subterráneas, en las calas hidrogeológicas realizadas en el yacimiento, se han estabilizado 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 serpentinitas.

En el área del yacimiento las presiones en las aguas subterráneas oscilan entre 0 y 8,4 m, determinadas por la diferencia de cotas entre la cota de afloramiento del agua y cota de estabilización del nivel (Figura 2).

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. 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 los pozos de explotación mineral que en profundidad cortan las rocas serpentiniticas.

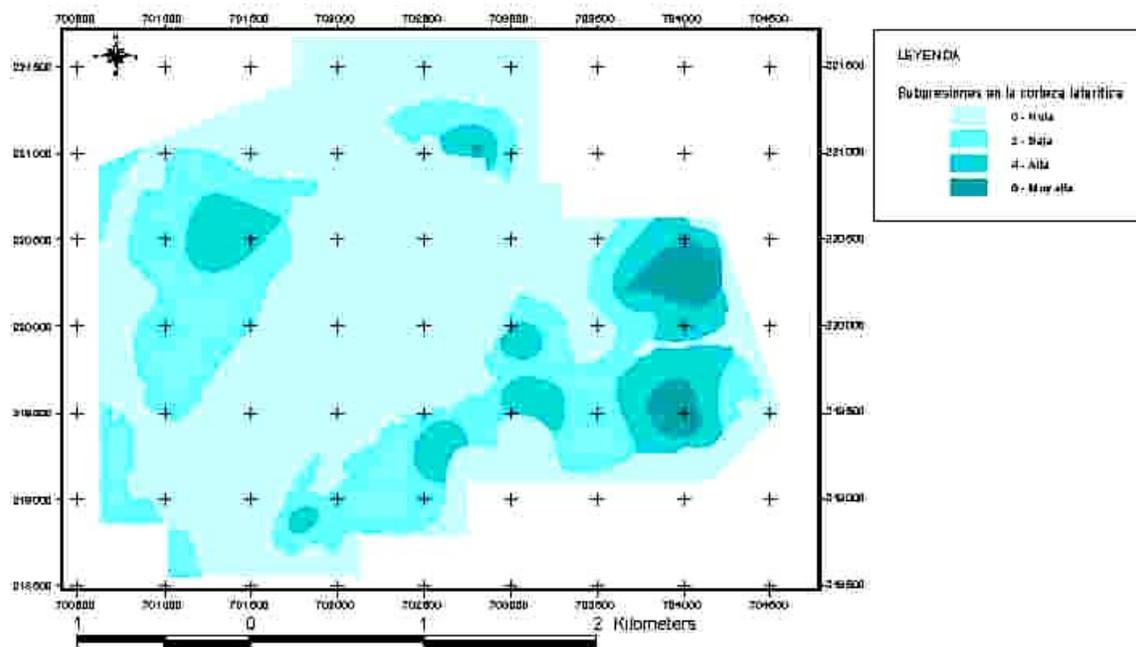


Figura 2. Plano de subpresiones de la corteza laterítica del yacimiento Punta Gorda (Escala original 1:2 000). (Almaguer, 2005).

El gradiente del nivel piezométrico de las aguas subterráneas oscila entre 0,0004 y 0,0232. Los valores más bajos caracterizan el área del yacimiento con menores pendientes del terreno los valores más altos caracterizan las áreas de mayores pendientes (Figura 3).

Los espesores saturados y acuíferos fueron totalmente perforados durante los trabajos de campo (perforaciones), a excepción del acuífero de las serpentinitas agrietadas, en las que solo se perforó 5 m bajo el techo de la serpentinita agrietada con la aparición del agua en cotas superiores y hasta unos 3 m bajo la cota de aparición del agua en las serpentinitas agrietadas. En el territorio los espesores de las serpentinitas alteradas es de unos 30 m como valor medio.

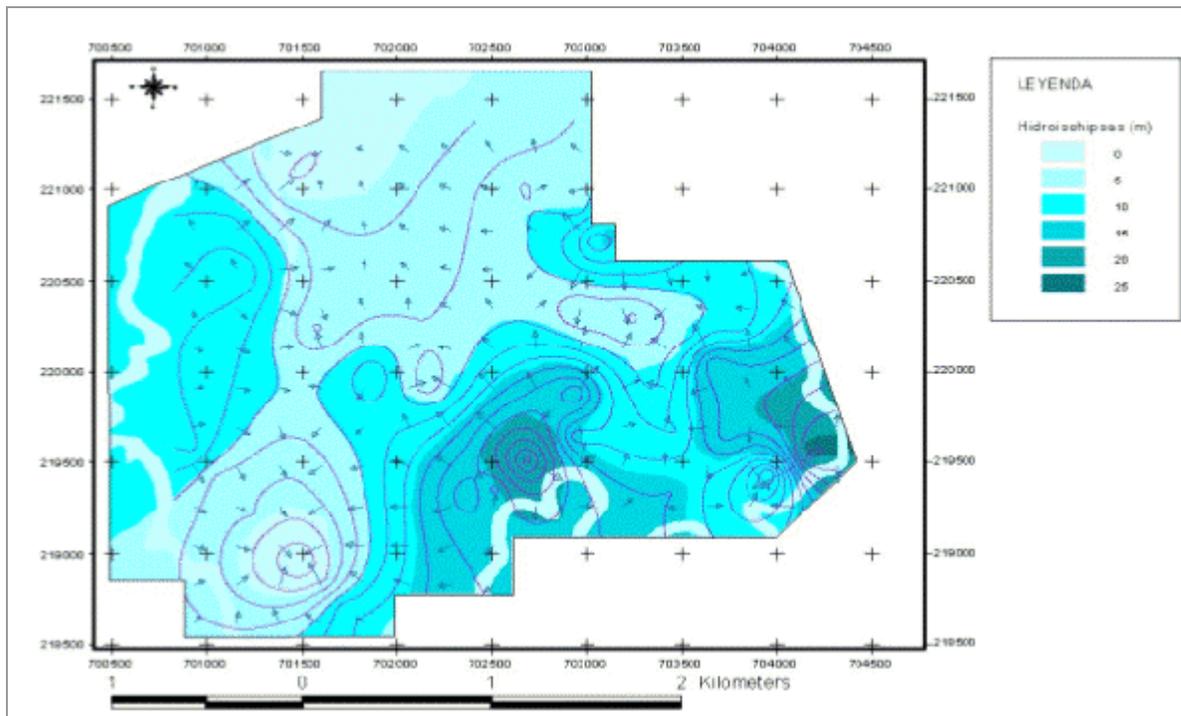


Figura 3. Plano de hidroisohipsas y dirección de flujos subterráneos en el yacimiento Punta Gorda. (Escala original 1:2 000). (Almaguer, 2005).

En las lateritas, la zona saturada no representa 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 27,6m., y los mismos dependen del relieve del terreno y base de erosión del mismo. Los mayores espesores de las lateritas se encuentran en las áreas más altas del yacimiento.

La permeabilidad representada por el coeficiente de filtración resultó ser variable, tanto en las lateritas como en las serpentinitas. En las lateritas, el coeficiente de filtración oscila entre 0,006 y 0,21 m/día., y por capas sus valores medios son como sigue: Capa 1 – 0,106 m/día, Capa 2 – 0,043 m/día.

En las serpentinitas 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 serpentinitas 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.



Como puede observarse, la permeabilidad en la capa 4 (Serpentinitas agrietadas) es más de tres veces mayor que la permeabilidad de las serpentinitas 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).

Se le determinó la acuosidad a las lateritas, por su importancia en el proceso minero – industrial, sus valores son bajos y expresados en l.seg/m de abatimiento son menores de 0,1 l.seg/m.

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 serpentinitas acuíferas, las que subyacen a las lateritas.

Las propiedades de ascenso capilar de las lateritas fueron determinadas basándose en la granulometría de los sedimentos analizados y su porosidad.

Como resultado de los cálculos efectuados, tenemos que los ascensos capilares en las lateritas oscilan entre 0 y 25,5 m. Los menores valores coinciden con espesores lateríticos de la Capa 1 que presenta la granulometría más gruesa, con ascensos que oscilan entre 2,4 y 3,4 m. En la capa 2 donde la granulometría es más fina, correspondiendo con ella los ascensos capilares oscilan entre 20 y 32,8 m. con medios de 26,0 m.

En la mayor parte del territorio del yacimiento Punta Gorda las lateritas yacen directamente sobre las serpentinitas lixiviadas y 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 de 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 serpentinitas agrietadas, donde existen aguas confinadas con presiones moderadas. (Figura 2).

La humedad en las lateritas oscila en la Capa 1 entre 17,1% y 47,3%, en la Capa 2 oscila entre valores de 31,4 y 94,9%. Esta diferencia de valores de 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 en las sub-capas b y c, ubicadas a mayores profundidades y contactando la Capa c con las serpentinitas acuíferas. La humedad de estas capas está influenciada directamente por las presiones existentes en las aguas contenidas y que circulan por las serpentinitas, hasta niveles de equilibrio de esas presiones (Figura 2). Sobre la cota de acción de las subpresiones desde las serpentinitas, la 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 serpentinitas.

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

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 serpentinitas, por las



presiones existentes en esas aguas y por los procesos de ascensos capilares que se desarrollan constantemente en las lateritas.

Durante los períodos de lluvia en la parte superior de las lateritas se produce una saturación (sobresaturación de los espesores de las lateritas) debido a la infiltración de las aguas de lluvia desde la superficie del terreno, esta saturación en profundidad se desarrolla hasta profundidades donde se equilibra con las humedades presentes debido a los ascensos capilares y subpresión desde las serpentinitas agrietadas.

Régimen de las aguas subterráneas

Con el estudio del régimen de las aguas subterráneas del yacimiento Punta Gorda, concluimos que 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, Tabla I].

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 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 dentro de 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 serpentinitas agrietadas.

Por lo antes expuesto se deduce, que esta capa presenta un régimen de acuífero esporádico y su alimentación proviene principalmente de las aguas de lluvia que se infiltran en una proporción mínima, de las aguas que llegan hasta ella por ascensos capilares de aguas que yacen a mayores profundidades.

En el primer horizonte acuífero y bajo la Capa 1 yace la Capa 2 con espesor saturado que oscila entre 0 y 8 m. y formada por tres subcapas. En esta Capa como acuífero está presente un acuitardo, debido a que la granulometría de los sedimentos presentes 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 en períodos de seca principalmente, el agua es evaporada.

En períodos de lluvia, por la infiltración de las aguas desde la Capa 1 se produce un movimiento vertical descendente de las aguas que se infiltran, hasta profundidades en que las lateritas están saturadas por aguas de ascensos capilares y que han ascendido por las subpresiones presentes en las lateritas. (Figura 2).

De tal forma, el régimen de flujo de 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 éste en tiempo depende también del período de duración de lluvias y del tiempo que demore la saturación de la parte superior de las lateritas, hasta profundidades en que las mismas, aunque presentan humedad, no están totalmente saturadas por las aguas de ascensos capilares aquí presentes.



El segundo horizonte acuífero en profundidad formado por las capas 3 y 4 tiene sus propias diferenciaciones. La Capa 3 formada por serpentinita agrietada con espesor máximo de unos 30 m., es la capa 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 mucho menos permeabilidad, presenta régimen de acuífero semiconfinado con presiones notables, aunque no sobrepasan los 10 m (1 atmósfera).

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. El drenaje de esta Capa se produce predominantemente por su escurrimiento, hacia zonas bajas que se corresponden con los ríos Moa y Yagrumaje, donde estos escurren en cotas más 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 serpentinitas y posterior evaporación desde la superficie del terreno de las aguas que ascienden.

Caracterización ingeniero geológica del yacimiento Punta Gorda

El yacimiento cobalto níquelífero de Punta Gorda se encuentra ubicado dentro de un macizo ofiolítico y por las características estratigráficas y litológicas de los sedimentos y rocas presentes en la parte superior del corte y sus propiedades físico mecánicas, se diferencian cuatro capas con sub-capas geotécnicas. [Tabla II].

Análisis del factor de seguridad por el método de rotura planar. Según este modelo de rotura, el cálculo del factor de seguridad puede ser obtenido por la ecuación (Dos Santos y Augusto Filho, 2005) presentada a continuación:

$$FS = \frac{c + \gamma * \cos^2 i * \tan \phi}{\gamma * z * \cos i * \text{seni}}$$

Donde:

c – cohesión

γ - peso específico

i – inclinación de la pendiente

ϕ - ángulo de fricción

z - profundidad de rotura

Tabla II. Horizontes ingeniero-geológicos presentes en el yacimiento Punta Gorda (Guardado y Almaguer, 2001; Blanco et al, 2002; Almaguer et al, 2005a; Almaguer, 2005).

Horizontes ingeniero geológicos		Horizontes geólogo-genéticos	Tipo de suelo (SUCS)	Observaciones
4		Ocre inestructural con perdigones (OICP)	SM – Arena gravo-limosa con fracción gruesa constituida por perdigones de óxido de hierro. Plasticidad baja. Color – Rojo ladrillo oscuro.	A medida que se desciende en el corte aumenta la humedad, disminuyen los pesos específicos
3	3c	Ocre inestructural sin perdigones (OI)	MH- Limo arcilloso de alta Plasticidad. Color- varía desde carmelita amarillento hasta verde amarillento, en partes	



	3b	Ocre estructural final (OEF)	abigarrado.	naturales y disminuyen las características resistentes.
	3a	Ocre estructural inicial (OEI)		
2		Serpentinita lixiviada (RML)	SM – Arena limo-gravosa con arcilla, con fracción gruesa constituida por fragmentos de serpentinitas. La fracción fina presenta alta plasticidad. Color- verdoso.	
1		Roca ultrabásica Serpentinizada (RMA)	Roca.	

Suelos SM (OICP). Los resultados obtenidos a partir del cálculo del factor de seguridad (FS) en los suelos SM, que se asocian a los ocres inestructurales con perdigones (OICP) en el cortante rápido saturado, determinan un FS óptimo para profundidades de superficie de rotura de valores ≤ 1 m, con una pendiente que no exceda los 5° ; sin embargo, si esta aumentara a 10° se comportaría medianamente estable, al igual que a una profundidad de 2 m con 5° de pendiente.

Suelos MH (OII, OEF, OEI). En suelos tipo MH, según el cortante rápido saturado, el FS resulta óptimo para 5° de pendiente con valores ≤ 1 m, y medianamente estables para profundidades de 2 m. Sin embargo, cuando la pendiente se eleva a 10° , resulta igual el comportamiento al descrito con anterioridad con 1 m de profundidad.

Suelos SM (SL). En suelos tipo SM, según las características de ambos cortantes (rápido y lento saturado), presentan un FS con estabilidad a los 5° de pendiente del terreno a profundidades con valores ≤ 4 m, al igual que con 10° y 2 m, hasta 15° con 1 m de profundidad de la superficie de rotura. Sin embargo, esto varía de $20^\circ - 25^\circ$ con 1 m y 5° con 6 m, pues resulta medianamente estable.

Análisis estadístico. Se realizó un análisis del coeficiente de correlación, con la finalidad de demostrar la relación existente entre las variables utilizadas con respecto al factor de seguridad [Tabla III]. Dicho análisis se demuestra a continuación:

- Correlación negativa entre el FS y la pendiente del terreno. Esto significa que con la disminución de los valores del factor de seguridad, la pendiente tiende a aumentar, resultando por tanto, una mayor inestabilidad en los taludes y laderas, ya que las fuerzas movilizadoras superarían considerablemente en valor a las resistentes.
- Correlación negativa entre el FS y la profundidad de superficie de rotura. Revela un comportamiento similar al anterior, ya que el aumento de la profundidad de superficie de rotura provoca una disminución en los valores del FS, donde la inestabilidad en los taludes y laderas resulta evidente.
- Correlación negativa entre el factor de seguridad y la cohesión. Esto significa que con el aumento de la cohesión, disminuyen los valores del factor de seguridad, por el incremento de materiales arcillosos, los cuales se relacionan con la potencia de los ocres estructurales, con aumento de la humedad y el peso propio del suelo.
- Correlación positiva entre el factor de seguridad y el peso específico. Cuando existe un incremento de los valores del peso propio, se evidencia la influencia del peso específico de los ocres inestructurales con perdigones (OICP), que son los que más peso tienen en el corte, debido a su contenido de material arenoso y a que poseen menor contenido de humedad.

Tabla III. Análisis de correlación entre variables de cálculo del factor de seguridad con el método de rotura planar.

Correlación	C	Peso Esp.	H	Pendiente
FS	-0,06	0,11	-0,33	-0,35

Comportamiento areal de las propiedades físico – mecánicas de las rocas

A partir de las características presentes en las propiedades físico – mecánicas de las rocas analizadas se ha podido determinar el comportamiento de los suelos existentes en el yacimiento Punta Gorda. De ahí, que su interpretación resulte de primordial importancia, ante la probabilidad de ocurrencia de algún fenómeno natural o provocado artificialmente, ya que dichos suelos son extremadamente susceptibles al desarrollo de movimientos de masas, como deslizamientos de taludes y laderas inestables.

De acuerdo a la distribución areal de la media ponderada de los valores de cohesión existe una concentración hacia el N - NW del área, con valores entre 0,01 y 0,29; lo cual refleja por una parte la relación directa con el aumento de los contenidos de materiales arcillosos y la disminución de los arenosos en la corteza, además de ser un indicador de las propiedades resistentes de los mismos. (Figura 4).

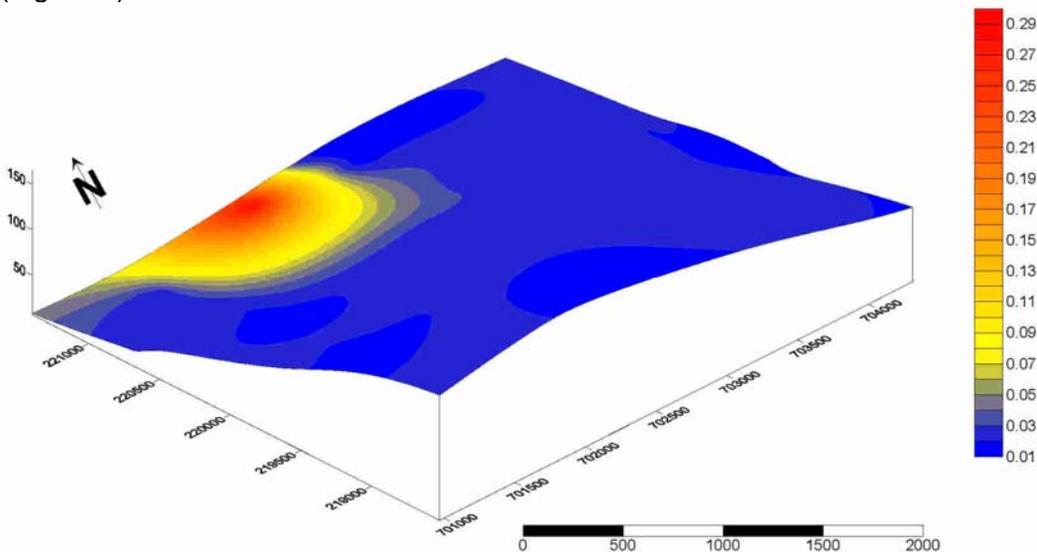


Figura 4. Plano de comportamiento de la cohesión.

El plano de comportamiento del ángulo de fricción revela una concentración marcada hacia el S – SE - SW con valores entre 12 y 24.5, los más altos reportados por el ángulo de fricción en el yacimiento Punta Gorda; se observan hacia el SW – NW del plano en cuestión, lo cual explica la existencia de suelos más arenosos con menos contenidos de arcilla y de mayor resistencia. En las zonas de menores ángulos de fricción, ubicadas hacia el NE y en forma alargada al W, y con menos magnitud al E, se debe prestar especial atención a la estabilidad de los taludes de explotación, por la predisposición natural debido a la disminución de las fuerzas resistentes. (Figura 5).

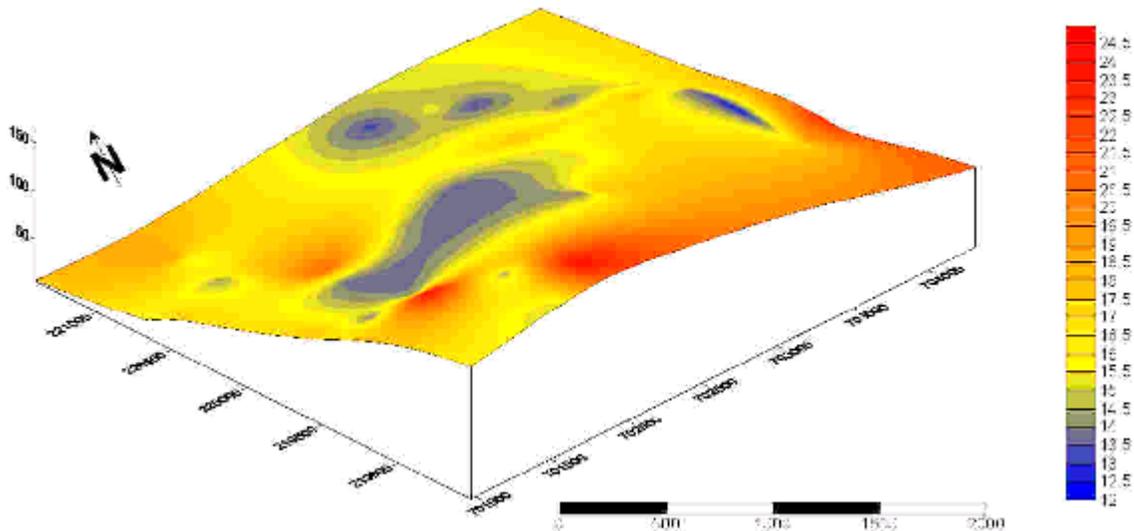


Figura 5. Plano de comportamiento del ángulo de fricción.

El plano de comportamiento del peso específico refleja hacia el NE y meridionalmente en forma alargada al E un incremento de los valores de peso específico, propiedad que suele comportarse inversamente proporcional con respecto a la resistencia de estos suelos porque incrementa el peso propio y por tanto las fuerzas movilizadoras, provocando aumento de la inestabilidad del terreno. Sin embargo, los valores mínimos se concentran fundamentalmente hacia el S – SE del plano, y de forma aislada hacia el E, lo cual es símbolo de suelos relativamente estables. (Figura 6).

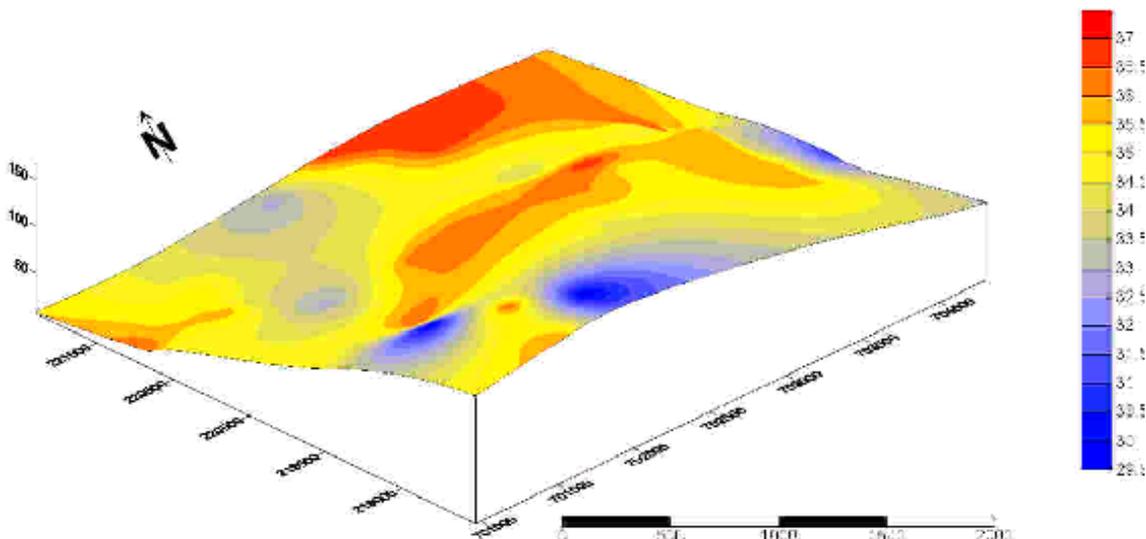


Figura 6. Plano de comportamiento del peso específico.

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 caracteriza por poseer propiedades de “acuitardo”, el segundo y principal horizonte acuífero está formado por las capas 3 y 4, de



- serpentinitas agrietadas, con un régimen de acuífero semiconfinado. La profundidad de afloramiento del agua subterránea varía en función del relieve del terreno y profundidad del techo del acuífero en las Serpentinitas agrietadas y oscilan 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.
2. De acuerdo a los cálculos del FS los suelos SM (OICP) según datos de cortante rápido saturado, determinan una estabilidad óptima para profundidades de superficie de rotura ≤ 1 m, con una pendiente que no exceda los 5° . Sin embargo, a los 10° se comporta medianamente estable, al igual que a una profundidad de 2 m con 5° de pendiente.
 3. El FS en suelos MH (OII, OEF, OEI) según el cortante rápido saturado, resulta óptimo para 5° de pendiente con valores ≤ 1 m, y medianamente estable para profundidades de 2 m. Sin embargo, cuando la pendiente se eleva a 10° , resulta igual el comportamiento al descrito con anterioridad con 1 m de profundidad.
 4. Los suelos SM (SL) reflejan un FS con estabilidad a los 5° de pendiente del terreno a profundidades con valores ≤ 4 m, al igual que con 10° y 2 m, hasta 15° con 1 m de profundidad de la superficie de rotura. Sin embargo, esto varía de $20^\circ - 25^\circ$ con 1 m y 5° con 6 m, pues resulta medianamente estable.
 5. La interpretación de los planos de cohesión, ángulo de fricción y peso específico, obtenidos a partir del cálculo de la media ponderada, revelan la existencia de suelos que indican las propiedades resistentes de los mismos hacia el N – NW con el aumento de materiales arcillosos según la valoración de la cohesión; concentración marcada al S- SE- SW reflejando el contenido arenoso de la corteza laterítica, y además, la resistencia de la misma evaluando el comportamiento del ángulo de fricción; y, al NE y meridionalmente al E se incrementan los valores de peso específico, que a su vez implica un aumento de las fuerzas movilizadoras y provoca inestabilidad del terreno.

BIBLIOGRAFÍA

- Almaguer Y., 2005: "Evaluación de la susceptibilidad del terreno a la rotura por desarrollo de deslizamientos en el yacimiento Punta Gorda". Tesis Doctoral, ISMM. p: 108.
- Blanco J. L. y E. Llorente, 2004: "Investigación ingeniero-geológica e hidrogeológica de la Base Minera Punta Gorda". Archivos de la Subdirección de Minas, Empresa Ernesto Che Guevara, Moa, Cuba. (Informe Técnico).
- De Miguel C., 2004: "Informe hidrogeológico conclusivo sobre: Investigación ingeniero-geológica e hidrogeológica de la Base Minera Punta Gorda. Archivos de la subdirección de Minas, Empresa Ernesto Che Guevara, Moa, Cuba.
- Dos Santos Oliveira A. y O. Augusto Filho, 2005. Análise de Movimentos de Massa com Base em Observações do Evento do Ano 2000 de Campos de Jordão (Estado de São Paulo, Brasil). Solos e Rochas (Revista Latino-americana de Geotecnia), São Paulo, Brasil, Vol. XXVIII (No. 1): p: 99-111.