



ROCAS Y SUELOS COMO INDICADORES INGENIERO GEOLÓGICOS Y AMBIENTALES DE ESTABILIDAD Y SOSTENIBILIDAD DE TALUDES Y LADERAS.

Dr. Rafael Guardado Lacaba. MSc. Yuri Almaguer Carmenates.

Departamento de Geología
Instituto Superior Minero Metalúrgico, Las Coloradas S/N, Moa, Holguín. rguardado@ismm.edu.cu

Resumen.

Las rocas y suelos, su composición, estructura y textura, propiedades físico mecánicas, y otras tienen un componente clave en la estabilidad de los taludes y laderas al movimiento de masa en ellos. Los autores brindan un análisis de los diferentes tipos de rocas: Rocas duras y semiduras, friables cohesivas y no cohesivas y rocas con composición y estado especiales y particulares. Se brinda una comparación de los distintos movimientos de masas en los taludes según el tipo de roca y sus condicionales ingeniero geológicas.

Summary.

The rocks and SOILS, its composition, structures and texture, properties physique mechanics, and others have a key component in the stability of the slopes and hillsides to the movement of mass in them. The authors offer an analysis of the different types of rocks: Hard rocks and semihard, friable cohesive and not cohesive and rocks with composition and special state and matters. You offers a comparison of the different movements of masses in the banks according to the rock type and their geologic conditional engineer.

Palabras claves: geomecánica, evaluación de taludes, rocas duras y semiduras, suelos, macizo rocoso, deslizamientos, movimientos de masas.



1. Introducción.

En la inestabilidad de los terrenos las rocas y suelos que los componen tienen un componente fundamental en los movimientos de masas que se producen en las laderas y taludes. Los procesos y fenómenos gravitacionales están relacionados con los desprendimientos de rocas, deslizamientos de rocas y suelos, los flujos, torrentes, etc. Para que se produzcan estos movimientos debe haber una roca o suelo que falle ante la acción combinada de las fuerzas gravitacionales, hidrostáticas, hidrodinámicas, sísmicas, por los cambios de estado, de presión, etc.

Podríamos evaluar diferentes indicadores geotécnicos que reporten la estabilidad en las laderas y taludes, pero son las rocas, sus propiedades, su estructura, textura, composición y estado los que hacen que las rocas desafíen la gravedad y se alcen a gran altura y con una pendiente prácticamente vertical. Contrariamente laderas y taludes no aceptan diferentes condiciones y se ponen en movimiento. En este sentido la Ingeniería Petrológica (Rock Engineering) juega un papel determinante en la evaluación de la inestabilidad de los taludes. Conocer las rocas que componen las laderas y/o taludes, su composición, estructura, textura, alteración, diaclasamiento, las propiedades físicas, acuíferas y mecánicas, todos estos indicadores ingenieros petrológicos condicionan ampliamente las condiciones de estabilidad. Ejemplos hay muchos, precisamente trataremos en este trabajo de fundamentar de cómo condiciones ingenieras petrológicas inciden en las inestabilidades de los terrenos. Hemos dividido las rocas en cinco grandes grupos: I- Rocas estables, II- Rocas poco estables, III- Rocas friables y cohesivas, IV- Rocas friables no cohesivas, V- Rocas con propiedades y estados particulares. Los taludes y laderas pueden ser homogéneos y heterogéneos, así los indicadores ingenieros geológicos fundamentales de estabilidad lo brindan los tipos de rocas presentes en ellos, de ahí la importancia de su dominio y conocimiento.

2. La estabilidad de los taludes formados por rocas resistentes y semiresistentes:

La estabilidad de taludes formados por rocas resistentes y semiresistentes, está relacionada con la estabilidad de los macizos rocosos, las rocas las podríamos dividir en dos grandes grupos en materia de estabilidad de laderas: rocas estables o resistentes y rocas inestables o semiduras. Las rocas para ser estables en taludes deben ser resistentes, cohesivas, densas, impermeables, estables en el amplio sentido de la palabra.

Las rocas semiresistentes son aquellas que presentan un grado de alteración de intemperismo, presentan numerosas debilidades estructurales (planos de diaclasamiento, fallas, esquistosidad, estratificación, etc.) todo ello reduce la resistencia de las rocas en los taludes y laderas. Precisamente el agrietamiento controla en las rocas de los taludes su estabilidad.

Las rocas y las discontinuidades presentes en ellas rigen la resistencia y su comportamiento deformacional de estas en laderas y taludes. La resistencia de las discontinuidades depende del tipo de rocas y del origen del propio agrietamiento del cual distinguiremos:

- **Juntas.** Corresponden a las grietas de las rocas. Pueden distinguirse las juntas de origen tectónico, formadas por un movimiento orogénico determinado. Son persistentes, se presentan en familias perfectamente definidas. Las juntas de compresión debidas a la expansión de las rocas en la superficie y debido a la descarga de la presión y descompresión a que están sumidas. Juntas de contracción, provocadas por el enfriamiento rápido de un magma en la superficie, siendo característico de las rocas volcánicas.



- **Fallas.** Son superficies de roturas en las rocas donde ha existido un desplazamiento. Son estos movimiento y sus consecuencias componentes problemáticos en la estabilidad de los taludes. Estos desplazamientos dejan marcados huellas muy peculiares pero también su movimiento a lo largo del plano de falla eliminan los elementos resistentes de cohesión entre las juntas borrando las irregularidades de su superficie. Los espejos son caras muy pulidas, en ellos aparecen muy bien marcados las superficies de resbalamiento, en ella es notable que la fricción es baja. En las fallas aparecen por lo general zonas de trituración que representan un conjunto de fallas, de rocas trituradas, diaclasadas, etc. Las fallas pueden ser buenos conductos de circulación de las aguas. La presencia de agua en las rocas y en las laderas complica y eleva las amenazas por inestabilidad.
- **Planos de estratificación.** Están asociados al tipo de litología, estas discontinuidades representan un contacto dentro de la misma roca o entre litologías distintas. Las estructuras sedimentarias son las mas comunes.
- **Esquistosidad.** Son discontinuidades muy persistentes y presentes con gran densidad, originadas por la anisotropía que produce en la orientación preferentemente de los minerales aplanados, estos planos a veces presentan cohesión pero pueden abrirse cerca de la superficie del terreno por descompresión.

Valores aproximados del ángulo de fricción para rocas y rellenos de fallas.
(Hoek y Bray, 1974).

Roca	ϕ roca intacta	ϕ discontinuidades	ϕ condiciones límites
Andesita	45	31 - 35	28 - 30
Basalto	48 - 50	47	-
Granito	45 - 50	-	-
Grauvaca	45 - 50	-	-
Caliza	30 - 60	-	33 - 37
Pórfido	64	40	30 - 34
Cuarcitas	45 - 60	44	26 - 34
Areniscas	-	-	25 - 34
Esquistos	45 - 60	-	25 - 34
Pizarra arcillosa	45 - 64	-	25 - 34
Limonita	50	37	27 - 32
Material de relleno		ϕ aproximado	
Relleno arcilloso remoldeado		10 - 20	
Calcita en zonas de cizalla		20 - 27	
Pizarra en zona de falla		14 - 22	
Brecha en roca dura		22 - 30	
Relleno de rocas dura		38	

La porosidad de las rocas otro componente que incide en las inestabilidad de las rocas en las laderas y taludes. La experiencia práctica plantea que cuanto más porosidad más inestabilidad. La porosidad se caracteriza por:

$$n = 1 - m = 1 - \frac{\gamma_{esq}}{\gamma_m} = \frac{\gamma_m - \gamma_{esq}}{\gamma_m}$$



otro componente importante es el índice de poros

$$e = \frac{n}{m} = \frac{n}{1-n} = \frac{\gamma_m - \gamma_{esq}}{\gamma_{esq}}$$

precisamente las rocas resistentes, duras y estables presentan poca porosidad e índice de poros. Sin embargo las rocas poco resistentes e inestables son rocas con alta porosidad y su peligrosidad aumenta cuando esta se hace más activa y permeable. La densidad de las rocas resistentes en los taludes estables son de 2.65 – 3.10 g/cm³ y la porosidad alcanza valores de las decenas de por ciento y menor. La resistencia y las propiedades elásticas son altas. La resistencia a la compresión 50 – 40 Mpa y al corte 2 – 15 Mpa. El módulo de deformación general es mayor de 10 000 Mpa, la velocidad de propagación varía entre 4.0 – 4.5 hasta 6.5 – 7.0 Km/s y en algunos casos hasta 8.0 Km/s, la dureza sísmica es de 10 – 12 y la dureza $F_d > 8$. en estas propiedades podríamos agrupar las rocas graníticas, granodioritas, garbos, sienitas, los pórfidos, las andesitas y basaltos, los mármoles, las cuarcitas, gneis, esquistos cristalinos, las areniscas y conglomerados cementados, las calizas, dolomitas y otras.

Las rocas semiresistentes, son rocas que como las anteriores pero que están sometidas a cambios de su estado, composición propiedades geomecánicas y otras provocadas por la meteorización, congelación, diaclasamiento y fallamiento, la carsificación, los procesos neotectónicos entre otros. Por lo general encontramos entre este grupo a rocas volcánicas muy agrietadas y alteradas, las tobas y rocas tobáceas, las areniscas y eleurolitas con un cemento arcilloso, las margas, las arcillas. Este grupo de rocas tiene la característica a diferencia de las anteriores de ser menos densa, sin densidad promedio 12.20 – 26.59 g/cm³, son más porosas 10 – 15 % y mayor y poseen las características en algunos casos de ser cavernosas.

Un elemento importante que incide en la inestabilidad de los taludes y laderas es la presencia de agua en estas rocas. Este grupo se caracteriza precisamente por ser permeables y por tener una capacidad acuífera que estará en dependencia del agrietamiento y la meteorización, así el coeficiente de filtración variará de 0.5 – 30 m/s (hasta 15 l/min) en rocas con poca a media permeabilidad y más de 30 m/s para rocas muy permeables.

Las propiedades mecánicas pueden ser variables debido precisamente al grado de diaclasamiento y meteorización, así la resistencia a la compresión puede variar para rocas medianamente resistentes con valores de 2.5 – 1.50 Mpa y rocas poco resistentes menor de 2.0 Mpa. El módulo de deformación general puede variar desde 10 000 – 2000 y menor de 2000 Mpa y la velocidad de propagación de las ondas sísmicas V_p varían desde 4.5 – 1.1 Km/s y su coeficiente de dureza oscila entre 8 – 2.

Las rocas duras y semiduras del grupo I y II originan desprendimientos principalmente en tobas, materiales volcánicos, granitos y granodioritas muy agrietadas y alteradas, peridotitas, serpentinitas, gneis, grabros muy agrietados, calizas y dolomitas agrietadas y lateradas, areniscas, entre otras.

Los desplomes. Se producen en rocas semiduras poco resistentes, agrietadas y meteorizadas, fundamentalmente en rocas tobáceas, volcánicas, terrazas aluviales (Cortes de la autopista Santiago de Cuba, Guantánamo, cortes de la carretera Santiago de Cuba Chivirico, Ocuja. Carretera Moa - Nicaro).



Los vuelcos. Aparecen relacionados con los esquistos, serpentinitas, rocas estratificadas, tobos, etc. (Cortes de la carretera Guantánamo Baracoa,)

Deslizamientos. Se pueden encontrar dos tipos de movimientos traslacionales donde el deslizamiento es producido por un plano de fallo que está relacionado con grietas planas o juntas en forma de bloques, es forma de cuñas. Precisamente las rocas serpentinizadas, las tobos estratificadas, las calizas margosas son rocas que presentan las huellas de estos desplazamientos. (Baracoa, Maisi, Sierra Maestra, Moa, Sagua de Tanamo)

Otras formas de fallos pueden ser los deslizamientos rotacionales; estos son muy bien enmarcados en las lutitas micénicas, las margas eocénicas de Cuba, en particular en las provincias de Santiago de Cuba, Guantánamo en el oriente de Cuba .

3. La estabilidad de laderas formadas por rocas friables no cohesivas.

Las rocas friables no cohesivas están constituidas fundamentalmente por arenas, gravas, conglomerados y otras mezclas de material detrítico. Sin embargo en ellas encontramos en algunos casos sedimentos con contenidos de fracción fina (matriz arcillosa o limosa) superiores al 10 – 20 % lo que le confiere una cierta cohesión al conjunto pero que justifica la disgregación del depósito cuando falla y se desplaza por la ladera.

La estabilidad de las rocas de este grupo en laderas y taludes dependen en gran medida del grado de clasificación de las partículas y de su empaquetamiento. Los factores que afectan la resistencia al esfuerzo cortante de las rocas friables no cohesivas o friccionantes pueden agruparse en dos clases. La primera agrupa a los que afectan la resistencia al corte de un suelo dado de los cuales los más importantes son la compacidad:

$$C_r = 100 \frac{e_{\max} - e_{\text{nat}}}{e_{\max} - e_{\min}}$$

donde:

C_r se expresa en %

e_{\min} : relación de vacío correspondiente al estado más compacto del suelo, obtenido al someter la muestra a un proceso de compactación dentro de un volumen determinado.

e_{nat} : relación de vacío en estado natural.

e_{\max} : relación de vacío máxima correspondiente al estado suelto obtenida vertiendo el material en un volumen sin ninguna compactación.

Valores superiores a 50% suelen considerarse como un suelo compacto y este valor puede considerarse como límite de seguridad razonable en problemas prácticos de estabilidad de taludes. Además de la compacidad, se deberá analizar la influencia en el comportamiento mecánico de los suelos gruesos la angulosidad de los granos (a misma compacidad, la mayor angulosidad da más trabazón y por lo tanto mayor resistencia al esfuerzo cortante) y la orientación de sus partículas que inciden en su permeabilidad.

Entre otros factores se destacan el tamaño, la forma, la textura y la distribución granulométrica de las partículas, y de su grado de alteración, definiendo esta última el fenómeno de ruptura de los granos, que afecta la resistencia de manera fundamental.



4. Componen las rocas friables no cohesivas.

Los suelos eluviales que en las laderas aparecen muy abundantes en las regiones tropicales y subtropicales. Su composición responde a las roca madre que lo originan, poseen una granulometría variable y una matriz limosa en algunos casos.

Los depósitos deluviales y coluviales son derrubios con cierto grado de movimiento en las áreas montañosas, su composición es heterogénea y están representados por diversa granulometría, incluyendo su matriz, a veces limosa-arcillosa. La disposición del depósito a modo de película que recubre heterogéneamente la ladera con grosores que oscilan entre los 0.5 – 2.5 m y más, condicionan la geometría del fallo en las pendientes.

En plano de fallo se desarrolla en el contacto entre el depósito y la roca subyacente por tal motivo las superficies de fallos pueden ser roturas por deslizamiento planos o rotacional superficial elíptica.

La masa movida se deslizará como un paquete único o se desmoronará en su recorrido generando una corriente o flujo.

Por lo general la superficie de fallo o de contacto es permeable y por ella circula agua provocando el lavado de los materiales más finos y aumentando la humedad del depósito. Así en épocas de grandes precipitaciones se generan las condiciones hidráulicas que favorecen las roturas en un talud. Ejemplo de ello los deslizamientos de Vargas en Venezuela en 1999.

Cuando la capa de deluvio o de coluvio no es potente y se encuentran en zonas de pendientes moderadas o laderas con vegetación arbórea, las deformaciones pueden ser lentas o limitadas, se detectan signos de reptación.

Las rocas formadas por arenas y gravas aluviales.

Los depósitos más representativos son las terrazas fluviales y depósitos torrenciales que se desparraman formando grandes abanicos. En las terrazas cuaternarias antiguas y en los rellenos detríticos continentales estos materiales presentan cierto grado de compactación y cementación que les permite disponer de una cierta cohesión. En este caso es posible encontrar taludes naturales prácticamente verticales que tienden a inestabilizarse por la apertura de grietas de tracción paralelas al frente del talud y que acaban desarrollando fenómenos de vuelco.

Las propiedades físico mecánicas. Las rocas arenosas poseen una densidad que varía entre 1.40 – 1.90 g/cm³ y porosidad de 25 – 40% (cambia en grandes límites y valores). Son permeables con coeficiente de filtración de 30 m/s, para un valor medio y bajo hasta mas de 30 m/s para la permeabilidad fuerte. La resistencia dependerá del depósito. No son rocas de alto índice de dureza, $F_d < 2$ y el módulo de deformación varía entre 5 – 10 hasta 100 Mpa. La velocidad de propagación de las ondas V_p están entre 1.5 – 1.8 Km/s y su dureza sísmica 0.5 – 2.9 hasta 4.8. El coeficiente de fricción interna f , varía de 0.25 – 0.60.



5. Rocas blandas y cohesivas.

Comprenden las arcillas, limos, argilitas y limonitas compactas, pizarras arcillosas, margas y otras. Son rocas homogéneas que cuando se presentan en espesores potentes pueden dar lugar a deslizamientos rotacionales; si los espesores son pequeños, los movimientos son de característica planar y en otros campos aparecen desplazamientos lentos provocando arrugas en las pendientes. Estratos arcillosos intercalados con rocas mas resistentes provocan el fallo de deslizamiento traslacionales. Las coladas de barro-torrentes están caracterizados por arcillas, lutitas o sedimentos margosos-arcillosos. Las rocas arcillosas presentan la propiedad de ser plásticas y en ella la humedad adquiere un nivel fundamental en su fallo y traslado en las laderas y taludes.

Los resultados de las investigaciones sobre suelos arcillosos indican que la resistencia de estos suelos en una prueba drenada puede representarse por la expresión:

$$\tau = \sigma \tan \phi_A + c$$

$$\tau = (\sigma - u) \tan \phi + c$$

para suelos arcillosos (sin drenaje y sin consolidación) la resistencia será simplemente:

$$\tau = c$$

y el ángulo de fricción aparente resulta ser cero.

En la práctica cuando se necesitan conocer las características esfuerzo-deformación y resistencia de un suelo dado se recurre a la búsqueda de pruebas que reflejen las circunstancias a la que están expuestas las rocas según la circunstancia que se trate. Existen dos criterios para la determinación práctica de la resistencia al esfuerzo cortante:

1. el criterio de los esfuerzos efectivos.
2. el criterio de los esfuerzos totales.

Los diferentes suelos arcillosos están relacionados con los suelos eluviales, los suelos lateríticos conservan un agrietamiento relíctico que unidos a los cambios de composición, estado, textura y estructura ponen en peligro a aquellos taludes con condiciones propias para el surgimiento de deslizamientos.

Numerosas formaciones arcillosas compuestas por arcillas y limonitas sobreconsolidadas tanto marinas como continentales tienen un estado tensional definido. Estos materiales están sometidos a una carga de peso propio que pueden ser descargados por varios efectos. Esta descarga tanto natural como provocada, causa en estas arcillas sobreconsolidadas una relajación que puede conllevar su inestabilización a largo plazo. La descarga en las arcillas hacen que estas se deformen expandiéndose. En algunos casos estas tensiones pueden superar la resistencia al cortante y desarrollar grietas de tracción y el movimiento en el talud. Claro está, otras condicionantes, como la lluvia, el ablandamiento del material arcilloso y el aumento de las presiones intersticiales contribuyen a una rotura progresiva en las laderas y taludes.

En los suelos cohesivos se presentan con abundante frecuencia los fenómenos de solifluxión o coladas de barro. Venezuela, en particular el estado de Lara y Caracas (diciembre, 1999).



Johnson y Sitar (1990), plantean la necesidad de considerar la presión de poros, a la cual atribuyen la reducción de la resistencia al corte en suelos saturados y con flujos según las pendientes. En arcillas sobre consolidadas que fallan en condiciones drenadas, los valores de la resistencia pico y residual pueden ser muy diferentes. La menor resistencia que se alcanza durante la deformación permite explicar porque las arcillas que rompen por deslizamiento rotacional progresan posteriormente ladera abajo a grandes distancias e incluso por pendientes menores que la inicial del movimiento.

Estudios realizados en deslizamientos en suelos arcillosos del yacimiento Punta Gorda de Moa, indican que tanto las arcillas preconsolidadas como las blandas, las resistencia al cortante cambia en dependencia de la orientación de las partículas, según los planos de microcizallamiento. Como se conoce, estos materiales son capaces de absorber y retener el agua pero no transmitirla, esto trae consigo el aumento de cargas hidrostáticas e hidrodinámicas en flujo según su pendiente, generando un mecanismo de carga no drenada.

Las rocas arcillosas poseen propiedades físico mecánicas muy variables, dependiendo de la composición (caolinítica, monmorillonítica o hidromicácea). Por lo general su densidad varía entre 1.10 – 1.20 y 1.90 – 2.10 g/cm³; su porosidad es amplia, desde 30 hasta 75 – 80% y su humedad varía en amplios límites entre 20 y 80%.

Su resistencia varía en amplios límites también, en dependencia de la humedad y densidad. Son rocas poco duras y el índice de resistencia $f_d < 2$. En cuanto a la compresibilidad, pueden catalogarse como muy compresibles con un módulo de deformación de 5 – 10 Mpa. La velocidad de propagación de las ondas longitudinales es de 0.3 – 0.85 hasta 1.2 – 2.2 km/s; la resistencia sísmica es de 0.8 – 2.3 hasta 2.8 – 5.9. poseen un coeficiente de fricción interna entre T_g 0.15 – 0.35; por tal motivo la estabilidad de laderas o taludes dependerá de la humedad e pendiente de estos. En ello juega un papel las propiedades reológicas del suelo arcilloso.

Estas rocas generan deslizamientos rotacionales y traslacionales, además de flujos de distintos tipos.

La fluidificación de los suelos lateríticos.

La experiencia en investigaciones geotécnicas en suelos lateríticos indican cambios bruscos en el contenido de humedad del suelo, provocando variaciones negativas en la resistencia al cortante de estos; estas variaciones transforman el material de un estado plástico a un estado viscoso-plástico a semilíquido con una alta capacidad para fluir. Así, en los suelos arcillosos-arenosos el comportamiento de esfuerzos-deformaciones dependerá de la cantidad de agua que se encuentra en el volumen de vacío de los suelos.

El índice de liquidez (IL) de un suelo nos permitirá conocer el comportamiento según su estado (sólido, plástico, viscoso, líquido, etc.) el índice de liquidez:

$$IP = (W_n - W_p) / I_p$$

cuando IL es menor de cero ($IL < 0$) el suelo se comporta como un sólido frágil, si está entre $0 < IL < 1$, el suelo tendrá un comportamiento plástico y si el $IL > 1$ se comportará como líquido viscoso (Holtz y Kovaca, 1981; Lontadze, 1982; Guardado, 1986).



En terrenos tropicales y subtropicales, durante las grandes precipitaciones en corto tiempo o en épocas prolongadas, la humedad de los suelos lateríticos aumenta debido a que como son materiales que permiten absorber el agua, al almacenarla y no transmitirla, hacen que el índice de liquidez alcance valores superiores a la unidad, disminuyendo considerablemente la resistencia al corte y provocando alteraciones en su comportamiento plástico que hacen que los suelos se pongan en movimiento.

La combinación del elemento pendiente puede incrementar la velocidad de traslación del material. De esta manera en taludes y laderas formados por suelos arcillosos o arcillosos-arenosos ocurrirán movimientos de diferentes tipos que van desde flujos a deslizamientos traslacionales, rotacionales o por bloques, conjugándose este caso el tipo de material con el agrietamiento relíctico de la roca que lo originó (Guardado y Almaguer, 2001).

ANÁLISIS DE LA METEORIZACIÓN

La descripción ingenieril del fenómeno de meteorización en el área de estudio se hizo mediante a partir de índices, los cuales nos permitieron determinar los diferentes grados de meteorización en el perfil rocoso. Los mismos fueron usados en dependencia de su efectividad para determinar los rasgos característicos de cada grado, de esta manera tenemos índices tales como resistencia axial y permeabilidad, que nos brindan criterios para analizar todos los grados de meteorización, y tenemos otros como el RQD, que solo se puede usar hasta el grado altamente meteorizado, porque en grados superiores la roca en estado de suelo no se le puede aplicar el mismo. En la tabla 3.7 mostramos los índices utilizados para cada grado de meteorización.

Uno de los resultados obtenidos acerca de la meteorización de las rocas serpentinizadas fue en base a la aplicación del índice de alteración unificado (Kc). En la tabla 3.8 se muestran los resultados.

Clase y grado de meteorización		Roca fresca (I)	Débilmente meteorizada (II)	Moderadamente meteorizada (III)	Altamente meteorizada (IV)	Extremadamente meteorizada (V)	Suelo residual (VI)
Inspección visual	Material de roca						Presencia de textura original
		Grado de decoloración y desintegración física					
		Grado de descomposición química de piroxenos y olivino					
							Presencia de humus y raíces
	Macizo rocoso	Decoloración en las juntas					
		Relación roca/suelo					
		Apertura y meteorización a través de las juntas					
		Angulosidad de los núcleos de rocas					
Propiedades físicas y mecánicas	Material de roca	Resistencia a la tracción					
		Módulo de elasticidad y resistencia a la compresión uniaxial					
		Permeabilidad del material de roca					
		Porosidad, contenido de humedad y densidad					
		Velocidad sónica					
		Índice micropetrográfico y de microfractura					
	Macizo rocoso	Espaciamiento fracturas y RQD					
		Permeabilidad relativa del macizo rocoso					



Tabla 3.7 Métodos utilizados para definir los grados de meteorización de las rocas serpentinizadas.

Clase	Descripción	K_c	K_v	$K_{\sigma c}$	K_a
I	Fresco	0	0	0	0
II	Bajo	0,07	0,018	0,15	0,01
III	Moderado	0,62	0,33	0,25	0,54
IV	Alto	7	0,42	0,67	23
V	Muy alto	12	0,72	0,95	42

Tabla 3.8 Clasificación de las rocas de acuerdo a los índices de alteración obtenidos.

De la aplicación de los índices micropetrográfico y de microfractura se pudo determinar el grado de alteración sobre la base del conteo del microagrietamiento y del porcentaje de minerales secundarios formados por la descomposición de la roca. En la tabla 3.9 se muestran los resultados de los mismos. En la tabla se puede observar una correspondencia entre el aumento del grado de alteración y descomposición de las rocas y el aumento del microagrietamiento y del porcentaje de minerales secundarios dado por el avance de la meteorización a través de las microfracturas.

Clase de meteorización	Grado	Micropetrográfico	Microfractura
Roca fresca	I	> 15	> 5
Levemente meteorizado	II	7 - 15	5 - 8
Moderadamente meteorizado	III	5 - 7	8 - 14
Altamente meteorizado	IV	3 - 5	14 - 25
Completamente meteorizado	V	< 3	< 25

Tabla 3.9 Resultados de la aplicación de los microíndices en las rocas serpentinizadas.

Sistema de clasificación propuesto para las rocas meteorizadas.

De la aplicación conjunta de los diferentes métodos resultó un sistema de clasificación de las rocas serpentiniticas meteorizadas el cual introduce una descripción ingenieril de la meteorización. En el sistema propuesto se combinan el uso una identificación y descripción geológica, el reconocimiento de propiedades ingenieriles y ensayos de laboratorio. La descripción y clasificación del material rocoso meteorizado propuesto está basado en la información geológica obtenida por la inspección visual y reconocimiento de rasgos típicos de la desintegración física y descomposición química de las rocas en los afloramientos, y en muestras de núcleos de perforación, además, de la información mecánica, física e hidráulica derivada de ensayos de campo y laboratorio, suplementados con observaciones microscópicas. El sistema propuesto esta basado en la identificación de varios grados de meteorización y en la proporción volumétrica de estos materiales con respecto a las discontinuidades.

Un rasgo importante de esta clasificación propuesta es que mostramos para cada clase el modo de fallo de taludes asociado a estas. De esta manera tenemos modo de fallo no estructural en el horizonte más meteorizado (grado VI), y en los demás grados se observa la influencia del control estructural fundamentalmente del agrietamiento y la esquistosidad; en los grados II, IV y V la roca con agrietamiento espaciado falla a través de las discontinuidades (planar, cuña, vuelco), pero a medida que la intensidad del agrietamiento se intensifica, la roca tiene un comportamiento tipo suelo, o sea que los movimientos son circulares.



A modo de discusión.

En la inestabilidad de los terrenos las rocas y suelos que los componen tienen un componente fundamental en los movimientos de masas que se producen en las laderas y taludes. En 1974, en los Andes del Perú ocurrió uno de los deslizamientos de tierra más grandes en la historia de nuestro continente. Casi 500 personas en el pueblo de Mayunmarca y en sus alrededores perdieron la vida cuando el deslizamiento represó el río Mantaro. Este deslizamiento es un ejemplo del potencial destructivo y del por qué son considerados como peligros y riesgos naturales y ambientales. En 1987 Medellín: Un deslizamiento de la ladera arrasó con sus vidas y sus casas, 199 cadáveres de habitantes del barrio Villa Tina fue un desastre. No solamente los grandes deslizamientos pueden catalogarse como catastróficos, muchos pequeños por pueden provocar daños de igual magnitud o exceder el impacto de un solo gran deslizamiento. Los deslizamientos, sin importar su tamaño, pueden ser capaces de causar daños significativos y pérdidas de vida. En ello el factor fundamental es la roca o el suelo que compone la estructura del talud o la ladera.

Dentro de los pasos más importantes para identificar las áreas relativamente susceptibles a deslizamientos y evaluar los deslizamientos es: conocer los tipos de rocas y suelos del terreno y qué tipos de actividades de desarrollo socio económicas están planificadas o desarrolladas en estos terrenos. Los cambios en el medio geológico (naturales o antropicos) pueden afectar la susceptibilidad de los terrenos y provocar deslizamientos. Tres factores físico geológicos - la historia, la calidad de las pendientes y las rocas firmes - componen los elementos ingeniero geológicos para evaluar el peligro de deslizamientos. Además, es necesario añadir otro factor el hidrológico que permita conocer el trabajo que las aguas subterráneas en las rocas y que juegan un papel clave en la ocurrencia de deslizamientos.

Los movimientos de ladera constituyen un riesgo geológico que debe tenerse en cuenta en el ordenamiento territorial y la planificación física del territorio. En la actualidad no es posible la predicción de dónde y cuándo han de ocurrir los deslizamientos, aún con la mejor información disponible. Sin embargo, es posible identificar áreas susceptibles a deslizamiento y evaluar estos riesgos. Este artículo nos ha permitido analizar un componente básico de la susceptibilidad a los deslizamientos: las rocas como fundamento de los taludes y laderas y los diferentes tipos de deslizamientos. Todo esto permitirá tener un conocimiento práctico de los términos, conceptos y de las importantes consideraciones relacionadas con deslizamientos y la evaluación de los peligros y riesgos de los movimientos de masas en laderas y taludes. La mejor herramienta para reducir los riesgos por deslizamientos es conocimiento del comportamiento geomecánico y geotécnico de las rocas, que precisa la existencia del fenómeno geológico peligroso, de la evaluación de la peligrosidad y la adopción de medidas para mitigar los efectos.

Los factores ingeniero geológico que influyen en la estabilidad de las laderas se pueden separar en: factores internos y externos. Los factores internos están relacionados con los diferentes tipos de rocas y suelos que dan lugar a los diferentes tipos de deslizamiento. Los indicadores claves son los relativos a la composición, estado y propiedades físicas, acuíferas y mecánicas del material. Las primeras incluyen parámetros como la litología, textura (granulometría, cementación), consolidación y espesor de los materiales y parámetros estructurales relativos a planos de estratificación y de debilidad (diaclasas, fallas y fracturas). En el segundo grupo encontramos los parámetros que caracterizan el estado físico, acuífera y mecánico del material rocoso o suelo. En los factores externos podemos encontrar las condicionales morfológicas como la pendiente de la ladera y su disposición respecto a discontinuidades geológicas y la orientación, y los factores de tipo ambiental como cambios estacionales de temperatura y tipo y cambios en la vegetación. La pendiente del terreno así como la morfología propia de la ladera es un factor y condicionante previo a partir del cual el



resto de factores se combinarán influyendo en la estabilidad. Los factores externos actúan sobre el material y dan lugar a modificaciones en las condiciones iniciales de las laderas, provocando o desencadenando las roturas debido a las variaciones que ejercen en el estado de equilibrio de aquéllas. Tres tipos de acciones se incluyen aquí: la infiltración de agua en el terreno, las vibraciones y las modificaciones antrópicas. La *infiltración de agua* provoca el aumento de la presión intersticial disminuyendo la resistencia de los materiales.

La relación entre ocurrencia de deslizamientos y períodos lluviosos o de deshielo es bien conocida. Las variaciones del nivel de agua subterránea pueden ser debidas a intensas precipitaciones, intervenciones humanas, etc. Las *vibraciones*, por otra parte, provocan aceleraciones en el terreno favoreciendo la rotura y la licuefacción. Éstas pueden ser debidas a movimientos sísmicos naturales o inducidos por el hombre como explosiones mineras o por obras públicas. La sacudida debida a terremotos naturales es una de los principales agentes que generan deslizamientos siendo capaces, en el caso de los terremotos más grandes, de desencadenar miles de deslizamientos a lo largo de enormes áreas. Finalmente, las *actividades humanas* alteran el equilibrio de las laderas debido a cargas estáticas provocadas por construcciones de edificios, construcciones de taludes para vías de comunicación, explotaciones mineras y construcciones de presas.



Bibliografía.

- Almaguer Y. 1998. Evaluación ingeniero geológica e hidrogeológica del yacimiento Punta Gorda. Trabajo de Diploma. P. 100. Dpto. geología, ISMM.,
- Barton N. 1976. The shear strength of rock and rock joints. *International Journal of Rocks Mechanics and Mining Sciences*, **13(9)**:255–279.
- Bieniawski Z. T. 1967. Stability concept of brittle fracture propagation in rock. *Engineering Geology an International Journal*, **2(3)**:149–162.
- Corominas J. (1996): Litologías inestables. Monografía. SEG: 3. p: 81-96-
- Guardado R. y Almaguer Y. (2001): Análisis de peligrosidad por deslizamiento en el yacimiento Punta Gorda, Moa. Revista Minería y Geología.
- Guardado R. y Y. Almaguer 2001.: Evaluación de riegos por deslizamiento en el yacimiento Punta Gorda, Moa, Holguín. *Minería y Geología*. XVIII (1): 1-12,
- Guardado R; C. De Miguel; Y. Almaguer; J. Blanco; A. Rodríguez; B. Riverón; J. Batista 1998.: Evaluación ingeniero geológica e hidrogeológica del yacimiento Punta Gorda. Informe de Investigación. Archivo de la Empresa Comandante Che Guevara, Moa.
- Guardado R. 1986. Ingeniería Geológica, Ingeniería Petrológica. Editorial Pueblo y Educación La Habana Cuba. 2da edición 356 pg.
- Hock E., Marinos P., Benissi M. 1998. Applicability of the geological strength index (GSI) classification for very weak and sheared rock masses. The case of the Athens Schist formation. *Bulletin of Engineering Geology and the Environments*, **57(2)**:151–160.
- Hoexter D. F., Holzhausen G., Soto A. E. 1978. A method of evaluating the relative stability of ground for hillside development. *Engineering Geology an International Journal*, **12(4)**:319–336.
- Hutchinson, J.N., and Kogan, E. "The Mayunmarca Landslide of 25 abril 1974" in UNESCO Serial No. 3124/RMO.RD/SCE (Paris: UNESCO, February, 1975).
- Instituto Tecnológico Geo Minero de España. *Manual de ingeniería de taludes*. 2 ed. Madrid. Editora Gráfica Monterreina, SA. 1991. p. 466.
- Johnson K. A. and Sitar N. (1990): Hidrologic condition leading to debris flow initiation. Part I and II. *Canadian Geotechnical Journal*. V: 77, p: 789-801.



ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES A PARTIR DE LA EVALUACIÓN GEOMECÁNICA DEL MACIZO SERPENTINITICO DEL YACIMIENTO PUNTA GORDA, MOA, HOLGUÍN. CUBA.

Yuri Almaguer Carmenates y Rafael Guardado Lacaba.

*Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. Rpto. Las Coloradas s/n, CP: 83329, Moa, Holguín, Cuba.
Email: yalmaguer@ismm.edu.cu*

RESUMEN

El presente trabajo titulado "Análisis de estabilidad de taludes a partir de la evaluación geomecánica del macizo serpentinitico de la región de Moa", tiene como objetivo analizar la estabilidad de los taludes. La metodología consistió en un análisis estructural, valoración geotécnica de los horizontes lateríticos, análisis de deslizamientos, aplicación de clasificaciones geomecánicas para taludes, determinación del tipo de rotura y aplicación del método de calculo correspondiente para determinar el factor de seguridad de los taludes. Como resultados se brinda un análisis estructural mostrando las principales discontinuidades presentes en el macizo, además se muestra la calidad del macizo rocoso a partir de los índices geomecánicos RMR y SMR, se muestra el tipo de rotura por la posición relativa de los taludes con los sistemas de grietas principales y finalmente el calculo del factor de seguridad para deslizamientos por rotura tipo cuña.

ABSTRACT

The present titled work "Analysis of stability of slope starting from the geomechanic evaluation of the serpentinitic rock of the region of Moa", it has as objective to analyze the stability of the slope. The methodology consisted on a structural analysis, valuation of the lateritic horizons, analysis of landslide, application of geomechanic classifications for slopes, determination of the break type and application of the method of calculate corresponding to determine the factor of security of the slopes. As results offers a structural analysis showing the main present discontinuities, the rocky quality is also shown starting from the geomechanic index RMR and SMR, the break type is shown by the relative position of the slopes with the systems of main joint and finally the calculate of the factor of security for landslide for break type wedge.

Introducción

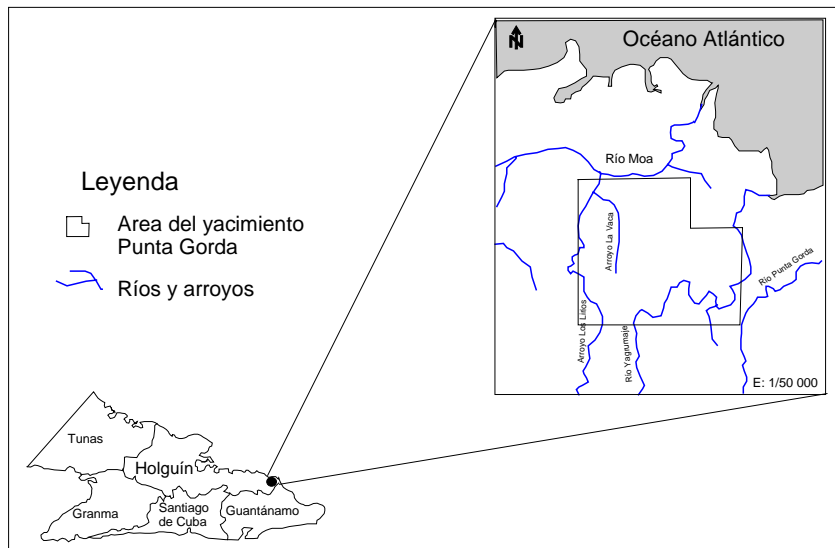
Los yacimientos ferroniquelíferos cubanos son genéticamente de tipo residual. Formados por una corteza de intemperismo en forma de manto que descansa sobre la roca madre. Estas cortezas se encuentran desarrolladas sobre una cadena montañosa compuesta por rocas ultrabásicas serpentinizadas, en menor grado por rocas básicas y efusivas. Entre los yacimientos principales tenemos los de Pinares de Mayarí y los de Moa, constituyendo nuestro país uno de los de mayores reservas de níquel a nivel mundial. Durante la explotación de estos yacimientos se ha presentado desde los inicios de la minería, la problemática con los deslizamientos dado por las condiciones climáticas (abundantes lluvias), geológicas (intensos procesos de meteorización y tectónicos del macizo rocoso), ingenieriles del suelo (suelos con bajo ángulo de fricción, baja cohesión) influyendo negativamente en las condiciones ambientales de los yacimientos y el constante riesgo de los trabajadores y equipos. El área seleccionada para la investigación se encuentra enclavada en el Municipio de Moa, específicamente entre las coordenadas: X: 692 500 – 705 000, Y: 217 000 – 225 000 (ver figura 1).



Metodología

La metodología se basó en un análisis estructural del macizo rocoso, evaluación del perfil de meteorización desde el punto de vista ingenieril; además, fue aplicada la clasificación geomecánica para taludes SMR, y por último se aplicaron métodos de cálculo para la estimación del factor de seguridad de los mismos. A partir de la aplicación lógica y racional de los métodos citados anteriormente, se realizó la evaluación geomecánica integral del macizo rocoso, con vista al cálculo de la

Figura 1 Ubicación geográfica del yacimiento Punta Gorda (cortesía de De Dios Leyva)



estabilidad de los taludes dentro del yacimiento Punta Gorda, pasando de los métodos de campo usados para el reconocimiento, descripción y evaluación de las características de los taludes y de los movimientos encontrados en el área del yacimiento, además de la medición de los elementos yacencia de las discontinuidades; luego fue realizado el procesamiento de la información obtenida, preparación y análisis de las muestras orientadas a partir de técnicas de evaluación estructural, análisis de los datos de grietas mediante el uso de la proyección estereográfica, y la evaluación preliminar de la estabilidad de los taludes mediante la misma técnica, además, fueron aplicadas las clasificaciones geomecánicas (RQD, RMR y SMR). Posteriormente con todos los resultados obtenidos, y conociendo el método de fallo de los taludes, fue aplicado el método de cálculo correspondiente a la rotura por cuñas propuesto por Hoek y Bray (1967), para cuantificar el factor de seguridad de los taludes analizados.

Resultados

El estudio del agrietamiento realizado fue con el objetivo de servir de base para evaluación geomecánica de los taludes. Las zonas de mediciones fueron en los cauces de los ríos Yagrumaje, los Lirios, arroyo La Vaca y en fondo rocoso de los bloques explotados determinándose el predominio de tres familias de grietas, una con dirección NS, la segunda sublatitudinal y la última NW (ver tabla I y figura 2). Para tener una idea global de las características estructurales del área del yacimiento se hizo un diagrama de contorno con todos los datos.

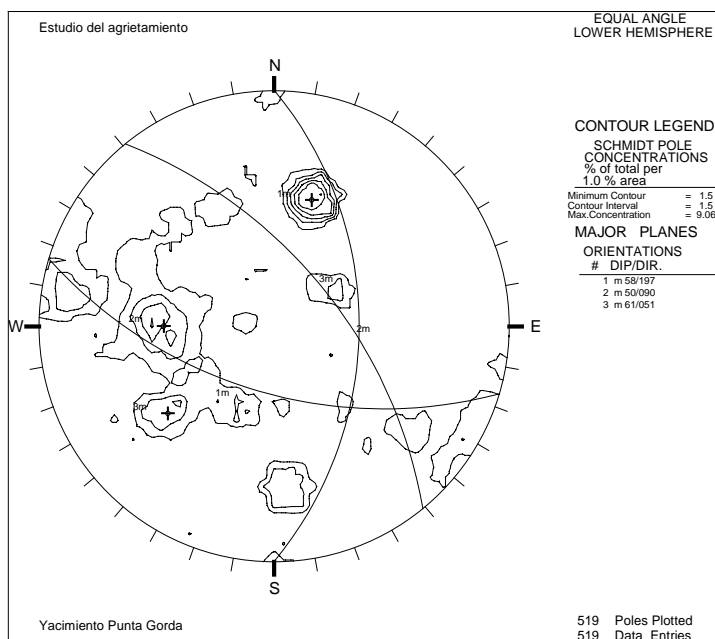


Figura 2. Diagrama de contorno y planos principales del área del yacimiento.

En base a los resultados obtenidos en el análisis estructural se determinaron pares conjugados de grietas de cizallas formando ángulo agudo con la fuerza de deformación (S-N) y grietas de tensión paralelas este esfuerzo y perpendiculares al eje de la estructura, formadas inicialmente. En la segunda condición de deformación, al seguir actuando la compresión, se produce una curvatura elástica del macizo, formándose grietas de tensión paralelas al eje y sistemas de grietas de cizalla paralelas también al eje, situadas entre los pseudoestratos originados por la misma curvatura.

Area de mediciones	Número de familias	Buzamiento	Acimut de buzamiento	Apertura (cm)	Espaciamiento (cm)	Persistencia (m)	Rugosidad
Arroyo Los Lirios	1	81	94	1.01	20.31	0.90	70%- ondulada lisa
	2	62	46	0.84	28.56	1.44	100% - ondulada lisa
	3	58	150	1.2	22.25	1.01	100% - ondulada lisa
Arroyo La Vaca	1	60	191	0.38	10.71	0.45	68% - ond. - rugosa
	2	68	350	0.80	12.91	0.35	100% - ond. - rugosa
	3	42	26	0.61	12.75	0.90	100% - plana rugosa
Río Yagrumaje	1	50	86	-	-	-	-
	2	50	45	-	-	-	-
Bloque N-50	1	55	185	0.76	16.5	0.57	43% - pulida
	2	39	210	0.51	13.12	1.62	62% - plana
	3	61	109	0.9333	14	0.333	68% - suave

Tabla I. Características generales del agrietamiento en el área del yacimiento Punta Gorda.

De la aplicación conjunta de diferentes métodos resultó un sistema de clasificación de las rocas serpentínicas meteorizadas (ver tabla II), el cual introduce una descripción ingenieril de la meteorización. En el sistema propuesto se combinan el uso una identificación y descripción geológica, el reconocimiento de propiedades ingenieriles y ensayos de laboratorio. La descripción y clasificación del material rocoso meteorizado propuesto está basado en la información geológica obtenida por la inspección visual y reconocimiento de rasgos típicos de la desintegración física y descomposición química de las rocas en los afloramientos, y en muestras de núcleos de perforación, además, de la información mecánica, física e hidráulica derivada de ensayos de campo y laboratorio, suplementados con observaciones microscópicas. El sistema propuesto esta basado en la identificación de varios grados de meteorización y en la proporción volumétrica de estos materiales con respecto a las discontinuidades. Un rasgo importante de esta clasificación propuesta es que mostramos para cada clase el modo de fallo de taludes asociado a estas. De esta manera tenemos modo de fallo no estructural en el



horizonte más meteorizado (grado VI), y en los demás grados se observa la influencia del control estructural fundamentalmente del agrietamiento y la esquistosidad; en los grados II, IV y V la roca con agrietamiento espaciado falla a través de las discontinuidades (planar, cuña, vuelco), pero a medida que la intensidad del agrietamiento se intensifica, la roca tiene un comportamiento tipo suelo, o sea que los movimientos son circulares.

Para evaluar el macizo rocoso aplicando las clasificaciones geomecánicas seleccionadas para este objetivo (RMR y SMR), se utilizaron los datos obtenidos fundamentalmente en el reconocimiento de campo, el análisis estructural, en el cual se determinaron los principales sistemas de grietas y la caracterización geomecánica de los diferentes parámetros de las mismas; además de utilizar los datos de las características físico mecánicas de las rocas determinadas con los ensayos de laboratorio. Además del estudio de las rocas duras y semiduras, se hizo un análisis de las características físico mecánicas del perfil de meteorización.

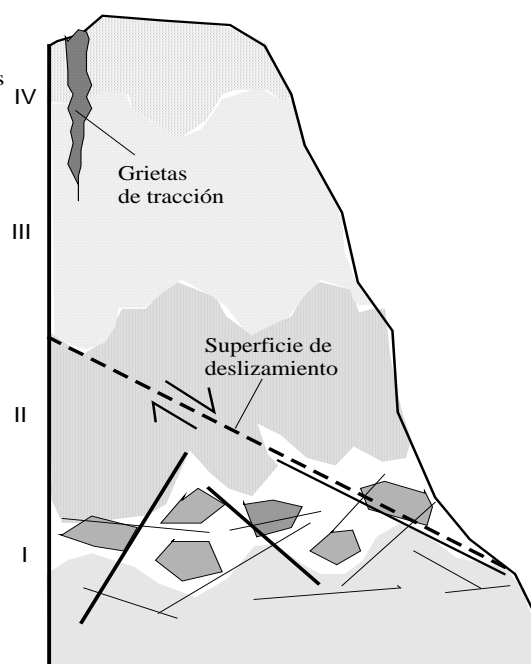
En la figura 3 se muestran las características típicas de los horizontes ingeniero geológicos presentes en los taludes del yacimiento Punta Gorda; como se observa, existen cuatro horizontes los cuales se diferencian por su comportamiento mecánico y las propiedades físicas. En la parte superior del corte existen grietas de tracción, las cuales se forman siguiendo discontinuidades relícticas presentes en la corteza laterítica, que se extienden desde el substrato rocoso hasta la superficie; a través de este agrietamiento se infiltran las aguas superficiales aumentando las presiones dentro de estas. El horizonte inferior es el más importante ya que constituye la base de los taludes y es el que corresponde con el horizonte

IV- Suelo laterítico color rojo vino oscuro con abundantes concreciones de hierro. Constituido por arcilla arenosa, húmedo, medio plástico, de consistencia muy blanda.
Índice de poros: 2.56 Índice de plasticidad: 17 %
Cohesión: 95 KPa Ángulo de fricción: 30 grados

III- Suelo laterítico carmelita rojizo. Constituido por arcilla plástica con intercalaciones de arcilla arenosa, poco compacto, húmedo.
Índice de poros: 2.95 Índice de plasticidad: 21 %
Cohesión: 70 KPa Ángulo de fricción: 17 grados

II- Suelo laterítico carmelita rojizo con vetas negras. Constituido por arcilla muy plástica, semisaturado, poco compacto, alta resistencia en estado seco.
Índice de poros: 2.25 Índice de plasticidad: 32 %
Cohesión: 105 KPa Ángulo de fricción: 28 grados

I- Suelo serpentínico de color verde amarillento. Constituido por arcilla plástica, húmeda, poco compacto. Presenta fragmentos de roca muy meteorizada. Constituye el horizonte acuífero.
Índice de poros: 2.70 Índice plástico: 26 %
Cohesión: 102 KPa Ángulo de fricción: 15 grados



acuífero, el cual está formado por serpentinita agrietada y altamente meteorizada, de manera que los sistemas de grietas presentan rellenos arenoso-arcillosos sobresaturados, con flujo de agua y bajo ángulo de fricción (residual). En este horizonte existen sistemas de grietas orientados en el mismo sentido de los taludes o formando cuñas y con buzamientos menores que los taludes, a través de los cuales se producen los movimientos del terreno. Aparte de estas condiciones naturales que provocan inestabilidades, el factor antrópico manifiesto en las

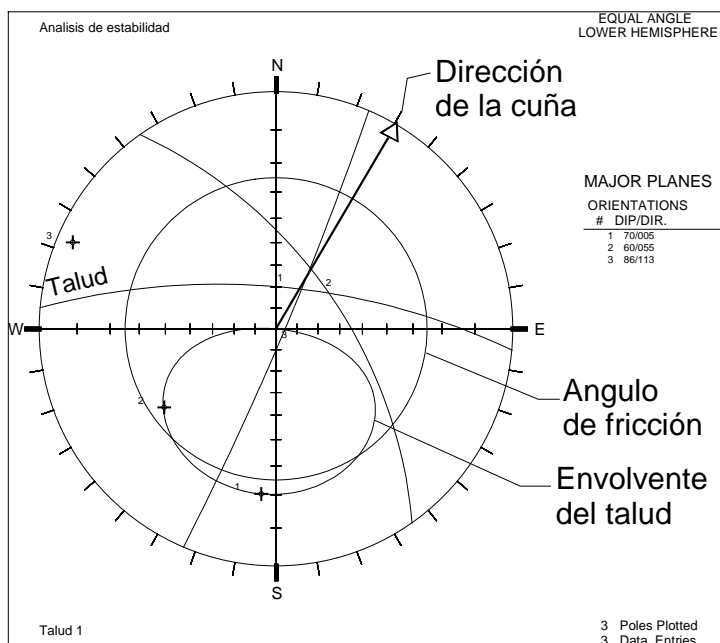


cortas mineras altera el equilibrio del sistema geomecánico roca/suelo, ya que se realizan hasta este horizonte inferior provocando el flujo de las aguas subterráneas descalzando el pie de los taludes. Además estas aguas no encuentran buen drenaje y se acumulan formando grandes embalses que contribuyen a mantener gran humedad en la corteza laterítica que los circunda.

Figura 3. Esquema del perfil ingeniero geológico típico de los taludes del Yacimiento Punta Gorda.

En la tabla III se presentan los resultados de la evaluación geomecánica de los taludes a partir de la aplicación del índice SMR. Los principales resultados son que los valores obtenidos del SMR clasifican la estabilidad de los taludes de mala a muy mala, solo el talud 1 es menos inestable, presentando una situación normal de inestabilidad. Para cada talud se señalan en negrita los valores y sistemas de grietas críticos, los cuales le confieren a los taludes inestabilidad total a través de algunas familias grietas o en forma de cuña, o de grandes roturas por planos continuos o por la masa de roca/suelo.

A partir de estos resultados se concluye con las propuestas para el tratamiento más adecuado en cada caso, predominando la corrección de los taludes fundamentalmente en la disminución de la inclinación de los mismos, para evitar los movimientos de masas por dominio estructural. En los casos críticos se propone la reexcavación puesto que las condiciones del agrietamiento (yacencia, humedad/flujo de agua, alteración, rugosidad y resistencia de las superficies y relleno) son muy desfavorables y se pueden involucrar en los movimientos grandes volúmenes de material laterítico.



La evaluación preliminar de la estabilidad de los taludes se hizo con la ayuda de la técnica de proyección estereográfica, aplicando la metodología propuesta por Hoek y Bray (1977). Se puede observar que el modo de fallo de los taludes se corresponde a roturas tipo cuña, con dirección de movimiento predominante hacia el NE, correspondiéndose esto con lo observado en el campo, o sea, que los deslizamientos en los taludes orientados hacia el norte, comenzaron por el extremo derecho (desde el E) y progresan hacia el oeste (ver figura 4).

Figura 4. Valoración de la estabilidad del talud 1.



Talud	Familia	RMR	SMR	Clase	Descripción	Estabilidad	Roturas	Tratamiento
1	1	44	46	III	Normal	Parcialmente estable	Algunas juntas o muchas cuñas	Sistemático
2	3	34	< 10	V	Muy mala	Totalmente inestable	Grandes roturas por planos continuos o por la masa	Reexcavación
3	3	24	< 10	V	Muy mala	Totalmente inestable	Grandes roturas por planos continuos o por la masa	Reexcavación
4	2	21	12	V	Muy mala	Totalmente inestable	Grandes roturas por planos continuos o por la masa	Reexcavación
6	3	34	< 10	V	Muy mala	Totalmente inestable	Grandes roturas por planos continuos o por la masa	Reexcavación
8	2	24	15	V	Muy mala	Totalmente inestable	Grandes roturas por planos continuos o por la masa	Reexcavación
10	3	34	< 10	V	Muy mala	Totalmente inestable	Grandes roturas por planos continuos o por la masa	Reexcavación

Tabla III. Resultados de la evaluación geomecánica de los taludes a partir del índice SMR.

Además se cumplen las condiciones para que exista inestabilidad en los taludes. Con relación a los ángulos de inclinación vemos que los taludes presentan mayor pendiente que la línea de intersección de las cuñas formadas, de manera que es posible que se manifieste el movimiento de las mismas en el sentido que señalan las flechas de los diagramas. Además, al comparar los ángulos de los taludes y el de las cuñas con el ángulo de fricción de las superficies de fallo, ocurre lo mismo, o sea, el ángulo de fricción es mucho menor que los demás. El modo de fallo de los taludes se corresponde a roturas tipo cuña, con dirección de movimiento predominante hacia el NE, correspondiéndose esto con lo observado en el campo, o sea, que los deslizamientos en los taludes orientados hacia el norte, comenzaron por el extremo derecho (desde el E) y están progresando hacia el oeste.

Talud	Planos de la cuña	Inclinación	Dirección	Ángulo de fricción	A	B	$FS = Atg \varphi_A' + Btg \varphi_B'$
1, 2, 3, 4.	A	60	50	25.5	0.7	0.3	0.47
	B	86	108				
	Dif.	26	58				
6, 8, 10.	A	38	356	25.5	1.2	0.65	0.882
	B	50	89				
	Dif.	12	267				

Tabla IV. Factores de seguridad determinados en los taludes del yacimiento Punta Gorda.

Después de obtener los datos necesarios acerca de los movimientos, el tipo de material, sus propiedades, el agrietamiento y otras características, aplicamos el método de cálculo propuesto por Hoek y Bray (1977) anteriormente descrito (ver tabla IV).

Como se puede observar en las tablas anteriores los resultados del factor de seguridad tienen valores menores que uno (1.00), significando esto que son inestables bajo las condiciones encontradas, correspondiéndose con lo hallado en el campo. Existen varias condicionantes de estas inestabilidades, una es que la posición de los taludes con respecto a los sistemas de grietas predominantes es desfavorable pues en el análisis se determinó que esta disposición crean roturas tipo cuña mediante las cuales el material desplazado se mueve hacia el Este,



corroborado con lo visto en el campo, además el buzamiento de la línea de intersección de las cuñas es menor que la inclinación de los taludes lo que facilita el movimiento; otro elemento esencial es que el ángulo de fricción estimado de la superficie de fallo es menor que el ángulo de inclinación de la cuña y del talud, lo que completa el cuadro inestable según el agrietamiento y sus características. Aparte de las condicionantes anteriores se suma además la humedad del material la cual provoca ablandamiento y disminución de la cohesión entre las partículas; los flujos de agua a través de las grietas y fisuras aumentan las presiones intersticiales disminuyendo considerablemente las tensiones efectivas.

Conclusiones

- A partir del análisis de agrietamiento se determinaron tres sistemas de grietas principales: las direcciones NS, NW y EW .
- Del análisis geotécnico de la meteorización tenemos seis grados fundamentales de alteración, en los cuales se manifiestan diferentes tipos de movimientos. Así tenemos entre los grados I y III el predominio de fallos planares y en forma de cuña con agrietamiento espaciado, y para espaciamiento muy cerrado fallos circulares. A medida que aumenta la alteración (IV-VI) los movimientos se producen a través de grietas relícticas, formándose deslizamientos complejos.
- De acuerdo a la evaluación geomecánica aplicada (SMR) la calidad del macizo se comporta de mala a muy mala y las inestabilidades están dadas a través de algunas familias grietas o en forma de cuña, o de grandes roturas por planos continuos por la masa roca/suelo. El tratamiento más adecuado es la corrección
- El tipo de movimiento que predomina es deslizamiento en forma de cuña, con movimientos dirigidos hacia el NE. Los factores de seguridad (FS) dan valores menores que 1.00.

Bibliografía

- Almaguer Y. (1998): Evaluación ingeniero geológica e hidrogeológica del yacimiento Punta Gorda. Trabajo de Diploma. P. 100. Dpto. geología, ISMM.
- Bieniawski, Z. T. (1974): Geomechanics classification of rock masses and its application intunelling. *Proc. 3rd. Internacional Congress Rock Mech.*, (Denver) 11A..
- Blanco J. L. (1999): Profundización en el estudio geológico y tectónico de Moa. Tesis de maestría. P.72. ISMM.
- Carmenate J. A. (1996): Evaluación de las condiciones ingeniero geológicas para la zonificación de los fenómenos geológicos en áreas urbanas y suburbanas de la ciudad de Moa. Tesis de Maestría. ISMM.
- De Dios Leyva (2000): Particularidades de la distribución espacial de las intercalaciones no industriales presentes en el “sector central” del yacimiento Punta Gorda. Tesis de Maestría. p.130. Dpto. Geología, ISMM.
- Fisher M. P. and M. Scott (2000): Predicting the orientation of joints from fold shape. Result of pseudo-three-dimensional modeling and curvature analysis. *Geology* (USA). 28(1): 15-17, January.
- Fonseca J. (1986): Relación de los espesores de los horizontes litológicos con los factores de intemperismo en las cortezas ferroniquelíferas en el yacimiento Punta Gorda. Trabajo de Diploma. ISMM.
- Guardado R. y Y. Almaguer (2001): Evaluación de riegos por deslizamiento en el yacimiento Punta Gorda, Moa, Holguín. *Minería y Geología*. XVIII (1): 1-12.



- Guardado R. (1982): Ingeniería geológica. Ingeniería petrológica (Cuba). Ed. Pueblo y Educación. p. 301.
- Guardado R; C. De Miguel; Y. Almaguer; J. Blanco; A. Rodríguez; B. Riverón; J. Batista (1998): Evaluación ingeniero geológica e hidrogeológica del yacimiento Punta Gorda. Informe de Investigación. Archivo de la Empresa Comandante Che Guevara, Moa.
- Hudson J. A. (1979): Discontinuities in rock mass geometry. *International Journal of Rock Mining Sciences* (Great Britain) 16 (6): December.
- Instituto Tecnológico Geo Minero de España (1991). *Manual de ingeniería de taludes*. 2 ed. Madrid. Editora Gráfica Monterreina, SA. p. 466.
- Kilic R. (1995): Geomechanical properties of the ofiolites (Cankiri/Turkey) and alteration degree of diabase. *Bulletin of the international association of engineering geology* (Paris) (51): 63-69, april.
- Romana M. (1997): El papel de las clasificaciones geomecánicas en el estudio de la estabilidad de taludes (conferencia). *IV Simp. Nac. sobre taludes y laderas inestables* (Granada) 2: 955-1012, noviembre.
- Suppe J. (1985): *Principles of structural geology*. New Jersey. Prentice-Hall Inc. p. 537.



Tabla II. Clasificación ingenieril del grado de meteorización propuesta para las rocas serpentinizadas.

Término	Grado	Descripción	RQD (%)	Roca/suelo (% roca)	Resistencia	Modo de fallo	Tipo de fallo
Roca fresca	I	No hay signos visibles de material meteorizado. La roca puede tener algunas grietas manchadas de óxidos de Fe.	90-100	95-100	Muy alta	Controlada por discontinuidades (grietas en las rocas serpentinizadas, clivaje y esquistosidad) (estructural)	Agrietamiento espaciado: Planar, cuña, vuelco, combinados.
Débilmente meteorizada	II	Manchas en las superficies de las discontinuidades. Meteorización desigual a través de la fábrica de la roca. La resistencia es parecida a la roca fresca. Mas del 90% es roca.	70-90	85-95	Muy alta a 45-55 % de la resistencia de la roca fresca		Agrietamiento cerrado: Circular, combinados (circular/cuña, planar/cuña)
Moderadamente meteorizada	III	La roca está manchada de limonita. Posee alguna resistencia, grandes piezas no pueden ser rotas con la mano. La roca fresca o decolorada se presenta como una estructura discontinua o en núcleos rocosos. Entre 50% – 90% es roca	30-70	55-85	25 % de la resistencia de la roca fresca	Material controlado por discontinuidades (clivaje fuerte, esquistosidad) (estructural)	Fallos planares, en cuña a través de discontinuidades. Circular con agrietamiento estrechamente espaciado.
Altamente meteorizada	IV	Está tan debilitada por la meteorización que grandes piezas pueden ser separadas o desintegradas con la mano. Se pueden obtener núcleos perforando cuidadosamente. La fábrica original está intacta. Menos del 50% es roca.	10-30	15-55	12 % de la resistencia de la roca fresca		Circular Cuña a través de grietas relícticas. Complejos
Extrem. meteorizada	V	Roca completamente descompuesta pero la fábrica es reconocible. No se pueden recuperar núcleos. Puede ser excavado con la mano con algún esfuerzo si está húmedo. Resistencia muy baja comparada con la roca fresca. Mas del 90% es suelo.	0-10	0-15	Extremadamente baja	Material controlado por grietas relícticas (estructural)	Erosión No circular Circular
Suelo residual	VI	La textura de la roca no es reconocible. Puede ser fácilmente excavado con la mano. Resistencia muy baja comparada con la roca fresca. Las capas superficiales contienen raíces de plantas y humus.	0	0	Extremadamente baja	No hay control estructural (no estructural)	



GENERALIZACIÓN DE LA EVALUACIÓN GEOMECÁNICA DE LOS DEPOSITOS MINERALES EN LAS ETAPAS DE INVESTIGACIÓN GEOLOGICA.

Rafael Falero Salgado⁽¹⁾ Antia Luna Vázquez⁽²⁾

(1) OTRM Stgo de Cuba , Loma San Juan Km 2 ½ Carr. Siboney , rfalero @geom.stg.minbas.cu

(2) Empresa Geominera de Oriente Loma San Juan Km 2 ½ Carr. Siboney , chicho @geom.stg.minbas.cu

RESUMEN

Para definir el aprovechamiento industrial de un deposito mineral estudiado geológicamente y donde se determinaron la cantidad y calidad de los recursos minerales, se requiere de la realización de una evaluación técnico económica.

Como regla general, los elementos que se evalúan son las características físico mecánicas, estabilidad del mineral y de la roca encajante, y otros factores, que no son lo suficientemente estudiados o algunos de ellos no aparecen en los estudio realizados. Esto ocurre por insuficiencias existente con relación a la necesidad y profundidad de la determinación de las características geológico mineras de las rocas hospederas

Por lo tanto al realizarse la evaluación técnico económica, que se inicia con la proyección minera, ésta se dificulta, al no tener los elementos suficientes para argumentar y diseñar la mina o un sector.

Con el objetivo de obtener las características geológico mineras que responda a un ETE, se elaboró una metodología, que complementa lo establecido, que no incurriera en gastos de tiempos significativos y que implicara los menores costos. Fue llevada a la práctica en los estudios realizados yacimientos metálicos fundamentalmente, Oro Barita, Loma La Plata y los depósitos de Cromos de Moa con resultados satisfactorios.

Para ello era necesaria una optima utilización de la existencia de una gran cantidad de testigos de perforación que son ejecutados en la investigación geológica, al objeto de llevar a cabo una evaluación geotécnica del área de estudio, se propuso un sencillo y practico procedimiento para la rápida inspección de los testigos, este procedimiento simplificado reduce el tiempo requerido para la evaluación de los testigos, normaliza la información, como resultado se logra un mayor volumen de información de las testigos de las perforaciones, recoge y evalúa datos que caracterizan el macizo rocoso y que serán utilizados posteriormente en el diseño y operación de la mina .

Con ello se introducen las nuevas tecnologías, y se avanza en el desarrollo sostenible (ecológico, cultural, político y económico) de la actividad minera, acorde a los pronunciamientos de la Cumbre de la Tierra en Johannesburgo, África en Septiembre del 2002 y de las iniciativas de las Cumbres Iberoamericanas de Presidentes.

ABSTRACT

In the mining industry before we star mining production it's necessary to make a feasibility study of the mineral deposit that has been studied in a geologist investigation.

Normally in an feasibility study stability of rock and mineral are evaluated their physic and mechanic characteristics and others properties of rock, but in fact, those geotechnic characteristics are deficiently bad studied during the geological investigation.

To resolve this situation and get more information with the same capital of investigation were introduced a new geotechnical method to resolve this task. With that step the engineers in their designs then are securing minimum impact of environment, losses and effluents.



INTRODUCCIÓN

Problema: La mayoría de los informes geológicos de las investigaciones realizadas a depósitos minerales, reflejan las características cualitativas de la roca mineral y el estéril, con un grado de estimación subjetivo de un geólogo a otro y solo en un bajo porcentaje son determinados parámetros ingeniero geológico a partir de ensayos.

Para disminuir esta incertidumbre se procedió a cuantificar algunos de los elementos estructurales del macizo rocoso y en base a ello entregar valores cuantitativos de las características de esos elementos, lo cual, da un grado de certeza y criterios de comparación de un macizo con otro dentro del mismo campo mineral u otro ubicado en otro lugar del país.

Para ello se emplearon varios métodos o formas, entre ellos la documentación estructural de los testigos y afloramiento y las recientes técnicas de evaluación geomecánicas.

TEXTO DEL TRABAJO

A partir del RQD (Rock Quality Designation) , índice de calidad simple propuesto por Deere et al (1963), obtenido de la recuperación de testigo en sondeos se estableció el perfil geotécnico de Oro Barita, Loma la Plata y Narciso I, al considerarse la naturaleza intrínseca de la roca. La fácil obtención de este índice, motivo su aplicación en la caracterización de la roca, y en conjunto con la evaluación. Por el grado de dureza, de intemperismo y de diaclasado se logró establecer la caracterización por zonas geotécnicas de todo el área investigada del depósito, esta evaluación es volumétrica por lo que en cualquier punto dentro del área podemos conocer con que calidad de roca nos vamos a encontrar, además de poder calcular los parámetros de calidad, para el reajuste de la potencia de los explosivos o de la potencia de los equipos necesarios o del rendimiento que pueda tenerse en dependencia del sector donde se proyecte trabajar.

Para poder realizar un trabajo evaluativo de la roca se procedió a elaborar una metodología para la organización y recopilación de la información que se documenta en los testigos, elaborándose una tabla que recogiera la siguiente información y en el siguiente orden.

Tabla I

TablaI DOCUMENTACIÓN DE TESTIGOS

Se documentan los índices señalados más abajo.				
Intervalos	Según los intervalos de perforación.			
Descripción de los testigos	Características Ingeniero Geológicas			
Recuperación	Perforado (metros)	Recuperado		%
RQD	Segmentos con longitud mayor de 10 cm.		%	
Clase	RQD desde 1 hasta 5 según Deere y Miller			
Intemperismo	AM desde 1 hasta 5 Clasificación según Intemperismo			
Dureza	Según su delesnabilidad			
Carácter de las grietas	Según las paredes	Según Separación	Según Relleno	Cantidad grietas



ADICIONALMENTE

En observaciones se reflejará el estado físico de cada sondeo (Ejemplo. Primeros 50 cm fragmentado con pedazos en el rango de 5 a 8 cm, a los 90 cm roca alterada con bordes de las grietas destruidos y presencia de arcilla).

Para vaciar la información se preparó el siguiente modelo con el siguiente formato que recoge los parámetros descritos más arriba. Tabla No II. Se tomará Barita como ejemplo.

Para la realización del trabajo también se requirió capacitar a los especialistas que laboraban en el trabajo de documentación de los testigos en el campo y su procesamiento posterior, Las consideraciones en cuestión, son el resultado de un estudio detallado de una gran parte de toda el área de investigación en la Zona de Barita, de un análisis de observaciones de determinados intervalos de testigo de perforaciones de sectores de deposito.

Para ello se prestó especial atención a las discontinuidades geológicas, no solo su emplazamiento y separación sino también sus características físicas ó grado de abertura (abierta, cerrada), la homogeneidad del perfil (plano, ondulado ó irregular) y la textura superficial (pulida, lisa ó rugosa) y su valoración numérica, factores importante en la posterior determinación del comportamiento del macizo rocoso.

El campo menífero Barita se ubica dentro de una estructura vulcano - tectónica relacionada a las fuentes de mineralización hidrotermal filoneana y polimetálica, por lo que sus características y propiedades van a corresponder a la de un macizo rocoso ígneo.

Tabla No II Zona Barita

No. Pozo: 617 Latitud _____ Profundidad: 40.0 m
Diámetro: NW-NQ Longitud _____ Sistema Perforación: Doble tubo
Angulo: 90° Elevación _____

Inter v.	Descripción	Recuperación			Índice RQD			Descripción Clase	Intemp	Dureza	Carácter de las Grietas			
		Perf. (m)	Rec. (m)	%	CM	%	Inter v.				Seg/ Pared de las grietas Abiertas	Según Separ. G. Abier	Relleno Grietas cerradas	Cant. GxM
0.0- 3.0	Material intemperizado. De 0.0 – 0.46 m es de color gris pardusco. De 0.46 – 3.0 m cambia la tonalidad a gris amarillento.	3.0	1.20	40	0	0	-	RQD - 1	AM- 5	Deleznable.	-	-	-	-
3.0- 4.50	Toba de color gris verdoso amarillento, alterada, argilitizada, sericitizada.	1.5	1.0	67	43	29	<u>0-30</u> 3	RQD - 1	AM- 5	Deleznable.	R. O	SA-4	ER-1 PR-4	20
4.50- 6.0		1.5	1.1	73	27	18	<u>0-30</u> 2	RQD - 1	AM- 5	Deleznable.	R. O	SA-4	ER-1 PR-4	



6.0-7.5		1.5	1.45	97	77	51	0-30 3 31- 60 1	RQD - 3	AM- 5	Deleznable.	R. O	SA-4	ER-1 PR-4	
---------	--	-----	------	----	----	----	-----------------------------	---------	-------	-------------	------	------	--------------	--

Del procesamiento de la información realizada, la cual fue superior a los 2200 m de longitud de testigos, se determinó la calidad de la roca en cada pozo y para el perfil, 0 + 75 W los cuales se muestran en la tabla No III

Es importante indicar que aún en los trabajos ingeniero geológicos actuales, no se recoge información completa sobre el agrietamiento,

Tabla III - RELACION "RQD/CALIDAD DE LAS ROCAS" EN EL PERFIL 0 + 75 W

Indice RQD	Calidad de la roca	POZO 617		POZO 618		POZO 619		POZO 620		POZO 621		POZO 622		POZO 647		Total Perfil	
		m	%	m	%	m	%	m	%	m	%	m	%	m	%	m	%
0- 25 RQD1	Muy mala	6	15	8	19	11	21	8	12	8	11	0	0	0	0	39	11
Otras 3 clases	Mala Regular Buena																
91-100 RQD5	Excele-nte	4	10	6	14	13	25	21	34	18	26	43	52	13	64	118	32
Total	xxxxxxxx	40		40		50		62		69		83		21		365	100

EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA

Se procedió a determinar algunas propiedades físico mecánicas fundamentales, la resistencia a la compresión, ángulo de deslizamiento natural, peso volumétrico, etc.

Para caracterizar preliminarmente las propiedades mecánicas de las rocas intactas, se tomaron muestras a las cuales se le realizaron ensayos a compresión simple, con muestras regulares y secas elaboradas en un torno mecánico sus caras.

Se evaluaron los siguientes tipos de rocas:

1.....Toba andesítica brechosa, gris, sílice 15% en matriz con parte sericitizada 20%, fragmentos de 1 - 8mm con yeso de arcilla. (293.47 –283,3 kg./ cm²), 2 muestras

2.....Toba andesítica, gris verdosa, fragmentos de 1 - 3cm, matriz arcillosa 40% cloritizada, cristales de piritita 3% (75.98 – 95,34 kg/cm²). 4 muestras

Otras

El valor máximo de la resistencia a compresión simple no excedió de los 550 kg/ cm² y el mínimo fue de 75.98 kg/ cm² el resto de los valores oscilaron entre 131.53 - 293.47 kg /cm².

Se dan valores promedios, máximos y mínimos, para cada dominio estructural y clasifica según la resistencia.

CLASIFICACION DE LAS ROCAS (Autores Deere y Miller)

Tipo de Roca: Toba andesítica

RESISTENCIA A LA COMPRESION DESCRIPCION

Tabla NoIV

CLASE



SIMPLE
(KG/CM²)

I - < 280
8 muestras
Otras

Resistencia muy baja

" E "

EVALUACION DEL INDICE "RQD" (ROCK QUALITY DESIGNATION)

El índice RQD se determinó midiendo intervalos de testigos de perforación inmediatamente después de extraídos, pues en determinados intervalos el material tiende a cuartearse, disgregarse, hincharse, o desmenuzarse por la baja resistencia, el agrietamiento y la arcilla en su composición.

Se califica la roca dentro de cada dominio

IDENTIFICACION GEOMECANICA DEL MACIZO ROCOSO

Además de los ensayos y determinaciones realizadas en un sector de la zona Barita se hizo necesario caracterizar cuantitativamente la calidad del macizo rocoso, el cual se realizó empleando el método sudafricano, conociendo como RMR " Rock Mass Rating " (Autor Bieniawski). Se seleccionó este sistema por ser uno de los más ampliamente divulgados y empleado para la estimación de parámetros de proyección para la minería a cielo abierto, para el cálculo de dentro del cálculo de taludes y estabilidad de los mismos. Permite el procesamiento estadístico, en lo cual radica una de sus ventajas por encima de los otros métodos.

RESUMEN:

Valoración	RMR	64
Clasificación		II
Descripción	ROCA BUENA	
Cohesión " C "	2 - 3 kpa / cm ²	
Angulo fricción	35 – 40 Grados	

PRONOSTICO DE RESISTENCIA DEL MACIZO ROCOSO

Se califica la calidad del comportamiento del macizo rocoso dentro de cada dominio estructural, el índice geológico GSI, además de las características mecánicas.

La estabilidad de una excavación va a depender de la estructura del macizo rocoso y de la relación entre los esfuerzos inducidos y la resistencia de la roca, por lo que para predecir el comportamiento de una excavación frente a dichos esfuerzos, se requiere disponer de un criterio de resistencia de la roca in situ.

Hasta hace muy poco tiempo se tomó en cuenta la consideración del factor agrietamiento, o sea la condición estructural del macizo y de la relación de las características del mismo.

En el área de la mecánica, se ha trabajado para explicar el comportamiento del macizo rocoso sometido a diferentes condiciones de esfuerzo, existen avances en particular, en la teoría de Griffin modificada, la cual relaciona los esfuerzos principales que actúan en el fenómeno del



debilitamiento y que simultaneado con el empleo de la clasificación geomecánica RMR permite obtener valores de resistencia suficientemente próximos a los reales del macizo.

CRITERIO DE HOEK Y BROWN

Ecuación general	$\sigma_{1n} = \sigma_{3n} + (m \sigma_{3n} + s)^{1/2}$
Coeficientes: m, f (material)	s, f (agrietamiento)

En los informes de proyectos, hasta la fecha Dic 2002 se entregan solamente los valores de la resistencia de las muestras ensayadas y en este trabajo se presentan los valores notables del pasaporte de resistencia de la roca intacta (muestras ensayadas) y los valores notables del pasaporte del macizo rocoso, este ultimo permite , no realizar sobreestimaciones en la proyección de los costos. A nivel internacional estos costos sobrepasan el 10% del valor de las obras.

Se califica la calidad del comportamiento mecánico del macizo rocoso dentro de cada dominio y los parámetros de calculo, como son el modulo de elasticidad E_m , el índice del material para cada dominio (m_b). En función de los valores obtenidos y las características del macizo , se puede establecer el modelo geomecánico de rotura Morh – Coulomb, Criterio de Hoek and Brown y otros.

PRONOSTICO DEL ANGULO DEL TALUD

En este trabajo se utiliza para la evaluación del ángulo, la clasificación geomecánica de Beniaowski ,conocida por RMR con cuyos resultados y otros datos levantados en el campo, se trabaja con la clasificación geomecánica de Romana conocida como SRM, la cual está diseñada para la evaluación de taludes, también se pueden emplear otros criterios geomecánicos, los cuales se utilizan también con estos fines, como son los de autores como Laubscher, Orr y otros

Estas técnicas, por primera vez se utilizan en proyectos de investigación geológica de minerales metálicos en Cuba, internacionalmente son exigidos, para avalar financieramente cualquier depósito mineral y su asimilación industrial. La importancia de estos parámetros radica en que un ángulo de talud relativamente pequeño, puede hacer no rentable una explotación, aunque sea de oro por el gran volumen de destape que puede implicar.

Para Laubscher (1975) para las clases II y III del RMR el recomienda valores de 55- 65 grados del talud. El criterio de Orr (1996), propone la ecuación siguiente:

$$Bt = 35^0 \ln RMR - 71^0 \quad \text{Para Clase de RMR II hasta IV}$$

Para el cálculo de la estabilidad se emplea la clasificación de Romana SMR, (Slope Mass Rating), la cual parte del RMR para analizar la estabilidad, calculando coeficientes de ajuste.

La clasificación SMR, introduce factores de ajuste, para los cálculos de estabilidad. Tabla No V

CLASIFICACION DE ROMANA SMR

Tabla No V

No	Factor de Ajuste	Valor	Descripción
1	F1 Diferencia entre dirección de buza-miento de las grieta y el talud $> 30^0$	0,25	Paralelismo entre el talud y cara del talud
2	F2	0,15	Rotura plana, buzamiento de las juntas inferior a 20 grados.
3	F3	-25	Normal. Buzamiento de juntas
4	F4	0	Método de excavación voladura normal, si se utiliza precorte entonces es +10



Se proponen para la mina los ángulos del talud para los escalones en explotación y ángulos finales de la mina.
Durante la explotación se realizan correcciones, para establecer los ángulos más óptimos para la mina en general y las ecuaciones para su cálculo.

CONCLUSIONES

Utilizar la metodología de evaluación geomecánica para los yacimientos metalíferos y no metálicos durante las etapas de la investigación geológica que así lo requieran, por los resultados positivos que se lograron en el yacimiento oro Barita, loma la plata y narciso i.

Esta investigación integral, basándose en las nuevas técnicas de evaluación, es totalmente nueva en el país en el campo de las investigaciones de yacimientos minerales y en general de los macizos rocosos. (INNOVACIÓN TECNOLÓGICA),

Se logró realizar una caracterización completa detallada de la calidad de las rocas del depósito y brindar a los proyectistas y operadores de la futura mina los parámetros para, la proyección de la mina y el cálculo de la potencia de los equipos mineros.

El operador tiene la posibilidad de saber con antelación, así como recalcular, la calidad de las rocas, para cada área que le sea de interés, para el cálculo de los pasaportes de voladura, cuando así lo requiera o para estimar como se comportaran los taludes por el tipo de roca que tendrá en un momento dado.

Se pudo evaluar que los valores de la resistencia, obtenidos, son característicos para cada zona geotécnica. Además se presentan por primera vez en un informe geológico, lo cual representa una innovación de carácter positivo y un ahorro considerable de tiempo y recursos financieros para evaluar un yacimiento el yacimiento y su aceleración a la producción.

Se disminuye el volumen de roca a mover, en el ejemplo 1,5 millones de toneladas que equivale a disminuir los costos de operación en un total de 1,8 – 1,09 MMP durante toda la vida de la mina. Y una disminución del costo de operación en un 8%, 990633 pesos.

Con el estudio se convirtieron en reservas los recursos, por lo que existirá mina, evitando un conflicto social en cuanto al empleo de trabajadores disponibles por el Cierre de la Mina El Cobre.

REFERENCIA BIBLIOGRAFICA

- Barton N.; Lien R.; Lunde J. (1974) : Engineering Classification of rock masses for the design of tunnel support. Rock Mechanics, Springer Verlag Vol pp 189-236)
- Bieniawski Z. T. (1979): The geometric Classification in rock engineering applications 4^{to} Congreso Internacional de Mecánica de Rocas, Montrux Tomo 2 pp 41 - 48
- Blanco R. " (1981): Mecánica de Rocas Instituto Superior Minero Metalúrgico Moa Editorial Oriente
- Castro O. G. (1989) : Mecánica Rocas Aplicada a las Construcciones. Editorial Oriente.
- Deere D. V (1968). " Technical description of rock cores for engineering purposes. Mecánica de Rocas. Editorial BLUME.
- Hoek E. y Brown E. (1980): Excavaciones Subterráneas en Rocas. Mc. Graw-Hill de Mexico.
- Menéndez José (1973) : Mecánica de Suelos, Dpto. Geotécnia Escuela Ingeniería Civil CUJAE.
- Oliva V. (1984): Propiedades Mecánica de Suelos. Editorial Oriente
- Otaño Noguel J. (1981) Elementos de Física de las Rocas ". Editorial Pueblo y Literatura.



HIDROGEOQUÍMICA DE FLUJOS LOCALES, INTERMEDIOS Y REGIONALES DE LA SIERRA DEL ROSARIO, PINAR DEL RÍO, CUBA.

J.R. Fagundo¹, P. González¹, M. Suárez¹, C. Melián¹, J. Pajón², J. Fagundo-Sierra¹, M. Llerena³.

1. Centro Nacional de Termalismo "Víctor Santamarina". (MINSAP).

2. Instituto de Geofísica y Astronomía (CITMA).

3. Instituto de Geografía Tropical (CITMA).

RESUMEN

Las propiedades químico-físicas de las aguas subterráneas dependen de las interacciones agua-roca durante el tiempo de contacto que media desde la infiltración hasta su emergencia y de la constitución de los materiales acuíferos que drenan, de modo que es posible caracterizar los diferentes flujos (locales, intermedios y regionales) sobre la base de un grupo de indicadores geoquímicos.

En el presente trabajo se presentan los resultados de la caracterización hidroquímica y de la interpretación del origen de la composición química de muestras de aguas tomadas de manera sistemática en diferentes sitios de la Sierra del Rosario desde 1984 hasta el 2002, así como a partir de datos tomados de un informe geológico, correspondientes a flujos de diferente naturaleza hidrogeológica que drenan rocas carbonatadas, silicatos ácidos y rocas ultrabásicas con edades que van desde el Paleógeno hasta el Jurásico.

The chemical-physical properties of the underground waters depend on the water-rock interactions during the time of contact that mediates from the infiltration until their emergency and of the constitution of the aquifer materials that drain, so that it is possible to characterize the different flows (local, intermissions and regional) on the basis of a group of geochemical parameters.

This work shows the results of the hydrochemical characterization and interpretation of the origin of the chemical composition of water samples taken in a systematic way in different places of the Rosario's Sierra from 1984 to 2002, as well as using a geologic data report, corresponding to flows of different hydrogeologic nature that drain carbonated rocks, acid silicates and ultrabasic rocks with ages that go from the Paleógeno to the Jurassic period.

INTRODUCCIÓN

En la subregión natural de las Montañas de la Sierra del Rosario (Gutiérrez y Glean, 1999), situada en la porción oriental de la Cordillera de Guaniguanico, entre la parte oriental de la provincia de Pinar del Río y la parte occidental de la provincia La Habana, existe un gran potencial de aguas naturales y minerales, que pueden tener uso como fuentes de abasto a pequeñas poblaciones rurales, para el regadío en la agricultura, para consumo mediante embotellamiento y para fines terapéuticos.

La cantidad y diversidad de las aguas de esta región está asociada a las complejas condiciones geológicas e hidrológicas existentes (Fig. 1), como consecuencia del desplazamiento y transporte tectónico de rocas de diferente naturaleza litológica (calizas, pizarras, areniscas y



rocas ultrabásicas), ocurrido durante el Eógeno Medio, así como la presencia de numerosas fallas orientadas en diferentes direcciones (Pszczokowski, 1978).

Los sedimentos carbonatados están constituidos por calizas y calizas dolomitizadas de las formaciones Pan de Guajabón, Sierra Azul, Artemisa y otras, con edades Cretácico y Jurásico.

Los sedimentos no carbonatados lo constituyen esquistos y areniscas de las formaciones Manacas (Paleógeno) y San Cayetano (Jurásico) compuestos por aluminosilicatos ácidos, básicas y ultrabásicas. Las rocas ácidas están representadas por sedimentos de tipo efusivo sedimentarias, constituidas por aleurolitas, argilitas, areniscas y silicatos de las formaciones Manacas (Paleógeno), Vía Blanca y Encrucijada (Cretácico), así como los esquistos y pizarras de la formación San Cayetano (Jurásico). Las rocas básicas y ultrabásicas están constituidas por serpentinitas, harzburgitas y otras rocas serpentinizadas de edad Cretácico.

La distribución y disposición de las secuencias estratigráficas en la Sierra con diferente composición originan acuíferos libres y confinados a diferentes profundidades, cuyas aguas poseen una variada composición química. Además de las aguas dulces originadas en los acuíferos más someros, existen otras de tipo mineral de composición más estable y temperatura más elevada. El objetivo de este trabajo es caracterizar los correspondientes flujos y determinar el origen de la composición química de los mismos aplicando modelos de reconocimiento de patrones, balance de masas y mezcla de aguas.

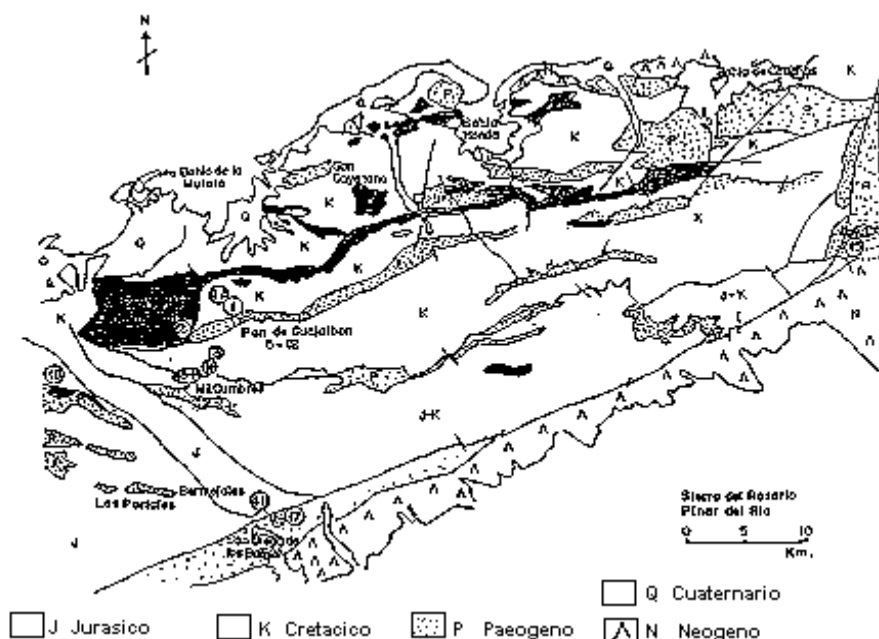


Figura 1. Esquema geológico de la Sierra del Rosario

MATERIALES Y MÉTODOS

Las mediciones de los parámetros geoquímicos se realizaron en el campo mediante pHmetro y medidor de temperatura y potencial redox (Eh), modelo HI-8424, marca HANNA y oxímetro



modelo HI-914, marca HANNA. Los contenidos de CO_2 y H_2S , así como la alcalinidad total (HCO_3^- y CO_3^{2-}) fueron también determinados "in situ", mientras que los restantes macroconstituyentes (Cl^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} y Mg^{2+}) y componentes trazas se analizaron en el laboratorio antes de las 24 horas de tomadas las muestras. Las marchas analíticas se efectuaron mediante las técnicas analíticas estándar (APHA, AWWA, WPCF, 1992).

Las muestras fueron tomadas entre enero de 1984 y enero del año 2000. También se utilizaron datos hidroquímicos del informe de prospección detallada efectuado por Peláez et al (1990) en la región de San Diego de los Baños – Los Bermejales. Los datos fueron procesados mediante un software, basado en un modelo hidrogeoquímico de balance de masas, implementado especialmente para los objetivos (Fagundo Sierra et al, 2001).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Acuíferos carbonatados

Las rocas carbonatadas se encuentran muy extendidas en la Sierra del Rosario, constituyendo más del 65%. En ellas se originan acuíferos cársicos libres o confinados, en dependencia de las condiciones de yacencia de estos materiales con respecto a otras rocas menos permeables. Las aguas de estos acuíferos pueden proceder de la zona no saturada (acuíferos colgados o vadosos), de la zona saturada o de la zona de saturación y circulación profunda; estas últimas se caracterizan por presentar elevados contenidos de minerales y gases disueltos (Fagundo et al, 1996) además de una temperatura mayor debido al calentamiento por el gradiente geotérmico. Algunas de estas fuentes poseen propiedades mineromedicinales reconocidas, como es el caso de los manantiales del Balneario de San Diego de los Baños.

Como ejemplos representativos de estos tres tipos de acuíferos se seleccionaron el manantial Mil Cumbres, el manantial La Pastora y el pozo artesiano P1, respectivamente. Todos estas fuentes tienen en común el hecho de que se encuentran asociadas a las calizas de la Fm. Artemisa. La composición química de estas aguas, se muestra en la tabla I.

Tabla I. Composición química de las aguas de varias fuentes de la Sierra del Rosario cuyas cuencas de alimentación se encuentran en terrenos carbonatados. Concentraciones de O_2 y TSS en mg/l, las restantes en mmol/l.

No	T °C	pH	Eh mv	O_2 mg/l	CO_2 mmol/l	H_2S mmol/l	H_4SiO_4 mmol/l	HCO_3^- mmol/l	Cl^- mmol/l	SO_4^{2-} mmol/l	Ca^{2+} mmol/l	Mg^{2+} mmol/l	Na^+ mmol/l	K^+ mmol/l	TSS mg/l
1	23.0	6.60			0.05	0.00	0.00	0.20	0.16	0.00	0.04	0.03	0.21	0.01	20
2	23.7	7.42	-50	7.7	0.37	0.00	0.48	4.44	0.48	0.39	2.14	0.23	0.93	0.03	438
3	23.8	7.15	-260	1.8	1.71	0.50	0.50	7.24	1.31	0.66	3.51	0.66	1.31	0.04	739
4	46.0	7.19	-250	2.8	0.89	0.73	0.40	3.36	1.22	18.36	14.44	2.63	6.98	0.18	2818

1) Agua de lluvia – San Juan de Sagua (N=5); 2) Manantial Mil Cumbres (N=18); 3) Manantial La Pastora (N=5); 4) Pozo P1 (N=10). La incertidumbre de los resultados corresponde al error de los métodos analíticos que del orden de 0.05 mol/l.

La composición química de las aguas del manantial Mil Cumbres es predominantemente del tipo bicarbonatada cálcica, aunque ocasionalmente por efecto de las precipitaciones puede transformarse en bicarbonatada cálcica sódica ($\text{CV}_{\text{TSS}}=13\%$). Otro rasgo que caracteriza a estas



aguas es su relativamente baja temperatura, su poco contenido de CO_2 , ausencia de H_2S , así como sus bajas concentraciones de cloruro y sulfato.

Los resultados del balance de masas correspondiente al proceso de intemperismo que origina la composición química de las aguas del manantial Mil Cumbres, así como los procesos geoquímicos correspondientes se muestran en la tabla II.

Tabla II. Masa de mineral disuelto o transformado en el proceso de intemperismo que origina las aguas del manantial Mil Cumbres.

Proceso geoquímico	mmol/l
Calcita	1.88
Dolomita	0.15
Albita	0.25
Pirita	0.19

Para el cálculo de la masa extraída en forma iónica por las lluvias, se tomó en consideración el factor de evapotranspiración:

$$f = \frac{\text{Contenido de Cl medio de la fuente}}{\text{Contenido de Cl medio de la lluvia}} = \frac{0.48}{0.16} = 3.0$$

El producto de este factor por la composición química del agua de lluvia se resta de la composición química del agua del manantial, obteniéndose así una diferencia (Δ iónico), correspondiente a la masa resultante en el balance, la cual es debida al intemperismo. En el caso de gases no se tiene en cuenta este factor.

La composición química del manantial La Pastora, de tipo bicarbonatada cálcica, es más estable en el tiempo que la del manantial Mil Cumbres ($\text{C.V}_{\text{TSS}} = 4.4\%$). Presenta también una temperatura media anual mayor, contenidos más elevados de CO_2 y minerales disueltos (TSS , Ca^{2+} , SO_4^{2-}), así como presencia abundante de H_2S .

Para calcular la masa extraída en el proceso de intemperismo en el caso del manantial La Pastora, se tomó en cuenta el procedimiento utilizado por Garrels y Mckencie (en Drever, 1982), el cual consiste en restar a la composición química de un manantial permanente, la de un manantial no permanente. En este caso, a la composición del manantial La Pastora (zona de saturación) se le restó la composición del manantial Mil Cumbres (zona no saturada). Los métodos de balance de masas constituyen una herramienta adecuada para estudiar los procesos geoquímicos en yacimientos carbonatados (Hidalgo et. al, 1997). Los resultados del balance de masas aplicado en este trabajo se presentan en la tabla III.

Tabla III. Masa de mineral disuelto o transformado y procesos geoquímicos que originan la composición química de las aguas del manantial La Pastora.

Proceso geoquímico	mmol/l
Calcita	0.90
Dolomita	0.90
Halita	0.61
Pirita	0.41
Sulfato-sulfuro	-0.50

Del análisis de la tabla III, se infiere que algunos de los procesos geoquímicos que conducen a la composición química de las aguas del manantial La Pastora son similares a los del manantial



Mil Cumbres (disolución congruente de calcita y dolomita, oxidación de pirita y generación biogénica de CO_2). En el manantial La Pastora no se produce disolución incongruente de albita y sí disolución de halita, así como una reducción parcial de SO_4^{2-} que origina H_2S .

Si se resta la composición química del manantial La Pastora a la del pozo P1, se puede determinar la cantidad de material adquirido o eliminado en el tránsito de estas aguas, desde la zona de saturación, hasta la zona de saturación y circulación profunda. Los resultados del balance de masas correspondiente se presentan en la tabla IV.

En este tránsito, la composición química de las aguas varía desde bicarbonatada cálcica a sulfatada cálcica. Como no existe yeso ni anhidrita en la región, la fuente de sulfatos es la propia caliza de la Fm. Artemisa, la cual libera H_2S al ser triturada. Los procesos químicos que explican la composición de estas aguas, según se infiere en la tabla IV, son los siguientes: disolución congruente de calcita y dolomita, disolución incongruente de albita y fedelspató K (microclino), oxidación de pirita con reducción parcial de sulfato, precipitación de cuarzo y liberación de CO_2 ,

Tabla IV. Masa de mineral disuelto o transformado y procesos geoquímicos que originan la composición química de las aguas del Pozo P1.

Proceso geoquímico	mmol/l
Calcita	8.96
Dolomita	1.96
Albita	5.66
Pirita	9.10
Microclino	0.07
Sulfato-sulfuro	-0.23

El balance neto de las tres zonas hidrogeológicas se muestra en la tabla V.

Tabla V. Balance de masas neto en las tres zonas hidrogeológicas (no saturada, saturada y de saturación y circulación profunda). Concentraciones en mg/l.

Material	Formula empírica	Zona no saturada	Zona saturada	Zona de saturación y circulación profunda	Total
Halita	NaCl	0 (0 %)	35.70 (100 %)	0 (0 %)	35.70
Calcita	CaCO_3	188.0 (16 %)	94.0 (8 %)	896.0 (76 %)	1178.0
Dolomita	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	18.6 (6 %)	48.50 (16 %)	243.63 (76 %)	310.73
Albita	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$	65.50 (4 %)	0 (0 %)	1482.92 (96 %)	1548.42
Microclino	KAlSi_3O_8	0 (0 %)	0 (0 %)	19.46 (100 %)	19.46
Pirita	FeS_2	22.80 (2 %)	49.20 (4 %)	1092.91 (94 %)	1164.91
Formación de H_2S	H_2S	0 (0 %)	17.0 (70 %)	7.36 (30 %)	24.36
Cuarzo	SiO_2	0 (0 %)	0 (0 %)	702.0 (100 %)	702.0
Dióxido de carbono	CO_2	87.2 (58 %)	63.36 (42 %)	-792.0 (-100 %)	

A partir de la información que recoge la tabla V, se puede estimar la proporción en que cada uno de los materiales es transformado en cada zona hidrogeológica como resultado del proceso de intemperismo: la halita sólo se disuelve en la zona no saturada; 16 % de calcita se disuelven en la zona no saturada, 8 % en la zona saturada y 16 % en la zona de saturación y circulación profunda; la dolomita se disuelve en las proporciones de 6%, 6 % y 78 % respectivamente; la albita se disuelve en forma incongruente (dejando caolinita en el terreno como residuo) en las proporciones 4 %, 0 % y 96 %; el microclino también se disuelve incongruentemente en similar forma a la albita, pero sólo en la zona de saturación y circulación profunda, la pirita se oxida a



sulfato (con producción de hematita) en las proporciones de 2 %, 4 % y 94 %; se reduce sulfuro a partir de la materia orgánica presente en el acuífero, por acción de las bacterias anaeróbicas sulforreductoras (Appelo y Postna, 1993) en las zonas saturada y de saturación y circulación profunda en las proporciones de 70 % y 30 %. El CO₂ de carácter biogénico es generado por las bacterias en mayor cuantía en las zonas más someras (58 % en la zona no saturada y 42 % en la zona saturada), mientras que en la zona más profunda no hay producción microbiológica de este gas, el cual tiende a liberarse a la atmósfera. Finalmente, se produce precipitación de sílice en la zona del drenaje más profundo.

La ocurrencia de piritas puede estar asociada tanto a las calizas fétidas de la formación Artemisa que constituyen el material acuífero, como a los polimetales que por lo general yacen en los sedimentos de la formación San Cayetano, los cuales forman parte de las capas confinantes del acuífero. La alta proporción en que este mineral es oxidado produce un elevado contenido de CO₂, hecho que puede explicar las altas concentraciones de minerales disueltos en esta zona profunda en forma congruente (calcita, dolomita y halita) y en forma incongruente (albita y microclino). Otro factor que favorece la disolución de los aluminosilicatos es la temperatura, la cual en la región de San Diego de Baños del orden de 46 °C a unos 300 m de profundidad (Peláez et al., 1990).

Acuíferos no carbonatados

En la tabla VI se presenta la composición química de las aguas seleccionadas en este trabajo, las cuales son representativas de los manantiales y pozos no carbonatados de la región de estudio.

Tabla VI. Composición química de la lluvia local y de varias fuentes de la Sierra del Rosario que drenan acuíferos no carbonatados. Concentraciones en mmol/l.

No	T °C	PH	Eh mv	O ₂ mg/l	CO ₂ mmol/l	H ₂ S mmol/l	H ₄ SiO ₄ mmol/l	HCO ₃ ⁻ mmol/l	Cl ⁻ mmol/l	SO ₄ ²⁻ mmol/l	Ca ²⁺ mmol/l	Mg ²⁺ mmol/l	Na ⁺ mmol/l	K ⁺ mmol/l	TSS mg/l
1	23.0	6.60			0.05	0.00	0.00	0.20	0.16	0.00	0.04	0.03	0.21	0.01	20
2	23.5	8.47	156	8.4	0.06	0.00	1.10	3.67	0.45	0.06	0.06	1.85	0.55	0.02	307
3	26.5	7.10	-365	7.1	1.15	5.79	1.60	12.75	0.70	0.54	2.55	2.07	5.19	0.16	1129
4	30.0	9.00			0.00	0.00	0.19	2.96	0.48	0.36	0.20	0.15	3.75	0.11	345
5	32.0	8.21			0.41	0.70	0.23	7.66	2.74	1.72	1.43	0.62	11.69	0.36	1147

1) Agua de lluvia – San Juan de Sagua (N=5); 2) Manantiales y arroyos en Sierra de Cajalbana (N=13); 3) Pozo El Sitio (N=4); 4) Pozo P3 40 m - San Diego de los Baños-Bermejales (N=1); 5) Pozo P4 –Bermejales (N=9). (HCO₃⁻ = HCO₃⁻ + CO₃²⁻)

Como puede apreciarse, existen tres tipos principales de aguas en estos acuíferos: bicarbonatadas sódicas (con mayor o menor contenido de cloruro o sodio), asociadas a los aluminosilicatos ácidos presentes en las areniscas (formaciones Encrucijada, y Manacas) y esquistos (Fm. San Cayetano); bicarbonatadas magnesianas, relacionadas con los acuíferos someros constituidos por rocas ultrabásicas del complejo ofiolítico, y bicarbonatadas mixtas, originadas en los acuíferos más profundos constituidos por este último tipo de roca. La temperatura de las aguas depende de la profundidad del acuífero, el pH es generalmente básico y el contenido de CO₂ bajo. El H₂S sólo está presente en las aguas de origen profundo y los



contenidos de minerales disueltos son más elevados también a mayor profundidad, alcanzándose por lo general, altas concentraciones de iones alcalinos y alcalinos térreos.

En la tabla VII se presentan los resultados del balance de masas, que explica el origen de la composición química de las aguas de los manantiales y arroyos que discurren por la Sierra de Cajalbana. Estos terrenos están constituidos por rocas ultrabásicas que originan lateritas por intemperismos, los minerales más abundantes son la serpentina, el piroxeno y otros similares, ricos en magnesio, hierro, níquel y cobalto.

La composición química de las aguas de los manantiales y arroyos de Cajalbana se explica mediante la ocurrencia de procesos geoquímicos de disolución de serpentina, oxidación de pirita y la generación de CO₂ según las siguientes expresiones estequiométricas que se muestran en la tabla VII. Para el cálculo de la masa extraída en forma iónica por la lluvia se tomó en consideración el factor de evapotranspiración (2.813).

Tabla VII. Masa de mineral disuelto o transformado y procesos geoquímicos que originan la composición química de las aguas de los manantiales y arroyos de la Sierra de Cajalbana.

Proceso geoquímico	<u>mmol/l</u>
Serpentina	0.56
Pirita	0.06

El pozo El Sitio fue perforado en el marco de un estudio de exploración geológica, emitiendo desde entonces en forma artesiana, con una composición química del orden de la que se presenta en la tabla VI. Su composición puede ser explicada a partir de los cálculos de balance de masas que se exponen en la tabla VIII, donde la concentración correspondiente a los manantiales de Cajalbana se resta a la del pozo El Sitio.

Tabla VIII. Masa de mineral disuelto o transformado y procesos geoquímicos que originan la composición química de las aguas del pozo El Sitio.

Proceso geoquímico	<u>mmol/l</u>
Halita	0.25
Serpentina	0.08
Albita	4.40
Microclino	0.14
Anorthita	5.00
Pirita	3.13
Sulfato-sulfuro	-5.79

En este proceso de intemperismo que tiene lugar desde la zona somera del acuífero (manantiales y arroyos de Cajalbana) hasta el horizonte captado por el pozo el Sitio, las mayores proporciones de minerales disueltos o transformados corresponden a la albita (36.2 %), la anorthita (43.7 %) y la pirita (17.5 %)., mientras la serpentina es intemperizada en sólo un 0.9 %.

El pozo P 3, perforado durante los trabajos de búsqueda y exploración detallada realizados en el sector hidrogeológico San Diego de los Baños - Bermejales (Peláez, 1990), interesó diferentes horizontes acuíferos en profundidad. A los 40 m captó aguas de tipo bicarbonatadas sódicas y bicarbonatadas cloruradas sódicas de relativamente alta mineralización, cuya composición química puede ser explicada mediante los cálculos de balance de masas y los procesos geoquímicos que se presentan en la tabla IX. Los procesos geoquímicos que



intervienen en este caso son los siguientes: disolución de serpentina, albita, microclino y anorthita, oxidación de pirita, precipitación de cuarzo y generación de CO₂.

Tabla IX. Masa de mineral disuelto o transformado y procesos geoquímicos que originan la composición química de las aguas del pozo P 3 (40 m).

Proceso geoquímico	<u>mmol/l</u>
Serpentina	0.02
Albita	3.11
Microclino	0.09
Anorthita	0.08
Pirita	0.18

La cantidad de material extraído por las aguas en su curso subterráneo desde la zona saturada del acuífero hasta las capas más profundas en los esquistos y areniscas de la Fm. San Cayetano, así como la composición química de las mismas, puede ser calculada restando a la composición de las aguas del pozo P 4 (tomada entre 103 y 288 m), la composición del pozo P 3 (90 m). En la tabla X se presentan los resultados del balance de masas, así como los procesos geoquímicos que originan esta composición.

Tabla X. Masa de mineral disuelto o transformado y procesos geoquímicos que explican la composición química del pozo P4 tomada entre 103 y 288 m (Bermejales) a partir de las aguas del pozo P 3 (40 m), los cuales drenan diferentes horizontes acuíferos constituidos por esquistos y areniscas de la Fm. San Cayetano (aluminosilicatos de tipo ácido).

Proceso geoquímico	<u>mmol/l</u>
Halita	3.82
Serpentina	0.09
Albita	6.09
Microclino	0.30
Anorthita	0.53
Pirita	7.72
Sulfato-sulfuro	-3.53

El balance de masa neto en los de acuíferas estudiadas en la zona los terrenos no carbonatados estudiados se resume en la tabla XI.

Tabla XI. Balance de masas neto en los acuíferos desarrollados, a diferentes profundidades, en aluminosilicatos de tipo ultrabásico y ácido de la Sierra del Rosario. Concentraciones en mmo/l.

Material	Formula empírica	Acuíferos en rocas ultrabásicas		Acuíferos en rocas ácidas	
		Somero	Profundo	Somero	Profundo
Halita	NaCl	0 (0 %)	14.6 (100 %)	0 (0 %)	212.0 (100%)
Serpentina	Mg ₃ (Si ₂ O ₅)(OH) ₄	131.2 (87 %)	16.2 (11 %)	11.0 (18.2 %)	49.7 (81.8 %)
Albita	NaAlSi ₃ O ₈	0 (0 %)	1152.8 (100 %)	814.8 (33.8 %)	1595.6 (66.2 %)
Microclino	KAlSi ₃ O ₈	0 (0 %)	38.9 (100 %)	25.0 (23.1 %)	83.4 (76.9 %)
Anorthita	CaAl ₂ Si ₂ O ₈	0 (0 %)	1390 (100 %)	22.2 (13.1 %)	147.3 (86.9 %)
Pirita	FeS ₂	26.4 (41%)	375.0 (59 %)	21.6 (2.3 %)	924.9 (97.7 %)
Red. sulfato	H ₂ S	0 (0 %)	426.0 (100 %)	0 (0 %)	120.0 (0 %)
Cuarzo	SiO ₂	0 (0 %)	558.7 (100 %)	-400 (32 %)	845 (68 %)
Dióxido de carbono	CO ₂	139.5 (69 %)	-63.4 (100 %)	119.2 (11 %)	147.8 (89 %)

Aguas procedentes del drenaje profundo



En la tabla XII se presentan las características químico - físicas de las aguas de los manantiales y pozos procedentes de los acuíferos profundos de la Sierra del Rosario (flujos intermedios y regionales), así como otras fuentes que originan los mismos por procesos de interacción agua – roca y mezcla de aguas.

Tabla XII. Composición química de pozos y manantiales del sistema hidrotermal San Diego de los Baños Bermejales. Concentraciones en mmol/l.

No	T °C	pH	Eh mv	O ₂ mg/l	CO ₂ mmol/l	H ₂ S mmol/l	H ₄ SiO ₄ mmol/l	HCO ₃ ⁻ CO ₃ ²⁻ mmol/l	Cl ⁻ mmol/l	SO ₄ ²⁻ mmol/l	Ca ²⁺ mmol/l	Mg ²⁺ mmol/l	Na ⁺ mmol/l	K ⁺ mmol/l	TSS mg/l
1	25.8	9.00			0.00	0.00	0.19	2.96 (O.20)	0.48	0.36	0.20	0.15	3.74	0.12	345
2	36.0	7.70			0.75	0.00	0.11	6.28	0.76	0.41	3.07	0.27	1.16	0.02	606
3	46.0	7.20	-250	2.8	0.86	1.18	0.37	2.77	0.95	20.52	15.92	2.99	6.84	0.21	3042
4	30.3	7.10			2.75	3.53	0.06	11.03	4.35	0.69	0.75	0.60	13.62	0.42	1261
5	30.0	7.40			1.48	3.44	0.26	3.92	1.10	12.71	11.71	2.59	1.96	0.06	2073
6	30.0	8.00			1.00	1.36	0.19	5.92	1.09	0.40	2.15	0.59	2.26	0.07	591
7	36.0	7.15	-226	2.7	1.11	0.35	0.31	5.00	1.07	7.81	7.38	1.87	3.09	0.10	1506
8	32.0	7.15	-266	2.8	1.11	0.35	0.31	3.75	1.19	13.17	11.38	2.37	0.75	0.02	1846
9	31.0	7.60	-250	2.6	1.36	1.13	0.34	5.24	1.72	13.13	12.58	2.37	3.22	0.10	2277
10	30.5	7.90			0.75	0.70	0.28	6.32	1.63	8.23	5.23	2.42	8.83	0.27	1710

1) Pozo P3 (40 m); 2) pozo P 3 (90 m); 3) pozo P 1 (237-320 m); 4) pozo P 4 (222-288 m); 5) pozo P 4 (100 m); 6) pozo P 13; 7) Manantial El Templado (San Diego de los Baños); 8) manantial La Gallina (San Diego de los Baños); 9) manantial M 1 (Los Bermejales); pozo P 4 (145-195 m) (San Diego de los Baños).

El pozo P 3 se encuentra ubicado entre los manantiales de San Diego de los Baños y los de Bermejales, más próximo a estos últimos. Corta primero a la Fm. San Cayetano, luego una brecha tectónica y posteriormente las calizas de la Fm. Artemisa. En los primeros 40 m, el acuífero presenta aguas del tipo bicarbonatadas sódicas de bajas temperatura (25.8 °C), mineralización (345 mg/l) y dureza (35 mg/l). Son aguas básicas (pH = 9) donde están presentes iones CO₃²⁻ junto a HCO₃⁻. El catión predominante es el Na⁺, no posee CO₂ ni H₂S y el contenido de sílice es de 15.3 mg/l. Esta composición es característica de un agua que drena sedimentos y rocas constituidas por silicatos.

A partir de esta profundidad hasta los 290 m, el pozo exhibe aguas del tipo bicarbonatadas cálcicas originadas por disolución de calizas relativamente puras. Su temperatura asciende lentamente desde 26 hasta 34 °C, la mineralización oscila entre 564 y 606 mg/l, la dureza lo hace entre 292 y 334 mg/l, el pH es neutro tendiendo a ligeramente básico (7.5-7.9) y el contenido de CO₂ es relativamente alto (22-33 mg/l), no contienen H₂S y poseen un contenido bajo de sílice.

El pozo P 1 fue perforado hasta unos 300 m de profundidad y sólo cortó calizas de la Fm. Artemisa. Se aprecia un aumento creciente de la temperatura, desde 26 °C en la primera zona hasta los 46 °C en la última. En ese sentido descienden el pH (de 8.0 a 7.2) y se incrementan el CO₂ (de 11 a 38 mg/l), el H₂S (de 0 a 39.7 mg/l), el H₂SiO₃ (de 51.1 a 34.2 mg/l), la mineralización (de 440 a 3042 mg/l) y la dureza (de 209 a 1886 mg/l). Durante los experimentos hidrogeológicos este pozo se hizo surgente.



El pozo P 4 fue perforado en las cercanías de los manantiales de Bermejales. Corta al principio y al final la Fm. Artemisa, mientras que en las zonas intermedias (entre los 200 y 300 m) corta la Fm. San Cayetano. Aunque el primer contacto tectónico es de tipo transicional, el segundo es brusco, apareciendo una brecha tectónica y una serpentinita (Peláez et al., 1990). La temperatura en este pozo varía poco, entre 28 y 30.5 °C.

Hasta los 100 m de profundidad las aguas son similares en su composición a las de los manantiales de Los Bermejales. Poseen temperaturas del orden de 30 °C, mineralización (2073-2143 mg/l) y dureza (1421-1462 mg/l) elevadas, pH neutro (7.4-7.7) con contenidos relativamente altos de CO₂ (33-65 mg/l) y muy altos de H₂S (81.6-116.9 mg/l).

Entre los 100 y 200 m, aproximadamente, las aguas muestran una facies hidroquímica del tipo bicarbonatada sódica, con pH elevado (8.9), ausencia de CO₂ y presencia de iones CO₃²⁻ junto a HCO₃⁻. La mineralización de estas aguas es alta (1166 mg/l), mientras que la dureza es baja (62 mg/l). Poseen un elevado contenido de H₂S (120 mg/l) y contrario a lo esperado, poseen un relativamente bajo contenido de sílice (15.6 mg/l). El origen de estas aguas está asociado, posiblemente, a los procesos de disolución de silicatos en condiciones hidrotermales.

Entre los 145 y 195 m la facie hidroquímica es sulfatada cálcica sódica, al parecer originada por mezcla entre aguas de los tipos sulfatadas cálcicas y bicarbonatadas sódicas, asociadas a las formaciones Artemisa y San Cayetano respectivamente. Estas aguas presentan valores de pH, CO₂, H₂S, H₂SiO₃, TSS y CaCO₃ que son intermedios entre las muestras tomadas a 100 y 103-106 m respectivamente.

Entre 222 y 300 m, las aguas poseen una composición química similar a la de la muestra tomada entre 103 y 106 m, siendo de nuevo la facies hidroquímica presente la bicarbonatada sódica.

Las aguas del pozo P 13 son del tipo bicarbonatadas cálcico sódicas de mediana mineralización (591 mg/l) y dureza (274 mg/l). El pH es básico (8.0), mientras que el CO₂ es anormalmente alto y no coherente con el pH. El H₂S es también elevado (46.3 mg/l). El contenido de sílice no es elevado (15 mg/l).

Las aguas de los manantiales de San Diego de los Baños (El Tigre, El Templado y La Gallina), poseen temperaturas ligeramente mayores (31-36 °C) que las de los manantiales de Bermejales (M 1, M 2, M 3, M 4 y M 5), las cuales varían entre 31 y 32 °C. El pH tiende a ser más bajo (7.15-7.16) y el CO₂ más elevado (49-60 mg/l) en las aguas de San Diego y la de los manantiales M1 y M 2 de Los Bermejales (pH entre 7.5 y 7.79 y CO₂ entre 29 y 49 mg/l). El H₂S es menor en las aguas de San Diego (7.42-11.9) que en Los Bermejales (31.3-34.8). El contenido de H₂SiO₃ oscila entre 23.5 y 40 mg/l para todas las aguas, tendiendo a ser algo más elevados en los manantiales de Bermejales. En cuanto a la mineralización, ésta es mayor en los manantiales de Bermejales (2256-2409 mg/l) que en los manantiales de San Diego (1506-1847 mg/l). Los mayores contenidos de TSS se corresponden con los valores de SO₄²⁻, Ca²⁺, Cl⁻ y Na⁺. Por último, el contenido de Rn es mucho más pequeño en los manantiales de Los Bermejales (0.19-0.23 mµc/l) que en los manantiales de San Diego de los Baños (0.93-1.25 mµc/l). Con anterioridad se había reportado concentraciones de Rn de 2.7, 2.1, 3.3 y 0.6 mµc/l en los manantiales de El Tigre, El Templado, La Gallina y Los Bermejales respectivamente (Guerra, 1947a, 1947b; Trelles, 1948).



Con relación a las facies hidroquímicas presentes, se observan dos ligeramente diferentes, una de tipo sulfatada bicarbonatada cálcica, presente en el manantial El Templado y ocasionalmente en el manantial El Tigre, y otra de tipo sulfatada cálcica, presente en el resto de los manantiales. En todos los casos, las aguas pueden ser considerarse como hipertermales de acuerdo a la clasificación de Schoeller (1962) o moderadamente tibias según Borgamov (en Armiejo y San Martín, 1994).

Del comportamiento global de los parámetros químico-físicos de los manantiales de San Diego de los Baños y Los Bermejales, se infiere un origen común de las aguas. La fracción de las precipitaciones que se infiltran en la región a través de las grietas y fisuras presentes en las calizas de la Fm. Artemisa, descienden hasta una cierta profundidad, donde se calientan en virtud del gradiente geotérmico, ascendiendo luego por la Falla San Diego de los Baños. Las diferencias observadas con relación a la magnitud de los diferentes parámetros en ambos sitios, pueden deberse a diferencias locales de tipo litológicas y estructurales, así como a la profundidad de descenso, tiempo de residencia, velocidades de ascenso de las aguas, así como su posible mezcla con otras más someras. Así el mayor contenido de Rn en las aguas de San Diego de los Baños apunta a un tiempo superior de contacto agua-roca que en las aguas de Los Bermejales. En correspondencia con esto, debía esperarse una mayor mineralización y contenidos de CO_2 disueltos en las aguas de San Diego. A pesar de que la concentración de este gas es superior en dichos manantiales, ocurre lo contrario con la mineralización, la cual es más grande en los manantiales de Los Bermejales. Este comportamiento pudiera deberse a que las aguas que emergen por San Diego, se mezclan antes con otras menos mineralizadas ubicadas más cerca de la superficie. El hecho de que las aguas de El Tigre y El Templado poseen un alto contenido relativo de HCO_3^- (19-23 % meq/l) sugiere una posible mezcla con aguas del tipo bicarbonatas sódicas, típicas de los acuíferos desarrollados en los esquistos, pizarras y areniscas de la Fm. San Cayetano.

El menor contenido de H_2S en los manantiales de San Diego con respecto a los de Bermejales pudiera explicarse asumiendo un mayor proceso de reducción bacteriana de sulfatos en Bermejales.

En la tabla XIII se presentan los resultados de los cálculos del balance de masas y los procesos geoquímicos que explican la composición química del pozo P13. Como puede apreciarse, la composición de esta fuente, de tipo $\text{HCO}_3-\text{Ca} > \text{Na}$, se justifica por la mezcla de las aguas de los pozos P 3 (90 m), del tipo HCO_3-Ca , y P 3 (40 m), del tipo HCO_3-Na , en las proporciones de 69 % y 31 % respectivamente. Los procesos geoquímicos que tienen lugar son: disolución congruente de halita y dolomita, precipitación de calcita; oxidación de pirita, reducción de sulfato, liberación de CO_2 al medio y transferencia de masas entre caolinita y albita. Este último tipo de proceso ha sido considerado por Helgeson (en Drever, 1982) sobre la base de los productos de alteración originados en los procesos de intemperismo en sistemas de tipo $\text{X}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$, donde X = Na o K.

Tabla XIII. Masa de mineral disuelto o transformado y procesos geoquímicos que originan las aguas del pozo P 13. Mezcla de aguas: 69 % pozo P3 (90 m) y 31 % pozo P3 (40 m).

Proceso geoquímico	mmol/l
Halita	0.43
Calcita	-0.40
Dolomita	0.34
Albita	-0.12
Pirita	1.38
Sulfato-sulfuro	-1.36



La composición química del manantial El Templado, de tipo $\text{SO}_4\text{>HCO}_3\text{-Ca}$, puede explicarse a partir de la mezcla de las aguas del pozo P 3 (90 m), de tipo $\text{HCO}_3\text{-Ca}$, con la de las aguas del pozo P 1 (237-320 m), de tipo $\text{SO}_4\text{-Ca}$. En la tabla XIV se presentan los resultados de los cálculos del balance de masas y los procesos geoquímicos que explican la composición química del manantial El Templado (San Diego de los Baños). Dicha composición de se justifica por la mezcla de las aguas de los pozos P 3 (90 m) y P 1 (237-320 m) en las proporciones de 64 % y 36 % respectivamente. Los procesos geoquímicos que tienen lugar son: disolución congruente de halita y dolomita, precipitación de calcita, transferencia de masas entre aluminosilicatos (albita y caolinita); oxidación de pirita, reducción de sulfato y precipitación de cuarzo.

Tabla XIV. Masa de mineral disuelto o transformado y procesos geoquímicos que originan las aguas del manantial El Templado. Mezcla de aguas: 64 % pozo P3 (90 m) y 36 % pozo P1 (237-320 m).

Proceso geoquímico	mmol/l
Halita	0.24
Calcita	-0.96
Dolomita	0.64
Albita	-0.36
Pirita	0.15

Las aguas del manantial La Gallina (San Diego de los Baños), poseen un patrón hidrogeoquímico típico de un agua sulfatada cálcica, similar al patrón del agua del pozo P 1 de mayor mineralización. Si se asume que la composición del manantial La Gallina se origina por mezcla de las aguas de dicho pozo, procedentes del drenaje profundo, con otras aguas más someras de composición similar a las del pozo P 3 (90 m), entonces el proceso neto de mezcla y de modificación de la composición químicas puede ser expresado por las reacciones calculadas en la tabla XV mediante balance de masas. La composición química de las aguas de este manantial puede ser explicada por la mezcla de las aguas de los pozos P 1 (237-320 m) y P 3 (90 m), en las proporciones de 36 % y 64 % respectivamente. Los procesos geoquímicos que tienen lugar son: disolución congruente de halita y dolomita, transferencia de masas entre aluminosilicatos (albita y microclino) con minerales secundarios (caolinita), reducción de sulfato, formación de azufre a partir de H_2S y precipitación de cuarzo. Finalmente, se debe considerar además una pérdida de CO_2 en los cálculos de balance de masas para obtener un error más pequeño (pudiera ser por disolución en agua dando HCO_3^-).

Tabla XV. Masa de mineral disuelto o transformado y procesos geoquímicos que originan las aguas del manantial La Gallina. Mezcla de aguas: 64 % pozo P1 (237-320 m) y 36 % pozo P3 (90 m).

Proceso geoquímico	mmol/l
Halita	0.31
Dolomita	0.22
Albita	-4.36
Sulfato-sulfuro	-0.12
$\text{H}_2\text{S} - \text{S}$	-0.53

El manantial M 1 de Los Bermejales (aguas sulfatadas cálcicas sódicas) posee un contenido relativamente mayor de sodio que el de las aguas del manantial La Gallina (aguas sulfatadas cálcicas) y menor que el pozo P 1 (aguas sulfatadas cálcicas). Teniendo en cuenta además,



que la mineralización de aquel manantial es inferior a la del pozo P1, se puede asumir que la composición del manantial M 1 (Los Bermejales) pudiera originarse por mezcla de las aguas del pozo P 1 con las del pozo P 4 (103-206), de mayor contenido de Na^+ y mineralización. En la tabla XVI aparecen los resultados de los cálculos de balance de masas y los procesos geoquímicos correspondientes.

Tabla XVI. Masa de mineral disuelto o transformado y procesos geoquímicos que originan las aguas del manantial M 1 Bermejales. Mezcla de aguas: 68 % pozo P1 (237-320 m) y 32 % pozo P4 (103-206 m).

Proceso geoquímico	mmol/l
Halita	0.98
Calcita	1.49
Dolomita	0.37
Albita	-7.09
Sulfato-sulfuro	-1.47
$\text{H}_2\text{S} - \text{S}$	-2.27

La composición química de las aguas del manantial M 1 (Los Bermejales) puede ser explicada por la mezcla de las aguas de los pozos P1 y P 4 en la proporción de 68 y 32 % respectivamente. Los procesos geoquímicos que tienen lugar son: disolución de halita, calcita y dolomita en forma congruente y transferencia de masas entre aluminosilicatos (albita y microclino) y minerales secundarios (caolinita); oxidación de pirita; formación adicional de H_2S a partir de azufre, precipitación de cuarzo y generación de CO_2 .

Durante los trabajos de exploración detallada llevados a cabo en la región (Peláez, 1990), el pozo P 4 perforó varios horizontes acuíferos, con aguas de diferente composición relativa (aguas sulfatadas cálcicas, bicarbonatadas sódicas y sulfatadas bicarbonatadas cálcicas sódicas, estas últimas, captadas entre 145 y 195 m se originan presumiblemente por mezcla de las dos anteriores. En la tabla XVII se muestra los resultados de los cálculos del balance de masas, así como los procesos geoquímicos que se producen en el marco de dicha mezcla. Las proporciones calculadas corresponden a 52 % de las aguas captadas a 100 m de profundidad y a 48 % de las aguas captadas entre 222 y 288 m.

Tabla XVII. Masa de mineral disuelto o transformado y procesos geoquímicos que originan las aguas del pozo P 145-195. Mezcla de aguas: 51 % pozo P4 (100 m) y 48 % pozo P4 (222-288 m).

Proceso geoquímico	mmol/l
Halita	-1.03
Calcita	-2.04
Dolomita	0.83
Albita	2.29
Microclino	0.04
Pirita	1.30
$\text{H}_2\text{S} - \text{S}$	-2.78

En la figura 2 se presenta la composición química mediante diagramas de Stiff, tanto de las aguas de partida como de aquellas resultantes de los procesos de interacción agua-roca y de mezcla de aguas. En los acuíferos carbonatados someros, los principales procesos geoquímicos son los de disolución de calcita y dolomita (II), así como de oxidación de piritas, los cuales originan las aguas $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ (Fagundo et al, 2000a), mientras que en los acuíferos constituidos por minerales de tipo aluminosilicatos ácidos (III), priman los procesos



geoquímicos de disolución incongruente de plagioclas (albita y microclino principalmente) que originan las aguas de tipo $\text{HCO}_3\text{-Na}$ (Fagundo et al, 2000b). De las zonas profundas emergen las aguas termominerales de tipo $\text{SO}_4\text{-Ca}$ (I), las cuales se originan por oxidación de las piritas. Mediante la mezcla de estos miembros extremos en las proporciones que aparecen en dicha figura y con la ocurrencia de los procesos geoquímicos determinados por balance de masas, se originan las restantes fuentes de composición variable: $\text{HCO}_3\text{-Ca>Na}$ (IV), $\text{SO}_4\text{-Ca}$ de menor mineralización (V), $\text{SO}_4\text{>HCO}_3\text{-Ca}$ (VI), $\text{HCO}_3\text{-Ca>Na}$ (VII) y $\text{SO}_4\text{>HCO}_3\text{-Ca>Na}$ (VIII).

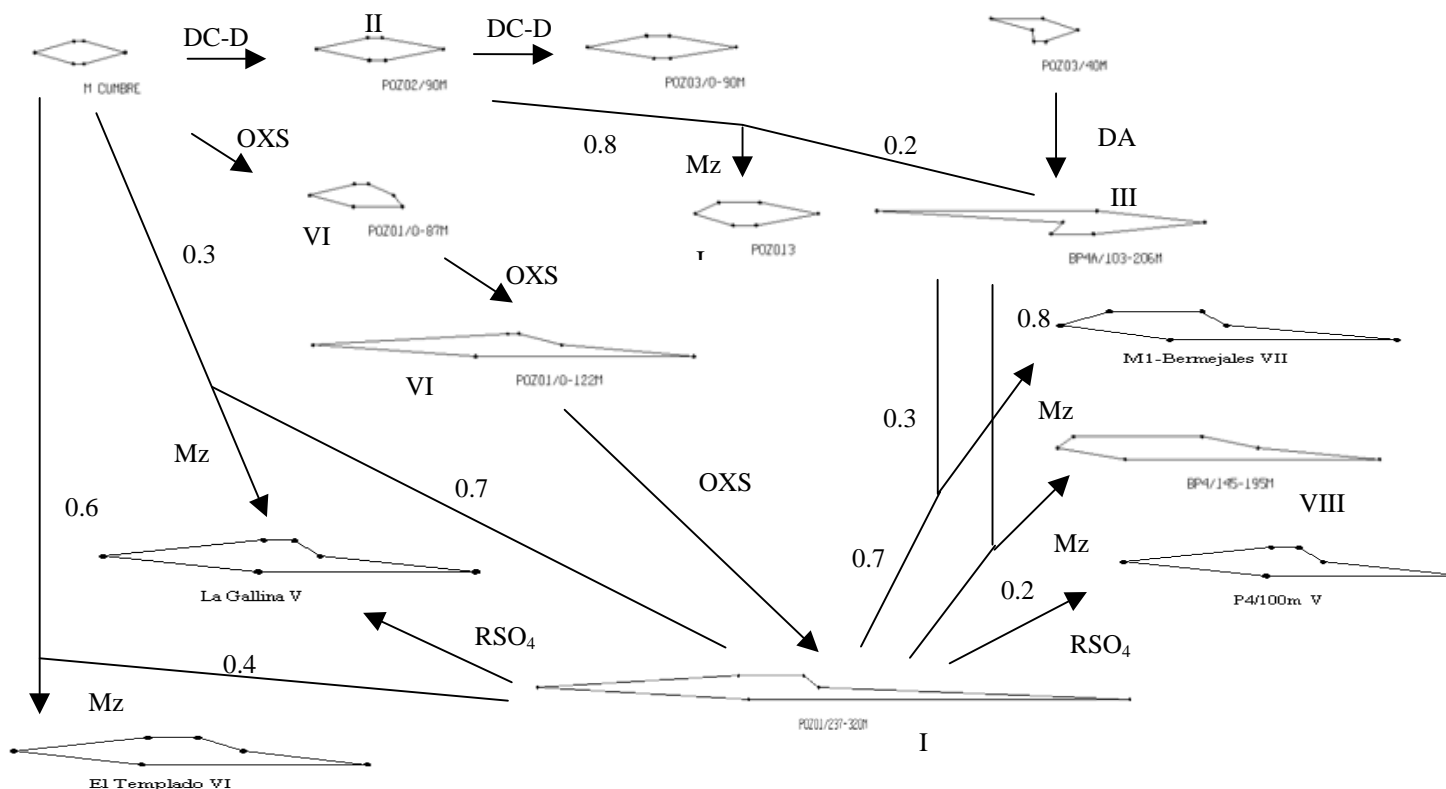


Figura 2. Procesos hidrogeoquímicos representados mediante Diagramas de Stiff (San Diego de los Baños-Bermejales).

Leyenda

DC-D: Disolución de calcita y dolomita; DA: Disolución de albita; OXS: Oxidación de piritas; RSO4: Reducción de sulfato; Patrones: (números romanos): I: Agua $\text{SO}_4\text{-Ca}$; II: Agua $\text{HCO}_3\text{-Ca}$; III: Agua $\text{HCO}_3\text{>Cl-Na}$; IV: Agua $\text{HCO}_3\text{-Ca>Na}$; V: Agua $\text{SO}_4\text{-Ca}$ de mayor mineralización; VI: Agua $\text{SO}_4\text{>HCO}_3\text{-Ca}$; VII: Agua $\text{SO}_4\text{-Ca>Na}$; VIII: Agua $\text{SO}_4\text{>HCO}_3\text{-Ca>Na}$. (Los números decimales representan la proporción en que ocurren las mezclas).

CONCLUSIONES

Las principales regularidades geoquímicas encontradas en las aguas que emergen a diferentes profundidades en los acuíferos de la Sierra del Rosario fueron las siguientes:

En la zona de descarga de los flujos locales prima un ambiente oxidante, el pH depende de la del tipo de roca drenada, la cantidad de CO_2 disuelto depende del pH, siendo mayor cuando



este último es más bajo, y en correspondencia las aguas son de tipo $\text{HCO}_3\text{-Mg}$ (rocas ultrabásicas), $\text{HCO}_3\text{-Na}$ (silicatos ácidos o neutros) o $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ (calizas); la mineralización y los contenidos iónicos son bajos. Su composición absoluta varía con las precipitaciones.

En las emergencias procedentes de los flujos intermedios el ambiente es más reductor que en las que proceden de flujos locales, el pH es más bajo y son más elevados los contenidos iónicos y de CO_2 disueltos y la mineralización. Los tipos de aguas y procesos geoquímicos suelen ser similares a los de los flujos locales y las aguas presentan una mayor estabilidad en su composición.

Las aguas de las emergencias procedentes de flujos regionales, generalmente asociadas a fracturas y fallas, que drenan diferentes tipos de litología, se caracterizan por presentar condiciones reductoras, así como pH más bajos y contenidos de CO_2 más elevados que las de los flujos locales e intermedios. Poseen mayor mineralización y contenido de iones disueltos. Suelen poseer también componentes minoritarios en proporciones apreciables. Los principales patrones hidrogeoquímicos corresponden a aguas $\text{SO}_4\text{-Ca}$, $\text{SO}_4 > \text{HCO}_3\text{-Ca}$, $\text{HCO}_3\text{-Na}$, así como $\text{HCO}_3\text{-Mixtas}$ y $\text{SO}_4\text{-Mixtas}$. La composición química absoluta es muy estable. Por lo general se encuentran saturadas o sobresaturadas a la calcita y la dolomita y en ocasiones tienden a la saturación al yeso.

En las zonas no saturada, saturada y de saturación y circulación profunda de los acuíferos carbonatados existen aguas de los tipos bicarbonatadas cálcicas, bicarbonatadas cálcicas sulfhídricas y sulfatadas cálcicas sulfhídricas respectivamente, estas últimas con propiedades mineromedicinales. El origen de la composición química de estas aguas se debe a la ocurrencia de procesos de disolución congruente de calcita, dolomita y halita; a la disolución incongruente de albita y microclino; a procesos de redox que implican oxidación de pirita y reducción parcial de sulfatos; así como de procesos de generación biogénica de CO_2 y de precipitación de sílice, especialmente en la zona más profunda. Mientras que los procesos microbiológicos que producen CO_2 y reducción de sulfato son más intensos en los acuíferos más someros, la oxidación de pirita es mayor en los acuíferos más profundos, originando una disolución adicional de los minerales carbonatados y silícicos.

Los principales procesos geoquímicos que explican la composición química de las aguas que drenan los acuíferos constituidos por silicatos son: disolución de serpentina, albita, microclino y anorthita, así como oxidación de pirita. La halita sólo se disuelve en las zonas más profundas de ambos tipos de acuíferos, la serpentina intemperiza en mayor proporción en la zona menos profunda de los acuíferos desarrollados en rocas ultrabásicas y en la más profunda de los acuíferos desarrollados en esquistos y areniscas. Los restantes minerales intemperizan principalmente en las zonas más profundas de ambos tipos de litología.

La composición química de las aguas minerales del sistema hidrotermal San Diego de los Baños – Bermejeles son fundamentalmente de tipo sulfatadas cálcicas y sulfatadas bicarbonatadas cálcicas, aunque también existen aguas del tipo bicarbonatadas sódicas, en casi todos los casos sulfuradas. Se origina mediante un proceso de mezcla de tres miembros extremos de composición bicarbonatada cálcica, bicarbonatada sódica y sulfatada cálcica, procedentes los dos primeros de acuíferos desarrollados en calizas y sedimentos esquistos arenosos de las formaciones Artemisa y San Cayetano respectivamente, y el tercero de un acuífero profundo que almacena aguas de tipo hidrotermal. Estas mezclas producen a su vez, modificaciones en la composición química debidas a procesos geoquímicos complejos, principalmente: disolución de halita y dolomita, precipitación de calcita, transferencia de masas entre caolinita y albita y caolinita y microclino, oxidación de pirita, reducción de sulfato,



formación de azufre a partir de H_2S , precipitación de cuarzo y liberación de CO_2 al medio. Con menos frecuencia se produce: disolución de calcita y disolución incongruente de albita y microclino.

BIBLIOGRAFIA

- Appelo C. A. J. and D. Postma (1993). "Geochemistry, Groundwater and Pollution". Ed. Balkema, Rotterdam, Netherlands, 536 Págs.
- APHA – AWWA – WPCF (1992). "Métodos Normalizados para el análisis de Aguas Potables y Aguas Residuales, Am. Public Assoc., Edición 17th. Editorial Grijalbo (Madrid), 4-1 – 4-235.
- Armijo-Valenzuela, M. y J. San Martín (1994). "Curas Balnearias y Climáticas. Talasoterapia y Helioterapia". Ed. M. Armijo-Valenzuela y J. San Martín, Universidad Computense, Madrid, 183-194.
- Drever, J. I. (1982). "The Geochemistry of Natural Waters". Ed. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 430 Págs.
- Embil, J. (1946). "La fotólisis del hidrógeno sulfurado en las aguas de San Diego de los Baños". Archivos del Instituto Nacional de Hidrología y Climatología Médicas, Año I, No 4, 17-20.
- Fagundo, J.R., J. J. Valdés y J. E. Rodríguez (1996). "Hidroquímica del Karst". En: Libro de Comunicaciones. I Taller Internacional sobre Cuencas Experimentales en el Karst. Ediciones Osuna, Granada (España), 212 Págs.
- Fagundo, J.R., P. González, M. Suárez, J. Fagundo-Sierra, C. Melián y M. Llerena (2000a). "Origen de la composición química de las aguas naturales y minerales procedentes de acuíferos carbonatados de la Sierra del Rosario". En: "Contribución a la Educación y la Protección Ambiental". Editorial Academia, ISBN 959-02-02535. Vol. 1, 198-203.
- Fagundo, J.R., P. González, M. Suárez, J. Fagundo-Sierra, C. Melián, M. Llerena y L. Sánchez (2000b). "Origen de la composición química de las aguas naturales y minerales procedentes de acuíferos no carbonatados de la Sierra del Rosario". En: "Contribución a la Educación y la Protección Ambiental". Editorial Academia, ISCTN 959-02-02535. Vol. 1, 204-210.
- Fagundo-Sierra, J., J.R. Fagundo, P. González, M. Suárez (2001). "Modelación de las aguas naturales". En: Memorias del VII. Taller de la Cátedra de Medio Ambiente, ISCTN, La Habana. ISBN 959-7136-13-9 (en soporte electrónico).
- Guerra, J. (1947a). "Balneario San Diego de los Baños: determinación de la radiactividad (contenido de Radón y Radio) en las aguas de San Diego de los Baños". Archivos del Instituto Nacional de Hidrología y Climatología Médicas, Año I, No 3, 54-57.
- Guerra, J. (1947b). "Determinación de la radiactividad (contenido de Radón y Radio) en las aguas y en el aire". Archivos del Instituto Nacional de Hidrología y Climatología Médicas, Año I, No 4, 45-47.
- Gutiérrez, R. y M. R. Glean (1999). "Regiones Naturales de la Isla de Cuba". Ed. Científico Técnica. Ciudad de la Habana, 145 Págs.
- Hidalgo, D., F. López-Vera, C. Gómez y J. A. Iglesias (1997). "Balance de masas a lo largo de las aguas subterráneas del acuífero cástico de Torrelaguna". I Congreso Ibérico de Geoquímica, VII Congreso de Geoquímica de España. Ed. CEDEX, Soria (España), 375-383.
- Peláez, R., Ma. de la C. Olivárez, R. Núñez y M. Valdivia (1990). "Informe para la búsqueda detallada – exploración orientativa de las aguas minero – medicinales de San Diego – Bermejales". Unión Geológica (Fondo Geológico Nacional), MINBAS, Cuba, 159 Págs.
- Pszczolkowski A. (1978). "Geosynclinal sequences of the Cordillera de Guaninuanico in Western Cuba, their lithostratigraphy, facies development and paleogeography". Acta Geologica Polonica (Varsovia, Polonia), 28 (1) : 1-98.
- Schoeller, H. (1962). "Les eaux souterraines". Ed. Masson, Paris.
- Trelles, F. (1948). "Estudio químico de la radiactividad (contenido de Radón) de los manantiales Los Bermejales en la Provincia de pinar del Río". Archivos del Instituto Nacional de Hidrología y Climatología Médicas, Año II, No 1, 59-61.



THE HYDROGEOLOGY OF THE MIOCENE – PLIOCENE ROCKS OF THE PIEDMONT OF THE CORDILLERA CENTRAL, NORTHWESTERN DOMINICAN REPUBLIC

Andrew J. Coleman, Ph.D., EPRI, Palo Alto, CA
Joseph W. Troester, Ph.D., USGS, Guaynabo, PR
Robert C. Mastice, Tri-Power Consulting, NY, NY

A humanitarian effort, including a hydrogeologic reconnaissance expedition to the piedmont of the northwestern Dominican Republic, was conducted in July 2002 between the latitude of 71°25'W to 71°30'W and longitude 19°24'N to 19°36'N within the Martín García quadrangle. The towns of Los Amanceyes and Cabeza de Toro were visited to determine how to effectively better serve the potable water demand in this extremely arid region. These two communities are located at about 100 meters above mean sea level in the northwest portion of the Martín García quadrangle in northwestern Dominican Republic. At present the people in these two communities obtain their water from nearby rivers or ponds. This water, however, is contaminated with bacteria. Previous attempts to drill and install water wells in the vicinity of these two communities have either failed to produce water or have produced water that was too hard to be acceptable due to a poor interpretation of the geology of the region. The geological reconnaissance resulted in mapping the geology of a thin sequence of Miocene-Pliocene clastics known regionally as the Gurabo Formation. Regional tilt of the Gurabo limestones and unconsolidated sandstones provides evidence for future placement and installation of water wells down dip of the suspected regional flow of groundwater, which starts in the piedmont and flows to the south in the field study area. No neotectonic evidence was found to have contributed to the approximate 9°NE tilt of the clastic rocks of this area. It was determined that the Cretaceous Amina Schist unconformably underlies the thin sequence of clastic rocks in the field area and is not a major aquifer bearing formation in the area.



MODELO HIDROGEOFÍSICO DE LA CUENCA SUR DE LA HABANA: NUEVOS APORTES.

Dr. Rosa María Valcarce Ortega, MSc. y Dr. Willy R. Rodríguez Miranda, MSc.

Departamento de Geociencias – CUJAE. Calle 127 s/n, Apartado 6028, Habana 6, Marianao, Ciudad de La Habana, Cuba.

Email: rosy@tesla.ispjae.edu.cu, willy@civil.ispjae.edu.cu.

RESUMEN

Se presentan relaciones empíricas entre parámetros geofísicos de pozo y parámetros hidráulicos, no reportadas en investigaciones anteriores, obtenidas después de re-interpretar la información aportada por registros geofísicos de pozo en 14 calas del acuífero cársico Cuenca Sur de La Habana. Los resultados más significativos son los siguientes:

- ♦ Se identifican pozos donde existe correlación directa, y otros donde existe correlación inversa, entre la velocidad del flujo del agua subterránea y la radiactividad gamma natural. Ello evidencia la presencia de, al menos, dos modelos colectores diferentes.
- ♦ Los parámetros de Dar Zarrouk pueden correlacionar indistintamente con la transmisividad del acuífero, en dependencia de la relación existente entre la conductividad eléctrica y la conductividad hidráulica del acuífero.
- ♦ Cuando en el área de estudio el producto de la conductividad hidráulica y de la conductividad eléctrica es aproximadamente constante, la relación entre resistividad eléctrica transversal y transmisividad del acuífero es más significativa. Cuando es el cociente entre estos parámetros el que presenta poca variabilidad la correlación es más significativa entre la conductividad eléctrica longitudinal y la transmisividad hidráulica.
- ♦ Se obtienen ecuaciones de regresión lineal múltiple que permiten estimar la velocidad del flujo de las aguas subterráneas a partir de la radiactividad gamma natural y la resistencia eléctrica transversal; o a partir de la radiactividad gamma natural y la conductancia eléctrica longitudinal del acuífero. Ello dependerá de la relación existente entre permeabilidad e intensidad gamma natural.

Estas relaciones contribuyen a elaborar un modelo hidrogeofísico del acuífero que permite elevar el poder resolutivo de los métodos geofísicos en las investigaciones hidrogeológicas de acuíferos cársicos.

Palabras claves: hidrogeológicas, métodos geofísicos de pozo, Dar Zarrouk.

ABSTRACT

Empirical relationships are presented between geophysical parameters of well and hydraulic parameters, not reported in previous investigations, obtained by interpreting the information contributed by geophysical log in 14 wells of the aquifer Cuenca Sur de La Habana. The most significant results are the following ones:

- ♦ Are identified wells where direct correlation exists and others where inverse correlation exists, between the speed of the flow of the groundwater and the radioactivity natural gamma. These evidence the presence of, at least, two different collector's model.
- ♦ The parameters of Dar Zarrouk can correlate indistinctly with the transmissivity of the aquifer, in dependence of the existent relationship between the electric conductivity and the hydraulic conductivity of the aquifer.
- ♦ When in the study area the product of the hydraulic conductivity and of the electric conductivity it is approximately constant, the relationship between transverse electric resistivity and transmissivity of the



aquifer is more significant. When it is the quotient among these parameters the one that presents little variability the correlation is more significant between the longitudinal electric conductivity and the hydraulic transmissivity.

- ♦ Is obtained multiple lineal regression that allow estimating the flow velocity of groundwater. These equations are obtained from the radioactivity natural gamma and the transverse electric resistance; or from the radioactivity natural gamma and the longitudinal electric conductivity of the aquifer. These equations will depend it on the existent relationship between permeability and intensity natural gamma.

These relationships contribute to elaborate the hydrogeophysics model of the aquifer that allows elevating the resolutely power of the geophysical methods in the hydrogeologicals investigations of karstic aquifers.

Key words: hydrogeological, well geophysical methods, Dar Zarrouk.

Introducción.

El conocimiento de la distribución espacial de los parámetros hidráulicos de un acuífero, es esencial para optimizar los programas de explotación y para definir estrategias de protección y remediación de la calidad de las aguas subterráneas.

La interpretación de las pruebas de bombeo como función del tiempo, son procedimientos clásicos para la estimación de los parámetros del acuífero, pero estos resultados brindan valores promedios para grandes volúmenes del medio poroso. A través de las pruebas de bombeo no es posible estudiar la variabilidad estructural del acuífero, lo cual resulta muy necesario para resolver eficientemente muchos problemas hidrogeológicos (Lima y Niwas, 2000). Las mediciones geofísicas de superficie y de pozo brindan un mayor poder resolutivo en este sentido. La tortuosidad y porosidad de las rocas controlan el flujo de corriente eléctrica así como el flujo de agua subterránea, es decir, controlan la conductividad eléctrica y la conductividad hidráulica del medio geológico. A partir de esta similitud, se han desarrollado un gran numero de relaciones empíricas para correlacionar parámetros geofísicos y parámetros hidráulicos (Kelly, 1977; Kosinski y Kelly, 1981). Sri Niwas y Shingal (1981; 1985) desarrollaron una relación analítica entre conductividad hidráulica y resistividad eléctrica a través de las conocidas Ley de Darcy y Ley de Ohm en medios homogéneos. Estos resultados suministran la base físico - matemática de las relaciones estadísticas, que han sido obtenidas fundamentalmente en medios porosos intergranulares no arcillosos.

Lima y Niwas (2000), desarrollaron un procedimiento para estimar la permeabilidad de areniscas arcillosas a partir de registros eléctricos de pozo y de superficie.

Purvance y Andricevic (2000), demuestran teórica y experimentalmente que la conductividad eléctrica y la conductividad hidráulica de los acuíferos pueden ser correlacionadas. Estos autores demuestran que existe correlación lineal simple log - log positiva entre la conductividad eléctrica e hidráulica cuando el flujo eléctrico está definido por el volumen de poros, mientras que la correlación será negativa cuando el flujo eléctrico es dominado por la superficie de los poros.

Valcarce (1998) estudia las correlaciones estadísticas entre parámetros geofísicos de pozo y parámetros hidrodinámicos en el acuífero cársico Cuenca Sur de La Habana. Teniendo en cuenta la elevada heterogeneidad y anisotropía del medio cársico, la autora aplica técnicas de reconocimiento de patrones con autoaprendizaje sobre las capas definidas por la interpretación de los registros geofísicos de pozo, logrando conformar 10 grupos litogeofísicos de composición



relativamente homogénea, caracterizados por los valores medios de resistividad eléctrica (R_t), resistencia transversal (RT), conductancia longitudinal (S), factor de formación (F), y radiactividad gamma natural (I_g). Para cada uno de estos grupos también se calculó la media de la velocidad de filtración del agua subterránea (V_f) obtenida de la interpretación del método de dilución de sal en pozo. El estudio de la correlación estadística entre los valores medios de estos parámetros para los 10 grupos definidos, reflejó como tendencia general, que el incremento de la intensidad gamma natural se relaciona con una disminución de la permeabilidad del acuífero; y que la conductancia longitudinal es el parámetro más efectivo para explicar el comportamiento de los parámetros hidrodinámicos, variando de forma directamente proporcional con la trasmisividad del acuífero, según un modelo de regresión logarítmico lineal positivo.

En el presente trabajo se profundiza en los resultados descritos anteriormente para la Cuenca Sur de La Habana, y se obtienen nuevas relaciones entre parámetros geofísicos e hidrodinámicos que reflejan mejor las heterogeneidades del medio cársico.

Características geológicas de la Cuenca Sur de La Habana.

La región estudiada se encuentra ubicada al sur de la provincia La Habana, como puede verse en la Figura 1.

Los pozos profundos perforados en la zona sur de La Habana, revelan que el corte está compuesto por dos unidades geológicas principales: el cinturón o sustrato plegado y el neoautóctono.

Al cinturón plegado pertenecen las rocas del arco volcánico de edad Aptiano - Campaniano, compuesto por rocas efusivas y vulcano - clásticas, con una composición thoeolítica - calcoalcalina, a los que sobreyacen rocas de las "piggy back basins" de edad Campaniano - Eoceno Medio, compuesto por sedimentos clásticos suavemente deformados y rocas carbonatadas (grauvacas y calizas). En el componente clástico de estas rocas hay fragmentos del arco volcánico y de ofiolitas.

Al neoautóctono pertenecen las secuencias de edad Eoceno Superior a Mioceno, de composición carbonatada, terrígeno y terrígeno carbonatada.

El acuífero Cuenca Sur de La Habana, está formado, casi íntegramente, por rocas de la Formación Güines, la cual yace concordantemente sobre la Formación Cojímar, y en algunos casos, sobre la Formación Husillos.

La dirección del flujo del agua subterránea es desde el centro de la provincia hacia el sur, o sea, desde la zona de alimentación hacia el mar, con variaciones en dependencia de las condiciones hidrogeológicas locales. El nivel de las aguas subterráneas va disminuyendo hacia la costa, donde llega a la superficie formando una extensa franja cenagosa de 2 a 5 km de ancho.

Materiales empleados.

Se procesaron un total de 14 pozos de la Cuenca Sur de La Habana. A partir de la interpretación geofísica de los registros gamma natural y resistividad eléctrica, fueron delimitadas 215 capas litogeofísicas, que quedaron caracterizadas por sus valores de I_g , R_t , RT , S ; así como por sus valores de V_f , K_f (coeficiente de filtración) y T (trasmisividad), a partir de la interpretación del método de dilución de sal. A su vez, cada pozo fue caracterizado por la



media ponderada de estos parámetros, tomando como factor de peso el espesor de las capas delimitadas.

Relación entre Ig y Vf.

Para cada pozo se estudió la relación existente entre la intensidad gamma (Ig) y la velocidad de filtración del agua subterránea (Vf). Los resultados se muestran en la Tabla 1.

Pozo	N	R [Vf vs Ig]
TS-110	8	-0.60
TS-106	12	-0.21
TS-E1E2	11	0.28
TS-3	10	-0.55
TS-5	13	-0.53
TS-121	14	0.60 (*)
Cala 2 - Alquizar	11	0.72 (*)
I-II-9K	22	0.45 (*)
I-II-21K	17	-0.33
I-II-16K	14	0.25
TS-45	22	-0.30
40-MSN	25	-0.72 (*)
TS-38	18	0.05
TS-125	14	-0.53 (*)

Tabla 1: Correlaciones estadísticas entre Ig y Vf para cada pozo.
(*) correlaciones significativas para un 95% de probabilidad.

Se destaca la presencia de pozos donde existe correlación positiva y otros donde existe correlación negativa entre Ig y Vf.

Se estudió la correlación entre la media ponderada de Ig y Vf entre los pozos que presentan modelo de regresión directa e inversa entre ambos parámetros. Los resultados se muestran en la Tabla 2.

Relación entre Ig y Vf	N	Coefficiente de Correlación
Inversa	8	-0.7 (*)
Directa	5	0.82 (*)

Tabla 2: Correlación entre la media ponderada de Ig y Vf.
(*) correlaciones significativas para un 95% de probabilidad.



Relación entre Trasmisividad del acuífero y Parámetros de Dar Zarrouk.

Para cada pozo se estudió la correlación entre la Trasmisividad del acuífero, obtenida de la interpretación del método de dilución de sal en pozo, y los parámetros de Dar Zarrouk, obtenidos de la interpretación del registro eléctrico. Los resultados se presentan en la Tabla 3.

Pozo	N	log (T) vs log (RT)	log (T) vs log (S)
TS-110	8	<u>0.73 (*)</u>	0.06
TS-106	12	0.13	<u>0.62 (*)</u>
TS-E1E2	11	0.46	<u>0.71 (*)</u>
TS-3	10	<u>0.88 (*)</u>	<u>0.77 (*)</u>
TS-5	13	<u>0.74 (*)</u>	<u>0.95 (*)</u>
TS-121	14	<u>0.62 (*)</u>	0.11
Cala 2 - Alquizar	11	0.65	<u>0.82 (*)</u>
I-II-9K	22	<u>0.61 (*)</u>	0.37
I-II-21K	17	<u>0.58 (*)</u>	0.2
I-II-16K	14	<u>0.62 (*)</u>	<u>0.81 (*)</u>
TS-45	22	<u>0.5 (*)</u>	<u>0.62 (*)</u>
40-MSN	25	<u>0.57 (*)</u>	<u>0.58 (*)</u>
TS-38	18	<u>0.57 (*)</u>	<u>0.6 (*)</u>
TS-125	14	<u>0.8 (*)</u>	0.18

Tabla 3: Correlación entre trasmisividad del acuífero y parámetros de Dar Zarrouk para cada pozo.

(*) correlaciones significativas para un 95% de probabilidad.

En la tabla anterior se han subrayado, para cada pozo, en qué caso se obtiene mayor coeficiente de correlación con la trasmisividad del acuífero. En este sentido se pudo comprobar que el incremento del coeficiente de variación del cociente K_f/R_t , provoca que disminuya la correlación entre T y R_t . Por otro lado, el incremento del coeficiente de variación del producto $K_f \cdot R_t$, hace que disminuya la correlación entre T y S. Ello coincide con lo reportado por Yadav (1995), en acuíferos intergranulares.

Lo anterior se demuestra en la Tabla 4, que presenta la correlación entre $V(K_f/R_t)$ (coeficiente de variación de K_f/R_t) y el coeficiente de correlación entre T y R_t ; así como entre $V(K_f \cdot R_t)$ (coeficiente de variación de $K_f \cdot R_t$) y el coeficiente de correlación entre T y S.



Relación	N	Coefficiente de Correlación
V(Kf/Rt) vs r(T-RT)	14	-0.63 (*)
V(Kf*Rt) vs r(T-S)	14	-0.67 (*)
V(Kf/Rt) vs r(T-S)	14	0.0
V(Kf*Rt) vs r(T-RT)	14	0.37

Tabla 4: Correlación entre la variabilidad de las relaciones entre Kf y Rt y el coeficiente de correlación de la transmisividad y los parámetros de Dar Zarrouk.
(*) correlaciones significativas para un 95% de probabilidad.

Modelos de correlación múltiple.

Es muy importante señalar que para aquellos pozos donde existe correlación negativa entre Ig y Vf, se obtuvo el siguiente modelo de correlación lineal múltiple:

$$V_f = 8.02 - 0.61 \log(I_g) - 0.46 \log(S) \quad R = 0.83 \quad N = 7$$

Para los pozos que presentan correlación positiva entre Ig y Vf, el modelo de regresión lineal múltiple fue el siguiente:

$$V_f = 2.43 + 0.9 \log(I_g) + 0.43 \log(RT) \quad R = 0.97 \quad N = 5$$

Conclusiones.

- ♦ Se identifican pozos donde existe correlación directa, y otros donde existe correlación inversa, entre la velocidad del flujo del agua subterránea y la radiactividad gamma natural. Ello evidencia la presencia de, al menos, dos modelos colectores diferentes.
- ♦ Los parámetros de Dar Zarrouk pueden correlacionar indistintamente con la transmisividad del acuífero, en dependencia de la relación existente entre la conductividad eléctrica y la conductividad hidráulica del acuífero.
- ♦ Cuando en el área de estudio el producto de la conductividad hidráulica y de la conductividad eléctrica es aproximadamente constante, la relación entre resistividad eléctrica transversal y transmisividad del acuífero es más significativa. Cuando es el cociente entre estos parámetros el que presenta poca variabilidad, la correlación es más significativa entre la conductividad eléctrica longitudinal y la transmisividad hidráulica. Este resultado tiene gran importancia desde el punto de vista práctico.
- ♦ Se obtienen ecuaciones de regresión lineal múltiple que permiten estimar la velocidad del flujo de las aguas subterráneas a partir de la radiactividad gamma natural y la resistencia eléctrica transversal; o a partir de la radiactividad gamma natural y la conductancia eléctrica longitudinal del acuífero. El comportamiento del coeficiente de variación de las relaciones entre permeabilidad e intensidad gamma natural, definirá cuál debe ser el modelo más significativo.



- ♦ El estudio de las relaciones entre parámetros geofísicos e hidráulicos, contribuye a elevar el poder resolutivo de los métodos geofísicos y a la solución de tareas geológicas de forma más eficiente desde el punto de vista técnico y económico.

Referencias Bibliográficas.

- Kelly, W.E., 1997: Geoelectric sounding for estimating aquifer hydraulic conductivity. *Ground Water*. Vol. 15 (16).
- Kosinsky, W.K. y W.E. Kelly, 1981: Geoelectric sounding for predicting aquifer properties. *Ground Water*. Vol. 19 (2).
- Lima, O. A. L. And S. Niwas, 2000: Estimation of hydraulic parameter of shaly sandstone aquifers from geoelectric measurements. *Journal of Hydrology*. Vol. 235 (12-26).
- Nivas, S. And D. C. Singhal, 1985: Aquifer trasmissivity of porous media from resistivity data. *Journal of Hydrology* (82).
- Niwas, S. And D. C. Singhal, 1981: Estimation of aquifer trasmissivity from Dar Zarrouk parameters in porous media. *Journal of Hydrology*. Vol. 50 (393-399).
- Purvance, D. T. And R. Andricevic, 2000: On the electrical - hydraulic conductivity correlation in aquifers. *WRR*, Vol. 36, No. 10 (2905-2913).
- Yadav, G.S., 1995: Relating hydraulic and geoelectric parameters of the Jayant aquifer, India. *Journal of Hydrology* (167).
- Valcarce, R. M., 1998: Evaluación de las propiedades hidrogeológicas de acuíferos cársicos empleando un complejo mínimo de registros geofísicos de pozo. Tesis de Doctora en Ciencias Técnicas, CUJAE, Ciudad de La Habana, Cuba.

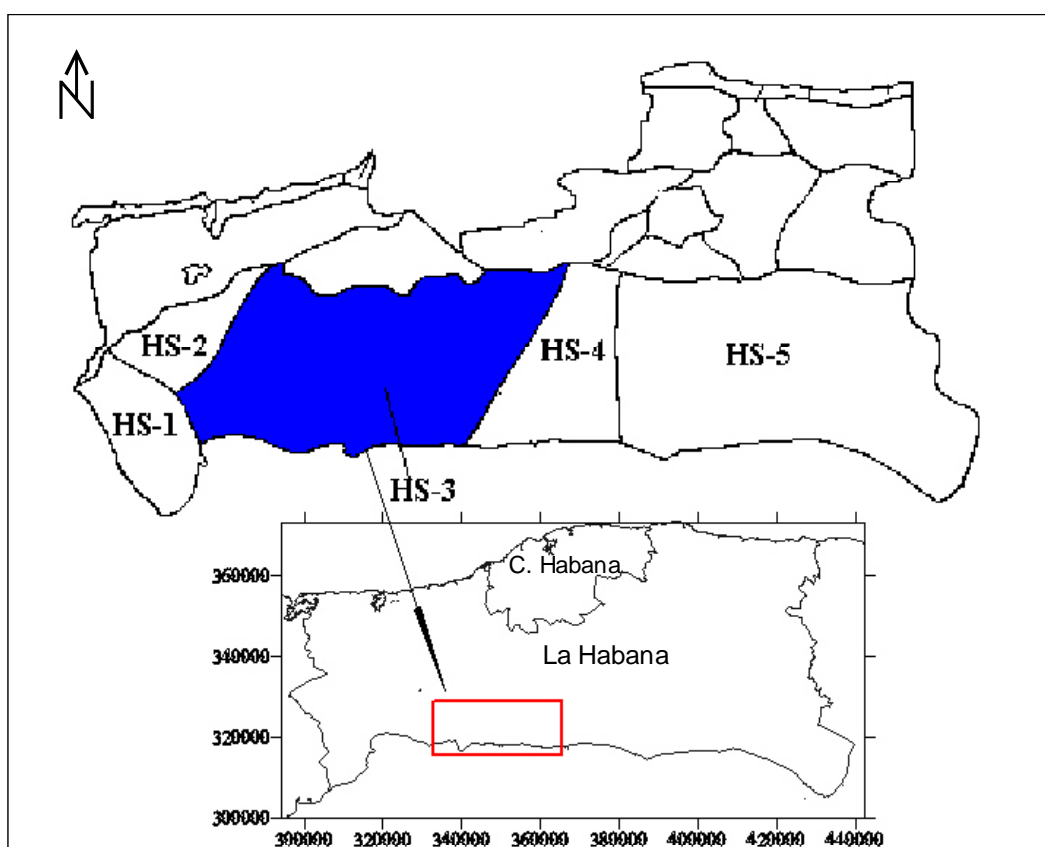


Figura 1. Ubicación de la zona de estudio



CRITERIOS DE SELECCIÓN DEL FACTOR DE SEGURIDAD PARA EL PRONÓSTICO DE OCURRENCIA DE DESLIZAMIENTOS DE TALUDES.

Ernesto Rocamora Álvarez

*Grupo de Aguas Terrestres del Instituto de Geofísica y Astronomía
Calle 212 #2609 e/ 29 y 31, La Lisa, Ciudad de La Habana, Cuba
Telef. (53 7)2714331, 2710644. FAX. (53 7)339497. Email: rocamora@iga.cu*

RESUMEN

El análisis para la selección del factor de seguridad en el pronóstico de movimientos de masas en taludes, lo hemos adaptado a varios criterios muy relacionados con los aspectos en que se basa el procedimiento de pronóstico, destacándose, la representatividad de las investigaciones de campo, la anisotropía del medio, el tipo de rotura parcial o total esperada del talud, los criterios de rotura progresiva y la acción de las cargas sobre el macizo.

En el caso de las investigaciones de campo, se ha dirigido a identificar puntos de debilidad o litotipos, los cuales dentro de un criterio de homogeneidad del macizo puedan condicionar superficies de deslizamiento, incluyendo los taludes de rocas carsificadas.

La probabilidad de ocurrencia de la rotura parcial o total del talud y el criterio de la rotura progresiva, incorpora un análisis más integral, desde considerar la rotura asociada a un determinado ángulo de inclinación hasta la variación de los parámetros de c y φ de los materiales que conforman el macizo. Asimismo, partiendo de la resistencia pico y residual de los materiales, se identifican las condiciones de equilibrio del macizo y a estimaciones de la posible existencia de paleosuperficies de deslizamientos.

Sobre la acción de las cargas, se hace énfasis en el tiempo de actuación de las mismas sobre el talud, considerando que a largo plazo, el factor de seguridad puede incrementarse hasta en un 30%.

ABSTRACT

The selection of the safety factor in the forecast analysis of slope mass movement, has been adapted following several approaches highly accounting for the forecast itself like the representative ness of the field investigations, the partial or total slope failure, the progressive failure approaches and of the action loads on the massif.

In the field investigations, it is addressed to identify the weakness points or lithotypes, including the karstic rocks slope, which can control the occurrence of slip surfaces in the massif.

The probability of occurrence of partial or total slope failure and the progressive failure approach, incorporate a more integral analysis, considering the associated to a specific slope failure angle and the variation of the parameters C and φ of the forming materials. According to the peak and residual resistance of the materials, the balance conditions are identified to estimates the possible existence of slide ancient surfaces.

Concerning the action of loads, emphasis is addressed to the performance time on the slope, considering that at long term, the safety factor can be increased up to 30%.



Introducción

El cálculo de la estabilidad de un talud o ladera, conformado por una excavación o un terraplén, permite sintetizar en un solo concepto, el factor de seguridad (FS), la seguridad global de ese talud. No obstante, la selección y adopción del FS como único parámetro representativo de la garantía frente a la rotura puede falsear la realidad.

De este análisis global para determinar el FS más adecuado en cada caso, se desprende la necesidad de la Ingeniería Geotécnica de tener en cuenta un conjunto muy diverso de factores y aspecto que influyen sobre este criterio, estableciéndose una serie de aproximaciones e incertidumbres que reflejan la complejidad de las propiedades y condiciones de los materiales que conforman el macizo.

Este criterio de selección ha constituido el punto de partida para incorporar el FS en el pronóstico de ocurrencia de deslizamientos en taludes y laderas.

El procedimiento de pronóstico (Rocamora et, al. 2001) analiza al FS como uno de los aspectos de evaluación de la posibilidad de ocurrencia del fenómeno, a partir de factores tales como: la representatividad de las investigaciones de campo, la anisotropía del medio, el tipo de rotura parcial o total esperada y la acción de las cargas sobre el macizo.

Términos de referencia

Si bien en los métodos de cálculo de estabilidad siempre se sugiere un criterio de selección del FS sin tabulaciones ni sugerencias del investigador, en el caso del pronóstico, este criterio estará aún más dependiente del análisis de las condiciones de estado del macizo.

La inclusión del FS como un criterio en los análisis de pronóstico, es un tema totalmente novedoso, que tiene como objetivo establecer una vía más de evaluación, permitiendo así, profundizar en cuestiones de primer orden de la estabilidad de laderas y taludes.

Para los cálculos del FS, se recomienda un modelo bidimensional simplificado (Hoek y Bray, 1977) que si bien solamente considera las fuerzas de equilibrio y asume que todas las fuerzas pasan a través del centroide del esquema modelado, el error que esto introduce es insignificante si consideramos otros datos que se incluyen para el cálculo.

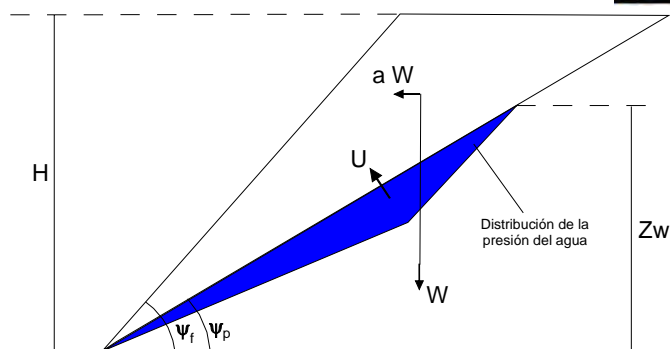
Así, se tiene en cuenta el cálculo del FS para un talud o ladera sin grieta de tensión y con ella, además de las presiones intersticiales por el agua en el macizo (Fig. 1).

Obtenido el FS para las condiciones escogidas, se dispone de un valor de partida sobre la estabilidad global del talud, que si bien representa a un método directo de análisis, para ser utilizado en el pronóstico solo se considera como un indicador inicial, sobre el que influirán todos los criterios de selección hasta alcanzar un valor que represente a las condiciones de pronóstico. Los rangos de análisis para ese valor inicial son los que tradicionalmente se utilizan en los métodos de cálculo de estabilidad, donde $FS = 1$ es la condición límite y un $FS > 1.5$ es suficientemente estable.



A- sin grieta de tensión

$$FS = \frac{c.A + (W (\cos \psi_p - a.\sin \psi_p) - U). \tan \varphi}{W (\sin \psi_p + a.\cos \psi_p)}$$



B- con grieta de tensión

$$FS = \frac{c.A + (W (\cos \psi_p - a.\sin \psi_p) - U - V.\sin \psi_p). \tan \varphi}{W (\sin \psi_p + a.\cos \psi_p) + V.\cos \psi_p}$$

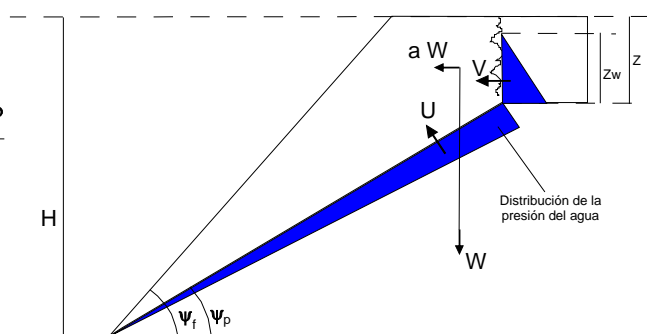


Figura 1- Modelo de cálculo del FS en el procedimiento de pronóstico

Análisis de los criterios de selección

Sin pretender que el orden en que se exponen indique prioridades o una importancia decreciente, a continuación se describen los aspectos que se recomiendan tener en cuenta para definir el FS que será llevado al procedimiento de pronóstico de la estabilidad de los taludes o laderas.

- *Representatividad de las investigaciones de campo y anisotropía del medio:* La intensidad del reconocimiento de campo y la efectividad de los métodos de investigación, resultan elementos de los cuales dependerán la calidad de los parámetros y las condiciones de estado del macizo, a partir de los cuales se calcula el FS.

En este sentido es importante considerar el criterio, que para estos estudios, las observaciones de campo son más representativas de la realidad que los ensayos de laboratorio, especialmente en los taludes de rocas. Los parámetros físico-mecánicos que intervienen en los cálculos del FS, son la cohesión (C), ángulo de fricción interna (φ) y la densidad húmeda natural (γ_f); y su determinación en el laboratorio es muy compleja en caso de macizos heterogéneos, teniendo en cuenta las dificultades para un correcto muestreo en el campo, lo que implica que los ensayos se realicen a las muestras mejores obtenidas, pero menos representativas de las condiciones de estado natural.

Se pueden citar como ejemplo, las formaciones geológicas representadas por intercalaciones de estratos de rocas y materiales terrígenos (Fm. Nazareno, Tinguaro, etc), donde los planos de



deslizamiento se asocian a los contactos entre estratos, siendo los sectores menos conservados en el muestreo y casi imposible de ensayar por los métodos tradicionales de laboratorio. Para las condiciones más desfavorables, la cohesión de estas superficies de contacto puede estar en el orden de 0.4-0.7 C de la capa más blanda (Rocamora, 1994) y además, ser la vía de flujos de aguas subterráneas en el macizo. En nuestro procedimiento de pronóstico, estos aspectos adquieren peso informativo dentro de los factores de evaluación de la estabilidad a partir de la clasificación geomecánica de Bieniawski ajustada, y la cual a su vez cuantifica el valor reductor de la C y para la determinación del FS.

Asimismo, los materiales terrígenos que yacen en estratos de poco espesor (Fm. Capdevila, Vía Blanca, etc), por lo general aparecen con $C > 0$ y $\varphi > 0$ para toda la capa, sin embargo muchos movimientos de masas que ocurren en estos macizos se asocian a capas puramente friccionables con $C = 0$ y $\varphi > 0$. Esta problemática es muy difícil de modelar en el laboratorio, por las condiciones de yacencia de los estratos en la muestra, el espesor de las capas o la precisión del equipamiento utilizado; y para lo cual las observaciones de campo constituyen una mejor aproximación al comportamiento de estos materiales y la definición de los parámetros de C y φ modificados.

En macizos de rocas carsificadas, la representatividad de las condiciones de estado del macizo por las propiedades de los materiales es crítica. El muestreo y ensayo de estos materiales comúnmente conduce a errores que van a falsear el cálculo directo del FS:

1. Por lo general, las magnitudes de la resistencia a la compresión axial (R), son valores característicos de la matriz rocosa sin considerar las oquedades cársticas.
2. Asimismo, las grietas o las familias de grietas son parcial o totalmente excluidas de las probetas de ensayo para los parámetros de resistencia.
3. Estos errores inducen a que comúnmente se observen, para una misma muestra, que sus valores de R seca sean menores que los de R saturada, lo cual no es un fenómeno característico de estos de rocas; o que la R seca \gg R saturada lo que puede interpretarse incorrectamente como rocas ablandables.

Las acumulaciones de materiales granulares que yacen en las superficies del talud o ladera, son generalmente no consideradas en los cálculos de estabilidad, o sus parámetros son erróneamente estimados por criterios normativos. Sin embargo, su yacencia condiciona la ocurrencia de deslizamientos por reptación, que pueden además modificar la geometría del talud y por ello la relación de equilibrio en el macizo.

Las investigaciones de campo a estos materiales permiten, entre otras cuestiones, determinar su distribución espacial dentro de los límites del macizo, detallar sobre su dinámica y sus propiedades granulométricas en base a las cuales se calcularán los parámetros de C y φ (cuando el % de grava supera el 40%). Estos elementos aportan criterios para la selección del FS final, los cuales son incorporados al procedimiento de pronóstico.

• *Probabilidad de rotura parcial o total:* Existen varios métodos que permiten estimar un FS ante la rotura de un talud, basados en un gran número y diversidad de ensayos de laboratorio, cuestión que reduce su utilidad práctica.

Este tema, llevado al análisis de pronóstico, se presenta desde otro punto de vista que busca un determinado grado de seguridad que le proporciona un FS ajustado. Sin embargo, el hecho de definir un determinado FS, mientras mayor sea menor será la probabilidad de rotura pero mayor serán los costos de las obras.



El método que se ha propuesto para ser utilizado en los pronósticos, se basa en dos cuestiones básicas interrelacionadas, la primera en un análisis de los FS parciales y la segunda en la dependencia entre el FS y la probabilidad de rotura del talud.

Partiendo de que las componentes de la resistencia de los materiales en el macizo son hasta cierto punto independientes, es evidente que se conseguirá un margen de seguridad más uniforme aplicando FS parciales, que son la relación de los valores de C y ϕ determinados y estos valores minorados que conducen a la rotura.

Así, se han tomado valores de FS recomendados por varios autores y que a su vez reflejan la confiabilidad de la determinación de los parámetros (Manual de taludes, 1996).

Parámetros de resistencia

C

ϕ

FS

1.5 – 2.0

1.2 – 1.5

De esta manera detallando sobre la composición granulométrica de los materiales en el macizo, su yacencia y sus condiciones de estado, se puede precisar sobre el FS que se escogerá y en dependencia del valor inicial calculado.

Teniendo en cuenta la alta probabilidad de roturas parciales o deformaciones en los primeros tiempos de vida útil del talud, hemos considerado importante la relación entre el FS y la probabilidad que ocurra el fenómeno (Wu y Kraft, 1970). Se han diferenciado estas relaciones para el caso de materiales cohesivos (gráfico A en la fig. 2) y considerando un coeficiente de variación (gráfico B en la fig. 2) a partir de los calculados para las cargas y las resistencias del macizo.

Gráfico A- Relación FS y probabilidad de rotura para varios coeficientes de variación

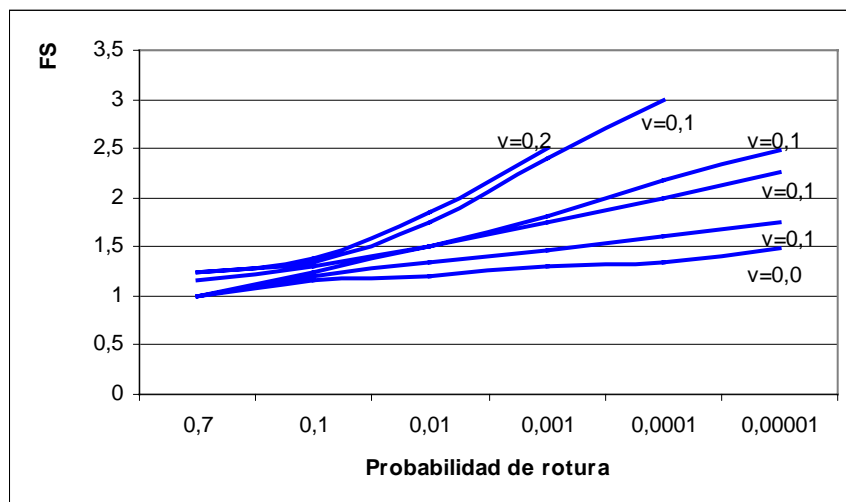




Gráfico B- Probabilidad de deslizamiento en materiales cohesivos

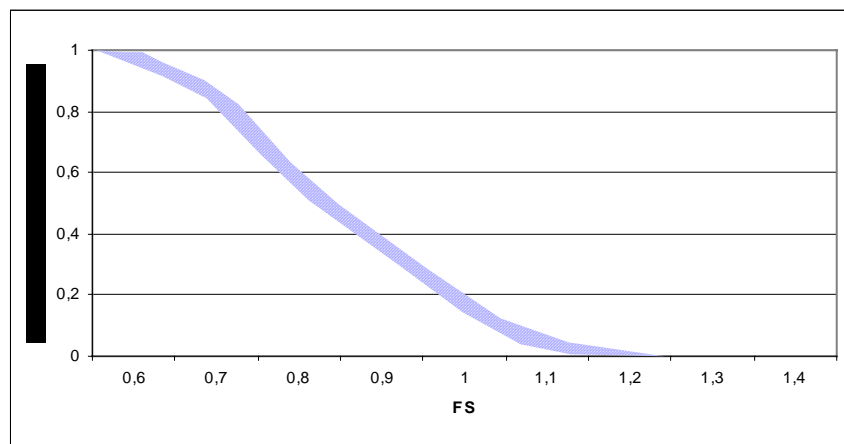


Figura 2- Relación entre el FS y la probabilidad de rotura del talud

Dentro de este tema se recomienda tener en cuenta el criterio de la estabilidad a corto y a largo plazo desde el punto de vista del FS y de acuerdo con la probabilidad de rotura considerada anteriormente.

Al introducir un cambio en el estado de tensiones del macizo, ya sea por un desmonte de una ladera, la modificación de un talud o la construcción de una obra, se llega a nuevas condiciones de equilibrio sobre las cuales se calculará el pronóstico de las deformaciones.

Asimismo, el FS para el pronóstico de la estabilidad estará muy en dependencia del periodo de tiempo en que realmente actuarán las tensiones principales en el macizo, ya sea a corto o a largo plazo.

Si bien en un periodo corto, después de las modificaciones en el macizo, pueden ocurrir cambios en las tensiones debido al drenaje en suelos permeables, a medida que transcurre el tiempo, las condiciones van cambiando, llegando a presiones intersticiales y la resistencia en presiones efectivas, estado en el que se considera “estabilidad a largo plazo” con un FS muy diferente al estimado a corto plazo.

Puede suceder, y así se ha tenido en cuenta, que las condiciones pésimas se alcancen en un tiempo intermedio, por producirse una distribución de las presiones intersticiales que disminuye la condiciones de estabilidad.

En cualquiera de los casos, los análisis previos de las condiciones de yacencia de las capas de suelos y sus propiedades, serán las que sugieran el criterio más aceptable para las condiciones de estabilidad que se producirán en el macizo.

▪ *Estabilidad con rotura progresiva:* Este fenómeno de la rotura progresiva en taludes es habitual considerarlo, asociándolo a deformaciones previamente ocurridas a las condiciones que se establecen en el talud por una nueva configuración. En el procedimiento de pronóstico este tema tiene un punto independiente de evaluación a partir de la existencia de paleodeslizamientos o deformaciones en el macizo, sin embargo una mejor forma de cuantificar este estado tensional es asociado a la evaluación del FS.



Existen tres aspectos que condicionan la rotura progresiva del macizo y a partir de los cuales se conforma nuestro criterio global del fenómeno para la selección del FS.

El primer aspecto es la existencia de un tipo de suelo o medio rocoso, que presenten una resistencia residual, para deformaciones mayores de las que se precisan para alcanzar la de “pico”. La práctica geotécnica sugiere que las arenas densas y las arcillas preconsolidadas son suelos muy propensos a la rotura progresiva; mientras que los medios rocosos con grietas rugosas, no rellenas y las rocas blandas propician el fenómeno.

Un segundo aspecto está relacionado con la morfología y las dimensiones del macizo, tales que puedan coexistir zonas con deformaciones unitarias o movimientos de masas relativos por encima y por debajo de las que se requiere localmente para alcanzar o sobrepasar la resistencia “pico”. En la práctica los medios homogéneos requieren de dimensiones importantes para que se condicione el fenómeno, sin embargo en medio heterogéneos depende de las deformabilidad local.

Por otra parte, la resistencia al esfuerzo tangencial, la relación tensión-deformación del macizo y el estado tensional previo, son factores que juegan un papel importante en el comienzo y desarrollo de la rotura progresiva. Este aspecto tiene menos aplicación práctica por la necesidad directa de ensayos y estudios específicos, pero es un elemento a tener en cuenta.

Es evidente la complejidad que tiene la cuantificación de estos aspectos, más si nuestro objetivo tiene una componente cualitativa considerable y por otro lado la experiencia internacional es muy pobre. Sin embargo, hemos considerado varios aspectos generales, que nos aportan al criterio de selección de un FS adecuado.

En taludes de materiales cohesivos, con escaso drenaje, con el tiempo habrá una disminución de las presiones efectivas y por ello de la resistencia. Este comportamiento sugiere que en caso de taludes permanentes se trabaje con un FS calculado para la estabilidad de largo plazo, considerando la rotura progresiva. De este mismo análisis se deriva que en caso de taludes temporales, se puede asumir un FS mucho mayor, teniendo en cuenta un corto tiempo como un periodo en que el cambio de las tensiones es insignificante. Si las condiciones de tiempo y espacio son favorables, en estos taludes se produce la rotura progresiva.

Para este tipo de materiales, se sugiere una corrección del FS por la plasticidad del suelo y a partir de los resultados de la resistencia obtenidos por ensayos *in situ*, considerando que el macizo es heterogéneo (Jiménez Salas et, al. 1981).

En macizos fracturados también es importante calcular el FS considerando la rotura progresiva, partiendo de que la propias grietas en el macizo son superficies con resistencias disminuidas, en las que se ha sobrepasado la resistencia pico.

En general este fenómeno es aplicable y a zonas donde han ocurrido movimientos anteriores, por lo que existen superficies de desplazamiento con valores de resistencia muy inferiores a los valores de los materiales en el macizo. Asimismo es importante estos análisis en taludes de terraplenes, conformados por compactación de materiales terrígenos y arenosos, donde un laboreo incorrecto condiciona una granulometría que propicia la rotura progresiva del talud.

▪ *Acción de las cargas sobre el macizo:* Es importante en los análisis de las cargas exteriores sobre el macizo, considerar su transitoriedad, definiendo su actuación a corto o a largo plazo. De manera general, para el cálculo de taludes con cargas que actuaran a largo



plazo, se exige un FS superior en un 10-30% del que se usaría en caso de que esas cargas solo actúen un corto tiempo.

En los pronósticos de estabilidad de taludes, este aspecto está muy relacionado a los anteriormente tratados, por cuanto la aplicación de cargas exteriores, su distribución y magnitudes, estarán muy en dependencia a las condiciones de estado del macizo y su pronóstico de cambio.

Sin tomar como punto de partida las condiciones de cargas permanentes, existentes sobre una ladera o talud, se considera que un valor de $FS=1.5$ muy condicional, es aceptable para los análisis de pronóstico de estabilidad. Sin embargo, la cimentación de nuevas estructuras que provocarán una movilización de la resistencia y deformaciones locales, exigen elevar el FS global hasta 2. Para condiciones de cargas temporales, el FS puede ser disminuido a 1.3-1.25, y recomendando que se consideren controles durante la cimentación.

A partir de estos valores prediseñados, otros análisis pueden influir en la adopción de un FS diferente al considerar las cargas externas en el macizo y su dinámica de aplicación.

Nota final

Dentro del pronóstico de la estabilidad de taludes, la selección de un FS basado en los factores discutidos, constituye una forma muy directa de disminuir los errores que se asumen en los cálculos, que pueden estar en el orden de 2-6%.

Los criterios de selección del FS aplicados al pronóstico, al estar basados en los aspectos que representan las condiciones del macizo, sus relaciones de fuerza de equilibrio y su posibilidad de modificarse, son una herramienta efectiva de evaluación y adecuación de los parámetros al estado real del macizo.

Bibliografía

- Hoek, E y J.W. Bray, 1977. Rock Slope Engineering. Archivo de la Institución de Minas y Metalurgia de Londres, Gran Bretaña.
- Instituto Minero y Geológico de España, 1996. Manual de taludes. Serie Geotecnia. España.
- Jiménez Salas, J.A; J.L. de Justo Alpañes y A.A. Serrano González, 1981. Geotecnia y Cimientos II: Mecánica de suelos y de las rocas. 2^{da} edición. Madrid. Ed. Rueda. 3.
- Rocamora Álvarez, E; L. Molerio; M. Guerra; R. Leal; J. Acosta, J. Alcaide y J.C. Rodríguez, 2001. Pronóstico de riesgo de ocurrencia de fenómenos físico-geológicos a partir de su evaluación ingeniero-geológica. Proyecto del Programa Ramal "Protección del Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible Cubano". Agencia de Medio Ambiente, CITMA, Cuba.
- Rocamora Álvarez, E, 1994. Deslizamientos, algunas consideraciones para su evaluación como fenómenos físico-geológicos. Memorias II Congreso Cubano de Geología y Minería. Cuba.
- Uriel Romero, S., 1999. Cálculo de estabilidad de taludes con rotura progresiva. Modulo de Geotecnia vial del I Master Internacional de mecánica de suelos e ingeniería de las cimentaciones. Madrid, España.
- Wu, T.H y L.M. Kraft, 1970. Safety analysis of slopes. *Revista de mecánica de suelos y cimentaciones ASCE (England)*, vol. 96, N° SM2: 10-28.



ESTUDIO INGENIERO- GEOLÓGICO DE LOS CAYOS CRUZ Y MEGANO GRANDE PARA SU MANEJO INTEGRAL CON VISTA AL DESARROLLO TURÍSTICO.

Moraima Alvarez Ortiz, Gustavo Godines Barrera, José Gandarillas Hevia, Víctor Estrada Sanabria.

GEOCUBA Estudios Marinos. Punta Santa Catalina s/n. Regla. Ciudad de la Habana, Cuba.

RESUMEN

En la costa Norte del territorio Camagüeyano se encuentran los cayos Cruz y Mégano Grande con importantes riquezas naturales y las atracciones geográficas para el desarrollo del producto turístico; lo cual ha motivado el interés de evaluar sus potencialidades a través de un estudio integral de los mismos. Han sido objetivos específicos de estas investigaciones:

1. Evaluar la factibilidad constructiva en dichos cayos, obteniendo la información ingeniero- geológica que caracterice las diferentes áreas, además de otros fenómenos físicos y geológicos que influyan en las condiciones de cimentación.
2. El estudio de las acumulaciones de arena en la plataforma de los cayos como fuente de aporte y soporte de la estabilidad de las playas como principal recurso turístico.

Se empleó un complejo de métodos geológicos y geofísicos, obteniéndose como principales resultados de este estudio: planos y tablas donde se definen 5 zonas ingeniero- geológicas en los cayos, se dan criterios de las categorías de factibilidad constructivas y también se caracterizan las particularidades geomorfológicas en el área marino- litoral, las potencialidades de los recursos de arenas y su composición y clasificación.

Podemos resaltar que de los dos cayos, Cayo Cruz posee una extensa zona con condiciones ingeniero-geológicas favorables, las mejores playas y un alto valor paisajístico. En la plataforma marina los volúmenes de sedimentos no consolidados constituidos por arena media a gruesa constituyen potencialidades de reserva. En la zona litoral existe un balance morfodinámico natural, asociado con la morfología del subfondo rocoso arrecifal y los procesos de dinámica costera.

ABSTRACT

In the north coast of the Camagüey territory meets the keys Cruz and Mégano Grande with important natural wealth and the geographical attractions for the development of the tourist product; that which has motivated the interest of evaluating their potentialities through an integral study of the same ones.

They have been specific objectives of these investigations:

1. To evaluate the constructive feasibility in these keys, obtaining the engineer - geologic information that characterizes the different areas, besides other physical and geologic phenomenon's that influence under the foundation conditions.
2. The study of the accumulations of sand in the platform of the keys like sources contribution and support of the stability of the beaches like main tourist resource.

A complex of geologic and geophysical methods was used, obtaining, as the main results of this study: planes and charts where they are defined 5 engineer - geologic areas in the keys, approaches of the constructive categories of feasibility are given. The geomorphology's particularities is also characterized in the marine - coast area, and the potentialities of the resources of sands and their composition and classification.

We can stand out that of the two keys, Key Cruz possesses an extensive area with favorable geologic - engineer conditions, the best beaches and a high value of the landscape. In the marine platform the volumes of not consolidated silts constituted by half sand to thick constitute reservation potentialities. In the coast area exists a natural morphodynamic balance, associated with the morphology of the Sub bottom reef.



Introducción

El presente trabajo recoge los resultados de la aplicación de las investigaciones geólogo - geofísicas en la plataforma marina y el área emergida de los cayos Cruz y Megano Grande para dar respuesta a la solicitud técnica de investigación realizada por la empresa Inmobiliaria ALMEST. Estos cayos están situados en la cayería Norte del territorio Camagüeyano, presentando grandes riquezas naturales y atracciones geográficas para el desarrollo del producto turístico; lo cual ha motivado el interés de evaluar sus potencialidades a través de un estudio integral de los mismos.

Han sido objetivos específicos de estas investigaciones la evaluación de la factibilidad constructiva en dichos cayos mediante la obtención de la información ingeniero- geológica que caracterice las diferentes áreas del cayo, los parámetros físico- mecánicos de los suelos y rocas, además de otros fenómenos físicos y geológicos que influyan en las condiciones de cimentación, así como el estudio de las acumulaciones de arena en la plataforma de los cayos como fuente de aporte y soporte de la estabilidad de las playas como principal recurso turístico de los mismos.

Se elaboró un programa de investigación integrado por: Estudios Geofísicos (Sísmica de refracción y Reflexión) y Estudios Geológicos (Levantamiento Geológico, Perforaciones, Muestreo y Laboratorio), complementándose con consulta de información sobre investigaciones precedentes y análisis de fotointerpretación de fotos aéreas.

Como resultados de este estudio se obtuvieron: planos y tablas donde se definen las zonas ingeniero- geológicas, se dan criterios de las categorías de factibilidad constructivas y además se caracterizan las particularidades geomorfológicas en el área marino- litoral, las potencialidades de los recursos de arenas y su composición y clasificación.

Materiales y métodos

Se diseñó un esquema de investigación con la utilización de los diferentes métodos preconcebidos para la solución de la problemática planteada.

Área emergida de los cayos:

Fotointerpretación: Se utilizaron imágenes aéreas en base digital a una escala 1:30 000 del vuelo general realizado por **Geocuba La Habana** en el año 1998. Se hicieron observaciones primarias en el fotoesquema base del levantamiento, diferenciando las estructuras geomorfológicas fundamentales, además se hizo la clasificación supervisada, a partir de los fototonos de las características zonales de los cayos; durante los trabajos de campo se comprobaron dichos patrones en el área terrestre.

Levantamiento y muestreo geológico: Se realizó un levantamiento para control de los trabajos de fotointerpretación, la valoración de la zonificación geomorfológica, la delimitación de la zonificación de factibilidad constructiva y para precisar las posibilidades de ubicación de los trabajos de sísmica y perforación. En este levantamiento se realizaron conjuntamente hincas manuales y muestreo de arena y afloramientos rocosos para su clasificación.

Sísmica Somera de Refracción: Se utilizó con el objetivo de delimitar la estructura geométrica del corte geológico (espesores y número de capas, profundidad de la roca) además de caracterizar algunas propiedades físico - mecánicas orientativas de los elementos presentes a



partir de las relaciones entre V_p y V_s . Para esto se realizaron 42 puestas sísmicas con hodógrafos de encuentro, se empleó una estación sísmica ABEM-TERRALOC de fabricación sueca que cuenta con 12 canales de recepción, la excitación se realizó por golpes en ambos extremos.

Perforación rotaria y percusión: Se realizaron 6 calas geológicas distribuidas a lo largo del terraplén existente en Cayo Cruz, donde único existió acceso para la perforadora. Se utilizó la máquina de perforación UGB – 50 M montada sobre camión de fabricación Rusa. Se perforó a percusión con la cuchara cubana en los suelos arenosos hasta el límite de 100 golpes / pies, para la realización del ensayo de Nspt. En la roca se perforó a rotación con portatestigo simple tubo de 89 mm de diámetro; para las arenas se realizó el ensayo granulométrico según normas ASTM para su clasificación.

Area de la plataforma marina al Norte de los cayos:

Vibroperforación y muestro geológico: Para esta actividad se utilizó una vibroperforadora modelo VKG-3 de procedencia alemana, con una longitud de muestra de 3.3 m y un diámetro de perforación de 108 mm, emplazada en la patana H-81 para la perforación en el mar; además se tomaron muestras superficiales en aquellos lugares donde no se realizaron vibroperforaciones, por ser los espesores menores de 0.5 m y no ser posible usar la VKG-3.

Perfilaje Sísmico Continuo y Batimetría acompañante: Los trabajos de Perfilaje Sísmico Continuo (**PSC**) y Batimetría acompañante se ejecutaron en toda el área con la finalidad de obtener las profundidades del lecho marino, los espesores de sedimentos no consolidados y la profundidad del techo de la roca. Para el **PSC** se utilizó un Perfilador Sísmico Continuo (Hidrosonda), con fuente de emisión Sparker (chispeador) y un hidrófono de 11 elementos sensibles como receptor, la distancia emisor- receptor fue de 1 m y la profundidad de inmersión de los mismos de 1 m. Por su parte los trabajos de Batimetría se ejecutaron con un Ecosonda ATLAS DESO-20, de fabricación alemana, con dos frecuencias de trabajo bien definidas 33 y 210 KHz lo que nos permitió realizar una valoración cualitativa de los diferentes tipos de fondo existentes. Las profundidades determinadas, fueron corregidas por las variaciones del nivel de marea, utilizando como referencia el Puesto Mareográfico de Nuevitas.

Las muestras tomadas fueron ensayadas en el laboratorio determinando: granulometría, restos esqueléticos, peso específico, petrografía.

Para georreferenciar las investigaciones se empleó el Sistema de Posicionamiento Global por Satélite (GPS), variante autónoma. Como base cartográfica se usó el levantamiento topográfico 1: 10 000 realizado en el año 1999 por Geocuba Camagüey.



Resultados y discusión

Como resultado de la investigación en el área emergida de los cayos se obtuvieron las características orientativas fundamentales para evaluar la factibilidad y el dimensionamiento de las cimentaciones en las arenas; estas fueron: la posición del nivel freático, la densidad relativa, el ángulo de fricción interna, el módulo de deformación general y las profundidades para colocación de la base del cimiento con una sobrecarga adecuada. A partir de toda la información se clasificaron 5 zonas ingeniero - geológica divididas en:

Zona I. Playas y dunas actuales hasta 120 m. de la línea de costa como criterio de zona de protección costera: Es un área de muy alta sensibilidad ecológica en el equilibrio y estabilidad de las playas por lo que se debe conservar su estado natural y estudiar acciones para garantizar la conservación de las playas.

Zona II. Llanura litoral acumulativa de extensión considerable, ondulada de cotas relativamente elevadas formada por depósitos de arena que han llegado a conformar un sistema de dunas fósiles con cobertura litificada, estratificada y meteorizada que sobreyacen a rocas carbonatadas del cuaternario (calcarenitas): Se establece la categoría de **FAVORABLE** en la clasificación de factibilidad constructiva al considerarse la de mejores condiciones de todas las áreas estudiadas. No aparecen manifestaciones cársticas amplias, ni empantanamientos, la estructura geológica y geomorfológica es simple y homogénea, la variabilidad de las propiedades físico – mecánica es pequeña y las aguas subterráneas no dificultan la cimentación.

En esta valoración se incluyen el carácter estable de la zona, su considerable extensión, con cotas relativamente elevadas y con el NF generalmente por debajo de 1.0 m del nivel de terreno natural. Las condiciones de cimentación son simples al existir estratos de arenas de medio densa a densa o roca calcarenita que la subyacen; cualquiera de los cuales puede constituir una base adecuada para las cimentaciones.

Es el área vinculada más cercanamente a la zona de mejores playas de los cayos y los impactos serían de menor consideración comparativamente con las otras zonas. Como en gran parte del cayo, en esta zona se establece un complejo de vegetación con alta presencia de palmáceas de alta belleza como la yuraguana de costa, lo cual brinda un paisaje de alta calidad y muy característico que diferencia este cayo de la generalidad de los cayos cubanos.

Zona III. Llanura litoral acumulativa en forma de estrechas franjas de extensión considerable y cotas medias, de constitución geológica y vegetación similar a la zona II. Se considera **MEDIANAMENTE FAVORABLE** debido a que sus características de franja, linealmente alargada y estrecha, limitan el desarrollo constructivo por el distanciamiento necesario de las construcciones a las zonas adyacentes: para evitar dañar las playas (zona I) y por las dificultades de la cimentación en la llanura biógeno – palustre acumulativa (zona V). Esta se considera una zona de alta sensibilidad ecológica. Además de presentar posibles inundaciones temporales en áreas de cotas bajas.

Zona IV. Llanura litoral plana, abrasiva relativamente baja con nivel freático cercano a la superficie. Le ha sido atribuida la clasificación **FAVORABLE CON LIMITACIONES**; ya que el estrato base al ser una caliza biohémica coralina de dureza media, presenta agrietamiento y cavernosidad superficial, lo que hace necesario se evalúen las condiciones del macizo para clasificarlo como base de cimentación. Las características de cotas muy bajas con dificultades de drenaje y la existencia de lagunas litorales, así como la amplitud de la duna litoral hacen no



aconsejable la edificación en primera línea de playa y considerar la parte central de esta zona con cotas más elevadas como la ubicación recomendable de una parcela constructiva en la misma.

Zona V. Llanura acumulativa marino- biogénica, pantanosa y muy baja. Se consideró **DESFAVORABLE** ya que se incluyen dos zonas geomorfológicas con condiciones inapropiadas para la construcción; existen suelos débiles de potencia considerable en algunas áreas, están temporalmente o totalmente inundadas, hay desarrollo de la carsificación en la roca que puede aflorar o estar cubierto, las cotas son muy bajas y los impactos en esta zona de alta sensibilidad ecológica serían muy considerables. Esto hace que las cimentaciones sean complejas, costosas, impactantes y por lo tanto no recomendables ni justificables económicamente en primera instancia.

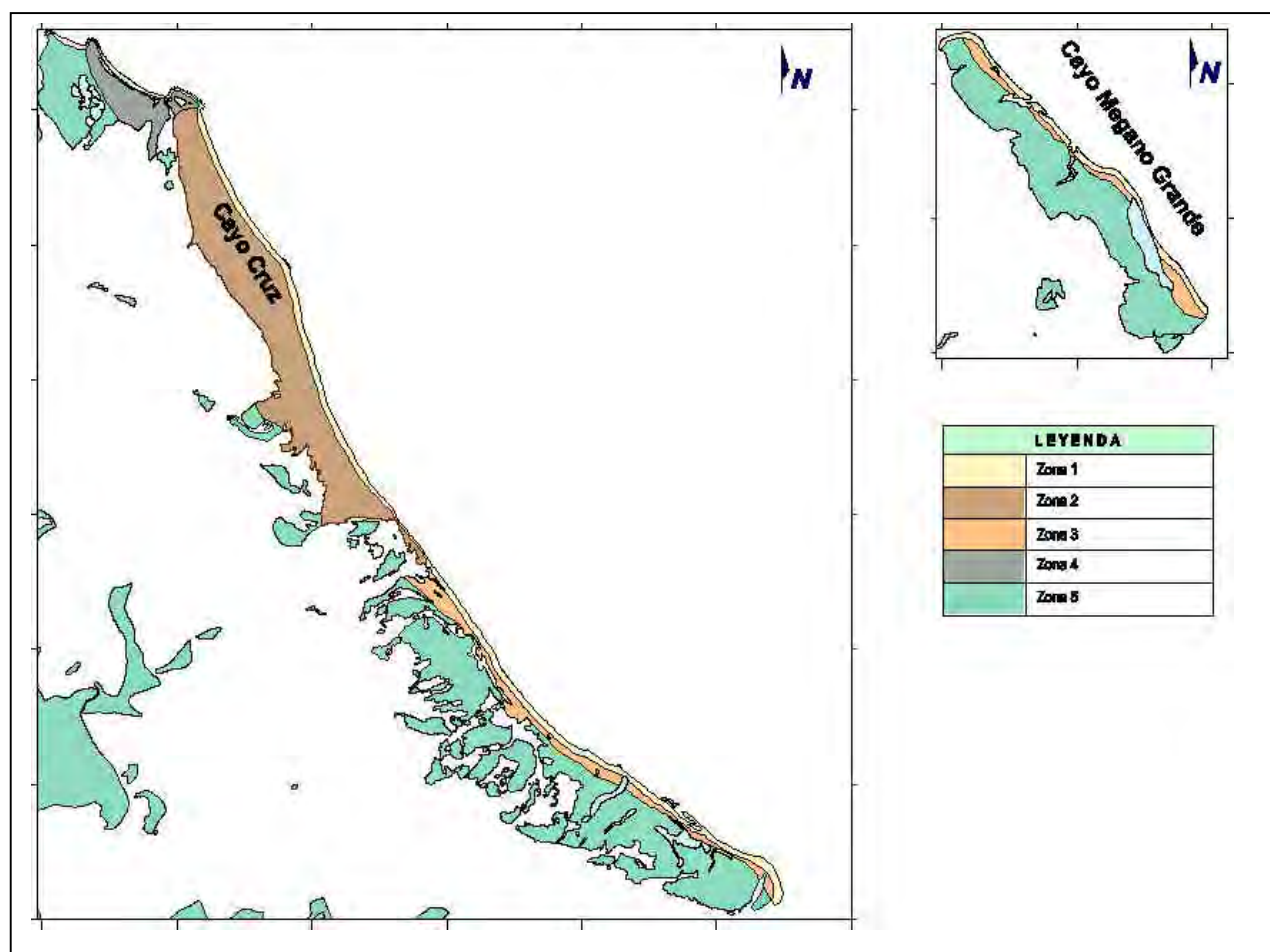


Fig.- 1. Plano de zonificación ingeniero geológica en los cayos Cruz y Megano Grande

En la plataforma marina se caracterizaron las particularidades geomorfológicas en el área marino- litoral, las potencialidades de los recursos de arenas y su composición y clasificación. El área evaluada de la plataforma marina insular constituye una franja asimétrica en la dirección **NW – SE**, cubierta por una columna de agua, cuya profundidad varía entre los -2 y los -20 m. En general la buena visibilidad de los tipos de fondos permitió la observación durante los trabajos de levantamiento de varias formas del relieve de génesis biogénicas, químicas y



marinas (acumulaciones de arena, afloramientos rocosos, barras litorales, formaciones coralinas, acantilados, etc.).

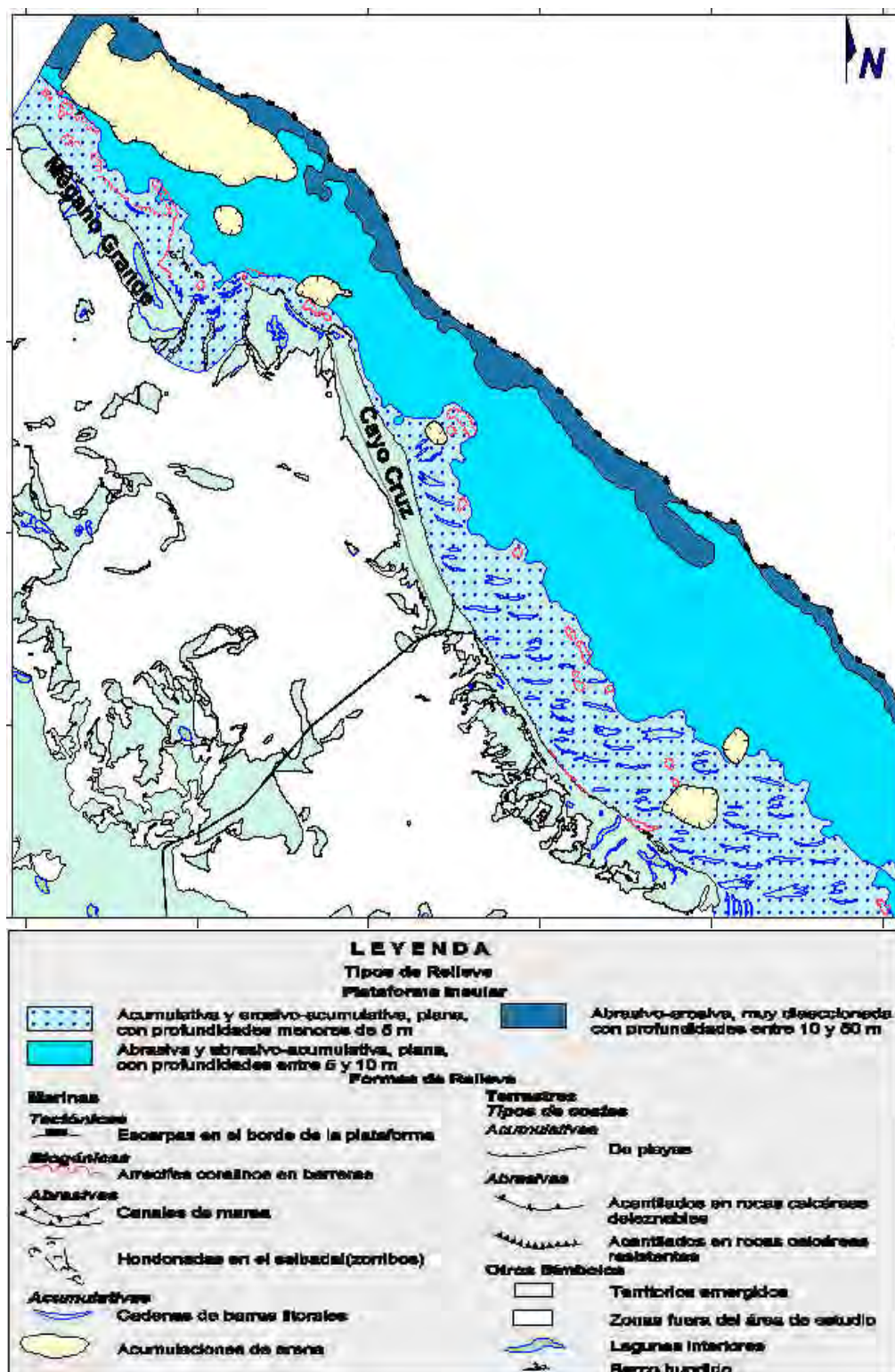


Fig.- 2. Plano geomorfológico de la plataforma litoral de los cayos Cruz y Mágano Grande



En el sector correspondiente a los cayos Mégano Grande y Cruz por la zonalidad geólogo - geomorfológica del fondo marino fueron definidos tres tipos de llanuras marinas: abrasivo - erosivo muy diseccionada; abrasiva y abrasivo - acumulativa; acumulativa y erosivo - acumulativa. Los dos primeros tipos de llanuras abarcan un 70 - 75 % del área evaluada desde la isobata con valor de -10 m hasta el borde del talud insular. En cambio la llanura acumulativa y erosivo - acumulativa cubre entre un 25 - 30%, y se asocia básicamente a sectores litorales adyacentes a los cayos Mégano y Cruz.

Los espesores de sedimentos no consolidados varían entre 0 y 5.5 m en toda el área, alcanzando los mayores valores en las zonas bajas, próximas a las costas de ambos cayos, que se encuentran en la unidad geomorfológica: llanura acumulativa y erosivo – acumulativa y los mínimos coinciden con las llanuras abrasivo– acumulativa y abrasivo – erosivo muy diseccionada del mapa geomorfológico.

En las zonas de acumulaciones de arena, los espesores pueden alcanzan valores de más de 1.5 m según los datos de la sísmica de reflexión ó Perfilaje Sismoacústico y las vibroperforaciones de mapeo. En dirección a la costa para Cayo Mégano Grande y Cayo Cruz la potencia de los sedimentos registra un aumento entre los 0.5 y los 5 m. Lo cual podemos ver, responde al balance morfodinámico natural, caracterizado por un potente campo de barras litorales submarinas, y por la alineación de arrecifes coralinos en barreras, que constituyen un obstáculo natural que entrapa los sedimentos entre los cayos y estos.

Los resultados de los análisis de laboratorios definieron granulométricamente los sedimentos no consolidados como arena media a gruesa y por la composición esqueletal de las muestras se observa que la génesis de los sedimentos es totalmente organógeno - marina, entre las partículas identificadas, existe un predominio de algas calcáreas y moluscos.

En la siguiente tabla se ofrecen los volúmenes de sedimentos de las zonas de mayores espesores que constituyen potencialidades de reserva, aunque debemos señalar que en las zonas II y III existen numerosos arrecifes coralinos aislados, los cuales tienen una distribución alineada en dirección **NW – SE**;

Tabla No. 1 Volúmenes aproximados para las zonas de mayores espesores de sedimentos

Zona	Volumen Aproximado(m³)
I.- Acumulación de arena al NE de Cayo Mégano Grande	27 506 623
II.- Zonas bajas inmediatas a Cayo Mégano Grande	36 093 004
III.- Zonas bajas inmediatas a Cayo Cruz (entre Punta La Cocina y Punta La Laguna)	43 955 831
Toda el área de estudio	254 060 636

Las profundidades de yacencia del tope superior del substrato rocoso se encuentran en el rango de -2 a -24 m en dirección **SW – NE**, sus isolíneas (isohipsas) presentan un comportamiento regular, este basamento es bastante plano y de una pendiente muy suave, con ligero buzamiento hacia el **NE**.



Conclusiones y recomendaciones.

Area emergida de los cayos:

1. Cayo Cruz presenta las mejores características para el desarrollo constructivo ya que posee una extensa zona con condiciones FAVORABLES según la clasificación de factibilidad constructiva, posee las mejores playas de los cayos y los impactos serían de menor consideración comparativamente con las otras zonas. Además existen otras zonas clasificadas como MEDIANAMENTE FAVORABLES y FAVORABLE CON LIMITACIONES.
2. Mientras que Cayo Mégano solo tiene condiciones MEDIANAMENTE FAVORABLES en áreas ubicadas en sus extremos occidental y oriental; también con playas de calidad aceptable.
3. Para ambos cayos la zona V es considerada como DESFAVORABLE para el proceso constructivo ya que: las características físico- mecánicas de los elementos litológicos son variables y débiles, la estructura geomorfológica es relativamente compleja y las cimentaciones serían complejas, costosas, impactantes y por lo tanto inapropiadas
4. La primera área de zonificación en ambos cayos corresponde a las playas y costas acantiladas, que unidas al área de protección constructiva; comprende un espacio, que planteamos la necesidad de mantener en estado natural o estudiar acciones que impliquen impactos positivos dada la extrema fragilidad de estos sistemas y su importancia en la formación y comportamiento de los cayos.
5. Consideramos recomendable no realizar viales de considerable carga estática o dinámica en otras áreas que no sea en la zona II. En las áreas clasificadas como III recomendamos solo considerar senderos o viales ligeros teniendo en cuenta las dificultades de drenaje en las zonas bajas.

Area de la plataforma marina al Norte de los cayos:

1. En la plataforma correspondiente al sector de los cayos Mégano Grande y Cruz por la zonificación geólogo- geomorfológica del fondo marino fueron definidos tres tipos de llanuras marinas: abrasivo-erosiva muy diseccionada; abrasiva y abrasivo- acumulativa; acumulativa y erosivo- acumulativa.
2. La distribución de los espesores de sedimentos no consolidados constituidos por arena media a gruesa tiene un comportamiento asociado con la morfología del subfondo rocoso arrecifal y los procesos de la dinámica costera. En las zonas de acumulaciones de arena, los espesores pueden alcanzar valores de más de 1.5 m y en dirección a la costa la potencia de los sedimentos registra un aumento entre los 0.5 y los 5 m.
3. Por las potencialidades de los recursos identificados como zonas de acumulación de arena en el mar, antes de cualquier toma de decisión socioeconómica en las proyecciones turísticas regionales, se recomienda, la ejecución de trabajos multidisciplinarios a mayor escala, para la evaluación detallada de sus particularidades geodinámicas de emplazamiento y sus reales posibilidades de explotación, que permitan un uso sustentable, racional y ecológico, acorde a la gestión medioambiental, principio fundamental del desarrollo turístico en nuestro país.



Evaluación integral de los cayos

De forma general se puede llegar a la conclusión que los cayos tienen altos potenciales para el desarrollo constructivo con fines turísticos; que pudiéramos resumir:

- ♦ Poseen extensas playas de optima calidad, que se pueden considerar las mejores de la Cayería Norte de la Provincia de Camagüey.
- ♦ Un alto valor paisajístico, muy particular que los diferencia en gran medida del resto de los cayos cubanos.
- ♦ Posibilidades para desarrollar la actividad náutica y el buceo contemplativo en los arrecifes coralinos y plataforma circundante asociada a las instalaciones a potenciar.
- ♦ Son relativamente evolucionados con cotas medias sobre el NMM.
- ♦ Presencia en la región de atractiva flora y fauna.
- ♦ Poseen zonas con condiciones ingeniero- geológicas de Favorables a Medianamente Favorables para el desarrollo constructivo.
- ♦ En la plataforma marina los volúmenes de sedimentos no consolidados constituidos por arena media a gruesa constituyen potencialidades de reserva.



Bibliografía.

- G. M. Nazarov, URSS, 1974. Ábacos para la valoración de las propiedades de resistencia del medio por los valores de las velocidades de las ondas longitudinales.
- Cabrera, M, G. Furrázola, y K. Núñez, 1997. Estudios sobre Geología de Cuba. IGP.
- Peck, Hanson, Thornburn. Cimentaciones sobre arena. Foundation Engineering, pág 219-228.
- Instituto Cubano de Hidrografía. 1989. Derrotero de las Costas de Cuba. Tomo I. Costa Norte.
- GEOCUBA Ediciones Marinas. 2001. Tablas de Marea. Costas de Cuba. Servicio Hidrográfico y Geodésico de la República de Cuba.
- Godines, G. 2001. Estudio de Factibilidad Constructiva de los cayos Cruz y Megano Grande. GEOCUBA Estudios Marinos.
- Academia de Ciencias, ICGC. 1990. Estudio de los grupos insulares y zonas litorales del archipiélago cubano con fines turísticos. Cayos Mégano Grande, Cruz, Romano y Guajaba.,
- Estrada, V y J. Gandarillas. 2001. Exploración geólogo- geofísica de las arenas en la plataforma marina. Norte de Cayo Cruz y Mégano Grande. Camagüey. GEOCUBA Estudios Marinos.
- Hernández, H. 2001. Realización de perfiles de playa en los cayos Cruz y Mégano Grande. GEOCUBA Camagüey.
- Martínez, N. J .R. Alfonso. CUBA ,1984. Interpretación de la sísmica de refracción para tareas de la ingeniería geológica.
- Menéndez, M y N. Martínez. 1997. Meta – análisis de la estructura ecológica de las comunidades de corales pétreos en 59 arrecifes de Cuba. MARCUBA. Programa – Resúmenes, página 69.
- J .León et al, Propuesta de norma de cimentaciones. ISPJAE.
- IPF, Camagüey, 2000. Plan de ordenamiento territorial de Cayo Cruz, Mégano Grande y Cayo Romano.



NUEVAS REVELACIONES HIDROGEOLOGICAS EN LA PROSPECCION DE AGUAS PROFUNDAS EN SECTOR DE LA PROVINCIA HOLGUIN

Orlando Dussac Tamayo⁽¹⁾

⁽¹⁾ Geominera de Oriente, Carretera Siboney, Km 2.5, Santiago de Cuba, Cuba.
C. Elect.: aramsay@geom.stg.minbas.cu

RESUMEN

Por la necesidad del abasto de agua potable de buena calidad que presenta la provincia Holguín, para la población así como para las diferentes fabricas presentes en el área, y debido a que las aguas superficiales han sufrido procesos de salinización y contaminación. Se contrato al grupo de servicios geofísicos de la E.G.M.O. con el objetivo de estudiar un sector cerca de la ciudad. En esta área de investigación los tipos litológicos presentes, son las rocas presentes en la formación camazán (caliza, marga, arcilla), y conglomerado polimícticos que buzan por debajo de la facie arcillosa de formación camazán, en donde se esperan la existencia de grandes reservorios de agua potables. Las tareas a resolver por los métodos geofísicos fueron las siguientes:

- Aumentar el grado de conocimiento hidrogeológico del área.
- Determinar las zonas de mayor posibilidad acuíferas.
- Determinar las diferentes capas o fronteras geoelectricas presentes en el corte.
- Mapeo de la tectónica presente.
- Determinar el techo de la capa impermeable.

Las investigaciones geofísicas se basaron fundamentalmente en los métodos eléctricos en la variante de sondeo eléctrico vertical, magnetometría terrestre. En el presente trabajo se exponen los resultados del análisis de la magnetometría terrestre, el análisis del campo aeromagnético, de las mediciones de los sondeos eléctricos verticales, así como la metodología empleada. Además se hace una correlación de los resultados de los datos geológicos e hidrogeológico del área con los resultados de la interpretación de los sondeos eléctricos verticales, el campo magnético y campo aeromagnético.

ABSTRACT

For the necessity of the supply of drinkable water of good quality required for the Holguín province, for the population and factories present in the area, and because the superficial waters have suffered salinization processes and contamination. The group of geophysical services of the E.G.M.O. were hired on the objective of studying a sector near the city. In this investigation area the present litological types are the rocks in the Camazán formation (limestone, loam, clay), and polymictic conglomerates that dip below the loamy facie of Camazán formation, where is expected the existence of big deposits of water. The tasks to solve for the geophysical methods were the following ones:

- To increase the degree of hydrogeological knowledge of the area.
- To determine the aquifer areas of more possibility.
- To determine the different layers or geoelectrical frontiers present in the cut.
- To map the present Tectonics in the area.
- To determine the roof of the waterprof layer.

The geophysical investigations were based fundamentally on the electric methods in the variant of vertical electric sounding, terrestrial magnetometry and analysis of the aeromagnetic field. In the present work the results of the terrestrial magnetometry analysis, the eromagnetic analysis, as well as of the mensurements of the vertical electric sounding and the used methodology. It is also made a correlation of the results of the geologic and hydrogeologic data of the area with the results of the interpretation of the vertical electric sounding, the magnetic field and aeromagnetic fields.

INTRODUCCIÓN



El abasto de agua para las industrias constituyen un aspecto imprescindible para satisfacer la necesidad de la sociedad, donde juegan un papel importante los métodos geofísicos herramienta imprescindible para la investigaciones hidrogeológicas por las diferentes tareas que resuelve, constituyendo un eslabón importante en estos tipos de investigaciones.

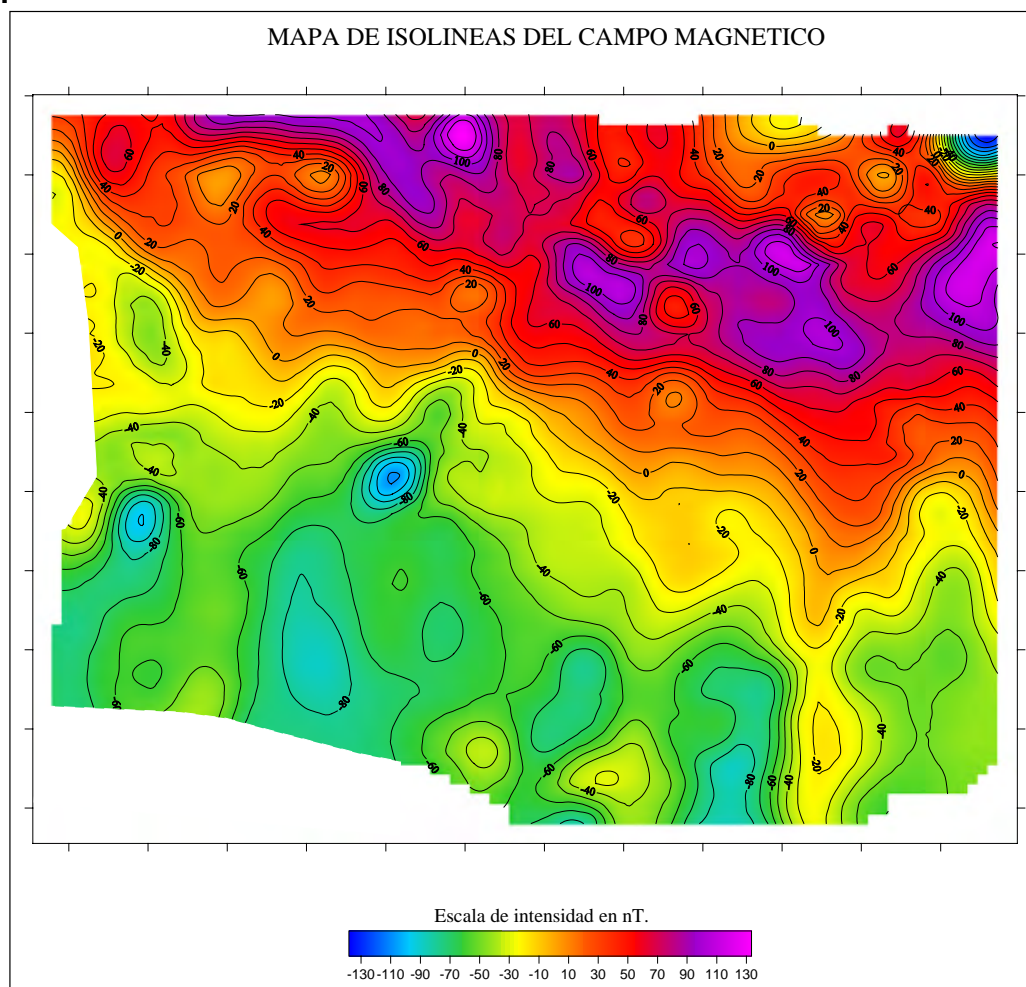
Los resultados que mostramos del Sector Fraile 2 constituyen una demostración más del poder resolutivo de los métodos geofísicos en los trabajos hidrogeológicos.

RESULTADOS

El campo magnético en la zona (ver fig-1), presenta un carácter tranquilo característico de rocas sedimentarias. Se observan dos zonas bien definidas una en la parte NE con valores positivos que alcanzan los 100nT, los cuales pueden estar asociados a un menor espesor de las rocas sedimentarias y la otra en la parte SW con valores negativos que alcanzan los -50 nT, asociado posiblemente a una mayor potencia de rocas sedimentarias, formando una estructura en forma de graven.

Ambas zonas por la forma en que se expresa el campo magnético, isolíneas paralelas entre sí, están separadas por un contacto tectónico.

Fig-1:



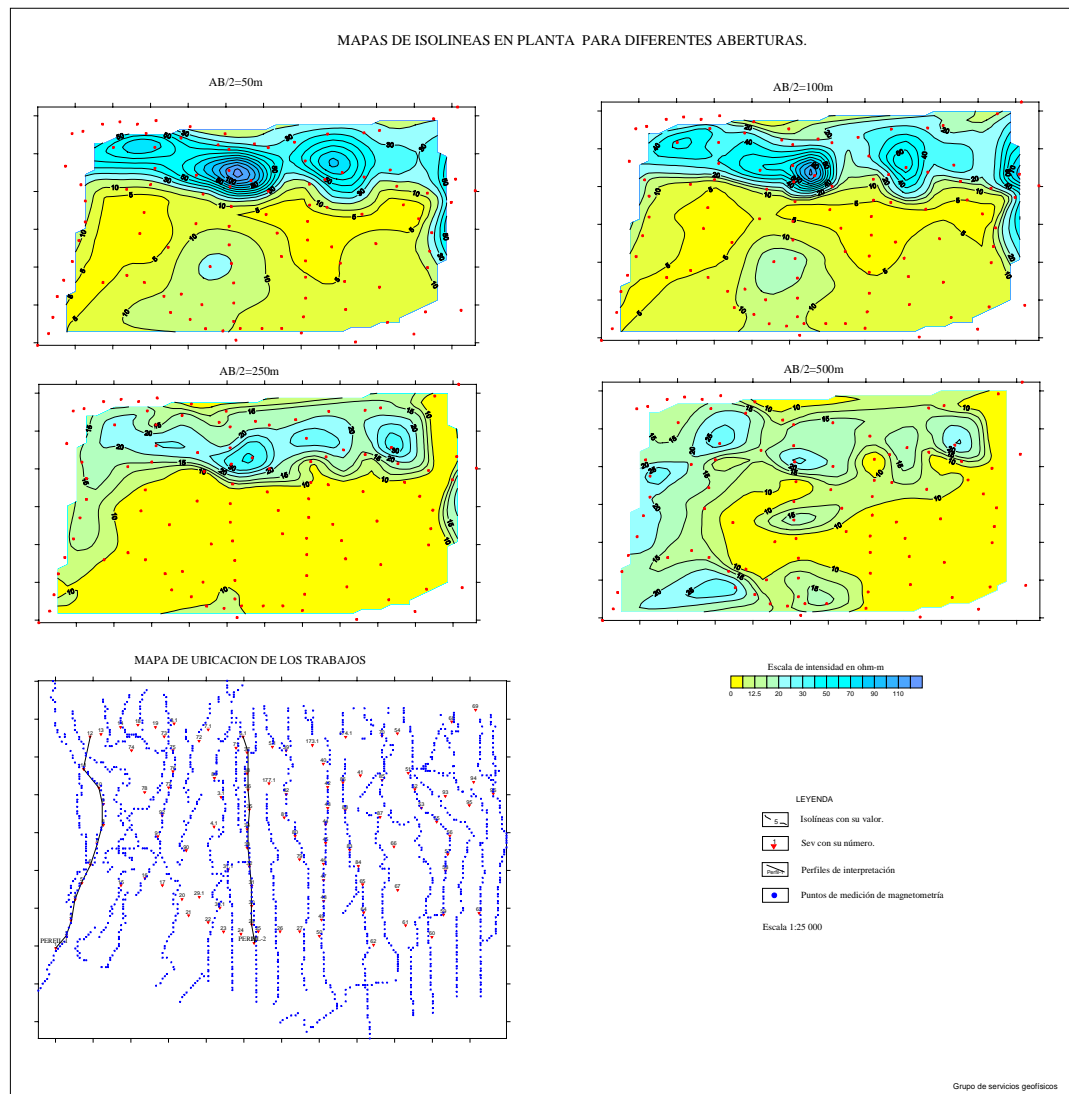


Analizando el comportamiento de la resistividad aparente en los mapas de isolíneas para diferente aberturas ($ab/2=50, 100, 250$ y 500 m) (ver fig-2), se pueden observar también dos zonas bien definidas, una en la parte norte - noreste con valores altos de resistividad, superiores a los 20 ohm-m asociados a las rocas calizas y margas con intercalaciones de calizas y otra en la parte sur con valores de resistividad inferiores a los 20 ohm-m asociados a las calizas arcillosas, margas con intercalaciones de arcillas y arcillas, este comportamiento de la resistividad se mantiene en los primeros 100m de profundidad aproximadamente ya que se observan las misma características para las diferentes aberturas.

En el mapa de isolíneas para $ab/2=500$ m, se observa otra zona en la parte W con valores superiores a los 20 ohm-m que pueden estar asociados a margas con intercalaciones de calizas o calizas cavernosas.

En estos mapas de isolíneas se definen varias zonas de fuerte gradiente de resistividad que pueden estar asociados a zonas de fallas o de contactos geológicos.

Fig-2:





En el corte de isohomas mostrado por el perfil-2 (ver fig-3), se puede observar que se encuentran las dos zonas definidas anteriormente, la parte sur con valores de resistividad menores de 20 ohm-m asociados a grandes espesores de arcillas y margas con intercalaciones de arcillas que constituyen un impermeable en forma lateral y la zona de la parte norte- noreste con valores altos de resistividad asociados a las calizas y margas con intercalaciones de calizas descendiendo gradualmente hasta alcanzar valores de resistividad inferiores a los 20 ohm-m.

En estos cortes se observan fuertes contrastes de resistividad que se mantienen en toda la profundidad estudiada, que pueden estar asociados a zonas de fallas o contactos geológicos en forma vertical

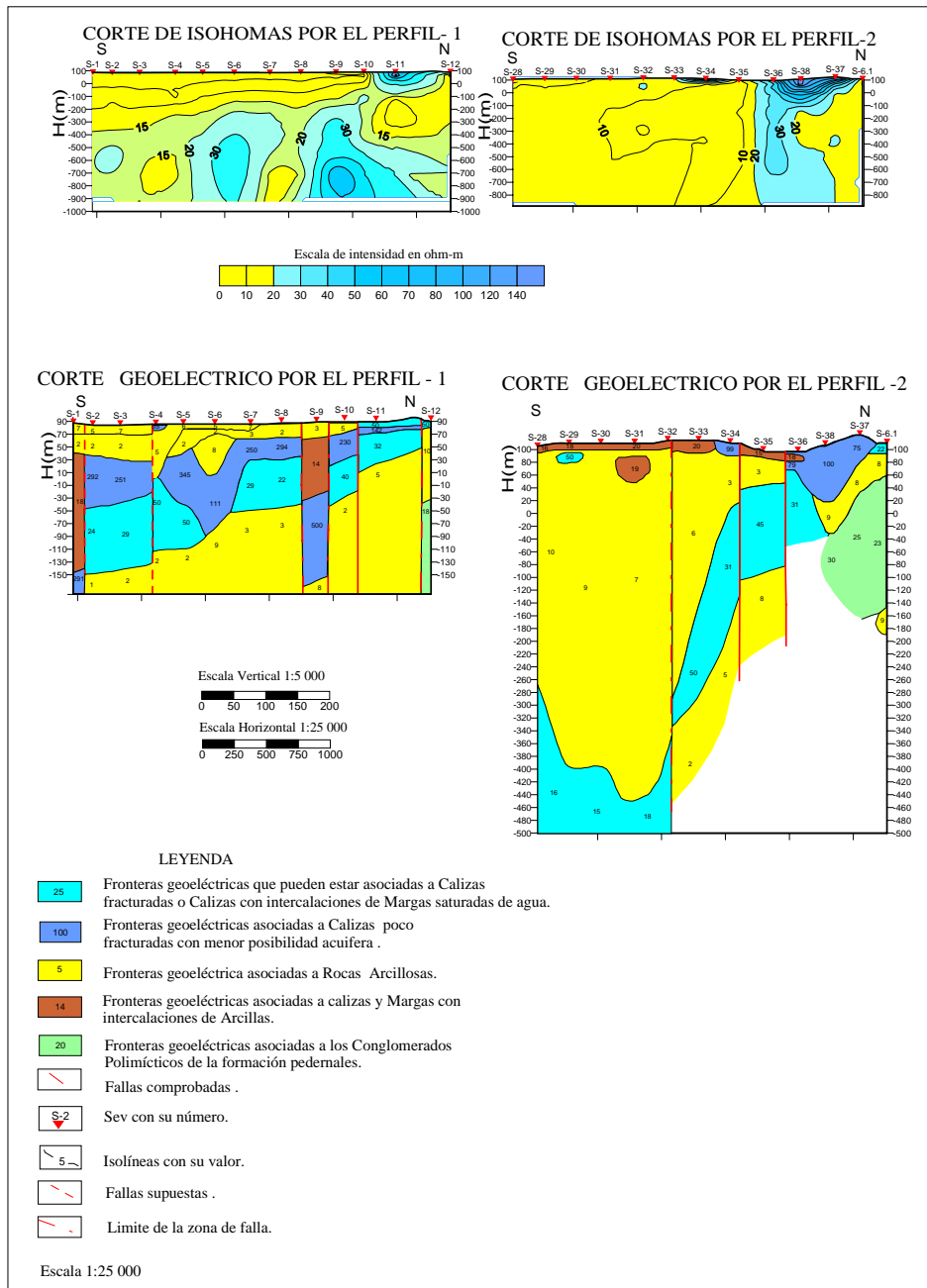
En el corte de isohomas por el perfil-1(ver fig-3), en la parte sur se observan valores bajos de resistividad en la parte superior del corte asociados a las arcillas presentes en la zona y van aumentando gradualmente hasta alcanzar valores superiores a los 20 ohm-m que pueden estar asociados a las calizas o margas con intercalaciones de calizas, esta zona puede ser perspectiva para la presencia de agua con pocas posibilidades de contaminación ya que en la parte superior se encuentran espesores de arcillas superiores a los 20 metros, como se puede ver en el corte geoeléctrico por el perfil-1. En este corte geoeléctrico (ver fig-3), en la parte superior se encuentra una capa con valores de resistividad inferiores a los 20 ohm-m que tiene potencias en varios puntos superiores a los 20m(S-5 y S-6), en esta misma capa de arcillas se observa una capa con valores de resistividad entre (1-3) ohm-m que pueden estar asociado a la presencia de agua salobre que está extendida en gran parte de la zona de estudio, la capa que subyace a ésta, tiene valores de resistividad que alcanzan los 500 ohm-m (s-9), que pueden estar asociados a las calizas presentes en la zona, la capa que subyace con valores de resistividad entre los 20 y 50 ohm-m que pueden estar asociados a calizas cavernosas saturadas de agua, la capa que subyace a esta presenta valores de resistividad inferiores a los 20 ohm-m asociados a las rocas arcillosas que pueden constituir el horizonte impermeable.

En el corte geoeléctrico por el perfil 2 (ver fig-3), se observan en la parte sur puntos esporádicos con valores altos de resistividad asociados a las calizas y margas que afloran en algunos puntos, luego aparecen los espesores de arcillas que alcanzan potencia superiores a los 100m y van aumentando gradualmente de norte a sur con valores de resistividad inferiores a los 20 ohm-m, la capa que subyace con valores superiores a los 20 ohm-m asociados a las calizas y margas con intercalaciones de calizas por debajo de esta capa se observan valores de resistividad inferiores a los 20 ohm-m que pueden estar asociados a las arcillas, constituyendo el impermeable para esta zona. Hacia la parte sur no se pudo dar seguimiento al techo del impermeable por que se encuentra muy profundo(S-28,S-29 y S-30), aunque esta zona constituye un impermeable en forma lateral por los potentes espesores de arcilla y margas con intercalaciones arcillas que presenta. En la parte norte, se observan valores de resistividad superiores a los 20 ohm-m asociados a las calizas, calizas cavernosas y margas con intercalaciones de calizas, por debajo de esta capa se encuentran los valores de resistividad inferiores a los 10 ohm-m asociados a las rocas arcillosas (S-38,S-37 y S-6.1), subyaciendo a esta capa en los mismos puntos de SEV aparecen valores de resistividad superiores a los 15 ohm-m que están asociados a los conglomerados polimícticos corroborado con el sondeo paramétrico (S-37) realizado en la cala 11h que a los 77 metros de profundidad corto los conglomerados. En este mismo perfil se realizó un sondeo paramétrico en el pozo-388 (S-36) que alcanzó los 82 m de profundidad y se quedo en calizas, los valores de resistividad de esta capa son los característicos de las calizas cavernosas saturadas de agua, y coincide con la zona de fuerte gradiente de resistividad que se observa en los mapas de isolíneas para



diferentes aberturas , este pozo tiene un gasto de 25 litros por segundo medidos por los hidrogeólogos del INRH. En esta misma zona de fuerte gradiente se encuentran ubicados varios pozos productivos para abastecer de agua a la población, por los que consideramos que esta zona tectónica definida por varios métodos es una vía de circulación del agua que drena hacia la parte sur y esta limitada por los grandes espesores de arcillas que allí se encuentran.

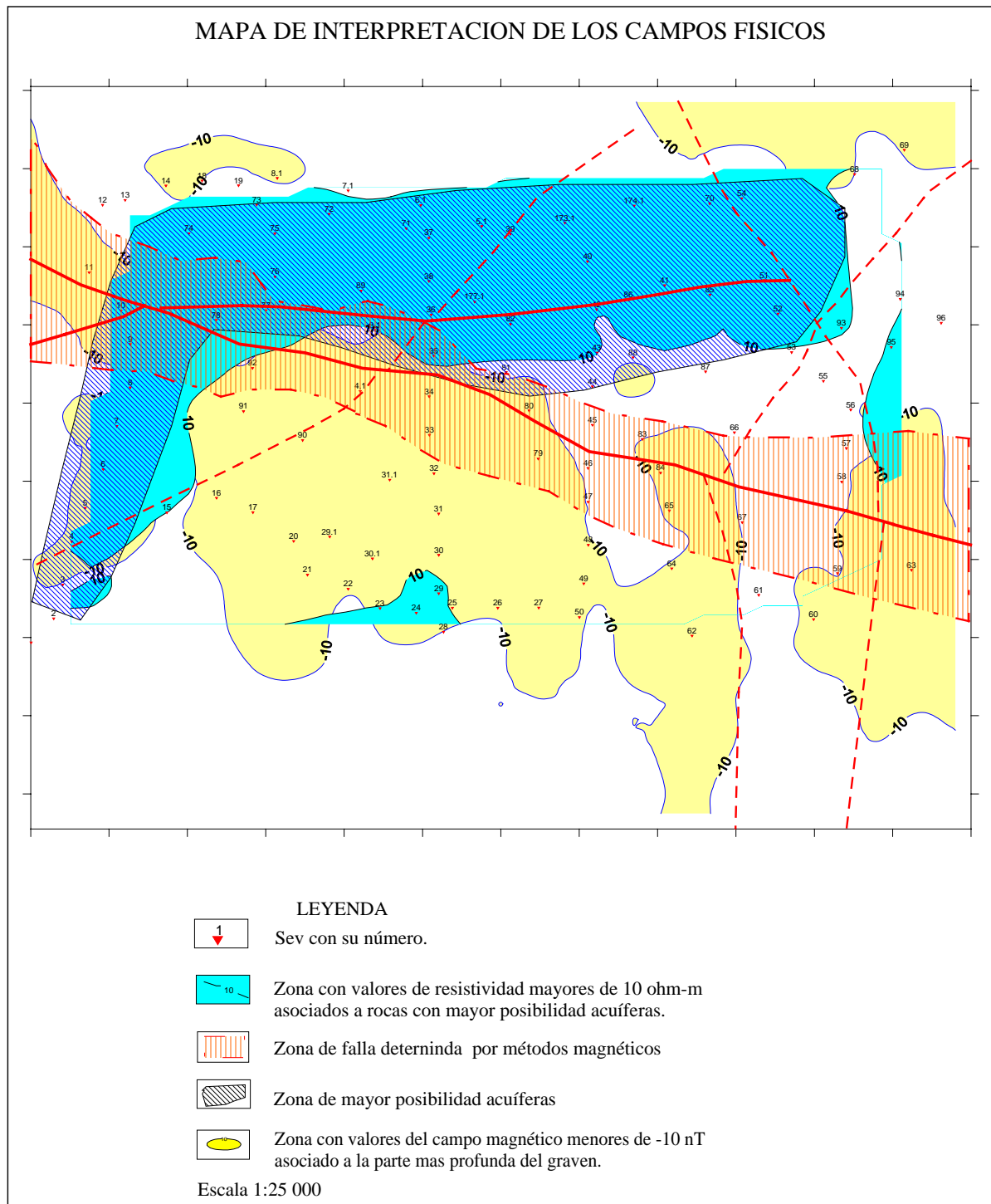
Fig-3:





En el mapa de interpretación de los campos físicos (ver fig-4), se delimita la zona perspectiva (de mayor posibilidad acuífera), la zona con valores de resistividad superior a los 10 ohm-m, y una zona de falla de carácter regional determinada por métodos magnéticos.

Fig-4:





CONCLUSIONES:

1. Las capas de mayores posibilidades acuíferas son las que presentan valores de resistividad entre los 20 y 50 ohm-m según los datos de los SEV paramétricos, ya que las capas con valores de resistividad inferiores a los 20 ohm-m están asociados generalmente a las margas y calizas con intercalaciones de arcillas o arcillas por, la que existe poca circulación de agua.
2. El agua en el sector puede estar controlada por la tectónica, y servir de vía de circulación del agua que drena hacia la parte sur y se encuentra limitada por los grandes espesores de arcillas que allí se encuentran por lo que se recomienda realizar alguna perforación próximo a las zonas de fallas comprobadas que se encuentran dentro de la zona perspectiva.
3. La capa con valores de resistividad menores de 10 ohm-m constituye el horizonte impermeable y es mapeado en la mayor la parte de la zona.



ESTUDIO INGENIERO GEOLÓGICO PARA EL EMPLAZAMIENTO DE UNA CONDUCTORA DE AGUA A LA PENÍNSULA DE RAMÓN

Gustavo Godines Barrera, Moraima Alvarez Ortiz, Carlos Salazar Pérez.

GEOCUBA Estudios Marinos. Punta Santa Catalina s/n. Regla. Ciudad de la Habana, Cuba.

RESUMEN

Dada la necesidad de realizar un proyecto de lanzamiento de una tubería submarina para el abasto de agua al plan turístico de la Península del Ramón, se ejecutó una investigación ingeniero – geológica en la ensenada de Cajimaya, Bahía de Nipe, extendiéndose longitudinalmente como una franja de aproximadamente 1.5 Km de ancho desde el poblado de Felton hasta la Península del Ramón.

Se emplearon las siguientes metodologías de investigación: levantamiento batimétrico, levantamiento sísmico de reflexión, vibroperforación y ensayos de laboratorio geotécnico.

Los resultados obtenidos en la primera etapa de investigación permitieron confeccionar los planos de espesores de sedimentos no consolidados y de profundidad del fondo marino y del basamento rocoso, para a partir de su análisis determinar la traza más favorable a considerar en la ubicación de la tubería. En la segunda etapa a través de las vibro perforaciones y los ensayos de laboratorio se definieron las condiciones ingeniero– geológicas del trazado seleccionado:

- El fondo marino en su totalidad está cubierto por una pequeña capa de cieno fluido en suspensión. Por debajo predominan los materiales arcillosos cohesivos, muy blandos, de alta compresibilidad y baja capacidad soportante.
- Se deben tener en cuenta para el diseño de la tubería; los bajos índices de capacidad soportante de los suelos y su alta compresibilidad, la posibilidad de algún fenómeno de socavación y la inestabilidad de algún material en los pronunciados taludes del canal de acceso.

ABSTRACT

Given the necessity to carry out a project of launching of a submarine pipe for the supply of water to the tourism plan of the Ramón's Peninsula, an geological engineering investigation was executed in the Cajimaya's bay, Bay of Nipe, extending lengthwise like a fringe of approximately 1.5 Km wide from Felton until the Ramón's Peninsula.

The following investigation methodologies were used: bathymetric survey, seismic survey, vibrocore, Geotechnical analysis.

The results obtained in the first stage allowed to make the planes of thickness of not consolidated materials, depth of the marine bottom and of the rocky basement, to determine the most favourable way to consider in the location of the pipe. In the second stage through the vibrocores and the geotechnical laboratory analysis were defined the engineering - geological conditions of the selected layout.

- The marine bottom is entirely covered by a small layer of flowing silt in suspension., in deep very soft clay materials prevail, of high compresibilidad and low capacity support.
- Should be kept in mind for the design of the pipe; the low capacity of support of the materials and their high compressibility, the possibility of some undercut phenomenon and the instability of some materials in the marked slope of the access channel.



Introducción

Con el objetivo de obtener la información ingeniero – geológica necesaria en el proyecto de lanzamiento de una tubería submarina que garantice un gasto de no menos de 200 Lt/seg de agua al plan turístico de la Península del Ramón, Bahía de Nipe, provincia de Holguín; se realizó esta investigación geólogo - geofísica.

El área a considerar en el estudio se encuentra en la Bahía de Nipe, abarcando la ensenada de Cajimaya y la parte interior del canal de acceso a la citada bahía; incluyendo una parte emergida de la Península de Saetía. Extendiéndose longitudinalmente como una franja de aproximadamente 1.5 Km de ancho y 5 km de longitud desde Felton hasta la Península del Ramón.

Para dar respuesta a la tarea planteada se emplearon las siguientes metodologías de investigación: Levantamiento batimétrico, levantamiento sísmico de reflexión, vibroperforación y ensayos de laboratorio geotécnico.

Los resultados de los estudios permitieron la definición en la primera etapa, de la traza más favorable a considerar como ubicación definitiva de la tubería y ya en la segunda etapa mediante las vibroperforaciones y los ensayos de laboratorio la definición de las condiciones ingeniero – geológicas del trazado seleccionado.

Materiales y métodos

Para dar cumplimiento a los objetivos propuestos se empleó el siguiente complejo de métodos de investigación:

Posicionamiento: Se empleó el Sistema de Posicionamiento Global (DGPS) con errores inferiores a ± 1.5 m en la determinación de las coordenadas. En la primera etapa se empleó una escala de 1:10 000 y posteriormente ya en el trazado seleccionado una escala de 1:1000.

Perfilaje Sismoacústico Continuo y Batimetría: Ambos métodos se emplearon simultáneamente con la finalidad de obtener las profundidades del lecho marino, los espesores de sedimentos no consolidados y la profundidad hasta el techo de la roca o estrato competente. En el primero se utilizó una Hidrosonda con fuente de emisión Sparker y un hidrófono de 11 elementos sensibles como receptor. Los trabajos de Batimetría se ejecutaron con un Ecosonda ATLAS DESO-20, con frecuencias de trabajo de 33 y 210 KHz respectivamente, permitiendo realizar una valoración cualitativa tipos de fondo existentes.

Calas de contacto: Consistió en la hinca mediante buceo autónomo y de forma manual de una varilla metálica graduada de 4.2 m de longitud, hasta el límite de resistencia posible de vencer. Obteniéndose de esta manera un criterio cualitativo de la consistencia y compacidad de los sedimentos: donde la hinca se realizaba con facilidad, con resistencia moderada o con gran resistencia y finalmente el límite de rechazo o penetración total de la varilla.

Trabajos de Vibroperforación y muestreo geológico: Se utilizó una vibroperforadora alemana modelo VKG-3, con longitud de muestra de 3.3 m y diámetro de perforación de 108 mm; las calas se distribuyeron sobre el trazado elegido para definir la distribución y continuidad de los elementos ingeniero – geológicos presentes en el área. Al material recuperado se le realizó una descripción detallada durante el proceso de perforación, seleccionando las muestras representativas para ser ensayadas posteriormente, simultáneo a esta actividad se realizó un



examen tacto- visual en toda la longitud del testigo recuperado, para así evaluar la consistencia de los materiales.

Ensayos de laboratorio: Después del muestreo en los pozos se seleccionaron las muestras más representativas para su clasificación a partir de los ensayo de laboratorio siguientes: Humedad Natural, Densidad Natural, Límites de consistencia, Análisis del tamaño de las partículas, Granulometría, Peso Específico, Consolidación y Triaxial

Resultados y discusión

El método sismoacústico fue utilizado en la primera etapa de investigación para valorar los espesores de sedimentos y precisar la ubicación del basamento rocoso o estrato competente más superficial, lo cual nos mostró la traza más favorable a considerar en la ubicación de la tubería.

Para definir las condiciones ingeniero – geológicas del trazado seleccionado, se decidió complementar la información obtenida inicialmente con una serie de sondeos de contactos y vibro perforaciones que precisaran los límites de la zona de interacción suelo- tubería que señalaba la tarea técnica como 2.0 m.

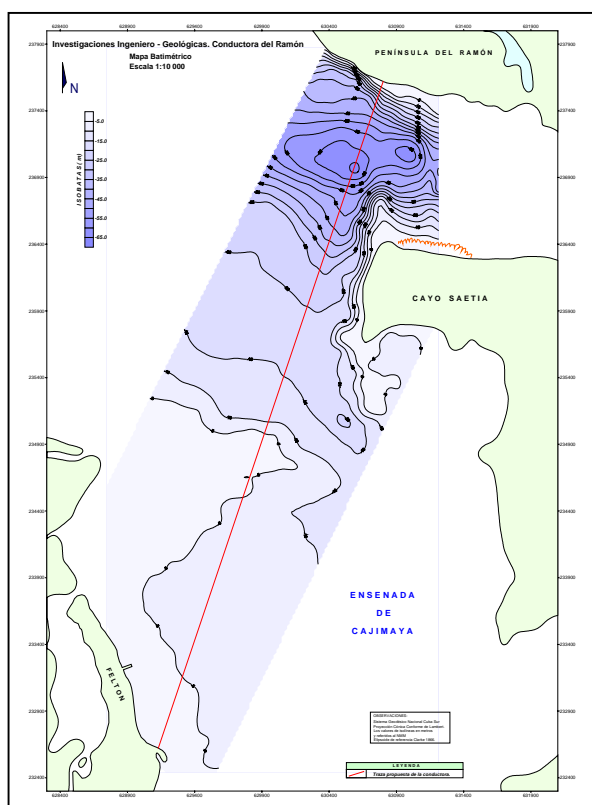


Fig. 1. Mapa batimétrico

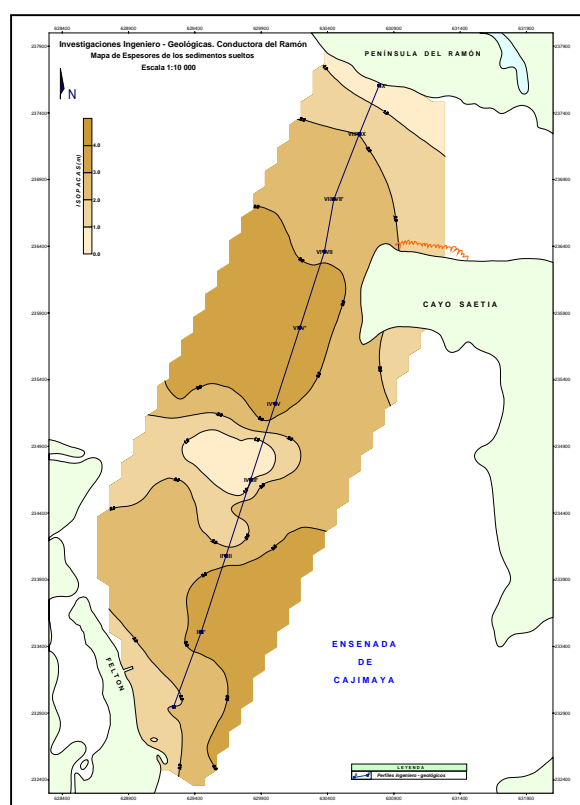


Fig. 2. Mapa de isopacas

En el mapa batimétrico observamos que el perfil del fondo es bastante regular desde su inicio en Felton, con profundidades entre 0 y 25 m y taludes máximos de 1/50, hasta atravesar el área del canal donde los taludes alcanzan 1/10 a 1/20 y una profundidad máxima de 65 m.



Así como el mapa de isopacas permitió valorar a lo largo del área y el trazado propuesto los espesores de los sedimentos no consolidados superiores a 3.0 m, además de determinar para profundidades menores de 3.0 m la frontera competente más somera; este límite coincide con el criterio práctico de consistencia seguido en los perfiles.

Desde el punto de vista ingeniero- geológico en el área fueron determinados cuatro elementos principales que pueden ser resumidos:

1. Cieno gris fluido; que constituye una capa superficial de pequeño espesor entre 0.20 y 0.50 cm, en ocasiones con abundante presencia de fragmentos de conchas, fundamentalmente arcilloso, se recuperó con una consistencia semi- líquida.
2. Arena arcillosa de color gris y granulometría fina, en ocasiones con abundantes restos de conchas y algunos fragmentos de coral, generalmente bastante suelta; se localiza al centro del trazado y constituye una zona morfológicamente baja, por su extensión en el área indica que proviene de una fuente de aporte cercano. (EIG No.2) (SC).
3. Arcilla pobre con arena con 17 a 32 % de arena fina de color gris oscuro. Por partes se encuentran mezcladas con restos de materia vegetal. De acuerdo a criterios de descripción y examen tacto- visual su consistencia está entre blanda y firme. (EIG No.3) (CL).
4. Arcilla franca con alrededor de un 6% de arena, de color gris oscuro con tonos verdosos, en ocasiones parduzcos. Es el elemento de mayor distribución en toda el área de estudio, tanto en área como en profundidad. De acuerdo a criterios de descripción y examen tacto- visual su consistencia es de fluida hasta firme en profundidad, predominando un comportamiento de muy blando a blando. (EIG No.4) (CH).

Tabla. Resumen de valores característicos promedio y \angle^2 -Desviación Standard
 γ_f, γ_d - KN/m³

		w	Gs	γ_f	γ_d	LL	LP	IP	Am	Af	Limo	Arcilla	e	S%
EIG 4 (CH) Arcilla	Min	55.8	2.74	12.8	6.3	54.7	24.4	29.5	1	0	31	44		
	Max	101.7	2.76	14.8	9.5	74.1	35.7	38.8	6	12	49	65		
	Med	80.1	2.75	12.9	7.3	61.1	29.2	31.9	2	4	40	54	2.7	80
	\angle^2	12.38	0.01	13.6	0.8	1.91	3.10	2.99	1.61	3.2	6.33	7.02		
EIG 2 (CL) Arcilla arenosa	Min	57.7		14.4	8.7	46.6	24.7	21.5	1	17	31	36		
	Max	64.2		14.9	9.2	49.8	28.3	22.4	3	32	39	41		
	Med	61.5	2.69	14.7	8.9	48.1	26.2	21.9	1	25	35	39	2.0	82
	\angle^2	3.38		0.35	0.3	1.60	1.87	0.45	1.15	7.5	4	2.51		
EIG 3 (SC) Arena arcillosa	Min	28.6							4	50	10	6		
	Max	42.3							18	74	18	25		
	Med	34.9							11	64	13	12		
	\angle^2	4.94							5.49	7.61	3.45	6.09		

Todos estos suelos investigados los podemos caracterizar, como suelos débiles arcillosos de alta compresibilidad de forma general, los cuales han tenido un proceso de formación como



sedimento estructural en el agua, conjuntamente con procesos microbiológicos y aporte de materia orgánica coloidal.

Estos elementos se muestran distribuidos en los perfiles donde mantuvimos representada la subdivisión obtenida en campo por criterios de examen tacto- visual sobre la consistencia de los mismos, (no se tienen criterios prácticos de NSPT al no realizarse la perforación a percusión). Ver Fig.3.

Queremos precisar que esta clasificación de consistencia no coincide con el análisis de índice de consistencia que pudiera realizarse de los ensayos de humedad y límite, donde al ser de mayor rango los primeros, eso estaría indicando un carácter fluido para todos estos materiales.

Esta diferencia la consideramos asociada al hecho de que en las arcillas con alto contenido orgánico, cuando el secado de la muestra se hace al horno, llegando a contenidos de agua muy pequeños, los límites disminuyen apreciablemente al ser determinados posteriormente añadiendo agua a las muestras a partir de esas bajas humedades. Esto es debido a que el secado produce cambios irreversibles en las características de la fracción orgánica coloidal de un suelo.

Se deben tener en cuenta para el diseño de la tubería; los bajos índices de capacidad soportante de los suelos y su alta compresibilidad, la posibilidad de algún fenómeno de socavación y la inestabilidad de algún material en los pronunciados taludes del canal de acceso.

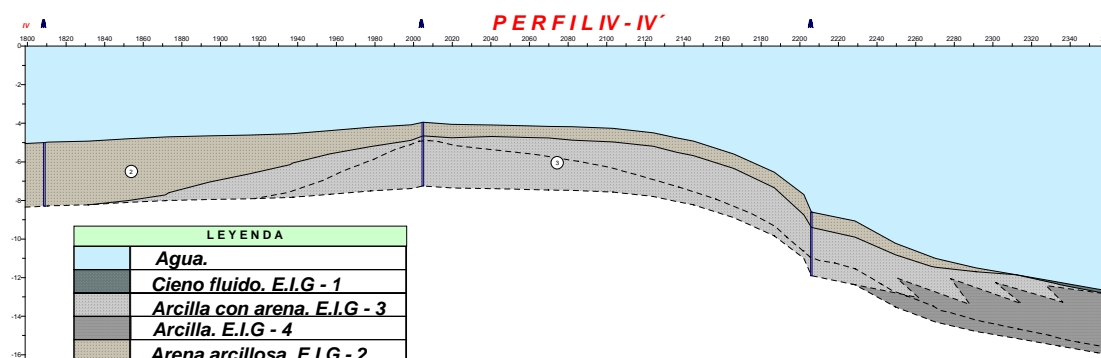


Fig. 3. Representación de un tramo del Perfil Ingeniero - Geológico



Conclusiones y recomendaciones.

1. El correcto funcionamiento de las tuberías colocadas sobre el fondo depende de factores como la estabilidad del suelo que las sustenta y de las fuerzas que este le transmite; estos factores a su vez dependen de las características del fondo marino superficial y del sistema de instalación de las tuberías.
2. En el trazado propuesto para el emplazamiento de la conductora predominan los materiales arcillosos cohesivos muy blandos, de alta compresibilidad y baja capacidad soportante; de ahí que recomendamos considerar para el diseño de la obra la arcilla como estrato soportante con una condición de muy blanda y tener en cuenta para los cálculos, los parámetros que se relacionan en la tabla mostrada anteriormente.
3. En el caso del tendido de la tubería sobre los materiales areno-arcillosos como estrato soportante considerar la condición de compacidad suelta de los mismos y de esa forma valorar los parámetros relacionados en la tabla.
4. Para la ubicación de la tubería en la zona de materiales arenosos próximos a la vibroperforación CV-28 se debe tener mucho cuidado por la posible existencia de intercalación de materiales sin capacidad soportante o de algunas oquedades ocasionadas por la existencia de un posible proceso de desarrollo coralino local, que explicarían la bajada en caída libre del instrumento de perforación en el pozo, algo muy raro en estos materiales. De ser posible sería recomendable desviar su trazado.
5. En lo que refiere a las características del fondo marino superficial en nuestro caso la existencia de suelos cohesivos muy blandos de alta compresibilidad determina la posibilidad de que al depositar la tubería lastrada, esta se entierre a una profundidad excesiva debido a la baja capacidad de soporte de los suelos. Esto entre otras alternativas puede solucionarse haciendo una trinchera previa a la colocación de la misma y colocando sacos de arena para que sobre ellos sea colocada la tubería, anclando esta solamente para evitar su flotabilidad.
6. Es importante también tener en cuenta los posibles asentamientos diferenciales excesivos que puedan ocasionar el contacto entre dos tipos distintos de suelos como lo son las arcillas muy blandas y la arena arcillosa.
7. En estos materiales arcillosos y condicionado además por la profundidad considerable en gran parte del área son poco probables los fenómenos de socavación, sin embargo en las zonas con poca profundidad de agua de los bajos donde inclusive es mayor el contenido de material granular arenoso; algunas condiciones meteorológicas-oceanográficas extremas asociadas a tormentas severas pueden provocar cierta socavación y es recomendable el anclaje de la tubería en estos casos como factor de estabilidad.
8. En las zonas de taludes pronunciados del canal el sistema de instalación de la tubería debe tener en cuenta el posible deslizamiento de volumen de sedimentos en algún evento extremo que genere la transmisión de esfuerzos a la tubería por la nueva conformación de un talud que puedan afectar su funcionamiento.



Bibliografía consultada.

1. Tomás de la Torre. 1968. Estudio Atraques 1 y 2 y Dragado Puerto de Felton. ENIA.
2. Exp. Soviética. 1983. Estudio para el emplazamiento de una base de FULL-OIL, ENIA. Ensenada de la Hoya. Pta Pomba.
3. Francisco O, 1995. Estudio para campo de boyas de Felton, Geocuba Estudios Marinos.
4. Otto Fernández, Manuel Arocha et al. Esquema general de las condiciones ingeniero-geológicas en los alrededores de la Bahía de Nipe. ENIA.
5. Diversos autores. Tablas empíricas para valorar el comportamiento mecánico de los suelos a partir de su clasificación y propiedades físicas.



PRESENTACIÓN DE UN EJEMPLO ANALÍTICO DE UN CONDUCTOR HIDRÁUCLICO EN EL ACUÍFERO FISURADO DE LA ZONA DE PUNTA ESPINILLO-RINCÓN DEL CERRO

A ANALITICAL EXAMPLE OF ONE HYDRAULIC CONDUCTOR IN THE FRACTURED AQUIFER IN THE PUNTA ESPINILLO-RINCON DEL CERRO AREA

Karina Pamoukaghlian

Instituto de Geología y Paleontología, FACULTAD DE CIENCIAS
Iguá 4225, Montevideo, Tel: 525.86.18, karpam@movinet.com.uy

RESÚMEN

En el marco del Proyecto PRENADER, se realizó el análisis de las características hidráulicas del Acuífero Fisurado de la zona de PUNTA ESPINILLO- RINCÓN DEL CERRO. Dicho Acuífero corresponde al basamento fracturado de la Formación Montevideo. Este contexto geotectónico es muy propicio para el emplazamiento de un acuífero de condiciones económicamente rentables, por tanto un importante recurso mineral.

Aquí se presentan los estudios analíticos realizados en un conductor hidráulico de dicho acuífero, como ejemplo metodológico a ser tenido en cuenta a la hora de realizar un estudio de Acuífero Fisurado, ya sea de origen ígneo-metamórfico o cárstico.

Será entonces analizado el pozo Bentancourt con su correspondiente piezómetro y el pozo Domingo con su piezómetro, para luego hacer una correlación de datos entre ambos, para dilucidar las características del conductor hidráulico inferido.



INTRODUCCIÓN

Este trabajo se realizó en el marco del Proyecto PRENADER, como se señala en el Abstract y su vez forma parte de un trabajo monográfico de grado de las referidas autoras.

Los cálculos presentados se basan en la metodología planteada por FILHIO (1979) y se hace énfasis aquí en la interpretación de los datos obtenidos mediante este análisis físico-matemático.

AREA DE TRABAJO

La zona a estudiar se ubica al SW de Montevideo, como se señala en el mapa de la figura 1, ubicándose entre Punta del Tigre y Punta Espinillo (de Este a Oeste) y entre Punta Yeguas y Punta Pajonal (de Sur a Noroeste).

Las coordenadas que delimitan la zona son: 6150,6 N; 6146,4 S; 442,1W y 457,9 E.

Ver Fig. 1: Mapa de localización de la zona

MARCO GEOLÓGICO REGIONAL

La zona de estudio está constituida por las siguientes formaciones geológicas, en el siguiente orden estratigráfico:

Formación Montevideo: forma el basamento de la zona, de edad precámbrica, aflorando en las zonas costeras, y está constituida por gneisses oligoclásticos, anfibolitas, micaesquistos y cuarcitas micáceas (BOSSI & NAVARRO 1998).

Granito de la Paz: Este granito de carácter anorogénico hace intrusión en la secuencia metamórfica arriba mencionada, desconociéndose aún sus relaciones estructurales con la Fm. Montevideo. Se encuentra intensamente fracturado por su proximidad a la falla tectónica sur de la fosa Santa Lucía de rumbo regional N60-70E, la cual determinó fracturas múltiples de rumbos N60-80E, y las conjugadas N30-45W, que facilitan la circulación de aguas superficiales y subterráneas.

Formación Fray Bentos: compuesta por rocas limosas de contenido de arcilla, arena fina y calcáreo variable BOSSI (1998), de edad oligoceno (PRECIOZZI et al 1998).

Formación Raigón: está compuesta por arcillas verdes, arenas finas algo arcillosas y niveles conglomerádicos (GOSO 1964, In: Bossi 1998). Se le asigna una edad Plioceno Superior. Presenta una alta capacidad acuífera.

Formación Libertad: compuesta por lodolitas y loess, con predominio de las primeras (GOSO Y BOSSI 1966, IN: Bossi 1998), de edad Pleistoceno (PRECIOZZI et al 1998). Funciona como manto "impermeable" sobre el acuífero Raigón, funcionando como capa protectora de este acuífero.

METODOLOGÍA

Se procedió a la interpretación de los datos obtenidos a partir del ensayo de bombeo en el siguiente orden:

- (1)- construcción de un gráfico volumen bombeado y niveles dinámicos en función del tiempo.
- (2)- construcción de la curva capacidad específica y rebajamiento, en coordenadas bilogarítmicas.



- (3)- interpretación de la última curva mencionada, con la variación de volumen bombeado en función del tiempo, ajustando la misma a una ley de potencia de tipo $Y(s_9=Q*s(-D))$.
- (4)- cálculo de la transmisibilidad del conductor hidráulico según JACOB (1946)(in: Custodio Llamas, 1996).
- (5)- cálculo del radio de influencia mediante una estimación gráfica.

DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS HIDRÁULICOS

Se presentan a continuación las determinaciones realizadas para el pozo Bentancourt - piezómetro Ferreira, basados en ensayos de bombeo, en los cuales se tuvieron en cuenta las sugerencias dadas por GENETIER (1984).

a)- Se determinó la fractura más profunda y la fractura más somera. Para ello se realizó una primera aproximación mediante el gráfico capacidad específica y descenso (Gráfico 1), observándose que la escala no era adecuada para dicha determinación. El Gráfico 2 se obtiene por medio de un ajuste de la escala. Así se determinan la fractura más profunda FMP a los 316m, y la fractura más somera FMR a los 31,6m.

b)- Se determinó el valor del espesor saturado inicial como la diferencia entre la fractura más profunda FMP y el nivel estático NE, siendo el mismo 309,1m.

c)- El espesor de la zona activa corresponde al intervalo entre la fractura más somera FMP y la más profunda FMR, obteniéndose como resultado de dicha diferencia un espesor de 284,4m.

d)- La capacidad específica observada es la relación entre el caudal y el descenso (ambos en función del tiempo). Como el ensayo de bombeo fue realizado en tres intervalos de caudal se asimilan a caudales constantes a los efectos de la evaluación de dicho parámetro. Se determinó la capacidad específica observada correspondiente al descenso máximo: $0,154\text{m}^3/\text{h}$.

e)- El caudal fractal uniforme se determinó gráficamente, siendo el mismo el punto de corte del eje de las ordenadas con la curva de descenso-capacidad específica (gráfico 1).

f)- La dimensión fractal D se obtiene por medio de la ecuación

$$D = \frac{\log(Q^*/s_w)}{\log.s_w}$$

Siendo la dimensión fractal obtenida a partir de la ecuación señalada 1,09.

g)- La capacidad específica fractal se obtiene como la relación entre el caudal y el descenso máximo, obteniéndose como resultado un valor de $0,155\text{m}^2/\text{h}$.

h)- La transmisibilidad del conductor hidráulico se estima mediante la estimación de JACOB (op.cit.), $(T_f = 0.183Q^*/s_w^D)$
La transmisibilidad estimada es $0,05\text{ m}^2/\text{h}$.

i)- El radio de influencia no puede ser estimado por la ecuación de Jacob, ya que sólo sería válido en Acuífero Fisurado si la distancia entre el pozo principal y el pozo de monitoreo fuera menor a 40m (en este caso es de 170m). Por lo tanto se utiliza la aproximación gráfica (ver Gráfico 3), donde se plotean las profundidades de ambos pozos y la distancia entre ellos,



tomando uno como punto de referencia, obteniendo así un radio de influencia de 190,4m, como el punto de corte con el eje de las abscisas.

j)- La de abertura media de las fracturas viene dada por la ecuación:

$$a = \frac{(Tf \cdot 12v)^{1/2}}{g}$$

El valor de a hallado es igual a $7,4 \times 10^{-5}$

k)- El caudal específico fractal se determina mediante la ecuación:

$$q = Q^*/Aa$$

Aa es el área de vacíos de la zona activa del pozo ($2,64m^2$), dada por la ecuación $Aa = 2\pi \cdot rw \cdot a$. Entonces el caudal específico fractal será $2,2 \times 10^6$ m/h.

l)- La conductividad hidráulica (Kf) se expresa mediante la fórmula $Kf = Tf/a$, de donde la conductividad hidráulica es igual a $675m/h$.

m)- La permeabilidad (kf) de las fracturas se obtiene mediante la ecuación:

$Kf = Kf \cdot v/g$, siendo v la viscosidad cinemática (9×10^{-7}) y g la gravedad ($9,8m^2/s$), se obtiene una permeabilidad de fractura de $6,2m/h$.

De la misma manera se obtienen los siguientes resultados para el pozo Domingo-piezómetro Merlo:

a)- La fractura más profunda FMP se encuentra a los 501m y la fractura más somera FMR, a los 23,9m. (ver gráfico 4).

b)- El espesor saturado inicial es de 13,87m

c)- El espesor de la zona activa es de 487,13m.

d)- La inmersión estática del nivel de succión de la bomba es de 41,13m.

e)- La capacidad específica observada correspondiente al descenso máximo, es de $0,13m^2/h$.

f)- El caudal fractal uniforme es de 25,12 l/h.

g)- La dimensión fractal D es 0,025

h)- La capacidad específica fractal será 23,13 m/h.

i)- La transmisibilidad obtenida por la aproximación de Jacob será igual a $4,5m,2/h$.

j)- Utilizando la misma aproximación para el radio de influencia que la arriba señalada, se estima en (3,9m 8ver gráfico5).

k)- La abertura media de las fracturas se determina como $7,1 \times 10^{-4}m$

l)- El caudal específico fractal q^* será 73,9 m/h.



m)- La conductividad hidráulica es igual a 5,8m/h.

n)- La porosidad es de $1,85 \times 10^{-6}$.

INTERPRETACIÓN DE LOS DATOS

- El análisis aquí presentado lleva a la comparación de dos pozos en un Acuífero Fisurado. Será importante evaluar si existe interferencia entre ambos pozos, y sería recomendable realizar la misma evaluación en varios pozos estratégicamente situados dentro del mismo acuífero.

En este caso, evaluando la interferencia por medio de las fracturas horizontales, se observa que el Pozo Bentancourt presenta una FMP a los 316m, mientras que el pozo Domingo presenta la FMP a los 501m; por otro lado las FMR se encuentran a los 31,6m y 23,9m respectivamente. Se observa que si bien las FMP se apartan considerablemente, las FMR no son demasiado disímiles.

Se podría inferir un conductor hidráulico entonces para el caso de las FMR, donde se determinaría un buzamiento para esta fractura de 1° , o sea horizontal (siendo la distancia entre los pozos de 418m y la diferencia de profundidad entre las FMR de 7,7m, se estimó el ángulo de buzamiento por medio de trigonometría). Sin embargo, el buzamiento que tendría la fractura correspondiente a la FMP sería de 23° , correspondiendo a una diferencia de profundidad entre las FMP de 185m.

Se sugiere que existiría un conductor hidráulico correspondiente a la FMR entre ambos pozos.

CONCLUSIONES

1- Como todo modelo matemático, no podrá por sí sólo conformar un modelo geológico, es únicamente una adaptación para la comprensión de un contexto hidrogeológico que debe complementarse con un análisis detallado desde el punto de vista petrográfico, geotectónico e hidrogeológico. Es decir se deben realizar además curvas piezométricas, donde se debe tener precaución por tratarse de un acuífero fisurado, y sólo podrán ser aplicables las conclusiones de direcciones de flujo se comprueba la "homogeneidad" aparente del acuífero. Análisis de este tipo ya fueron realizados por MONTAÑO et al (2000).

2- Algunos parámetros se deben tomar con cuidado como por ejemplo los datos de abertura media de la fractura y porosidad; ya que tratándose de un acuífero fisurado la porosidad media no refleja la potencialidad del acuífero, porque habrá muchas zonas en que no haya fractura. Sin embargo estos parámetros pueden ser importantes a la hora de utilizarlos en determinaciones posteriores.

3- La zona de estudio presenta serios problemas en el suministro de agua, ya sea debido a sobreexplotación del acuífero o mal manejo del mismo. Una de las posibles causas es la interferencia de pozos por medio de fracturas horizontales, lo cual deberá analizarse exhaustivamente. El ejemplo aquí expuesto no puede de ninguna manera generalizarse, pero muestra una situación de posible interferencia, cuando se han tomado dos pozos de modo aleatorio.

BIBLIOGRAFÍA

ARRIGHETTI et al. 1999. JORGE MONTAÑO, 1999, *Prospección de aguas subterráneas en rocas cristalinas, Florida. Uruguay*. In: Proyecto: Apoyo a la creación de un Departamento de geofísica de la DINAMIGE, 59: 4-62.



BOSSI & NAVARRO, 1988. *Geología del Uruguay*, Montevideo, Universidad de la República, **68**: 813-871.

CUSTODIO E., LLAMAS M.R. 1996. *Hidrogeología Subterránea*. 2ª edición. Vol I y II. Editorial Omega.Barcelona-España.

FREEZE R.A. & CHERRY J.A.1979. *Groundwater*. New Jersey: Prentice Hall. **18**: 145-163

GENETIER B., 1984. *La Pratique des pompages d'essai en hydrogéologie*. Orléans. **18**: 53-71

HEIZEN et al.1986, *Elementos del Ciclo Hidrológico. Memoria Explicativa, Carta Hidrogeológica Escala 1/2.000.000*, Montevideo, Uruguay

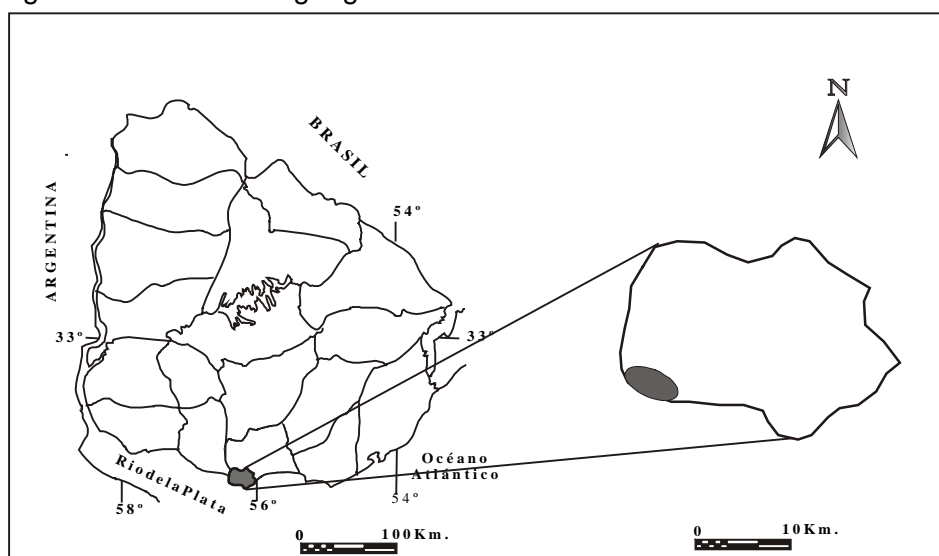
MANOEL FILHO J.1997. Tópicos de Geología de los medios porosos y fisurados. In: SEGUNDO CURSO SUDAMERICANO SOBRE EVOLUCIÓN DE VULNERABILIDAD DE ACUÍFEROS. Termas de Guaviyú. Paysandú. Uruguay.

MONTAÑO et al. 2000, *Metodología para el estudio de sistemas hidrogeológicos discontinuos - Punta Espinillo*. In: Revista de la S.U.G. Tercera edición. No.7. **9**:15-23 Uruguay.

PRECIOZZI et al. Memoria explicativa de la Carta Geológica del Uruguay a escala 1:500.000. dirección Nacional de Minería y Geología. Pp 1-90. Montevideo.



Figura 1- Localización geográfica de la zona de estudio



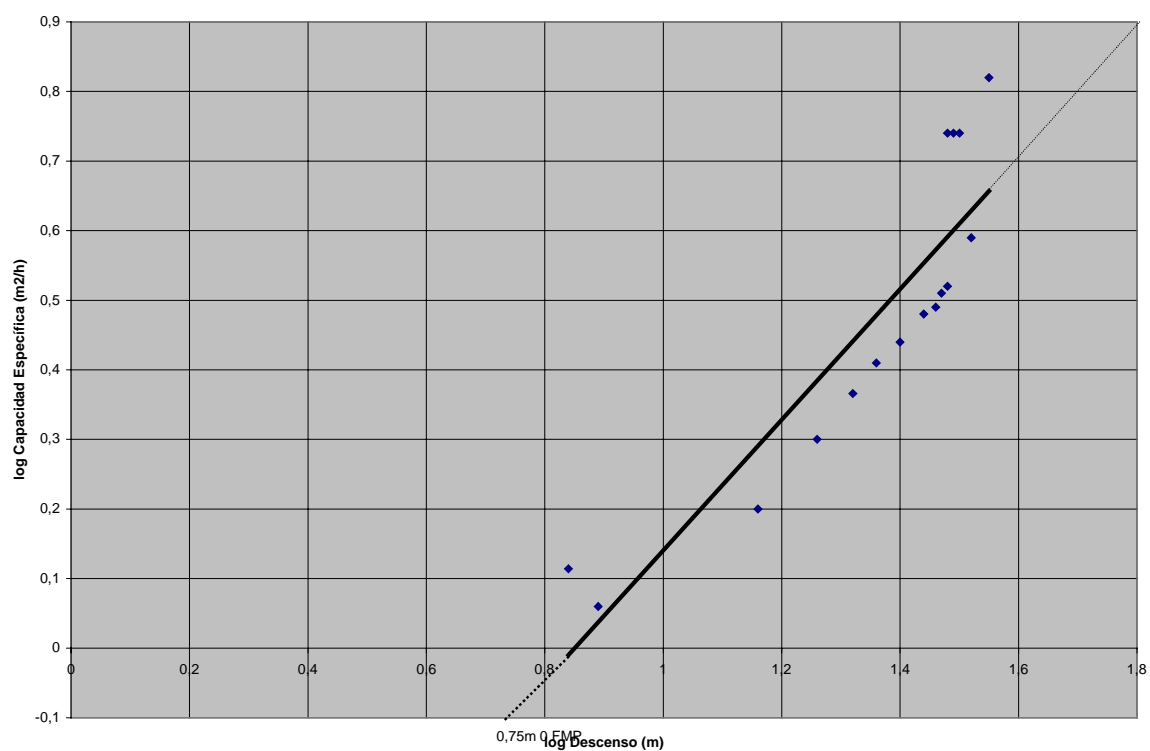
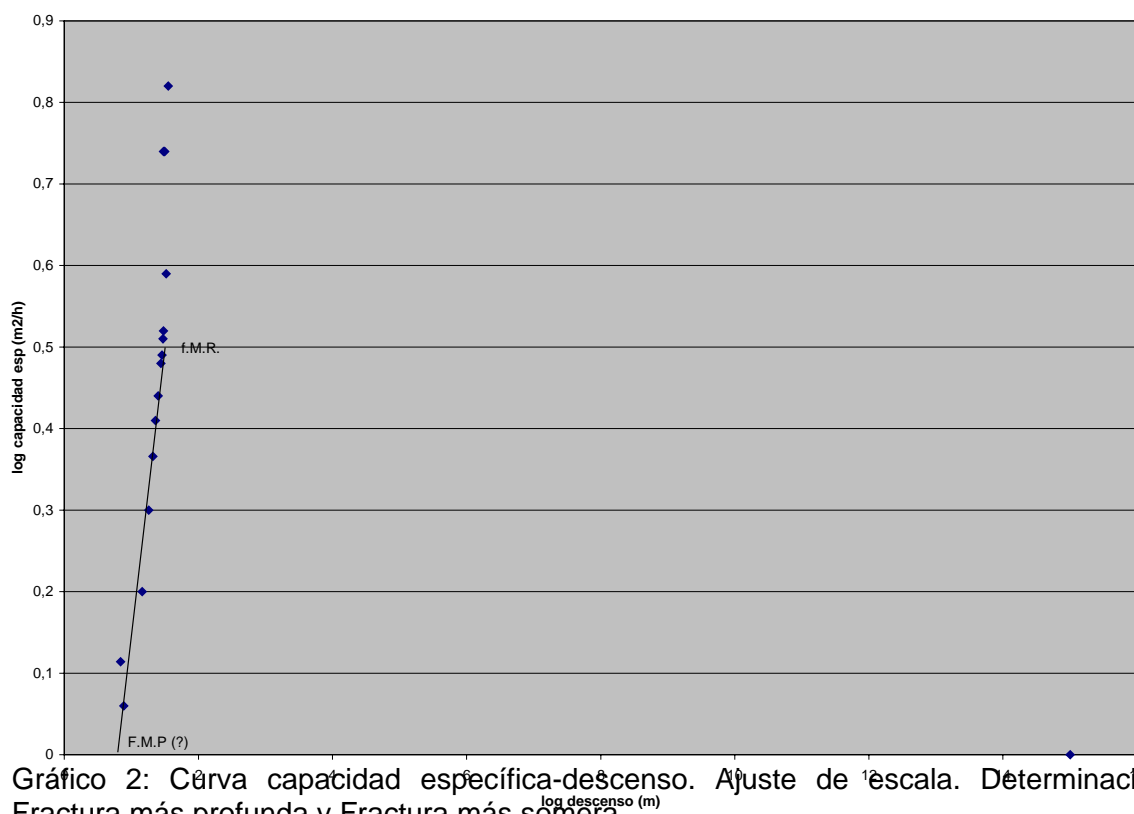


Gráfico 1- Curva capacidad específica - descenso. Primera aproximación



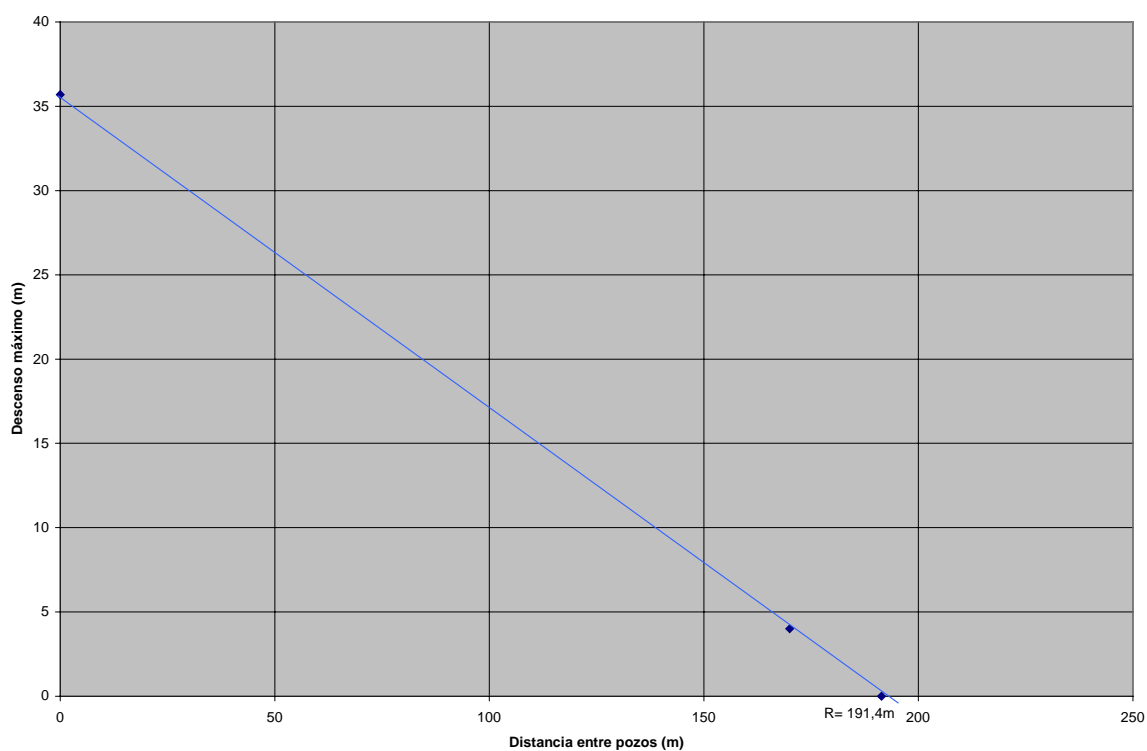


Gráfico 3: Aproximación del Radio de Influencia (Pozo Bentancourt-piezómetro Ferreira)

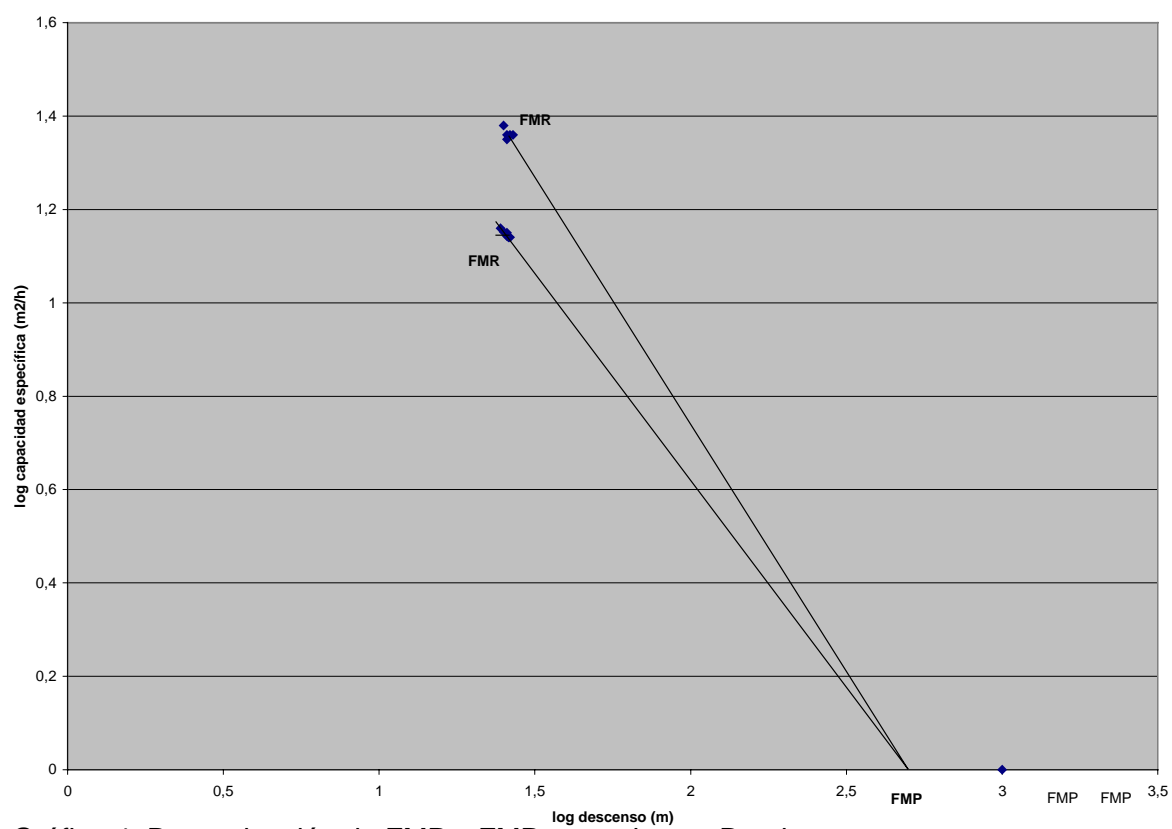


Gráfico 4: Determinación de FMP y FMR para el pozo Domingo

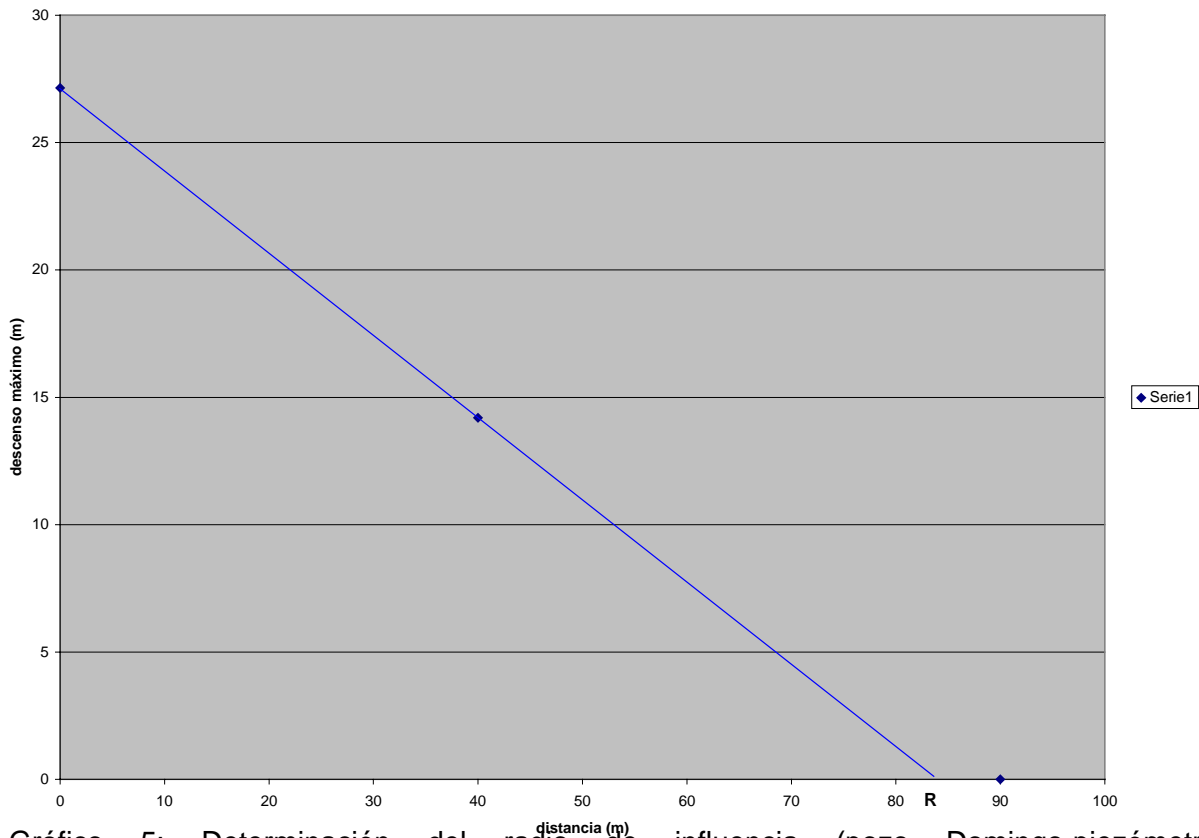


Gráfico 5: Determinación del radio de influencia (pozo Domingo-piezómetro Merlo)



ESTUDIOS INGENIERO- GEOLÓGICO DE MATERIAL DE RELLENO PARA LA LAGUNA MANGÓN.

Jesús M. Veliz Basabe, Moraima Alvarez Ortiz

GEOCUBA Estudios Marinos. Punta Santa Catalina s/n. Regla. Ciudad de la Habana, Cuba.

RESUMEN:

La zona de estudio preseleccionada se localizó a 3,5 millas al NE de la Península de Hicacos. Donde el problema científico- ambiental fue la evaluación de las propiedades físicas para los sedimentos no cohesivos o no consolidados en función de identificar su idoneidad para material de regeneración de la playa de Varadero y/o como relleno de la Laguna Mangón.

Los objetivos básicos del estudio fueron los siguientes.

- Las propiedades físicas de los sedimentos no cohesivos.
- El espesor útil hasta el techo de la roca.

El complejo de método de investigación lo conformaron: Posicionamiento hidrográfico, perforación, muestreo geológico, buceo autónomo y ensayos de laboratorio. Los trabajos de gabinete abarcaron la corrección por marea de los trabajos de perforación, análisis estadístico de los datos, clasificación para la granulometría y para dragado.

Los resultados permitieron inferir que el área (Ha) evaluada la constituye una arena de grano fino muy uniforme o mal graduada de baja capacidad de compactación con un contenido menor del 20% de restos esqueléticos. Esta arena no es idónea con la arena de la Playa de Varadero por contener alguna cantidad de arcilla. Sin embargo se podría utilizar como material de relleno de la Laguna Mangón, es de señalar que esta arena posee una baja capacidad de compactación, por lo que recomendamos añadirle un por ciento de gravilla para elevar la capacidad de trabajo.

ABSTRACT

The area of study was located to 3, 5 miles to the NE of the Peninsula of Hicacos. Where the scientific-environmental problem was the evaluation of the physical properties of the non cohesive or not consolidated silts to identify their suitability as material of regeneration of the beach and fill the Laguna Mangón.

The basic objectives of the study were the following ones.

- The physical properties of the non cohesive silts.
- The useful thickness until the roof of the rock.

The complex of investigation methods were conformed by: hydrographic positioning, perforation, geologic sampling, autonomous dive and laboratory analysis. The cabinet works embraced the correction for tide of the perforation works, statistical analysis of the data, classification for the grain size and dredging.

The results allowed to infer that the evaluated area constitutes a very uniform or not well graduate sand of fine grain of low compaction capacity with content smaller than 20% of remains debris. This sand is not suitable with the sand of the Beach because of the contain of some quantity of clay. However you could use as fill material in the Laguna Mangón, it is of pointing out that this sand possesses a low compaction capacity, for what we recommend to add him a rock percent to elevate the work capacity.



Introducción

El presente trabajo se confecciona para dar respuesta a la solicitud técnica de investigación Ingeniero- Geológica, cuyos objetivos específicos son: evaluación de las propiedades físicas para los sedimentos no cohesivos o no consolidados en función de identificar su idoneidad para material de regeneración de la playa de Varadero y/o como relleno de la Laguna Mangón, así como determinar las reservas de arenas y realizar su clasificación para dragado.

El área de estudio se localiza en la parte este del canal de entrada a la Bahía de Cárdenas provincia de Matanzas y la misma se encuentra a unas 3.5 millas de la Península de Hicacos.

Para dar solución a la tarea planteada se elaboró un programa de investigación compuesto por:

- Sistema de Posicionamiento.
- Perforación y muestreo.
- Calas de Contacto.
- Ensayos de laboratorio.
- Consulta de investigación sobre investigaciones precedentes en la región.

Los trabajos de gabinete abarcaron la corrección por marea de los trabajos de perforación, análisis estadístico de los datos, clasificación para la granulometría y para dragado.

Los resultados permitieron inferir que en el área evaluada la arena es de grano fino, muy uniforme o mal graduada, de baja capacidad de compactación y con un contenido menor del 20% de restos esquelétales.

Materiales y métodos

Para dar cumplimiento a los objetivos propuestos se empleó el siguiente complejo de métodos de investigación.

- **Sistema de posicionamiento Global de alta precisión (DGPS):** Para georreferenciar las calas de perforación y las de contacto en el espacio acuoso estudiado con la calidad y precisión requerida se utilizó el Sistema de Posicionamiento Global en su variante diferencial (DGPS) instalado a bordo de la embarcación con errores en la determinación de las coordenadas de las estaciones de +/- 1.00 m.
- **Trabajos de perforación (CP):** Para esta actividad se utilizó una perforadora manual a golpe, operada mediante buceo autónomo. Las perforaciones se ejecutaron hasta los 3.00 m por debajo del lecho marino, en los sedimentos no consolidados (suelos cohesivos) o hasta llegar a la roca de base cuando yacía por encima de los 3.00 m. La descripción tacto visual de los suelos se realizó durante los trabajos de campo. Se tomaron 47 muestras alteradas, las cuales fueron envasadas, embaladas y etiquetadas y posteriormente enviada al laboratorio geotécnico.
- **Calas de contacto (CC):** Las calas de contacto fueron realizadas con una varilla de acero inoxidable de 3.50 m de longitud mediante el buceo autónomo, intercaladas entre las calas de perforación con el objetivo de determinar espesores de sedimentos



- **Ensayos de laboratorio:** Se realizaron a las muestra recuperadas para la determinación de las propiedades físicas, según las normas ASTM.
Los ensayos realizados fueron los siguientes:
 - Granulometría
 - Peso específico
 - Densidad seca
 - Humedad
- **Trabajo de gabinete:** Los trabajos de gabinete abarcaron la corrección por marea de los trabajos de perforación, análisis estadístico de los datos, clasificación para la granulometría y para dragado.

Resultados y discusión

Como resultado de los trabajos de campo, laboratorio y el procesamiento se obtuvieron los datos necesarios para realizar la caracterización ingeniero-geológica del área estudiada así como su litología y propiedades físicas del elemento o capa detectada.

En el área predomina una sola capa ingeniero-geológica, hasta la profundidad estudiada; la cual es una arena de color gris de grano fino, suelta muy uniforme o mal graduada, con 10 – 20 % de restos de conchas de moluscos, las cuales pasan hasta el tamiz No. 20 (representan las gravas); con menos 1.19 % de finos, ver Tabla No. 1. Según el Sistema Unificado de Clasificación pertenece al grupo SP.

Existe en el área otra arena de color gris de grano fino-medio, suelta muy uniforme o mal graduada con 10 – 20 % de restos de conchas de moluscos las cuales pasan hasta el tamiz No. 20 (representan las gravas) con menos del 0.80 % de finos y se clasifica en el grupo SP.

Por lo que consideramos que ambas tienen las mismas características físicas y por lo tanto no es erróneo decir que son cuasi homogéneas.

Esta arena después de compactada es permeable, con buena resistencia al corte o cizallamiento y compresibilidad muy baja.



Tabla no. 1.- Características físicas.

Cala No.	Muest No.	Prof. (m)	Humedad W (%)	Peso Específico Gs (Kn/m ³)	Densidad seca γ_d (Kn/m ³)	Relación de vacío e	Porosidad η (%)	Saturación S(%)
2	3	4	5	6	7	8	9	10
CP-4	1	8.70	51.06	2.78	1.54	0.80	44.44	1.81
CP-10	1	7.00	----	2.71	1.31	1.07	51.69	----
CP-17	1	8.00	42.68	2.80	1.43	0.96	48.98	1.24
CP-20	1	8.10	----	2.78	1.54	0.80	44.44	----
CP-41	1	8.70	49.60	2.80	1.46	0.92	47.92	1.24
CP-47	1	8.50	----	2.78	1.46	0.90	47.37	----
CP-58	1	8.80	45.27	2.79	1.54	0.81	44.75	1.56
CP-60	1	8.60	45.59	2.83	1.58	0.79	44.13	1.63
CP-64	1	8.40	----	2.83	1.35	1.10	52.38	----
CP-74	1	8.50	----	2.77	1.33	1.08	51.92	----
CP-97	1	8.80	----	2.69	1.29	1.08	51.92	----
Media Aritmética (x prom.)			44.33	2.77	1.44	8	48.10	1.51
Media real (variación)			42.12<w<46.54	2.74<Gs<2.80	1.38< γ_d <1.50	0.86<e<1.00	47.2< η <50.8	1.30<S<1.72
Media cuadrática (σ)			1.70	0.045	0.099	0.115	2.87	0.23
Coeficiente de variabilidad (v)			3.83	1.62	6.88	2.36	5.97	15.23
Error medio aritmético (ϵ)			+/-2.21	+/-0.014	+/-0.03	+/-0.035	+/-0.90	+/-0.103
Nivel significativo (q)			0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Coeficiente de probabilidad (t)			2	2	2	2	2	2
Intervalo de clase			0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1

Para todas las muestras tomadas se determinó:

- Capacidad de compactación (Ci) – 0.35
- Grado de Compactación (Id) – 0.29

Clasificación para dragado.

Para el elemento ingeniero-geológico detectado en el área se aplicó la norma de clasificación para dragado según las regulaciones actuales vigentes en el Ministerio de la Construcción de la República de Cuba y se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla No. 2 Clasificación para dragado.

Elemento Ingeniero-Geológico	Denominación	Grupo de suelos Dificultad de extracción.	Grupo de suelos Dificultad de descarga.
E.I.G # 1	Arena de grano fino.	II	I



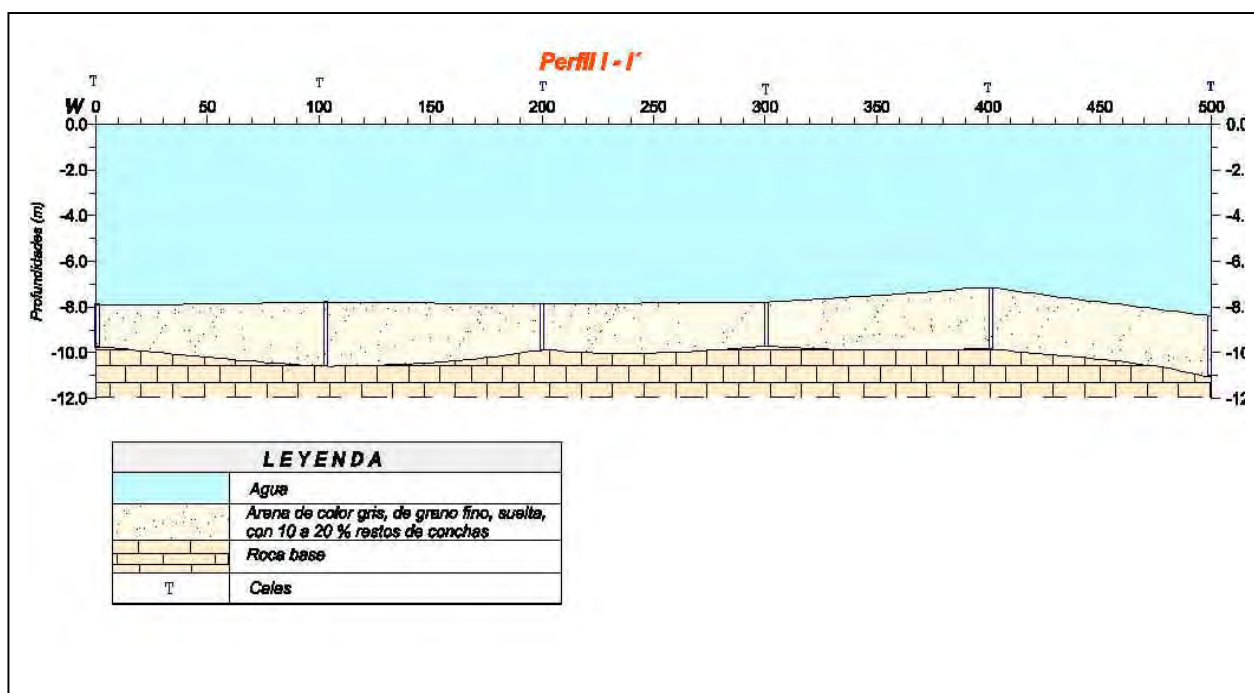
Las condiciones para el dragado los clasifica según la descripción macroscópica o tacto visual y los ensayos granulométricos principalmente como una arena de color gris de grano fino y grano fino-medio, suelta muy uniforme o mal graduada, perteneciente al grupo SP. La clasificación para extracción y descarga se puede apreciar en la tabla No. 2.

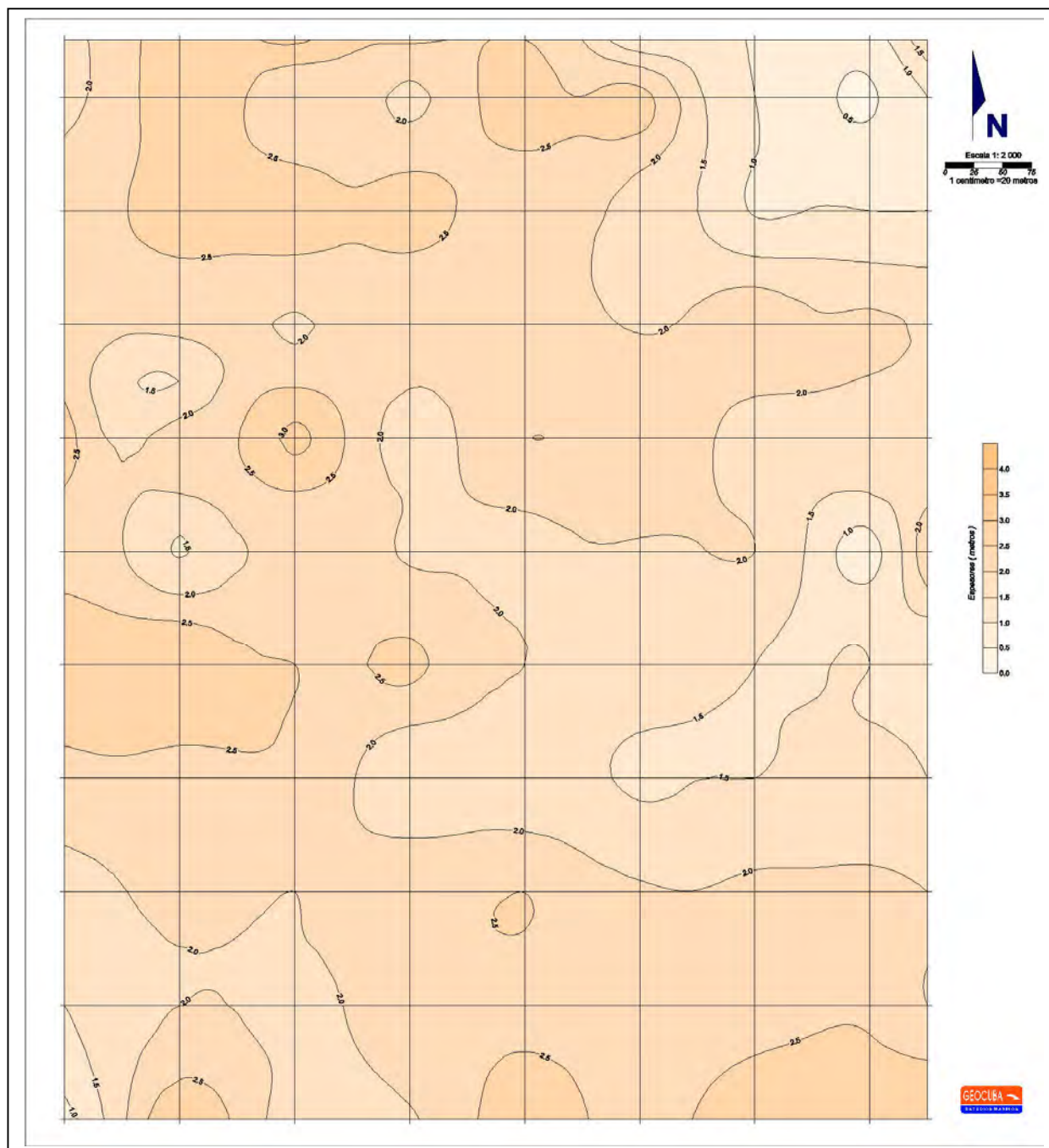
En el mapa de isopacas se pueden observar los espesores de sedimentos del área, los cuales varían entre 0.45 – 3.10 m por lo que las condiciones para dragar un metro en el E.I.G, solamente se verían afectadas en la porción NE donde los espesores de dicho elemento varían entre 0.45 – 1.00 m (Anexo No. 3).

Condiciones de utilización.

La arena que se va a dragar para ser utilizada en el relleno de la laguna Mangón, posee unas características físicas que son aceptables, aunque no son las ideales, pues la misma posee una granulometría muy uniforme (tiende hacia las partículas granulares de grano fino), mal graduada, su diámetro medio predominante varía entre $0.26 < D_{50} < 0.36$ mm con valores aislados que varían entre $0.156 < D_{50} < 0.18$ y $0.42 < D_{50} < 0.445$ mm. Es una arena de poca o baja capacidad de compactación ($C_i < 0.4$).

Fig. 1 Perfil Ingeniero Geológico







Conclusiones y recomendaciones.

Conclusiones.

1. El área investigada puede servir como préstamo para el relleno de la laguna Mangón por poseer una reserva mayor que la solicitada. La misma puede ofrecer un volumen de 717.800 m³ y la tarea solicita 400.000 m³ esto se puede obtener dragando solamente 1.00 m en el elemento ingeniero-geológico.
2. Esta arena es de baja capacidad de compactación.
3. Es una arena de tipo SP, muy uniforme mal graduada, es un cuerpo no cohesivo granular con tendencia hacia los granos más finos, estos granos parecen ser bien redondeados.
4. Posee un porcentaje de restos de conchas de moluscos bivalvos, briosoarios, etc comprendidos entre 10 – 20 %.
5. Esta arena contiene lentes de arcilla y algo de arcilla en la parte superior; por lo que se puede considerar que no es buena para la regeneración de la playa Varadero y sin embargo se puede utilizar como relleno de la laguna Mangón.

Recomendaciones.

1. Este material natural (arena) se puede utilizar como relleno de la Laguna Mangón, siempre y cuando las cargas estáticas que se desee que sostengan no sean muy grandes, esto es debido a su poca o baja capacidad de compactación.
2. Es necesario que cuente con un estudio previo de los suelos de la Laguna para que se conozca su capacidad de trabajo antes de comenzar a depositar el relleno a utilizar pues se debe conocer hasta la cota que se debe extraer el suelo que sea muy compresible, pues de lo contrario pudiera existir un asentamiento diferencial muy apreciable.
3. La calidad de la arena se pudiera mejorar si se utilizara una mezcla de la misma con grava o gravilla. En la compactación se pudiera realizar una deposición del material de relleno en capas de 0.30 – 0.40 de espesor y utilizar un compactador por vibración de 5 – 10 tn dando de 4 – 6 pases.
4. Proponemos que no se debe dragar en la parte NE debido a que el espesor de las arenas varía entre 0.45 – 1.00 m y como promedio el espesor es de 0.725 m.



Bibliografía

M. Fernández, Martín. L. Localización e investigación de yacimientos marinos. – Ministerio O. Públicas, España – INTECSA Internacional de Ingeniería Estudios Técnico S.A España.

A. Caquot – J. Kerisel. 1968 Tratado de mecánica de suelos. Editora Tennica, Bucarest.

Santero, J, I. Alfonso. 1992 Arena III GEOCUBA Estudios Marinos.

Mircea N Florea 1979. Geologie Ingenierasca Vol. 1 Editora Tennica Bucarest.

sxx

Norma Ramal Cubana de Clasificación de suelos y rocas para dragado. MICONS. Cuba.

Juárez , E, A. Rico. 1972. Mecánica de suelos Tomo I. Editora pueblo y Educación. La Habana.

Derrotero de las costas de Cuba. Región marítima del norte, ICH, 1989.

Geocuba Estudios Marinos 2002. Tablas de mareas. Costas de Cuba. Servicios hidrográficos y geodésicos de las costas de Cuba .



ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA A LA CIUDAD DE LA SERENA, NORTE CHILENO.

Armando Rodríguez Novo

Empresa de Acueducto y Alcantarillado del Este, Calle 164 # 322 e/ 3^a y 162 D, Zona 1 Alamar, Ciudad de la Habana. E-mail : acueste@ceniai.inf.cu

RESUMEN

Este estudio fue realizado, con el objetivo de ubicar las fuentes complementarias de agua potable que resolverían el déficit en el abasto a la ciudad de La Serena, capital de la IV Región de Chile, generado por el cierre del río Elqui, como consecuencia de la construcción del Embalse Puclaro, ubicado a unos 20 km aguas arriba de la población de Las Rojas, en las cercanías de la cual se encuentran las fuentes de abasto de agua potable a la ciudad. De este modo se solucionarían las demandas complementarias que origina el desarrollo poblacional, teniendo en cuenta que se trata de una zona turística y con alto desarrollo agrícola, en la cual la precipitación promedio anual es de tan solo 80,0 mm.

El estudio se basa en el levantamiento hidrogeológico de las áreas de estudio, apoyado en la recopilación, procesamiento y depuración de toda la información antecedente disponible.

La necesidad de precisar la disposición de los estratos acuíferos en el corte y conocer los espesores que alcanzan en el área los distintos sedimentos que los componen, justificó la conveniente realización de trabajos geofísicos de superficie (geoeléctricidad).

Los resultados obtenidos nos reflejaron claramente, la ubicación de las gravas limpias (sin presencia de materiales finos), que constituye desde el punto de vista hidrogeológico la capa con mayores posibilidades acuíferas en la zona. Todos los pozos ubicados a partir de los resultados obtenidos arrojaron caudales entre 30 – 50 l/s.

ABSTRACT

This study was carried out, with the objective of locating the complementary sources of drinkable water that would solve the deficit in the supply to the city of La Serena, capital of the IV Region of Chile, generated by the closing of the river Elqui, as consequence of the construction of the Puclaro dam, located to about 20 kms up of the population of Las Rojas, in the proximities of which they are the supply sources of drinkable water to the city. This way the complementary demands would be solved that originates the populational development, keeping in mind that it is a tourist area and with high agricultural development, in which the precipitation averages it is of so single 80,0 mm at year.

The study taking into account the hidrogeological study of the areas, supported in the summary, prosecution and purification of all the available antecedent information.

The needing to specify the disposition of the aquifer strata in the cut and to know the thickness that reach in the area the different silts that compose them, justified the convenient realization of geophysical works of surface.

The obtained results reflected us clearly, the location of the clean gravels (without presence of fine materials) that are from the point of hidrogeological view h the layer with more aquifer possibilities in the area. All the wells located starting from the obtained results threw flows among 30–50 l/s.

Introducción.

El área de estudio abarca una extensión aproximada de unos 10 km², estando localizada en las márgenes del Río Elqui, desde los alrededores del puente de acceso al poblado de Las Rojas



hasta el Recinto de Punta de Piedra, donde se localizan algunos pozos de explotación con caudales bajos como puede apreciarse en el mapa geológico (Figura No. 1). El área investigada pertenece territorialmente a la IV Región de Coquimbo en la provincia de Elqui, la que fue dividida en cuatros sectores de estudio.

Para dar solución a la tarea técnica planteada, se decidió emplear el método de **Sondeo Eléctrico Vertical (SEV)**, teniendo en cuenta su reconocida efectividad en los estudios hidrogeológicos de todo tipo y fundamentalmente en las zonas con un alto grado de complejidad geológica e hidrogeológica, como ocurre en la zona de estudio.

Materiales y Métodos empleados.

Se realizaron en total 32 puntos de SEV, los cuales quedaron distribuidos en 8 perfiles distribuidos de la siguiente forma:

1. Zona de la toma del río Elqui. Se realizaron 8 SEV distribuidos en dos perfiles, uno corto transversal al río que está conformado por 3 puntos de SEV, y el otro longitudinal a su margen izquierda, conformado por 6 SEV (Figura No. 2).
2. Zona de la Planta de Tratamiento de Agua Potable de ESSCO. Se realizaron 8 SEV distribuidos en dos perfiles, uno transversal al río que está conformado por 4 puntos de SEV, y el otro longitudinal a su margen izquierda, conformado por 5 SEV (Figura No. 2).
3. Zona de las parcelas Gabriela Mistral (Saturno). Se realizaron 5 SEV distribuidos en un perfil aproximadamente perpendicular a la ruta 41 y a la dirección del río; el último punto del perfil se encuentra ubicado en la terraza inferior, relativamente cerca del extremo Este de la zona de Punta de Piedra (Figura No. 3).
4. Zona de Punta de Piedra. Se realizaron 11 SEV distribuidos en tres perfiles, un perfil corto con 3 SEV, ubicado aproximadamente transversal al río, un segundo perfil corto con 3 SEV, ubicado muy cercano a la propia margen izquierda del río y un perfil longitudinal a la margen izquierda del río que contiene 7 SEV, que es el más representativo de esta zona (Figura No. 3).

Se realizaron 2 SEV paramétricos, junto a perforaciones existentes en las áreas de estudio, las cuales fueron realizadas mediante técnicas de percusión y roto-percusión respectivamente. El equipo de medición utilizado fue el autocompensador electrónico AE – 72.

Resultados y discusión.

Las curvas de SEV fueron clasificadas de forma cualitativa, según el comportamiento de las resistividades (ρ) en cada caso, lo cual permitió posteriormente separar las zonas con diferentes características geológicas e hidrogeológicas. Se identificaron 4 tipos de curvas de SEV :

1. Curvas tipo H. Son las que determinan 3 capas para las cuales $\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$. Se presentan en los SEV- 2, 3, 8, 9, 12, 28, 30 y 31.
2. Curvas tipo KH. Son las que determinan 4 capas para las cuales $\rho_1 < \rho_2 > \rho_3 < \rho_4$. Se presentan en los SEV- 1, 4, 5, 6, 7, 10, 11, 13, 14, 15, 16, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 29 Y 32.



3. Curvas tipo HKH. Son las que determinan 5 capas para las cuales $\rho_1 > \rho_2 < \rho_3 > \rho_4 < \rho_5$. Se presenta solo en el SEV- 17.
4. Curvas tipo QH. Son las que determinan 4 capas para las cuales $\rho_1 > \rho_2 > \rho_3 < \rho_4$. Se presenta solo en el SEV- 18.

Como puede observarse, existe un amplio predominio de las curvas de SEV de los tipos KH y H.

La zonificación realizada en las áreas estudiadas de acuerdo con los tipos de curvas obtenidas, puede observarse en las Figuras No. 2 y 3 respectivamente.

A partir de los resultados de la interpretación cuantitativa de los SEV y teniendo en cuenta la información obtenida en los recorridos en el terreno y de los antecedentes consultados, se definió que tipo de litología correspondía a cada una de las capas determinadas por el método empleado, lo cual permitió evaluar, cuales eran **los intervalos más perspectivas desde el punto de vista acuífero**, como puede verse en la tabla de resultados (Tabla I) y en los cortes geólogo - geofísicos que se adjuntan (Figuras No. 4, 5, 6 y 7).

La clasificación litológica realizada de acuerdo con los valores de las resistividades obtenidas, teniendo en cuenta el tratamiento estadístico de este parámetro, reflejó en general la presencia de 9 litotipos diferentes los cuales aparecen reflejados a continuación en la Tabla I.

Tabla I. Litotipos agrupados estadísticamente a partir de los valores de la resistividad real de las capas (ρ).

No.	Litología	ρ_m (ohm-m)	ρ_{min} (ohm-m)	ρ_{max} (ohm-m)	D.S.
1.	Terreno cenagoso.	—	8	23	—
2.	Arena limosa.	—	26	34	—
3.	Gravas limosas.	53	42	59	4,8
4.	Gravas.	71	60	85	7,6
5.	Arenas, gravas y bolones húmedos.	282	23	682	227
6.	Arenas y gravas secas.	539	129	1001	252
7.	Roca alterada.	567	236	996	241
8.	Gravas y bolones secos.	2030	1133	3793	807
9.	Roca.	3679	1226	8588	2221

$\rho_m, \rho_{min}, \rho_{max}$: resistividades media, mínima y máxima respectivamente de cada material.
D.S. : desviación standard.

Corte geólogo geofísico por el Perfil I – I' (contiene los SEV – 7, 6, 5, 4, 1 y 8) Figura No. 4: Tiene una longitud aproximada de unos 900 m, con una dirección aproximada Noroeste – Sureste y se encuentra ubicado en la margen izquierda del río Elqui. Está caracterizado de forma general por 4 capas, excepto en el caso del SEV- 8, en que solo se manifiestan 3 capas.

La primera capa se presenta con un espesor muy pequeño entre 0,5 y 1 m, estando representada por arenas y gravas secas; la segunda capa con un espesor entre 1 y 2 m



aproximadamente se caracteriza por valores de resistividad superiores a la anterior, estando representada por gravas y bolones secos. A continuación se presenta una capa caracterizada por los valores menores de resistividad en este perfil, la cual presenta un espesor variable, que de acuerdo con los valores de resistividad, se caracteriza al parecer por la presencia de gravas con granulometría variable, excepto en los alrededores del SEV- 1, en que la resistividad indica la presencia de una arena limosa; se consideró como mejor intervalo el que se localiza entre los SEV- 4 y 7, aunque en el caso del SEV- 5 se manifiesta una brusca disminución del espesor de las gravas, como consecuencia de que la roca aparece mucho más cercana a la superficie (a unos 67 m aproximadamente), lo cual quedó demostrado con la perforación ejecutada, entre los SEV- 4 y 5, junto al canal de entrega a la Planta de Tratamiento.

Corte geólogo geofísico por el Perfil III – III' (contiene los SEV – 16, 15, 9, 13 y 14) Figura No. 5: Tiene una longitud aproximada de unos 700 m, con una dirección aproximada Noroeste – Sureste y se encuentra ubicado en la margen izquierda del río Elqui. Está caracterizado de forma general por 4 capas, excepto en el caso del SEV- 9, en que solo se manifiestan 3 capas.

La cobertura superficial, constituida por las 2 primeras capas, con un espesor general de 3,5 – 4,5 m, presenta características variables pues en los alrededores de los SEV- 16, 15 y 9, está constituida por arenas, gravas y bolones secos; por su parte en los alrededores de los SEV- 13 y 14, la parte superior está constituida por un terreno cenagoso y a continuación una capa formada por gravas y bolones húmedos. A continuación se detectó una capa caracterizada por una resistividad más baja, con espesor que varía entre 44 y 140 m, y granulometría variable, pues se manifiesta con la presencia gravas, gravas limosas y una mezcla de arenas y gravas limosas, considerándose como mejores zonas para la acumulación de aguas subterráneas, la correspondiente a los alrededores del SEV- 9, así como la de los alrededores del SEV- 16, aunque en esta última, el espesor acuífero alcanza solamente unos 44 m.

Corte geólogo geofísico por el Perfil V – V' (contiene los SEV – 17, 18, 19, 20 y 21) Figura No. 6: Tiene una longitud de unos 900 m, con una dirección Suroeste – Noreste, aproximadamente transversal a la dirección del río, abarcando desde la Ruta 41 hasta la segunda terraza del extremo Este de las instalaciones del recinto de Punta de Piedra. Está caracterizado en general por la presencia de 4 capas, excepto en el SEV- 17, que manifiesta la presencia de 5 capas.

La cobertura superficial se presenta bastante heterogénea a lo largo del perfil, con un espesor entre 1,5 y 4,5 m, manifestándose la presencia de arenas, gravas y bolones secos y/o con diferentes grados de humedad; a continuación para los SEV- 17, 18 y 19, se presenta una capa con un espesor entre 5 y 10 m de espesor, que se puede asociar con la presencia de gravas y bolones húmedos. Posteriormente se presenta en todo el perfil, una capa caracterizada por una disminución en el valor de las resistividades y con un espesor entre 130 y más de 200 m, compuesta al parecer por gravas y gravas limosas, considerándose como mejor zona para la acumulación de aguas subterráneas, la de los alrededores de los SEV- 19 y 21 respectivamente.

Corte geólogo geofísico por el Perfil VI – VI' (contiene los SEV – 32, 31, 30, 28, 26, 23 y 25) Figura No. 7: Está ubicado en la margen izquierda del río y casi paralelo al mismo, con una longitud de unos 1.400 m, y una dirección aproximada Oeste – Este. Está caracterizado por la presencia de 4 capas en los alrededores de los SEV- 32, 26, 23 y 25, y solo por 3 capas en los alrededores de los SEV- 31, 30 y 28.



La cobertura superficial con un espesor entre 1,5 y 4 m, está constituida por arenas, gravas y bolones secos, observándose una capa de arena fina muy húmeda en el SEV- 32, así como una capa con predominio de bolones secos en los alrededores de los SEV- 26, 23 y 25. A continuación se manifiesta una disminución de las resistividades, relacionada en general con la presencia de arenas, gravas limpias y gravas limosas, con espesores entre 36 m (SEV- 26) y más de 200 m en los alrededores del SEV- 30, detectándose los menores espesores en los alrededores de los SEV- 26, 23 y 25, como consecuencia de que la roca se encuentra más cercana a la superficie, según queda demostrado por los afloramientos de la misma existentes en esta zona, mientras que en los alrededores de los SEV- 32, 31, 30 y 28, los espesores de los sedimentos aluviales están entre 136 y más de 200 m, considerándose el mejor lugar para la acumulación de aguas subterráneas el intervalo correspondiente a los SEV- 31, 30 y 28 respectivamente, caracterizado por la presencia de gravas limpias.

Para todos los cortes se presenta la roca como última capa, la cual constituye el impermeable de la región y está caracterizada por un brusco aumento de los valores de resistividad. A continuación se presentan los cálculos pronósticos de los caudales de explotación a extraer en algunos de los pozos propuestos, para lo cual se empleó la expresión siguiente:

$$Q = \frac{2\pi T S p}{\ln \frac{R_i}{r_p}} \quad (1) \quad \text{donde:}$$

T - Transmisibilidad en m²/s.

Sp - Abatimiento máximo fijado en m.

R_i - Radio de influencia en m.

r_p - Diámetro final del pozo en m.

Los cálculos pronósticos de los posibles caudales de explotación a extraer se estimaron primeramente para los SEV- 28, 30 y 31 por presentar características similares en cuanto a los espesores de gravas en el corte vertical, además se estimaron los posibles caudales a extraer en los pozos a construir en los SEV- 25, 27 y 29 donde los espesores de gravas son menores.

Cálculo pronóstico de explotación para los SEV- 28, 30 y 31:

T = 200,0 m² / día (Transmisibilidad calculada para el área)

R = 600,0 m (Radio de influencia)

r_p = 0,150 m (Radio del pozo fijando un diámetro final de 12 plg = 0,30 m)

Sp = 32,0 m (Abatimiento ó depresión)

Sustituyendo en la fórmula se obtiene

:

$$Q_{pron.} = \frac{(2)(3,14)(200)(32)}{\ln \frac{600}{0,15}}$$

$$Q_{pron.} = 4.838,4 \text{ m}^3 / \text{día} = 56,0 \text{ l/s.}$$



Conclusiones.

- El uso de los métodos geofísicos de superficie ha permitido determinar la disposición, tanto espacial como en profundidad, de las distintas capas aluviales que conforman las márgenes del río Elqui en las 4 zonas estudiadas, revelando donde los espesores del horizonte acuífero son más potentes, y con ello, ayudando a definir las zonas más perspectivas para la ubicación de las fuentes complementarias que se requieren, para cubrir el déficit de agua potable que pudiera ocurrir como consecuencia de la puesta en operación del embalse Puclaro.
- El empleo del SEV, conjuntamente con el reconocimiento hidrogeológico realizado, hizo posible resolver la tarea general planteada, pues los resultados obtenidos permitieron determinar la ubicación de las gravas limpias (sin presencia de materiales finos), que constituyen desde el punto de vista hidrogeológico la capa con mayores posibilidades acuíferas en la zona; además permitieron determinar la presencia de arenas y gravas limosas con relativamente pocas probabilidades acuíferas, pues en general los caudales que pudieran obtenerse en estos materiales son en general bajos, además que los filtros de los pozos tendrán muy alta probabilidad de obstruirse a corto o mediano plazo, producto de la presencia predominante de materiales finos.
- Los puntos de SEV más perspectivas para la posible ubicación de fuentes de captación de aguas subterráneas mediante pozos, están representados para cada sector como se relaciona a continuación:
 - ♦ Sector ~~Llanos~~ Las Rojas: Los puntos de SEV más perspectivas por orden de prioridad están representados por los SEV- 4, 6, 7 y 5.
 - ♦ Sector ~~Planicie~~ Planicie Las Rojas: Los puntos de SEV más perspectivas por orden de prioridad están representados por los SEV- 9, 10, 11 y 16.
 - ♦ Sector ~~Salina~~ Salina: Los puntos de SEV más perspectivas por orden de prioridad están representados por los SEV- 19 y 21.
 - ♦ Sector ~~Pan de Azúcar~~ Pan de Azúcar: Los puntos de SEV más perspectivas por orden de prioridad están representados por los SEV- 28, 30, 31, 27 y 29.
- Se demostró el alto grado de complejidad de los sedimentos aluviales Cuaternarios que conforman el valle del río Elqui, según puede apreciarse en los cortes geólogo – geofísicos construidos por los perfiles correspondientes, teniendo en cuenta fundamentalmente la variabilidad de la granulometría de dichos sedimentos.
- Se pudo determinar en todos los casos la profundidad del impermeable regional, constituido por la roca del basamento, la cual se manifiesta con diferentes estados físicos de acuerdo con los valores de resistividad que la caracterizan; además la roca del basamento conforma el relieve preexistente de los depósitos del Cuaternario y el Terciario, siguiendo una dirección predominante del Este al Oeste en todo el valle.
- Los pozos antiguos de explotación confrontan problemas por diversas razones, entre las que se destacan: mal diseño inicial en lo que respecta a la colocación de los filtros, que permite arrastre de materiales finos; en algunos casos, sobreexplotación mediante caudales



superiores a los recomendados, lo cual provoca grandes depresiones o abatimientos, detectándose niveles dinámicos muy por debajo de la ubicación de gran parte de los filtros instalados.

- Existe la necesidad de establecer, tanto para las nuevas captaciones como para el sistema actualmente en explotación, las zonas de protección sanitarias de las fuentes, con la finalidad de evitar el acceso a ellas de personal ajeno a la operación de las mismas, así como actividades indeseables en su radio de influencia que puedan originar el deterioro de la calidad del agua por vertimiento de contaminantes químicos, biológicos o de otro tipo.
- Se deberá ser muy riguroso en lo referente al diseño, construcción y aforo de los pozos, teniendo en cuenta precisamente la complejidad del acuífero y su granulometría.
- Se recomienda valorar los anteproyectos de captación propuestos para cada sector, así como los cálculos de los posibles caudales de explotación a extraer en los pozos propuestos, aunque se tendrán en cuenta consideraciones específicas a la hora de recomendar los caudales definitivos de explotación para lograr una extracción estable en cada caso.

Bibliografía consultada.

- Carta Geológica de Chile, Escala 1 : 250.000. Hoja Vallenar y parte Norte de La Serena. 1982.
- Jachatrian, D.A.(1978): Utilización de las investigaciones eléctricas en la solución de algunas tareas geológicas. Revista Voluntad Hidráulica No. 45, La Habana, Cuba.
- Mapa Hidrogeológico de Chile, Escala 1 : 1.000.000.
- Llamas, M.R. y E. Custodio (1976): Hidrología Subterránea. Editorial Omega, Barcelona, España.
- Minuta Hidrogeológica y diagnóstico fuentes Recinto Punta de Piedra. Consultora Ayala, Cabrera y Asociados Ltda. Septiembre 1994.
- Orellana E. (1972): Prospección geoeléctrica en corriente continua. Editorial Paraninfo, Madrid, España.
- Pérez Franco, D. (1983) Hidráulica Subterránea. Editorial Ciencia y Técnica, La Habana, Cuba.
- Roche A., Pérez N., et al (1991): SIS.Versión 1.0. Sistema de interpretación de Sondeo Eléctrico Vertical (software).
- Rodríguez Novo, Armando, Enrique Vázquez (1999): Estudio para la ubicación emergente de fuentes de agua potable en las márgenes del río Elqui. Consultora Case TH Ltda..
- Yakubovskii Yu. V. (1980): Prospección Eléctrica. Editorial Nedra, Moscú.

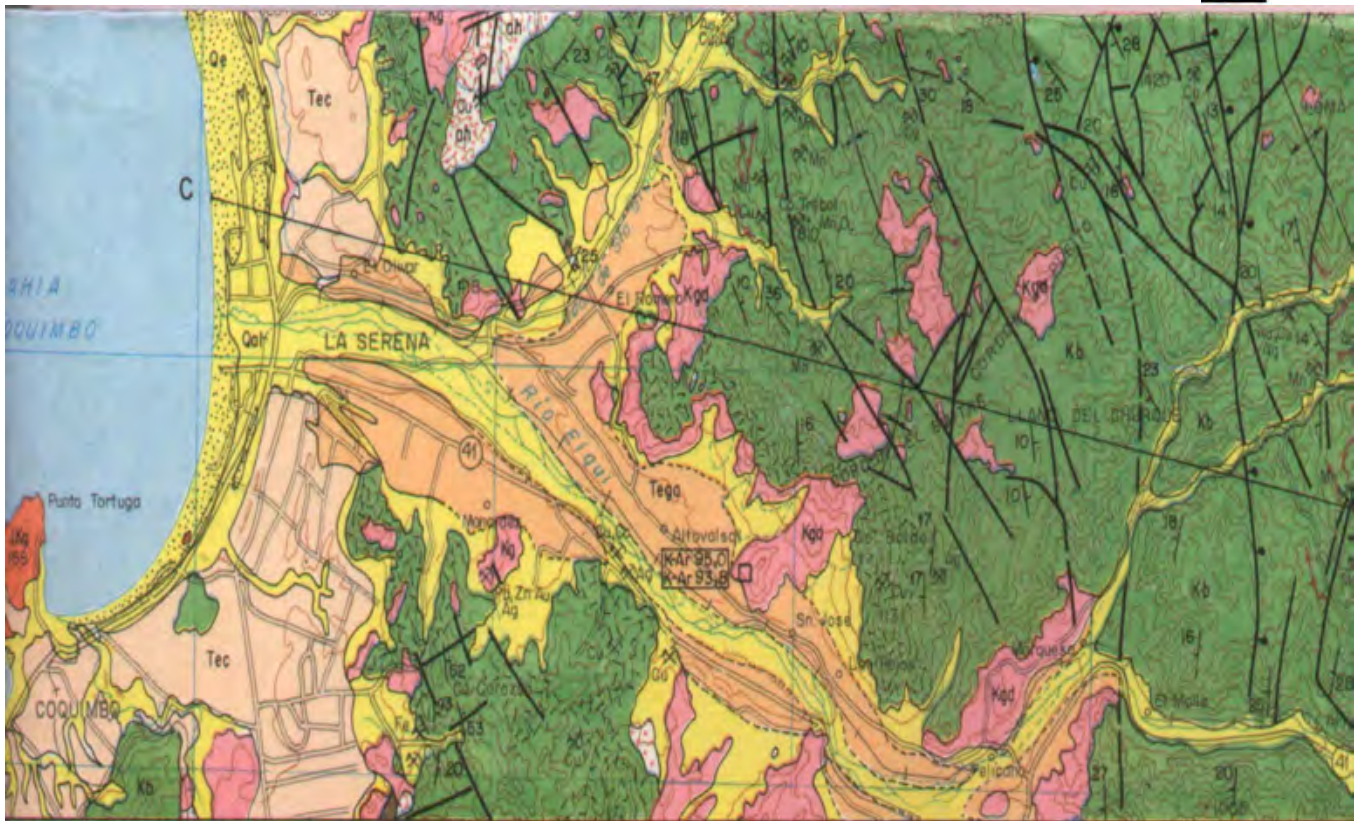


FIG. 1. MAPA GEOLÓGICO DE LA ZONA DE ESTUDIOS.

PLANO DE TIPO DE CURVAS DE SEV DE LAS ZONAS 1 y 2.
ESCALA APROX. 1:10.000

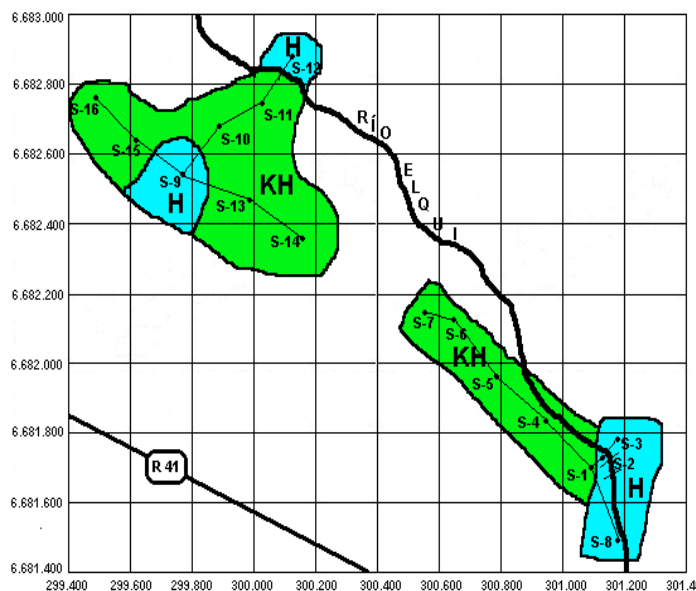


FIG. 2. PLANO DE TIPO DE CURVAS DE SEV
DE LAS ZONAS 1 Y 2.

PLANO DE TIPOS DE CURVAS DE SEV DE LAS ZONAS 3 y 4.
ESCALA APROX. 1:10.000

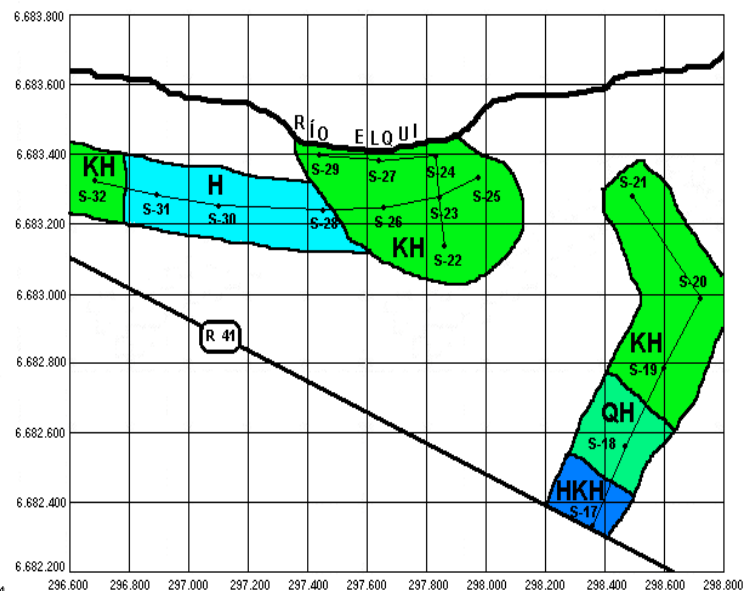


FIG. 3. PLANO DE TIPO DE CURVAS DE SEV
DE LAS ZONAS 3 Y 4.



**CORTE GEÓLOGO-GEOFÍSICO POR EL PERFIL I-I' (SEV- 7, 6, 5, 4, 1 y 8).
ZONA DE LA BOCATOMA DEL RÍO ELQUI.
ESCALA H. 1:5.000 V. 1:500**

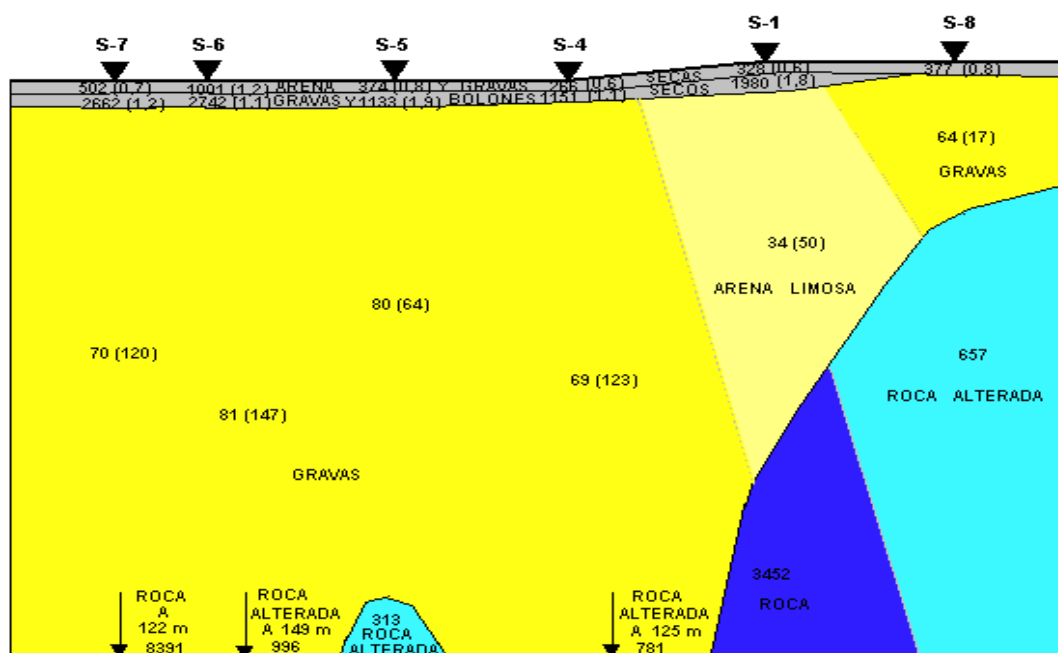


FIG. 4. CORTE GEÓLOGO-GEOFÍSICO POR EL PERFIL I-I'.

**CORTE GEÓLOGO GEOFÍSICO POR EL PERFIL III-III' (SEV- 16, 15, 9, 13 y 14).
ZONA DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE.
ESCALA H. 1:5.000 V. 1:500**

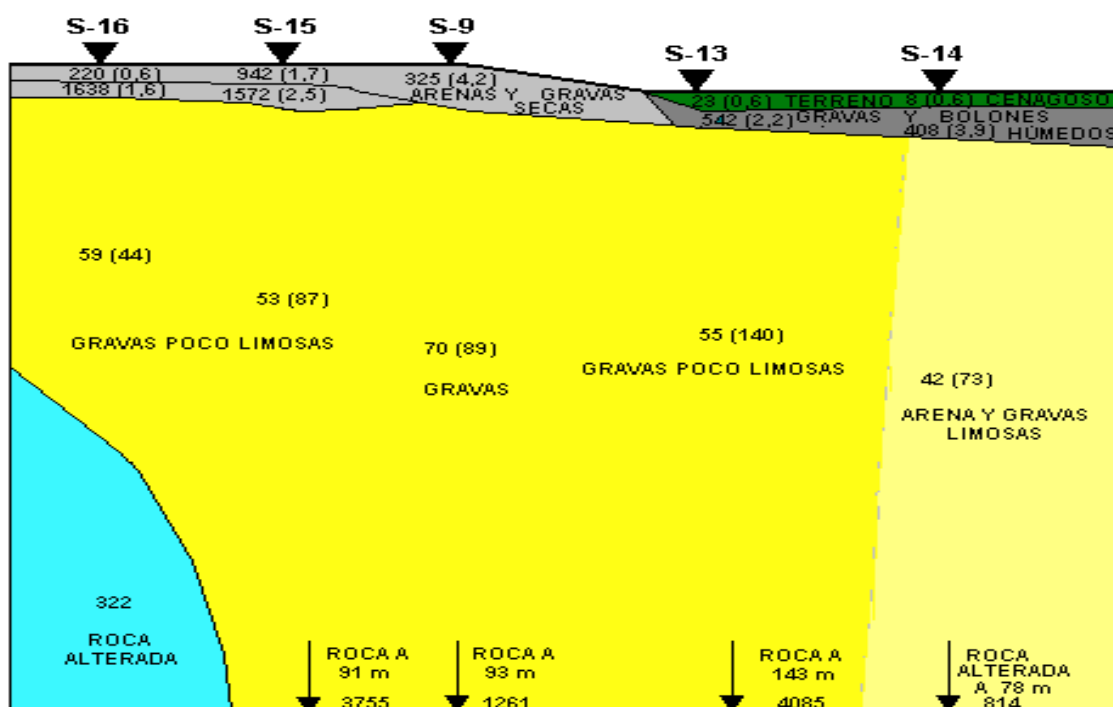


FIG. 5. CORTE GEÓLOGO-GEOFÍSICO POR EL PERFIL III - III'.



FIG. 6. CORTE GEÓLOGO-GEOFÍSICO POR EL PERFIL V - V'.
CORTE GEÓLOGO-GEOFÍSICO POR EL PERFIL V-V' (SEV-17, 18, 19, 20 y 21).
PERFIL ZONA SATURNO (GABRIELA MISTRAL).
ESCALA H. 1:5.000 V. 1:500

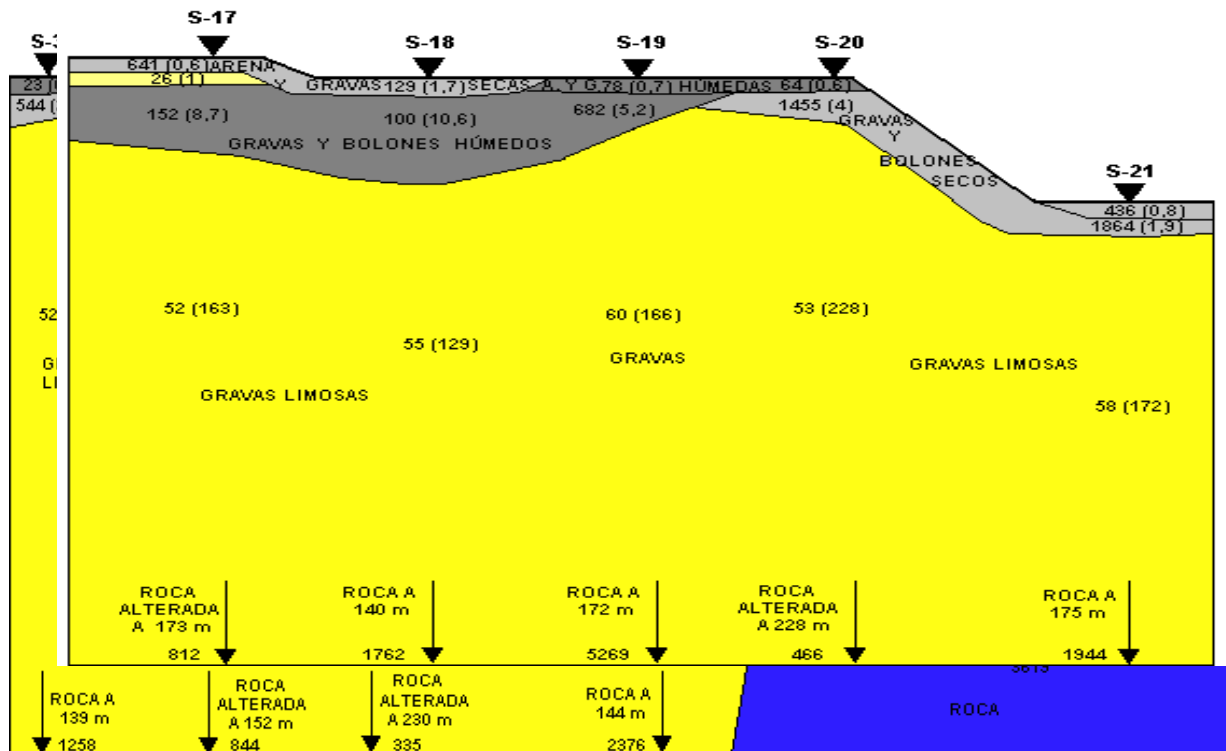


FIG. 7. CORTE GEÓLOGO-GEOFÍSICO POR EL PERFIL VI-VI'.



LOS SISMOS DE GRAN INTENSIDAD Y LAS CONSTRUCCIONES CON VALOR PATRIMONIAL EN CUBA

Bertha E. González Raynal y Luis D. Perez Lara

Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas, Departamento Ciudad Habana

Calle 212 No 2906 e/29 y 31, Rpto. La Coronela, Lisa, Ciudad Habana

Telefs. 271 0953 271 0209 Telefax. 33 9497 e-mail cenais@iga.cu

RESUMEN

La historia de la actividad sísmica de Cuba data de casi 500 años y abarca prácticamente a todo País. El primer sismo fuerte fue reportado en 1528 en la Villa de Baracoa, la primera fundada por los españoles en Cuba.

A partir de esa fecha, fue la Villa de Santiago de Cuba la más frecuentemente afectada por los terremotos, que en más de una ocasión, causaron la ruina de construcciones religiosas, hospitalarias, edificios públicos y viviendas de la época.

En 1880 se reportó el primer terremoto destructivo en el Occidente del País ($M=6,0$; $I=VIII$ MSK) con epicentro macrosísmico en las proximidades del poblado de San Cristóbal. Este sismo se sintió con fuerza en diferentes localidades de la Villa de San Cristóbal de La Habana. Con posterioridad, se reportaron otros sismos fuertes en las Villas de Remedios, Trinidad y Sancti Spiritus, dando al traste con la antigua creencia de que la actividad sísmica era sola propia de la región oriental del País.

Las construcciones con valor patrimonial y los monumentos históricos, constituyen la memoria histórica de la Nación. Muchas de estas construcciones por su estado de conservación debido a la influencia del intemperismo, falta de mantenimiento y otros factores son altamente vulnerables al impacto de los desastres naturales, fundamentalmente a los producidos por amenazas geológicas como los sismos.

En este trabajo se establece, de forma preliminar el riesgo que corren las construcciones coloniales que forman parte del patrimonio nacional y de la humanidad del territorio de Cuba. Se caracteriza la sismicidad del territorio nacional por subregiones y se brinda información general sobre las tipologías constructivas empleadas y su comportamiento ante diferentes sismos fuertes.

ABSTRACT

A preliminary estimation of risk for ancient constructions of the villages settled by the spaniards first in Cuba is given in this paper. Seismicity of the cuban territory is analyzed for different regions, and general information concerning building typologies and its behavior in case of strong earthquake occurrences is examined.

1. INTRODUCCION

La historia de la actividad sísmica de Cuba data de casi de 500 años. El primer reporte de un sismo fuerte en 1528 ($M=5,0$; $I=VIII$, MSK), correspondió a la villa de Baracoa, donde se produjeron daños de cierta consideración en las edificaciones.

A partir de esa fecha, fue la villa de Santiago de Cuba la más frecuentemente afectada por los terremotos que en más de una ocasión, causaron la ruina de construcciones religiosas, hospitales, edificios públicos y viviendas de la época.

No fue hasta 1880, que se conoció de la ocurrencia de un terremoto destructivo ($M=6,0$ $I=VIII$, MSK) en el occidente del país, con epicentro próximo a los poblados de San Cristóbal y Candelaria, que dio al traste con la antigua creencia de que la actividad sísmica era solo propia de la región oriental de Cuba. Este último terremoto, que se sintió con fuerza en la villa de San Cristóbal de la Habana, fue solo el preludio de otros terremotos que afectaron a Remedios, Trinidad y Sancti Spiritus.



Dado el hecho cierto de que todo el país se encuentra expuesto a los efectos de los sismos, se hace necesaria la realización de un estudio complejo que establezca la magnitud del riesgo que corren realmente las construcciones coloniales, que forman parte del patrimonio nacional y de la humanidad. Con el presente trabajo se dan los primeros pasos en ese sentido.

2. Breve información sobre la ocurrencia de sismos fuertes en Cuba.

Las manifestaciones de la sismicidad abarcan prácticamente todo el territorio de Cuba, aunque todo fue a comienzos del siglo XX, cuando los terremotos comenzaron a ser registrados instrumentalmente por las redes internacionales y a partir de 1964 por las nacionales.

A mediados del siglo XIX, el eminente científico cubano Andrés Poey, realizó un estudio minucioso de los terremotos perceptibles, de gran valor para la confección del actual catálogo de terremotos del país, con posterioridad, otros investigadores (Bacardí, 1925; Morales, 1931; Montelieu, 1933, 1968; Viñes, 1949; Chuy y González, 1980; Chuy, González y Escalona, 1980; Chuy y Pino, 1982; Chuy, 1982 y otros) completaron la información macrosísmica-histórica sobre terremotos.

Sobre la base de esta información Chuy, González y Alvarez (1983) realizaron la zonificación del país por intensidades sísmicas a esperar para períodos de recurrencia de 100 años. En la tabla 1, se presenta una relación en orden cronológico, de los terremotos más fuertes ocurridos en Cuba, conjuntamente con sus parámetros fundamentales (coordenadas, profundidad, magnitud e intensidad en el epicentro). La sismicidad de Cuba por datos históricos aparece representada en el mapa de la fig. 2.

Para estudiar en detalle la actividad sísmica del país, resulta conveniente dividir su territorio de forma convencional en regiones sísmica: sudoriental, nortoriental, central y occidental. En cada una de estas regiones ha ocurrido al menos un evento sísmico de relativa importancia.

Región occidental.

Esta región se caracteriza por presentar una baja frecuencia de ocurrencia de eventos sísmicos. A pesar de esto, el 23 de enero de 1880 ocurrió un terremoto significativo que produjo intensidades máximas de VIII grados en las localidades de San Cristóbal y Candelaria, asociado a la zona sismogénica Pinar, con una magnitud estimada de 6,0 en la escala de Richter

Viñes y Salterain (1880) realizaron una investigación muy detallada de los efectos de este último terremoto que constituye el testimonio más completo que existe. El mismo sirvió de base a estudios realizados con posterioridad por otros autores (Chuy, González y Polo, 1988; Chuy y Llanes, 1989) con el objetivo, el primero de determinar la potencialidad de las estructuras sismogénicas y ofrecer criterios sobre la peligrosidad sísmica y el segundo de evaluar el comportamiento de las construcciones de la época atendiendo al material, sistema constructivo etc.

A continuación se ofrece información sobre los sistemas constructivos predominantes en la zona epicentral, específicamente en la correspondiente a San Cristóbal-Candelaria-Bahía Honda-Mariel.

El de mayor distribución poseía paredes de "mocorrero", construidas con materiales de la localidad, generalmente rocas con alto contenido ferroso (Chuy y Llanes, 1989). Las paredes eran muy gruesas. El grosor de las mismas podían alcanzar los 50 cm. La cubierta de los techos de la vivienda del siglo XIX en



dicha zona así como otras villas de Cuba era de viguetas y tablazón. En ocasiones se colocaban pequeñas vigas denominadas cuadrales en las esquinas de la cubierta para evitar la separación de las vigas (soleras).

Otro tipo era el construido por piedras calizas colocadas con mortero y se utilizaba con mucha frecuencia en las casas de los cafetales. Las paredes también poseían un espesor considerable hasta 60 cm

También proliferaban las construcciones de ladrillo, espacialmente en el caso de los ingenios. En el caso de las viviendas se utilizaban también otros materiales como el embarrado y la madera.

Los tipos constructivos antes citados se enmarcan en los Tipos A y B de la escala de intensidades MSK.

El terremoto de San Cristóbal-Candelaria, fue perceptible en un área considerable dentro del territorio de Cuba, desde el cabo de San Antonio hasta Cienfuegos. También se reportó sentido en la Península de Yucatán y en la Florida.

En la localidad de San Cristóbal causó daños en el ayuntamiento, la cárcel y otros inmuebles reportándose paredes cuarteadas, horcones removidos y colapso total de algunas viviendas. También se produjeron daños de consideración en la localidad de Candelaria y en una serie de ingenios próximos a la zona epicentral entre los que se destacan el San Juan Bautista, el Galope, el San Gabriel, el María y otros.

Las mayores afectaciones sufridas por los ingenios se reportan en las torres de calderas y de máquinas. El sismo de San Cristóbal-Candelaria se sintió con fuerza en la Villa de San Cristóbal de la Habana y en la barriada de Jesús del Monte, produciendo afectaciones menores como caída del repello de los techos de algunas viviendas. En la región occidental de Cuba se produjeron también sismos de relativa importancia en épocas más recientes como el de Alonso de Rojas, provincia de Pinar del Río de 1981 (I=V MSK) y el de Torriente-Jaguey Grande de 1982 (I=VI MSK) (Chuy et al, 1983). Los mismos produjeron afectaciones menores en las edificaciones como grietas finas y caída de repello. El último de estos sismos fue perceptible en algunas localidades de la Ciudad de la Habana, específicamente en la Habana Vieja, Centro Habana, Plaza y Marianao.

Región Central.

Esta región también se considera como de baja actividad sísmica. Los reportes de terremotos ocurridos en la misma datan del siglo XIX y corresponden a las localidades de Trinidad, Cienfuegos, Remedios, y Sagua la Grande (Chuy, González y Escalona, 1980).

El sismo más fuerte de la región Central de Cuba ocurrió el 15 de Agosto de 1939 y produjo sacudidas máximas de VII grados de intensidad en las localidades de Remedios y Caibarién.

Este terremoto sacudió un área de 730 km de largo por 100 km de ancho aproximadamente. La misma formaba una faja cuyos límites eran Sola en la provincia de Camagüey por el Este, Corralillo en la provincia de Villa Clara por el Oeste, Cayo Paredón Grande al Norte, y la zona Cienfuegos-Trinidad al sur.

En Remedios, más del 90% de las viviendas sufrieron daños, algunos de consideración. El edificio del hospital civil quedó inutilizado. También cayeron las cornisas de muchos edificios. De igual forma, en Caibarién y Sagua la Grande los daños fueron considerables.



Otros sismos significativos fueron los de 1909 y 1943 en Trinidad. Este último evento sísmico con una intensidad de VI grados causó ligeras afectaciones en las edificaciones y pánico en la población.

Región Norte Oriental.

Esta región presenta una actividad sísmica de baja a moderada. Las localidades con una mayor frecuencia de ocurrencia de eventos son Gibara y Sagua de Tánamo.

El terremoto más fuerte ocurrido en la región norte oriental de Cuba ($M=6,21$ $I=VII$, MSK) fue el del 28 de febrero de 1914 con epicentro macrosísmico en el poblado de Gibara. Dicho terremoto produjo caída en el revestimiento y grietas en las edificaciones de aquella época (Chuy T, 1984). En la misma región ocurrieron sismos relativamente fuertes en otras localidades como San Germán y Sagua de Tánamo. En la ciudad de Holguín y otros poblados importantes han sido perceptibles con intensidades moderadas algunos sismos fuertes con epicentros próximos a la ciudad de Santiago de Cuba como el de 3 de febrero de 1932.

Región Suroriental.

En esta región se ha reportado la mayor actividad sísmica del País, debido a su proximidad a una zona sismogeneradora de primer orden (la zona de fallas transformantes Oriente o Bartlett-Caymán). La ciudad más afectada por los terremotos en esta región ha sido Santiago de Cuba, que cuenta con un casco histórico donde se conservan edificaciones antiguas de gran valor arquitectónico e histórico. Dicha ciudad ha reportado los efectos de 9 terremotos con $I=VII$; 8 con $I=VIII$ y 2 con $I=IX$ grados en la escala MSK.

El 12 de Junio de 1766 y el 20 de agosto de 1852 ocurrieron los sismos más fuertes reportados en dicha ciudad y en el País con $I=IX$ grados. El primero de ellos, destruyó la mayoría de las edificaciones, entre las que se destacan, la capilla mayor de la catedral, el convento de San Francisco, el hospital, los muros construidos para el Palacio Real, la audiencia, la sala de justicia y las iglesias de Dolores y Nuestra Señora de Dolores como consecuencia de los efectos de sismo, 120 personas murieron y más de 600 resultaron heridas.

El segundo de estos terremotos provocó la ruina de las iglesias de Dolores y nuestra Señora del Carmen, Santa Lucía, Santa Ana etc.; además de la destrucción de las casas del gobierno y el Arzobispado, la Intendencia, la aduana y el hospital. También se agrietaron las torres, las naves y el campanario de la catedral y se dañó un número considerable de la época. El terremoto más importante de este siglo ($M=6,75$, $I=VIII$ grados), ocurrió el de Febrero de 1932. El mismo produjo afectaciones de diferentes tipos en más de 80% de las edificaciones de la ciudad, llegando a colapsar el 5% de ellos. Producto de los efectos de este sismo, 14 personas perdieron la vida y alrededor de 300 resultaron heridas.

En la villa de San Cristóbal de la Habana, la mayor intensidad sísmica reportada ($I=VI$) correspondió al terremoto del 22 de Enero de 1880 como fue mencionado anteriormente. Sin embargo, se ha reportado un considerable número de eventos sísmicos débiles propios, con epicentro en las proximidades de dicho centro urbano. En la villa de Trinidad se han reportado en dos ocasiones intensidades de seis grados. En la villa de Sancti Spiritus solo se reportan bajas intensidades. El evento sísmico más importante de la región central de Cuba ocurrió en Remedios ($I=VII$) donde se han reportado también la mayor actividad sísmica en las villas del oriente del país, Bayamo, Santiago de Cuba y Baracoa si han sido sacudidas



como se observa en el gráfico en varias ocasiones por terremotos de intensidades superiores a siete grados a partir de la cual se producen daños de consideración en las edificaciones de esos tipos.

3. Investigaciones para la mitigación de los efectos de los sismos fuertes.

En las zonas sísmicas se utilizan normas constructivas especiales que deben regir la proyección de las nuevas edificaciones. En el contenido de las mismas, intervienen elementos que son proporcionados por las investigaciones de peligrosidad sísmica. Estas últimas, se realizan en diferentes etapas y con diferentes grados de detalle.

En la primera etapa se realizan estudios generales de regionalización sísmica a nivel de nación, que tienen como objetivo el estudio de las principales zonas simogeneradoras responsables de la actividad sísmica.

Los mapas obtenidos, generalmente a escalas pequeñas, inferiores a 1:1000 000, permiten estimar de forma global los costos de las medidas antisísmicas donde sean necesarias, y obtener criterios sobre la construcción de viviendas u otras obras de poca envergadura. Sin embargo, estos estudios no son suficientes para la planificación del desarrollo constructivo de grandes ciudades en las zonas sísmicas o en la selección de lugares apropiados para el emplazamiento de objetivos económicos importantes o estructuras críticas.

La región suroriental de Cuba es, como se observa en dicho mapa, la de mayor peligrosidad sísmica. En esta región está situada la villa de Santiago de Cuba para la que se realizaron investigaciones especiales correspondientes a las etapas dos y tres, que comprenden la regionalización sísmica detallada y la microzonificación sísmica respectivamente.

Estas investigaciones permiten seleccionar los sitios más apropiados para las nuevas construcciones y tomar medidas antisísmicas de carácter activo. Además, posibilitan la valoración del riesgo a que están sometidos las construcciones existentes. Más aun para las edificaciones de la época colonial, que han sufrido y a los efectos de sismos anteriores, permiten recomendar diferentes medidas de reforzamiento que mejoren su comportamiento ante la ocurrencia de un sismo de gran intensidad.

A continuación se presentan los resultados de las investigaciones para la mitigación de los efectos de un sismo fuerte que afecte a la ciudad de Santiago de Cuba.

Zonación Sísmica Detallada

Para precisar la intensidad o grado sísmico de base de la ciudad de Santiago de Cuba se utilizó un método probabilístico basado en la estadística de valores extremos de Johnson (González B. y Kogan, L., 1987). Con ayuda del mismo se determinaron las probabilidades de ocurrencia de intensidades de VI, VIII y IX grados en el suelo "promedio" de la ciudad, donde se asienta el casco histórico. Para la selección del grado de intensidad de base, las probabilidades calculada se compararon con el valor de la probabilidad normativa correspondiente a la categoría o clase de la ciudad. Esta última está dada por el número de habitantes y la velocidad de crecimiento de su población. La ciudad de Santiago de Cuba con más de 350 000 habitantes pertenece a la clase B, siendo su probabilidad normativa de 0,001 (probabilidad de que sea excedida la intensidad de base para los proyectos antisísmicos). De acuerdo con esto se tomó una intensidad igual a VIII grados como grado base de proyecto para la ciudad.



Microzonación Sísmica

Las investigaciones de Microzonificación sísmica permiten estimar la respuesta del subsuelo a las solicitaciones sísmicas. Los mapas de microzonificación sísmica constituyen documentos normativos para el diseño y la planificación urbana en las regiones sísmicas. Los mismos, muestran una división en zonas con diferentes intensidades sísmicas a esperar en dependencia de las condiciones ingeniero geológicas e hidrogeológicas. Por esta razón permiten un adecuado uso de la tierra y una predicción del comportamiento de las edificaciones existentes ante un evento sísmico de gran intensidad.

La Microzonación Sísmica de la ciudad de Santiago de Cuba fue realizado con ayuda de los métodos de Analogías Ingeniero Geológicas y Microsismos (González, B., Mirzoev, K, Chuy, T. y otros, 1989). Con posterioridad se realizaron como parte de diferentes campañas de medición nuevas observaciones instrumentales de microsismos que validaron y complementaron los datos sobre amplitudes y periodos de oscilación de la superficie del terreno (Zapata, 1999; González, Seo y otros, 2000).

Para la aplicación del método de Analogías Ingeniero Geológicas, se utilizó toda la información ingeniero geológica e hidrogeológica disponible incluyendo alrededor de 1000 calas y calicatas con profundidades entre 10 y 30 metros.

Se confeccionaron esquemas auxiliares de los tipos básicos de suelos y de la profundidad de yacencia del manto freático, factores que influyen en el incremento de la amplitud de las oscilaciones sísmicas. Además, se identificaron en el territorio perfiles ingeniero geológicos típico determinándose la variación de la intensidad sísmica a lo largo de los mismos.

Estos materiales sirvieron de base al esquema de Microzonación sísmica de la ciudad a escala 1: 25 000 en el cual, se delimitan zonas donde se pronostican incrementos de hasta 2 grados en el valor de la intensidad sísmica (áreas aledañas a la Bahía de Santiago de Cuba y parte de la cuenca del Río San Juan). Dichas áreas están compuestas por sedimentos friables y de carácter antropogénico, con el nivel freático a profundidades inferiores a un metro y solo son recomendables para la construcción de edificaciones ligeras. La construcción de edificios multiplantas requiere de trabajos especiales para el mejoramiento de los suelos. Se identifican también en el mapa, zonas donde se pronostican incrementos de hasta un grado en el valor de la intensidad sísmica compuestas por suelos friables y semirrocados intemperizados con el nivel del manto freático a profundidades inferiores a los 4 metros.

En el referido mapa se ponen también en evidencia zonas con condiciones más favorables para la construcción compuestas los primeros, por suelos friables y semirrocados intemperizados, con el nivel freático a profundidades superiores a los 4 metros donde no se pronostican incrementos en el valor de la intensidad sísmica y la segunda por rocas y semirrocadas agrietadas con el nivel freático a profundidades superiores a los 10 metros donde se pronostican decrementos de hasta 1 grado de intensidad.

Para validar la zonación obtenida, se superpusieron los resultados al mapa de microzonificación sísmica los resultados de la valoración de la intensidad de los daños en las edificaciones (de los cuales se poseen reportes), correspondiente a los terremotos destructivos de 1766 ($I=1k$; $M=7,5$), 1852 ($I=1X$; $M=7,3$), 1887 ($I=VII$; $M=7,9$), 1903 ($I=VII$; $M=5,4$), 1932 ($I=VIII$; $M=6,75$); 1932 ($I=VI$) y 1947 ($I=VII$; $M=6,3$).



Para la valoración de la intensidad de los daños para cada edificación en particular, se extrapoló la metodología propia de evaluación que presenta la escala de intensidades MSK de 12 grados utilizada en el País, para el caso de las áreas afectadas, y para las edificaciones, se tomo en consideración en la asignación de grado de intensidad, el tipo de edificación y que % de la misma resulto afectada (Chuy,1988).

Los resultados de la validación de la microzonificación sísmica permitió concluir que existe una concordancia aceptable entre el valor de la intensidad a esperar, de acuerdo con el mapa de microzonificación sísmica de la ciudad, y la evaluación de la intensidad según el % de las afectaciones sufridas por las edificaciones, en su mayoría iglesias, edificios públicos y viviendas de la época colonial. Esto permite, en una primera aproximación, realizar un pronóstico del comportamiento futuro de estas construcciones ante un evento sísmico con características similares por medio de la modulación de escenarios.

Existen diferentes factores que inciden en la resistencia sísmica de las estructuras entre ellos juega un papel importante el tipo de material utilizado en su construcción, la disposición de los diferentes elementos y la altura. Estos últimos determinan, en gran medida, el periodo propio o fundamental de oscilación de las mismas.

Cuando se produce un terremoto, la energía liberada en el foco, se trasmite por intermedio de las ondas sísmicas, manifestándose en forma de oscilaciones sísmicas del terreno. El movimiento del terreno en la zona de contacto con una construcción, constituye un elemento determinante en su comportamiento. El terreno juega el rol de filtro dinámico para el movimiento sísmico proveniente de la fuente. El paquete de estratos geológicos superficiales, generalmente compuestos por suelos friables que sobreyacen un estrato consolidado (roca de base), determina en gran medida la composición espectral y amplitudes de las aceleraciones sísmicas.

Por todo lo anterior, como parte de las investigaciones de microzonificación sísmica de Santiago de Cuba, se realizaron mediciones instrumentales de los microsismos (pequeñas oscilaciones del terreno),. Se determinaron mediante el análisis espectral, los períodos predominantes y los factores de amplificación experimentales de los suelos para diferentes diapasones de frecuencia (periodos). Se pudo concluir que en el dominio de los periodos largos $T > 1\text{seg}$ no existen contrastes apreciables en los valores del factor de amplificación del suelo, entre las zonas con condiciones ingeniero geológicas más y menos desfavorables, lo contrario ocurre en el dominio de los periodos cortos $T < 1\text{seg}$, donde existen diferencias en el factor de amplificación del suelo de 5,0 o más entre las diferentes zonas.

Predominan para los suelos del territorio de Santiago de Cuba, las oscilaciones sísmicas de período corto. Los eventos sísmicos que con mayor frecuencia afectan a esta ciudad son relativamente cercanos y someros con una composición espectral caracterizada por el predominio de periodos cortos. Debido a esto, los edificios rígidos de pocas plantas son, en apariencia, los más vulnerables a los efectos del fenómeno de resonancia.

En cuanto al material y sistema constructivo de las edificaciones coloniales de Santiago de Cuba se puede señalar el predominio del alquitradado (conjunto de elementos verticales y horizontales). Este



sistema constructivo fue extrapolado de Andalucía situada también en una región sísmicamente activa con el objetivo de hacer más resistentes las construcciones.

En la ejecución de los muros de las edificaciones coloniales se utilizaron el empujado, la mampostería (agregada de piedras) y el ladrillo. De acuerdo con esto, las edificaciones pueden clasificarse como de tipo A y B según la escala aunque predomina el tipo B.

En la construcción de las iglesias y edificios públicos se utilizaron generalmente materiales de buena calidad, aunque la falta de unión estructural entre determinadas partes de la edificación, fundamentalmente en las torres y la asimetría puede tener un peso determinante en los efectos desastrosos de los sismos, fundamentalmente los de 1766, 1853 y 1932.

Tomando en consideración la altura, el material y el sistema constructivo de la mayor parte de las edificaciones coloniales de Santiago de Cuba, los periodos propios de oscilación de las mismas deben encontrarse dentro de un amplio intervalo 0,05 – 0,35 seg (3-20 HZ).

Esto último constituye un factor desfavorable ya que dificulta enormemente la realización de un pronóstico seguro del comportamiento de las mismas ante los sismos de diferente composición espectral.

CONCLUSIONES

Como conclusiones generales de los estudios de sismicidad, peligrosidad y Microzonificación sísmica realizados en el país, se pueden señalar las siguientes.

1. Todas las regiones de Cuba donde se asientan las primeras villas fundadas por los españoles han sido expuestas a través de los años, a los efectos de terremotos perceptibles y fuertes. Para periodos de recurrencia de 100 y 1000 años se pronostican las intensidades máximas siguientes:

Localidad	I _{max} 100 años	I _{max} 1000 años
San Cristóbal de la Habana	5	6
Trinidad	5	6
Sancti Spiritus	5	6
Puerto Príncipe	5	6
Bayamo	7	8
Santiago de Cuba	8	9
Baracoa	7	8

- 2- En la zona del casco histórico de la ciudad de Santiago de Cuba, donde se conservan las construcciones coloniales más valiosas, no se pronostican incrementos de la intensidad sísmica de base (I= VIII) por las condiciones del subsuelo. Sin embargo, en la zona portuaria y áreas aledañas constituidas por sedimentos de relleno inundados, se pronostican incrementos de un grado o más en el valor de la intensidad sísmica.
- 3- Los mayores daños ocurridos en el pasado, en las construcciones coloniales en general, y muy especialmente en las iglesias, estuvieron determinados por asimetrías o falta de unión estructural entre partes de la edificación fundamentalmente en las torres y campanarios. Estos tipos de afectaciones pueden repetirse de ocurrir un sismo fuerte con características similares a los de 1766, 1852 y 1932. Sin embargo, deben sumarse los posibles daños debido al estado técnico de las construcciones que han soportado las cargas de sismos anteriores y al paso de los años.



- 4- En las regiones occidental y central del País, el estado de conservación de las edificaciones puede ser la causa de afectaciones producto de la ocurrencia de un evento sísmico de intensidad moderada, que en condiciones normales no produciría daños en las edificaciones.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Alvarez, L. (1989): Intensidades máximas para períodos de recurrencia de 100 y 1000 años por datos sismológicos. Características Geofísicas. Nuevo Atlas Nacional de Cuba.
- Bacardí, E. (1925): Crónicas de Santiago de Cuba. Reimpresión. Santiago de Cuba.
- Chuy, T. y González B.E. (1980): Catálogo macrosísmico de la región occidental de Cuba. Investigaciones Sismológicas en Cuba No1.
- Chuy, T., González B.E. y Escalona, S. (1980). Información macrosísmica de las provincias de Villa Clara, Cienfuegos y Sancti Spiritus. Investigaciones Sismológicas en Cuba No.1.
- Chuy, T., González, B.E. y Alvarez, L. (1983): Sobre la peligrosidad sísmica en Cuba. Investigaciones Sismológicas en Cuba. No.9.
- Chuy, T. (1982): Actividad sísmica de la provincia Holguín. Investigaciones sismológicas en Cuba No.2.
- Chuy, T. y Pino, O. (1982): Datos macrosísmicos de los terremotos en la provincia de Santiago de Cuba. Investigaciones Sismológicas en Cuba No.2
- Chuy, T. (1988) Sismicidad histórica de Cuba. Movimientos tectónicos reciente en Cuba No.2.
- Chuy, T. (1988): Influencia de las condiciones geológicas en la Intensidad sísmica en la ciudad de Santiago de Cuba. Movimientos tectónicos recientes en Cuba. No.2..
- González, B.E. y Chuy. T. (1983): Actividad sísmica de la Provincia Pinar del Río. Investigaciones Sismológicas No.4.
- González, B.E. y Kogan, L. (1987): Estimación del grado base para el suelo patrón de la ciudad de Santiago de Cuba. Resultados de los proyectos Geofísicos Internacionales. Investigaciones Sismológicas, Moscú (en ruso).
- González, B.E.; Mirzoev, K., Chuy, T. y otros (1990): Microzonificación sísmica de la ciudad de Santiago de Cuba. Comunicaciones científicas sobre Geofísica y Astronomía No.15.
- Montelieu, E. (1933): Informe de la comisión nombrada para el estudio del terremoto de Santiago de Cuba de Febrero de 1932. Revista Sociedad Cubana de Ingenieros. Vol. XXV. No1.La Habana.
- Montelieu, E. (1968): Notas acerca de terremotos ocurridos en Cuba. Inédito.
- Morales, L. (1931): Los terremotos de Cuba. Revista Sociedad de Ingenieros Vol. XXIII (Sep-Oct 1931). La Habana.
- Viñes y Salteraín, P. (1880): Excursión a Vueltabajo de Benito Viñes y Pedro Salteraín en ocasión de los fuertes temblores de tierra ocurridos en la noche del 22 al 23 de enero de 1880. La Habana.