



INSTITUTO SUPERIOR MINERO  
METALURGICO DE MOA  
DR. ANTONIO NUÑEZ JIMENEZ

**Facultad: Geología y Minería  
Departamento de Geología**

# *Trabajo de Diploma*

En opción al Título de  
**Ingeniero Geólogo**

**Caracterización geotécnica del dique de la presa de residuos Minero-Metalúrgico de la empresa Cmte. Ernesto Che Guevara.**

**Autor: Reinier Hernández Guilarte**

**Tutor: Andro Hernández Zaldívar**

Moa 27 de junio del 2014  
"Año 56 de la Revolución"



## *Agradecimientos*

Agradezco a mis padres Ricardo Hernández e Ireida Guilarte desde lo más profundo de mi corazón por su amor, paciencia, comprensión, y por darme su apoyo en todo tiempo. Nada existe como ellos para mí.

A mis dos abuelos Pausides y Nectora(Cuca) que siempre me protegieron, mi hermano Rubiel, a mi novia Iliana que ha estado a mi lado durante toda mi trayectoria en el ISMM en los buenos y malos momentos, a mi suegra María Elena, a toda mi familia de Moa.

A mi tutor Andro Hernández Zaldívar, por ayudarme con la realización de este trabajo, al igual que al profesor José Carmentate.

A mis compañeros de aula Pabel, Reinier, Ildanelis, Yunier, Freddy, José Miguel, Adrián, Olavis, Grabiél, Perera, Owen, Forge Félix, que estuvieron conmigo durante largo 5 años de trabajo y sacrificio.

A los profesores del departamento de geología, en especial a Yurisley Valdés, a Liuska Fernández, por ser comprensivos y ayudarme siempre, al profesor José Nicolás Muñoz por darme una parte de su infinita gama de conocimiento y al profesor León Ortelio Zardiñas que aunque ya no está entre nosotros fue un excelente profesor y una buena persona

Agradecer a todas las personas que de una forma u otra contribuyeron en la realización de este trabajo de diploma y a que mis 5 años en Moa fueran de la manera más placentera posible.

GRACIAS

## *Dedicatoria*

Les dedico de todo mi corazón este trabajo de diploma a las personas que más quiero en mi vida, mis padres Ricardo e Ireida.

A mis queridos abuelos Cuca y Pausides, a mi hermano menor Rubiel, a mi novia Iliana.

A todos aquellos que supieron serme fiel y haberme ofrecido su amor y dedicación.

## **Resumen**

El trabajo titulado **“Caracterización geotécnica del dique de la presa de residuos minero-metalúrgico de la empresa Ernesto Che Guevara”** Cmte. tiene como objetivo caracterizar desde el punto de vista geotécnico el dique de dicha presa, para esto se interpretaron los resultados de los métodos geofísicos empleados (sísmica y tomografía), se determinaron las propiedades físico-mecánicas, el corte ingeniero geológico y los parámetros hidrogeológicos (profundidad del nivel del agua y coeficiente de filtración), lo que permitió conocer la estabilidad de los materiales, establecer sus diferencias y clasificación así como el comportamiento de distintas variables geotécnicas ,estos resultados pueden ser empleados para profundizar en el conocimiento de los diques de la presa y tomar medidas correctoras de su comportamiento evitando así futuros accidentes.

Palabras claves: construcción, materiales, presas, propiedades.

**Abstract**

The titled work **“Geotechnical Characterization of the dike of the residual reservoir of company Cmte. Ernesto Che Guevara”** has the objective of characterizing geotechnically the materials of the dike of this residual reservoir. For this the geophysical results (seismic and tomography), the physical-mechanical properties and the hydrogeological parameters (depth of the water level and filtration coefficient) were interpreted. These interpretations lead to the stability of the materials, their differences and classification as well as the behavior of different geotechnical variables. These results can be employed to deepen the knowledge about the dike materials of the residual reservoir and to take measures proofreaders to avoid future accidents.

Passwords: construction, materials, reservoir, properties

## ÍNDICE

Introducción .....	1
Capítulo I: Características geográficas y geológicas del área de estudio .....	17
1.1 Generalidades .....	17
1.2 Características físico – geográfica .....	17
1.2.1 Ubicación geográfica .....	17
1.2.2 Relieve .....	18
1.2.3 Clima .....	20
1.2.4 Vegetación .....	21
1.2.5 Suelos. ....	22
1.2.6 Características socioeconómicas .....	22
1.3 Características Geológicas del territorio .....	23
1.3.1 Geología del área de estudio. ....	24
1.3.4 Procesos Geodinámicos y Antrópicos. ....	31
1.3.5 Sismicidad .....	32
Capítulo II: Metodología de la investigación .....	36
2.2 Trabajos de Laboratorio .....	43
2.3 Trabajos de gabinete .....	45
Capítulo III .....	49
Capítulo III. Interpretación de los resultados: .....	50
3.1 Resultados de los métodos geofísicos (sísmica y tomografía eléctrica) .....	50
3.3 Parámetros hidrogeológicos. (Profundidad del nivel del agua y coeficiente de filtración) .....	68
Conclusiones: .....	70

## **Introducción**

La construcción de presas para almacenamiento de las colas o lodos producidos por la industria minera es relativamente joven la cual surgió como una necesidad.

La industria minera es productora de grandes cantidades de residuos, también denominados “estériles”, que necesitan ser almacenados de manera que no produzcan daños. El vertido de residuos mineros al medio ambiente por rotura de una presa de colas tiene frecuentemente consecuencias catastróficas y prueba de ello es una larga lista de accidentes en este tipo de construcciones.

Por las características del territorio de Moa donde se encuentran en funcionamiento dos presas de residuos y una en construcción, y que los materiales que se usan para su construcción son los mismos suelos lateríticos del lugar, se hace necesaria la presente investigación: **Caracterización geotécnica del dique de la presa de residuos minero-metalúrgico de la empresa Cmte. Ernesto Che Guevara.**

**Problema:** Insuficiente conocimiento de las características del dique de la presa de residuos minero-metalúrgico de la empresa Cmte. Ernesto Che Guevara.

**Objeto:** El dique de la presa de residuos minero-metalúrgico de la empresa Cmte. Ernesto Che Guevara.

**Campo de acción:** Las características geotécnicas del dique de la presa de residuos minero-metalúrgico de la empresa Cmte. Ernesto Che Guevara.

**Objetivo:** Caracterizar desde el punto de vista geotécnico del dique de la presa de residuos minero-metalúrgico de la empresa Cmte. Ernesto Che Guevara.

### **Objetivos específicos:**

1. Determinar el corte ingeniero geológico
2. Determinar las propiedades físico-mecánicas
3. Determinar los parámetros hidrogeológicos ( profundidad del nivel del agua y coeficiente de filtración)

## **Hipótesis**

Si se conocen los datos geofísicos, las propiedades físico-mecánicas, el corte ingeniero geológico y los parámetros hidrogeológicos entonces es posible caracterizar el dique de la presa de residuos Minero-Metalúrgico de la empresa Cmte. Ernesto Che Guevara.

## **Marco teórico conceptual:**

### **Conceptos fundamentales.**

**Las colas** son sedimentos friables, sueltos de granulometría pequeña y fina, fuertemente limosas, saturadas por las aguas, con alta capacidad de fluidez (ante el agua). Precisamente esta última propiedad puede tener lugar de diferentes formas, desde muy lenta, lenta, a rápida hasta llegar a un movimiento catastrófico. La movilidad de las colas indica que existe una inestabilidad en el medio, así como una pérdida de resistencia y la deformabilidad de este suelo. (Barrera S. & Lara J. (1998), Barrera S. & Riveros C. (2000).

**Los relaves mineros** son materiales de desecho provenientes de la planta de metalúrgica, con una distribución granulométrica que depende del tipo de proceso de extracción y de las características mineralógicas de la corteza laterítica del macizo rocoso explotado. El tamaño típico de las partículas de relaves minero corresponde al de las arenas de tamaño medio a partículas del tamaño de los limos. Los relaves son usualmente transportados desde la planta de proceso al área de depositación a través de tuberías en forma de pulpa con contenido de sólidos, concentración que varía de 35 a 56%.

Una **presa de colas** no es más que una estructura u obra de ingeniería civil construida sobre la superficie del terreno. Generalmente consiste en un dique exterior de tierra u otro material que delimita una superficie determinada. En el área delimitada por el dique (vaso de presa) se almacenan los residuos minero-metalúrgicos. (Guardado y Columbié, 2013)

## **Síntoma característico de los suelos de las presas de relaves minero en la industria del níquel en Cuba.**

En la industria minero metalúrgica del níquel el mineral que se extrae entra al proceso industrial y sale como residuo sólido el que es depositado en las presas contiguas a la industria. Dentro de estos sólidos o suelos de relaves podemos diferenciar: (Guardado y Columbié, 2013)

**Mineral de rechazo.** Es el que entra al proceso pero al no cumplir los compromisos técnicos sale del proceso y es depositado en forma de pulpa en las presas de residuos anexas.

**Residuos metalúrgicos,** suelos de relaves mineros: Son los residuos sólidos del proceso metalúrgico que salen del proceso y son depositados en forma de colas en los depósitos o presas construidas para su efecto.

Los residuales sólidos son mezclados con agua y transportado por tubería a la presa de relave (figura 2). La composición media de estos suelos de relave es de un 60-70 % de líquido y un 30-40 % de material sólido, el Ph es ácido con valores de 4 a 4.5.

Es característicos de estos suelos la alta cantidad de materiales en suspensión y disueltos en el líquido de transporte. La granulometría es limo - arcillosa, con predominio de fracciones limosas. El diámetro de las partículas varía entre 100 y 5 micras. El agua que acompaña a estos suelos, se trata de un agua residual, frecuentemente ricas en metales pesados y con un Ph entre 2 – 6.

### **El riesgo ambiental por rotura de una presa de colas.**

El vertido de residuos mineros al medio ambiente por rotura de una presa de colas tiene frecuentemente consecuencias ambientales catastróficas. Esto se debe fundamentalmente a que la fracción sólida posee una elevada superficie específica (superficie por unidad de peso). Esta propiedad determina en primer lugar que la mezcla sólidos-agua (lodo) se comporte como un fluido viscoso, permitiendo que el volumen vertido se esparza sobre grandes superficies. Este lodo tiene además gran capacidad para cubrir drenajes, tapar tuberías, etc., debido al pequeño tamaño de las

partículas, generalmente menor de 0.5 mm. Una vez ocurrido el vertido, la fina granulometría facilita la erosión de las colas por el escurrimiento superficial debido a las precipitaciones atmosféricas, permitiendo que las partículas vuelvan a ponerse en suspensión en el agua.

La rotura de la presa provoca que los residuos se extiendan sobre una gran superficie, con lo que la masa de sulfuros puesta en contacto con el oxígeno es varias veces mayor que cuando el residuo estaba confinado en el depósito. El ácido producido, al disminuir el pH del agua, y encontrarse en un medio con condiciones oxidantes (en contacto con el aire), tiene gran capacidad para disolver los metales. Por lo tanto, cabe considerar la posibilidad de que los metales presentes en los residuos vertidos con la rotura de la presa, se movilicen y terminen incorporándose al suelo, corrientes de aguas superficiales o aguas subterráneas, contaminándolos de tal forma que posiblemente su recuperación resulta económicamente inviable. (Oldecop.L y Rodríguez. R)

#### **La ingeniería de presas de residuos o colas:**

Existen un número de similitudes entre los problemas de seguridad de presas de colas. Por ejemplo, los problemas de flujo, estabilidad y deslizamiento de taludes, problemas de erosión interna, vulnerabilidad al sobrepaso, su comportamiento bajo acciones sísmicas, susceptibilidad a licuación, etc. Las presas de colas se construyen progresivamente a lo largo de todo el periodo de explotación minera.

Durante la extendida etapa de construcción ocurren cambios importantes en el régimen de operación de la presa, esencialmente por aumento de la carga hidráulica y de las tensiones en el cuerpo de la presa y en la fundación. El correcto funcionamiento de la presa en las fases iniciales puede inducir una sensación de falsa seguridad a proyectistas y operadores.

Los efectos de rotura en una presa de residuos se agravan a medida que transcurre el tiempo y su altura y el volumen de residuos almacenados crece. Por lo tanto, cabe

considerar diferentes probabilidades de excedencia de las cargas extraordinarias (crecidas y terremotos) para las diferentes etapas de la presa.

Otra particularidad de las presas de colas es que tienen una fase de post-construcción, en ella la presa debe ser tan segura como durante la fase de explotación, aún muchos años después de que el beneficio económico haya cesado. Es difícil definir la extensión de la etapa de cierre en el tiempo. Ésta puede ser convencional (500, 1000 años) o a perpetuidad, lo que implica dificultades para el tratamiento estadístico de los eventos extraordinarios.

La consecuencia de esto es que el número de presas de colas en el mundo aumenta sostenidamente, en contraposición a las presas de embalse, que terminada su vida útil (aproximadamente 100 años de explotación) y se pueden demoler. Puesto que las presas de colas son estructuras que se operan simultáneamente con su construcción, hay mayores probabilidades de provocar una falla por un error de operación. (Oldecop.L y Rodríguez. R)

#### **Tipos de presas de colas acuerdo al sistema de cierre utilizado:**

Existen cuatro métodos fundamentales de construcción de las presas de residuo de acuerdo al método de recrecimiento del dique de retención (**Figura 1**) los cuales describiremos a continuación:

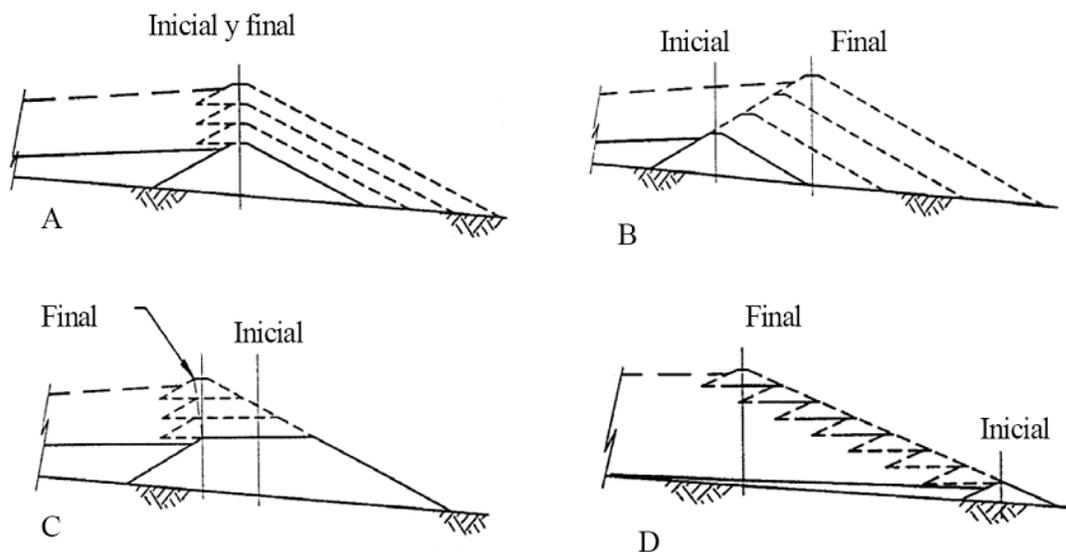
- **Línea central**” centerline” (Figura 1a). Combina alguna de las ventajas de los otros métodos (con una mejor estabilidad sísmica que el método” upstream” y con menos requerimientos de volumen de material en los recrecidos que con el sistema” downstream”). Sin embargo, la capacidad de retención de agua no es tan buena como la del método” downstream” (Markland y Eurenus, 1976; Junghans y Helling, 1998).

- **Aguas abajo**” downstream” (Figura 1b). Habitualmente, se construye una barrera impermeable en la cara del muro de la presa que está en contacto con el depósito y se provee de un drenaje interno para asegurar que el nivel freático dentro del muro se mantenga lejos de la cota de aguas arriba. El espesor de la presa en su base

aumenta con la altura. Esto incrementa su estabilidad, pero requiere aportes crecientes de material según la subida gradual del cierre (Markland y Eurenus, 1976; Junghans y Helling, 1998).

- **Línea central desplazada** “modified centerline ” (Figura 1c). En este método lo que se realiza es un recrecimiento del muro de contención de la presa de la misma forma que el método de línea central, pero con una prolongación de la longitud del muro de la presa aguas abajo (Junghans y Helling, 1998).

- **Aguas arriba” upstream”** (Figura 1d). Es el sistema más antiguo. Cada recrecimiento se apoya sobre el coronamiento del anterior y la playa de colas depositadas. Con este sistema la economía de volumen de presa es máxima pero tiene la desventaja de generar una estructura cuya estabilidad es muy sensible a la posición de la superficie freática. Este sistema todavía se usa en las áreas más secas del mundo, donde los niveles de agua en el interior de la presa se pueden mantener al mínimo (Junghans y Helling, 1998).



**Figura 1:** Tipos de presas de almacenamiento de residuos, de acuerdo a la forma de construcción del cierre (adaptado de Junghans y Helling, 1998). A) Línea central, B) Aguas abajo, C) Línea central desplazada y D) Aguas arriba.

La localización de los diques que delimitan presas depende en gran medida de la topografía natural y de la naturaleza de las rocas subyacentes. Los diques de estériles de acuerdo a su ubicación se pueden clasificar en: (Quintana, 1998, Rodríguez R, 2002).

- I)- Cerramiento de valle (cross valley),
- II)- De ladera (valley side), III) - fondo de valle (valley bottom),
- IV) - Anillo completo de cerramiento (ring or enclosed),
- V)- Cerramiento parcial o total de bahías marinas o ensenadas

**Los depósitos de residuos minero metalúrgicos pueden ser:**

**Cola fluida**



**Cola secas**



**Cola en pasta**



## **Descripción de los mecanismos de falla de presa de residuos. Ejemplos**

### **Deslizamiento de taludes**

El deslizamiento de un talud ocurre cuando los esfuerzos de corte en una superficie que delimita un bloque de suelo, exceden la resistencia al corte del material. Los eventos que determinan el inicio del deslizamiento pueden ser de diferente naturaleza. En particular, para 193 las presas de colas, dos situaciones son las que comúnmente desencadenan un deslizamiento de talud: (Oldecop.L y Rodríguez. R)

- 1) Elevación de la superficie freática y su aproximación al talud.
- 2) Desarrollo de presiones de poro durante trabajos de recrecimiento (ritmo de recrecimiento excesivo que no permite la disipación de presiones de poro), durante la instalación de la cobertura o por tránsito de maquinaria pesada.

Situaciones peligrosas también pueden generarse por una operación deficiente u otros factores. Por ejemplo, en climas fríos el congelamiento de las capas superficiales puede impedir el drenaje provocando el aumento de las presiones de poro.

### **Deslizamientos de las presas de colas provocados por elevación de la superficie freática**

Evidentemente que la pendiente con que se diseña y construye el talud es el factor primordial para asegurar su estabilidad. La posición de la superficie freática juega un papel fundamental como factor desencadenante de la mayoría de los deslizamientos de taludes .La aproximación de la superficie freática al talud puede ocurrir por: (Oldecop.L y Rodríguez. R)

- 1) Elevación del nivel de embalse por aportes de agua de crecidas o lluvias persistentes o por obstrucción de drenajes.
- 2) Por operación inadecuada de la presa, provocando que la laguna se forme en la proximidad de la presa.

3) Presencia de mantos de material fino que provoquen la ocurrencia de niveles freáticos colgados.

### **Deslizamientos provocados por incremento de presión de poros.(figura 2)**

Como todo material granular, las colas se comportan de acuerdo al principio de tensiones efectivas de Terzaghi cuando sus poros están saturados de agua. Sobre la base de este principio la resistencia al corte del material se puede escribir como: (Oldecop.L y Rodríguez. R)

$$s = (\sigma - u) \operatorname{tg} \phi' + c' \quad (1)$$

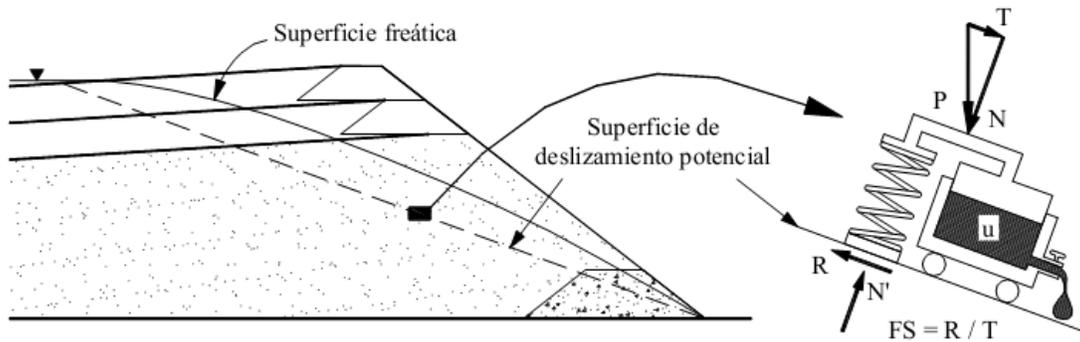
Donde **s** es la resistencia al corte,

**$\sigma$**  es la tensión normal al plano de deslizamiento,

**u** es la presión de agua en los poros del material  $\phi'$  y  $c'$  son los parámetros de resistencia del material (ángulo de fricción y cohesión respectivamente)

De acuerdo a la expresión (1), si la presión del agua en los poros crece por cualquier causa, la resistencia al corte del material disminuye y puede que en un cierto momento se alcance la inestabilidad. Los incrementos de presión de poros pueden ser provocados por:

- 1) Recrecimiento de la presa o vertido de nuevas capas de colas al depósito.
- 2) Instalación de la cobertura de cierre en depósitos llenos
- 3) Tránsito de maquinarias
- 4) Voladuras
- 5) Terremotos.



**Figura 2.** Deslizamiento iniciado por incremento de presión de poros. Modelo físico. P = peso del material encima de la superficie de deslizamiento, u = presión de agua en los poros del material, N' = fuerza normal efectiva sobre la superficie de deslizamiento, R = resistencia al corte del material (friccional), FS = factor de seguridad al deslizamiento.

### **Drenaje en las presas de colas.**

En vista de las implicaciones que tiene el agua en la estabilidad y seguridad de las presas de colas, es habitual que los proyectos modernos incorporen elementos de impermeabilización y drenaje específicos para controlar el agua freática, similares a los utilizados en las presas de embalse clásicas, tales como pantallas y mantos de material de baja permeabilidad, sistemas de drenaje y filtros. El grado de redundancia de estos sistemas suele ser elevado y por lo tanto garantizan la posición de la superficie freática, independientemente de las condiciones de operación de la presa. Además, como rutina de seguridad, la posición de la superficie freática se monitorea mediante piezómetros instalados en el depósito, en la presa y en la fundación.

Van Zyl y Robertson (1980) señalaron las ventajas de instalar sistemas de drenaje en los depósitos de colas:

- En la masa de colas no saturadas se inhibe el mecanismo de licuación.
- Disminuye la carga hidráulica sobre las barreras impermeables y por lo tanto el caudal de las fugas es menor.

- Se disminuye el contenido global de agua del depósito con lo cual existen menos posibilidades de generar y transportar contaminantes.
- Se disminuyen los asentamientos a largo plazo con lo que se preserva la integridad de la cobertura de cierre.
- Cuanta menos agua contengan las colas menor será la distancia que recorran las colas en caso de una falla.
- Cuando hay escasez de agua, mediante el drenaje es posible recuperar agua para el proceso metalúrgico.

Sin embargo, se debe tener en cuenta que, debido a la granulometría fina de las colas, las posibilidades de extraer el agua que contienen por simple efecto de la gravedad, son limitadas y en la mayor parte de los depósitos de colas en los que éstas se vierten en forma de lodo, un importante proporción del agua vertida junto con las colas, queda atrapada en forma permanente dentro de las colas como agua capilar. Existen técnicas para extraer el agua de las colas antes de ser colocadas en el depósito tales como el espesamiento y el filtrado. Estas técnicas se están aplicando en algunas explotaciones de desarrollo reciente.

### **Influencia del agua en el comportamiento de las colas.**

La mayor parte de los depósitos de colas existentes en la actualidad se han construido mediante el sistema de relleno hidráulico. Esto es, las colas mezcladas con agua (generalmente el agua proviene los procesos de molienda y flotación), con la consistencia de un lodo, son bombeadas a través de tuberías hasta el punto de descarga en el depósito.

La proporción de sólidos: agua del material que se vierte en una presa de colas tradicional suele ser cercana a 1:1 en peso. Puesto que el peso específico de las partículas de las sólidas que forman las colas es relativamente elevado (particularmente en los residuos de la minería metálica donde puede encontrarse entre 2 y 5 g/cm<sup>3</sup>), el agua puede representar entre el 65 y el 80% del caudal de lodo vertido.

## **Evolución de la humedad de las colas una vez vertidas al depósito**

A partir del vertido, el material fluye a lo largo de la playa, sedimentando las fracciones gruesas cerca del punto de vertido y clasificándose espontáneamente por tamaño con la distancia recorrida. La fracción más fina va a parar a la laguna de decantación donde sedimenta bajo agua. La evolución de la humedad de las colas con posterioridad al vertido depende en gran medida de su granulometría y por lo tanto de la posición dentro del depósito. Wells y Robertson (2003) estudiaron la evolución del contenido de agua en colas “gruesas” (próximas al punto de vertido, con 20% de finos) y finas (próximas a la laguna, con 70% de finos) de una explotación de cobre sobre la base de mediciones de campo y de laboratorio.

Evolución de la humedad de las colas en las diferentes etapas por las que pasa el material:

- a) Vertido: en el punto de vertido, el material estudiado contiene un 66% de agua en volumen (índice de poros = 2).
- b) Sedimentación: al fluir por la playa, las partículas sedimentan clasificándose por tamaño. El agua decantada escapa como escorrentía superficial hacia la laguna. En esta etapa, las colas “gruesas” pierden un 55% del agua que contenían en el vertido ( $e = 0.9$ ). En cambio las colas finas sólo pierden un 30% ( $e = 1.4$ ). Esta etapa dura 1 a 2 días.
- c) Consolidación: cuando las partículas entran en contacto y el volumen de los poros comienza a disminuir bajo la acción del propio peso del material, entonces se inicia la etapa de consolidación. Durante esta etapa, que puede durar entre 1 y 4 semanas, el agua de los poros es expulsada hacia la superficie o bien hacia capas inferiores de colas vertidas con anterioridad. Las colas “gruesas” pierden durante esta etapa un 15% del agua contenida inicialmente (el índice de poros baja a 0.6). Las colas “finas” expulsan durante la consolidación algo más que las gruesas debido a su mayor compresibilidad, quedando al final con un 50% del contenido de agua inicial ( $e = 1$ ).

d) Secado. Cuando el punto de vertido se traslada a otro sitio, la superficie de las colas tiene oportunidad de secarse. El aguase evapora primero desde la misma superficie. Cuando las colas pierden su condición de saturación, se inicia la etapa de secado. El ritmo de evaporación depende de las condiciones climatológicas y de la granulometría del material. En teoría, esta etapa tiene duración indefinida y por lo tanto el secado podría continuar hasta alcanzar un estado de equilibrio con las condiciones climatológicas del sitio. Sin embargo en la práctica el periodo de secado está limitado por el ritmo de operación de la presa (cuando llegue el momento de volver a verter en el mismo punto y por lo tanto las colas ya vertidas se vuelvan a mojar). También el agua freática puede limitar el grado de secado que alcance el material debido al agua que asciende por capilaridad desde el nivel freático. Wells y Robertson (2003) midieron al cabo de un mes de secado, que la humedad remanente en las colas gruesas representaba un 9% del volumen de agua contenida inicialmente, en tanto que las colas finas quedan con un 40%.

#### **Fallas provocadas por terremotos sobre un talud**

Se pueden distinguir dos tipos de daños que puede provocar un terremoto sobre un talud:

- a) Efectos directos de las fuerzas de inercia aplicadas al talud durante el movimiento sísmico.
- b) Daños provocados por degradación de la resistencia y/o rigidez de los materiales por incremento de presión de poros. Esto sólo puede ocurrir cuando los materiales afectados están saturados de agua.

En el caso de rellenos construidos por el hombre, el primer tipo de daño rara vez suele ser catastrófico. Esto se debe a que en estos rellenos, la resistencia de los materiales es de tipo friccional y no frágil, ya que las fuerzas de inercia que produce el terremoto están aplicadas al talud durante periodos de tiempo muy breves, los daños se limitan a desplazamientos residuales limitados y agrietamientos. (Oldecop.L y Rodríguez. R)

En la segunda categoría caen una serie de fenómenos que se conocen genéricamente con el nombre de licuación, aunque, en la literatura especializada este término se reserva para los casos concretos en que se alcanza una situación de inestabilidad. En estos casos el material licuado fluye, como si se tratara de un líquido viscoso y los daños suelen ser catastróficos.

### **Fallas por sobrepaso, tubificación y erosión**

Las fallas por sobrepaso, tubificación o erosión ocurren en las presas de colas de manera similar a las presas de embalse de materiales sueltos. Ambos tipos de presa son igualmente sensibles a estos problemas. Sin embargo, las circunstancias que desencadenan estos mecanismos de falla en las presas de colas son diferentes a las de una presa de embalse.

La hidrología de una presa de colas en muchos casos está condicionada por el hecho de que, por razones de protección del medio ambiente, el agua almacenada y aun la que ingrese accidentalmente en la presa no se puede verter al medio. Si el depósito es de tipo anular, el único aporte de agua que puede recibir es el de las precipitaciones, pluviales o niveas, que caigan en el área que ocupa su planta. Si, en cambio, el depósito está ubicado en un valle, con una presa de cierre por el costado de aguas abajo, entonces en las previsiones hidrológicas habrá que tener en cuenta el área de captación de la cuenca y el volumen de agua que puede generar una lluvia o deshielo. En algunas presas de este tipo se construyen estructuras de desvío (canales o tuberías) para evitar que el agua de escurrimiento superficial ingrese en el depósito.

A lo largo del proceso de construcción y llenado del depósito de colas la morfología y estructura del mismo cambia en el tiempo. La forma de operación de la presa puede tener una influencia importante en el riesgo de sobrepaso. Una operación inadecuada puede hacer que la altura de resguardo disminuya a niveles peligrosos. La obstrucción de tuberías de desagüe es otro problema que puede llevar al sobrepaso. (Oldecop.L y Rodríguez. R)

### **Licuación estática**

La licuación estática es una situación de inestabilidad no muy diferente de la licuación producida por un movimiento sísmico, en realidad la única diferencia es el mecanismo por el cual se llega a la inestabilidad. En el caso del terremoto, es el aumento de la presión de poros y la consiguiente acumulación de deformación de corte lo que determina que el material alcance la rama descendente de su relación resistencia de formación y se produzca así el disparo de la licuación. Ahora bien, cualquier otro proceso que produzca el aumento de las tensiones hasta que el pico de resistencia del material sea superado, entonces una situación de inestabilidad análoga se alcanza por incremento de carga “estática”, de ahí el nombre de licuación “estática”. (Oldecop.L y Rodríguez. R)

### **Otros mecanismos de disparo de la licuación estática: tubificación y erosión**

Las fallas por tubificación y por erosión tienen un mecanismo de desarrollo idéntico al descrito para el caso de sobrepaso. La diferencia en estos casos es el factor que desencadena la falla. Los procesos de tubificación o de erosión interna se pueden iniciar por afloramiento de agua freática en un talud, por arrastre de partículas hacia el exterior o hacia otros materiales más gruesos o por fractura hidráulica.

### **Subsidencia**

Los casos de falla de presas de colas por subsidencia no son frecuentes. En la colección de Boletín 121 del ICOLD (2001) sólo se registran tres casos. Todos ellos están asociados a la actividad minera subterránea que, por proximidad o por condiciones geológicas favorables, en un cierto momento llegan a afectar a los depósitos de colas en superficie. En dos de los casos registrados, Mulfilira (Zambia) y Atlas (Filipinas), la falla consistió en el escape de colas licuadas hacia galerías subterráneas en donde se estaban realizando actividades de extracción.

# CAPÍTULO 1

## **Capítulo I: Características geográficas y geológicas del área de estudio.**

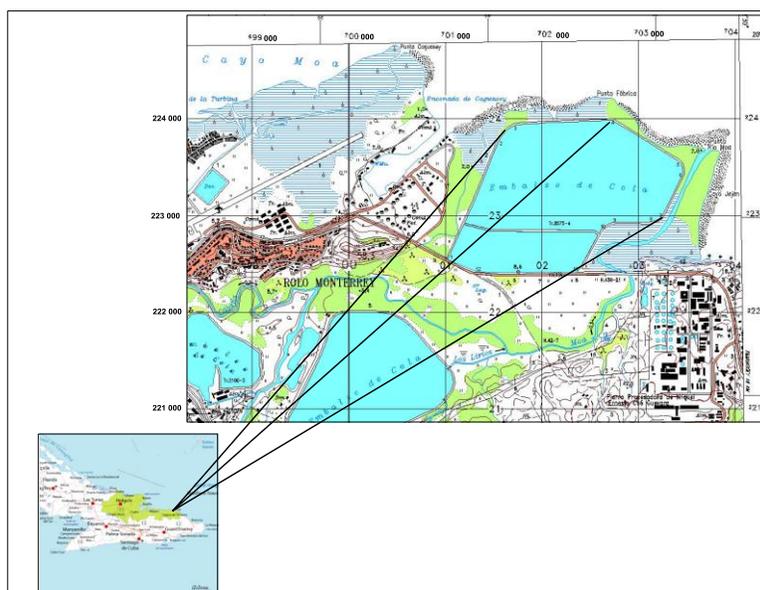
### **1.1 Generalidades**

El municipio de Moa tiene una extensión territorial de 732.6 kilómetros cuadrados. Se encuentra ubicado en la provincia Holguín, al noroeste de Cuba oriental. Limita al Este con el municipio Baracoa, separados por los ríos Jiguaní y Jaguaní; por el Sur limita con el municipio Guantanamero de Yateras; por el Oeste con los municipios de Frank País y Sagua de Tánamo y por el Norte con el estrecho de Bahamas en el Océano Atlántico. Próximos a sus costas se encuentran los cayos Moa Chico y Moa Grande situados frente a la Ciudad de Moa y Cayo del Medio en la Bahía de Yamanigüey.

### **1.2 Características físico – geográfica**

#### **1.2.1 Ubicación geográfica**

La obra objeto de estudio se encuentra ubicado en el municipio Moa, ocupando un área cercana a la actual Empresa Niquelífera Cmte. Ernesto Che Guevara.



**Figura 3:** Esquema del mapa de ubicación.

Punto	Coordenadas aproximadas		Hoja cartográfica
	X	Y	
1	701026.89	222544.50	5277-IV-a, Moa Esc. 1: 25 000
2	701555.95	223778.33	
3	701702.20	223926.02	
4	702738.86	223984.77	
5	703443.37	223532.81	
6	703460.73	223433.37	
7	703460.73	222973.86	
8	703141.72	222934.54	
9	702750.49	222928.76	
10	702623.68	222862.64	
11	702433.85	222438.11	
12	701332.70	222421.96	

### 1.2.2 Relieve

Orográficamente el territorio se caracteriza por una alta complejidad, predominando el relieve de montaña, hacia la parte este, con cota máxima de 1139 m sobre el nivel del mar (El Toldo) y ondulado hacia el norte, zona correspondiente a la región costera. Se clasifica en dos zonas geomorfológicas fundamentales: la zona de relieve de llanuras y la zona de relieve de montañas (Rodríguez, 1998), con subtipos específicos.

#### Zona de Llanuras

Se desarrolla en toda la parte norte de la región ocupando la zona comprendida desde la barrera arrecifal hasta los 100-110 m de altura hacia el sur. La formación de estas llanuras está relacionada con la acción conjunta de diferentes procesos morfogénicos que en ella han actuado, predominando los procesos fluviales y marinos. (A. Rodríguez, 1998)

La zona de llanura fue clasificada en tres subtipos:

- 1 Llanuras acumulativas marinas.
- 2 Llanuras fluviales clasificadas en acumulativas y erosivo-acumulativas
- 3 Llanuras acumulativas palustres

### **Zona de Montañas**

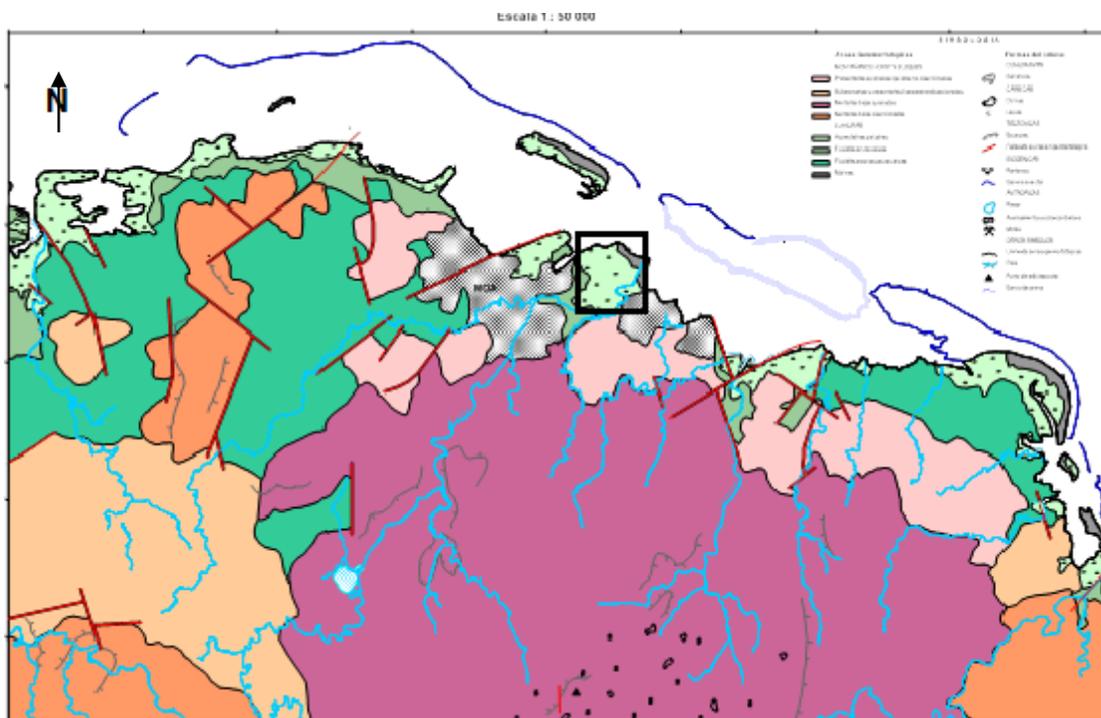
Según A. Rodríguez 1998. Esta zona geomorfológica es la más extendida dentro de la región ocupando toda la parte sur y central, además del Cerro de Miraflores y las zonas nordeste y noroeste del poblado de Cananova.

Teniendo en cuenta esos parámetros la zona de relieve de montaña fue clasificada en cuatro subtipos:

1. Zona de premontañas aplanadas ligeramente diseccionadas.
2. Zona de submontañas y premontañas ligeramente diseccionadas.
3. Zona de montañas bajas aplanadas ligeramente diseccionadas.
4. Zona de montañas bajas diseccionadas.

Conjuntamente con estas zonas, aparecen en la región formas menores del relieve o elementos del paisaje, algunas originadas por acciones antrópicas; que constituyen elementos importantes en la caracterización geomorfológica regional.

El relieve predominante en el área de estudio es de llanuras. La misma presenta un relieve ligeramente ondulado de tipo erosivo denudativos, con cotas absolutas que varían desde 8.0 hasta 19.0 m.s.m, desarrollado sobre las rocas de la Asociación Ofiolítica, en este caso sobre serpentinitas y peridotitas serpentinizadas.



**Figura 4:** Versión digital del mapa geomorfológico Escala original 1: 50 000 (Modificado de Rodríguez A. 1998)

### 1.2.3 Clima

El municipio Moa presenta características climáticas muy propias, debido a su ubicación geográfica, relieve y dirección e intensidad predominante de los vientos. El clima de la zona es subtropical húmedo, distinguiéndose de acuerdo a la distribución de las precipitaciones períodos secos y húmedos. La temperatura media anual oscila entre 22.26 – 30.5<sup>0</sup> C, siendo los meses más calurosos desde julio hasta septiembre y los más fríos enero y febrero.

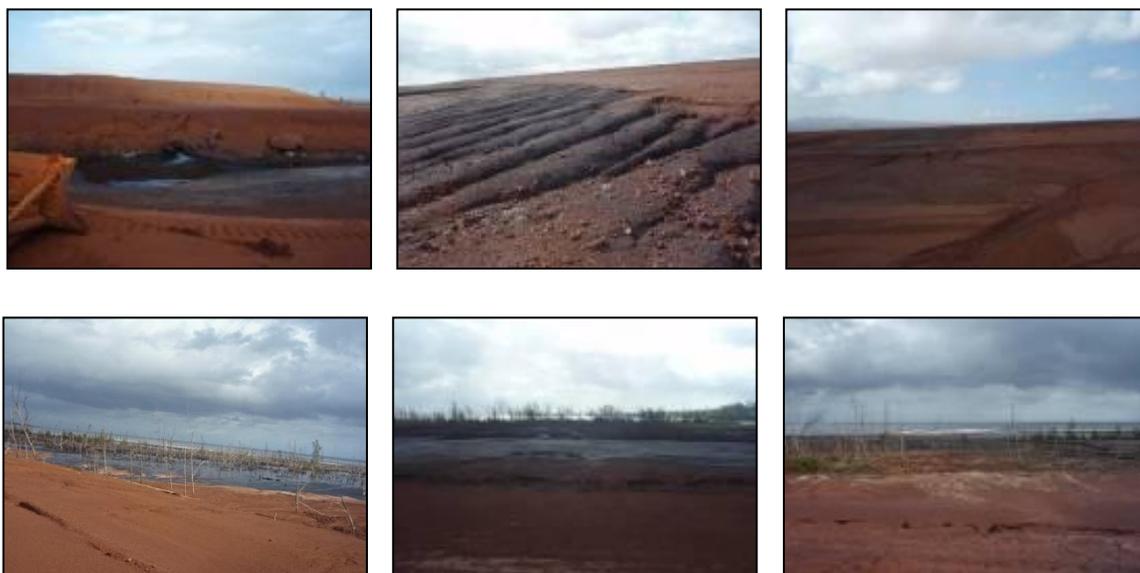
En el período comprendido entre los meses de diciembre a abril caen lluvias provocadas por la llegada de frentes fríos del norte. Los mismos pueden durar de dos a tres días, caracterizándose por tener poca intensidad y cantidad de lluvias.

El total de precipitaciones anuales es entre 767 - 3560 mm, siendo los meses más lluviosos octubre, noviembre y diciembre y los meses más secos abril, julio y agosto; la evaporación media anual varía entre los 1880 y 7134 mm.

### **1.2.4 Vegetación.**

El municipio forma parte del sistema montañoso Moa – Baracoa, el mismo representa la zona de mayor biodiversidad del país con un 68% de especies autóctonas. El área sur del municipio queda englobada dentro de una reserva de la biosfera declarada por la UNESCO en el año 1998. La vegetación presente en el área es variada, encontrando formaciones vegetales tales como: pinares, bosque en galería, arbustivo xeromorfo subespinoso (charrascal) y vegetación secundaria, pino cubensis (pino de Moa) y plantas latifolias, muchas de ellas endémicas de esta región, formando bosques típicos sobre las laderas.

El área de estudio se construyó en gran parte sobre una zona de manglar parcial o totalmente pantanosa, debido a la gran contaminación que existe a causa de los derrames de colas tanto por la cortina como eventualmente por los conductos aliviaderos de las aguas residuales, las que están cargadas de componentes químicos muy agresivos, afectando en gran medida el ecosistema costero (manglar- litoral). **(Figura 5)**



**Figura 5:** Fotos que atestiguan el avanzado estado de deterioro en que se encuentra el ecosistema costero

### **1.2.5 Suelos.**

En el territorio predominan los suelos aluviales formados por la meteorización de las rocas serpentinizadas y gabroides. Estos suelos pueden alcanzar potencias considerables de más de 50 m en bolsones situados en zonas tectónicas. En sentido general, las cortezas más potentes se desarrollan en las partes inferiores de las laderas con pendientes suaves y aplanadas en forma de mesetas. En las cimas más elevadas, los suelos son pardos, violetas, rojos y amarillentos. Estos no fueron sometidos a un proceso de sumersión, lo que puede probarse porque muchas plantas primitivas se conservan, han evolucionado, adaptándose a estos terrenos. La composición química de estos terrenos, ricos en distintos minerales pesados, lo hacen poco fértil, dificultando la alimentación de la población en lo que respecta a los productos del agro. El drenaje superficial y subterráneo en estos suelos son buenos y en ocasiones excesivos, lo que unido a sus características físico-mecánicas y las intensas precipitaciones y el tectonismo del terreno, dan lugar a la fuerte erosión laminar y en cárcavas.

### **1.2.6 Características socioeconómicas.**

La economía de la región permite que Moa sea uno de los municipios más industrializados del país, no solo por sus riquezas minerales, sino además porque cuenta con dos plantas procesadoras de níquel en producción, la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara y la Empresa Pedro Soto Alba. Este renglón constituye el segundo producto exportable del país. Además de estas industrias metalúrgicas, existen otras instalaciones de apoyo a la metalurgia y minería, tales como la Empresa Mecánica del Níquel, Centro de Proyectos del Níquel (CEPRONIQUEL), la Empresa Constructora y Reparadora del Níquel (ECRIN). Además de los yacimientos lateríticos, existen los de cromo refractario, clasificado como el mejor de su tipo en el territorio cubano, los mismos se encuentran distribuidos en las cuencas de los ríos Cayo Guam y Yamanigüey. Los gabroides y ultramafitas presentes en la región pueden ser empleados como áridos en la industria de materiales de la construcción.

Existen otros organismos de los cuales depende la economía de la región, tales como el establecimiento de la Empresa Geólogo Minera, la Presa Nuevo Mundo,

el Tejar, Combinado Lácteo y otros. Existen otros sectores económicos como la ganadería que se desarrolla al sur de la región y la explotación de recursos forestales, abundantes en la zona, siendo un eslabón importante en la economía. La agricultura y la pesca se encuentran poco desarrolladas, aunque se hacen esfuerzos para seguir fomentándola.

### **1.3 Características Geológicas del territorio**

El Bloque Oriental Cubano presenta características geológicas muy particulares dentro del marco de la estructura geológica cubana. De ahí el gran interés que ha despertado en diversos investigadores (Adamovich y Chejovich, 1963; Cobiella, 1978; Quintas, 1989; Blanco y Proenza, 1994; Iturralde-Vinent, 1996), llevando a cabo estudios encaminados a profundizar en la estructura geológica cubana en general.

Según Iturralde-Vinent, (1996) en la constitución geológica del archipiélago cubano se reconocen dos elementos estructurales principales: el cinturón plegado y el neoaútóctono.

El cinturón plegado según el autor, está constituido por terrenos oceánicos y continentales deformados y metamorizados de edad pre-Eoceno Medio, que ocupan en la actualidad una posición muy diferente a la original, representando las unidades geológicas que lo integran grandes entidades paleogeográficas que marcaron la evolución del Caribe Noroccidental. El autor divide al cinturón plegado en unidades continentales y unidades oceánicas.

Las unidades oceánicas están constituidas por las ofiolitas septentrionales, las rocas del arco de islas volcánicas del Cretácico (Paleoarco), las secuencias de las cuencas de piggy back del Campaniense Tardío-Daniense, el arco de islas volcánico del Paleógeno y las rocas de las cuencas de piggy back del Eoceno Medio-Oligoceno. El neoaútóctono está constituido por materiales terrígenos carbonatados poco deformados del Eoceno Superior Tardío al Cuaternario que cubren discordantemente las rocas del cinturón plegado.



### **Río Macío (Holoceno):**

Está integrada por los materiales aluviales de las terrazas de los ríos Moa, Cabañas y Cayo Guam (CGCO, 1980). La estratigrafía es bastante compleja, encontrándose hasta 8 capas donde es muy difícil poder definir la continuidad de las diferentes capas. En la zona de estudio, terrazas del río Moa, el área es de unos 10 Km<sup>2</sup> de extensión y su espesor de 25-35 m, está formado por los sedimentos aluviales depositados por el río Moa y el Cabañas. La granulometría está compuesta por gravas, arenas, limos y arcillas (INRH, 1986). Se encuentran pellets de hierro de diferentes tamaños y fragmentos de rocas ultramáficas serpentizadas (peridotitas harzburgitas). La mineralogía se caracteriza por la presencia de óxidos e hidróxidos de hierro y aluminio. Los minerales de hierro son hematita, goethita, magnetita, y de aluminio principalmente gibbsita. Además hay pequeñas cantidades de montmorillonita que no sobrepasan el 1%. El contenido de materia orgánica en la parte superior del corte (primeros 2 m) puede llegar al 1% del peso total (INRH, 1986). (Rodríguez Pacheco 2002)

### **Formación Punta Gorda: (Mioceno)**

Está constituida por suelos lateríticos redepositados y pequeñas capas de material terrígeno carbonatado de granulometría variada, presentando lentes de material arenoso y capas de material limo-arcilloso. En ella es posible diferenciar una capa de margas masivas de unos 40 cm de espesor. Están presentes diferentes capas de material areno-arcilloso y pellets de hierro de diferentes tamaños (entre 1-15 mm). En los minerales predominan los óxidos e hidróxidos de hierro (goethita, espinelas de cromo, hematitas), carbonatos, así como gibbsita y montmorillonita (anexo 1b). En esta formación se ha reportado la presencia de pirita (Formell y Oro, 1980). (Rodríguez Pacheco 2002).

## **Ofiolitas**

Estas rocas afloran como una serie de cuerpos alargados en la mitad septentrional de la isla de Cuba lo largo de una franja discontinua de más de 1000 km de largo y hasta 30 km de ancho, entre la localidad de Cajálbana al oeste y Baracoa al este, ocupando una extensión superior a los 6500km<sup>2</sup>. Desde el piso hasta el techo estos complejos rocosos se encuentran divididos estratigráficamente en las siguientes zonas fundamentales: a) una zona de harzburgitas con textura de tectónicas; b) una zona de harzburgitas que contiene principalmente cuerpos de dunitas, peridotitas “impregnadas” (con plagioclasas y clinopiroxeno), sills y diques de gabros y pegmatoides gabróticos, así como cuerpos de cromititas c) una zona de gabros, y d) el complejo vulcano-sedimentario. (Iturralde, 1998).

### **1.3.2 Tectónica**

El Bloque Oriental Cubano comprendido desde la falla Cauto-Nipe hasta el extremo oriental de la isla, presenta una tectónica caracterizada por su alta complejidad, dado por la ocurrencia de eventos de diferentes índoles que se han superpuesto en el tiempo y que han generado estructuras que se manifiestan con variada intensidad e indicios en la superficie (A, Rodríguez, 1998a, 1998b).

A, Rodríguez, (1998b) plantea que desde el punto de vista tectónico la región de Moa en general es muy compleja.

En los estudios tectónicos precedentes del territorio se han reconocido cuatro sistemas de fallas que cortan a las rocas de la asociación ofiolítica y que corresponden a cada uno de los períodos de la evolución geotectónica. El sector Playa la Vaca está constituido por las dislocaciones más abundantes y de mayor extensión de la región, que indistintamente afectan todas las litologías presentes y son a su vez los límites principales de los bloques morfotectónicos. Este sistema está constituido por fallas de dos direcciones: noreste y norte-noroeste que se desplazan mutuamente y se cortan entre los sesenta y ochenta grados.

Se extiende en forma de arco cóncavo hacia el este-noreste con un trazo casi paralelo a la falla Moa, con un rumbo N25°W desde el límite sur del área hasta

Cayo Chiquito y desde aquí hasta Punta Majá con una orientación N35°E. Su límite meridional al parecer lo constituye la falla Moa al sur del área de trabajo.

Es precisamente la falla Moa quien permite diferenciar para el sector de estudio los bloques morfotectónicos en los que se encuentra enmarcado, Bloque Moa y Bloque El Toldo (**ver Figura 8**)

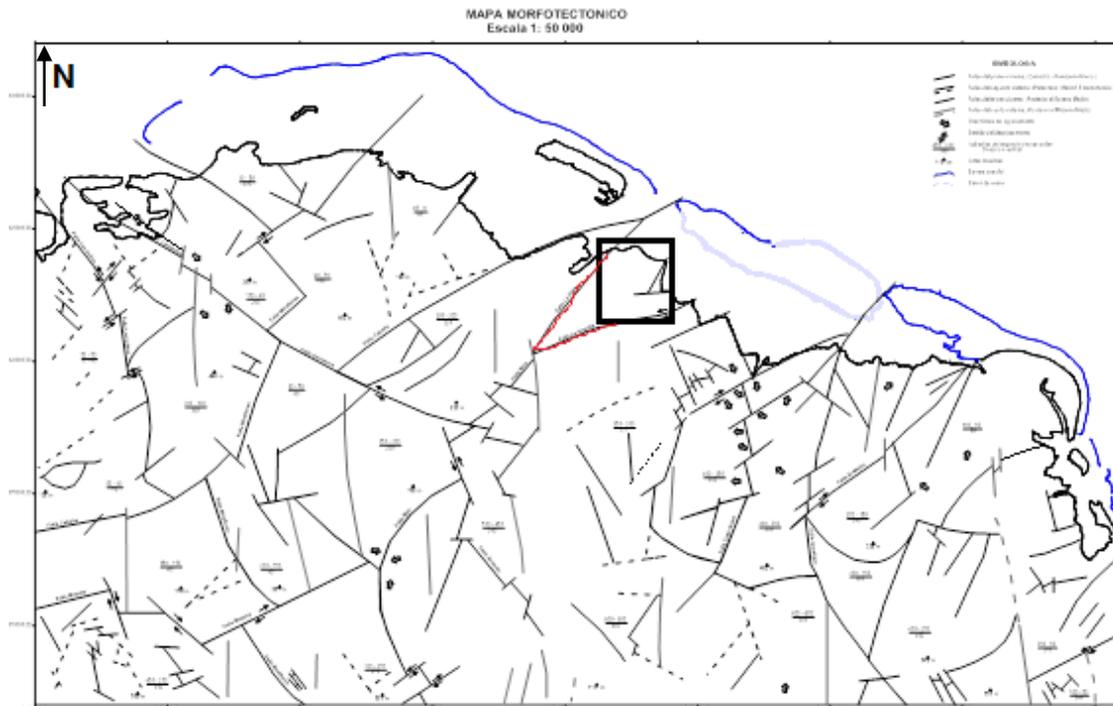
### **Falla Moa**

Dentro del territorio es la estructura de mayor extensión y su trazo corresponde con una línea cóncava hacia el este con el arco mayor en la zona de Calentura, haciéndose más recta hacia el norte con una dirección de N48°E, mientras que en su parte meridional tiene un rumbo N25°W.

En la parte norte esta estructura se bifurca en dos tramos, uno de rumbo N35°E denominado **La Vigía** y el otro de rumbo N74°E nombrado **La Veguita (ver figura 7)**, el que atraviesa la zona marina perilitoral, hasta cortar la barrera arrecifal a la cual limita y afecta, pues en el bloque oriental de la falla la barrera como tal desaparece, quedando reflejada sólo como un banco de arenas, lo que constituye un indicador del sentido de los desplazamientos.

En su conjunto forma la estructura más compleja, pero a su vez, de más fácil reconocimiento por su expresión nítida en la topografía. Los principales criterios que la identifican son:

- Alineación de sistemas fluviales con cauces profundos en forma de barranco y laderas muy escarpadas de pendientes mayores a treinta grados.
- Desplazamiento de la línea costera a 1 km aproximadamente.
- Desplazamiento de formas del relieve.
- Orientación diferenciada del agrietamiento en los bloques formados por el sistema de fallas.
- Intenso cizallamiento según los planos de fracturas con sectores mineralizados por ejemplo en La Vigía.



**Figura 7:** Versión digital del mapa morfotectónico (Modificado de Rodríguez 1998).Escala 1:50000

### **Bloque Moa**

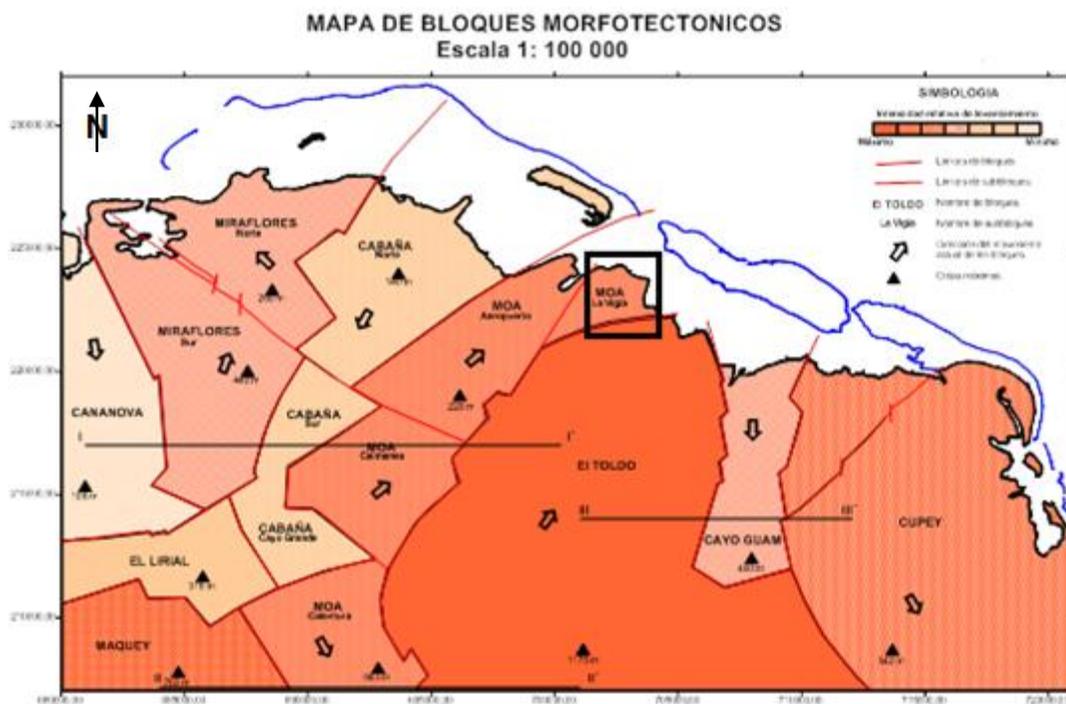
Se encuentra ubicado en la parte centro occidental de Moa, al este del bloque Cabaña con el cual contacta a través de la falla de igual nombre y al este con el bloque El Toldo según la falla Moa, extendiéndose de norte a sur en forma de una franja cóncava hacia el este. En este bloque afloran las rocas del complejo ofiolítico en el mayor por ciento de su superficie. Hacia el sur, en la zona de Calentura afloran las rocas cretáceas de la formación Santo Domingo, mientras que hacia el norte existe una extensa área de desarrollo de sedimentos fluviales y palustres del Cuaternario. Geomorfológicamente para el bloque es predominante el relieve de montañas bajas de cimas aplanadas ligeramente diseccionadas lo que junto a las condiciones litológica permite, que en el sector exista un intenso desarrollo y conservación de las cortezas de meteorización lateríticas, que a su vez condicionan las densidad del drenaje que sólo aumenta en las laderas abruptas, coincidiendo con las alineaciones tectónicas. Los cursos de agua permanentes van a presentar cauces en forma de barrancos profundos y

estrechos. Hacia el norte el relieve transiciona a premontañas bajas y aplanadas y de ahí a llanuras fluviales y palustres las cuales se encuentran cubiertas por las construcciones socioeconómicas de Moa. Morfométricamente el bloque va a presentar características intermedias y contrastantes con las elevaciones máximas del este y la llanura fluvial del río Cabaña lo que conjuntamente con los valores hipsométricos hace considerar al mismo un peldaño intermedio de transición en la estructura escalonada regional. Microtectónicamente las mediciones realizadas al norte de Nuevo Mundo y de Calentura dan para este bloque una dirección predominante de los planos de fractura de N20°E. Inicialmente el límite noreste del bloque fue considerado como la prolongación de la falla Moa en la estructura La Vigía que atraviesa la Bahía Yaguasey, pero estudios más detallados nos permitieron determinar su límite exacto que se desplaza hacia el este al norte de La Veguita extendiéndose hasta Punta Yagrumaje (A. Rodríguez 1998)

### **Bloque El Toldo:**

Ocupa la posición central de Moa y es el de máxima extensión, correspondiéndole también los máximos valores del levantamiento relativo de la región. Litológicamente está conformado en superficie por las rocas del complejo máfico y ultramáfico de la secuencia ofiolítica, sobre las cuales se ha desarrollado un relieve de montañas bajas de cimas aplanadas ligeramente diseccionadas. Hacia la parte norte se desarrollan en un pequeño sector premontañas aplanadas. El drenaje es de densidad media a baja, lo que está condicionado por las potentes cortezas de intemperismo que cubren al área y favorecen la permeabilidad del suelo y al intenso control estructural del drenaje que condiciona la formación de barrancos. En este bloque aparecen desarrolladas formas del relieve cársico en peridotitas ubicadas alrededor de las elevaciones máximas, siendo el punto de mayor cota El Toldo con 1174 m sobre el nivel del mar. Los parámetros morfométricos para este bloque son los más relevantes al tomar valores que indican la máxima intensidad de levantamiento con isobasitas que cierran en 900 m y 800 m para el 2<sup>do</sup> y 3<sup>er</sup> orden respectivamente y valores de la disección vertical de 550 m/km<sup>2</sup>. Hacia la parte norte, en su prolongación dentro de la zona marina puede notarse la pérdida de la barrera arrecifal desde la intersección de la

falla La Veguita hasta la falla Quesigua, donde sólo queda como testigo de su existencia un banco de arena de morfología similar, lo que se considera constituye un índice de los movimientos diferenciales entre los bloques. Los análisis microtectónicos realizados para el bloque indican la existencia de una dirección máxima de agrietamiento de rumbo N85°W, apareciendo otras dos direcciones importantes, una sublongitudinal y una de dirección noreste. En este bloque y sólo de forma similar ocurre en los bloques Maguey y Cupey, aparece el sistema de fracturas norte-sur en el cual no se manifiestan desplazamientos horizontales y verticales intensos, lo que consideramos se debe a un proceso de descompresión, al ser el bloque de máxima intensidad de levantamiento reciente. El límite nororiental de este bloque está dado por la falla Cayo Guam, mientras que al sur limita con el bloque Cupey a través de la falla Quesigua. (A. Rodríguez 1998)



**Figura 8:** Versión digital del mapa de Bloques Morfotectónicos del área (Escala original 1: 100 000). (Modificado de Rodríguez A. 1998)

### **1.3.3 Hidrografía.**

La red fluvial es densa y dendrítica hacia el oeste, representada por numerosos ríos y arroyos permanentes, entre los que se encuentran los ríos Cabaña, Cananova, Arroyo Aserrío, entre otros. La fuente de alimentación principal son las precipitaciones atmosféricas, desembocando las arterias principales en el Océano Atlántico, formando deltas cubiertos de sedimentos palustres y vegetación típica de manglar.

La red hidrográfica de la zona está conformada por algunos arroyos que corren con una dirección predominantemente de Sur a Norte (hacia el mar), que no cruzan el área de investigación. En la misma, el escurrimiento superficial y subterráneo está condicionado por la existencia de pequeñas vaguadas originadas por las mismas oscilaciones del terreno hacia las partes más bajas.

### **1.3.4 Procesos Geodinámicos y Antrópicos.**

Los fenómenos físico-geológicos presentes en el área estudiada son:

**Meteorización:** Está vinculado con la formación de potentes cortezas lateríticas sobre rocas ultrabásicas y básicas. Las condiciones climáticas, geomorfológicas, tectónicas y características mineralógicas de las rocas existentes favorecieron los procesos de meteorización química del medio ha dado lugar a una corteza de intemperismo compuesta por suelos lateríticos muy ricos en óxidos de Hierro y Aluminio, con espesores variables.

**Erosión:** Se debe a la acción de corrientes temporales, dando lugar a la formación de surcos y grandes cárcavas en los suelos, ocasionadas por el escurrimiento de las precipitaciones atmosféricas.

En el área de estudio, en gran parte de los diques que conforman la presa de colas se manifiesta en diferentes grados la acción de los procesos erosivos, es en el dique sur donde se observan con mayor intensidad.

En las fotos siguientes (**ver figura 9**) puede observarse que la erosión ha provocado cárcavas de importancia, donde se ha socavado el espesor de laterita descubriéndose las colas, este proceso va acompañado de arrastre de los distintos tipos de materiales presentes en el cuerpo del dique.



**Figura 9:** Fotografías de la erosión en el área de estudio.

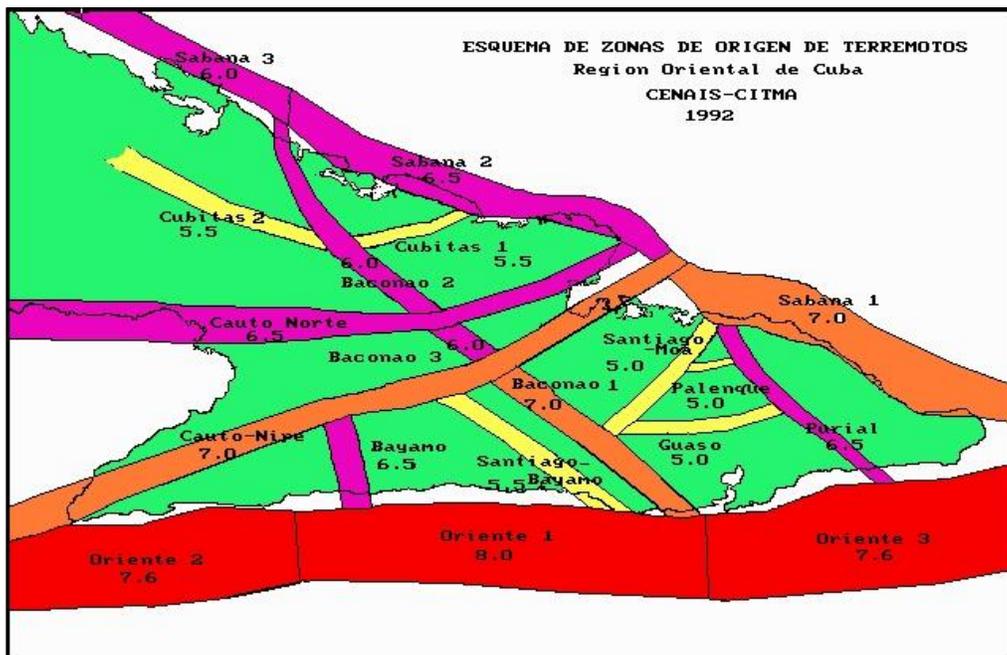
**Empantanamiento:** Se manifiesta en zonas cercanas al área estudiada, en partes bajas del relieve donde el drenaje es deficiente y los suelos presentan baja permeabilidad. Ha dado lugar a la acumulación de sedimentos de origen fluvial y pantanoso.

### **1.3.5 Sismicidad.**

La región de Moa se encuentra localizada al noreste de la provincia Holguín y norte y noreste de la provincia Guantánamo, en lo que podría llamarse una zona de transición entre el límite sur de la placa Norteamericana y los territorios de Cuba pertenecientes al interior de la misma. Esto conlleva a que se presente una sismicidad moderada (Cotilla et al., inédito), debido a la influencia de la principal zona sismogeneradora de Cuba (falla Bartlett - Caimán) y de estructuras de menor orden como la Cauto - Nipe, la Cauto - Norte y la parte oriental de la Norte - Cubana.

En el catálogo macrosísmico de la provincia de Holguín (Chuy, 1982), se evidencia, que a una gran parte de los estremecimientos reportados (incluyendo los más fuertes), no se les puede asociar su epicentro dentro de los límites de la provincia, ubicándose los mismos en zonas de mayor potencial sismotectónico, casi siempre Bartlett - Caimán o la porción oriental de la Norte - Cubana (Sabana).

No obstante la frecuente sismicidad de la región suroriental, en los últimos años se ha activado la región de Moa y sus acuatorias septentrionales. Esta actividad sísmica se comportó como una serie de terremotos con liberación cíclica de baja energía, con una magnitud semejante y una gran cantidad de eventos, cuyo origen es de carácter tectónico, estando concentrada junto a la falla Miraflores, límite de los bloques morfoestructurales de Miraflores y Moa. La orientación predominante de los epicentros es NE-SW, lo cual se refleja notablemente en la localización de los sismos perceptibles.



**Figura 10:** Zonas sismogeneradoras principales que afectan al territorio oriental de Cuba, dentro de ellas se observan subzonas que afectan a Moa de manera directa. Tomado de chuy et al (1997)

Teniendo en cuenta la Norma 46: 1999. Construcciones sismo resistentes. Requisitos básicos para el diseño y construcción; Moa está situada en la zona de riesgo sísmico bajo (1B) (**ver figura 11**) que puede ocasionar daños en las construcciones debiéndose tomar medidas sismo - resistentes en todas las estructuras y obras en función de la importancia de las mismas. Considerando que las cimentaciones se llevarán a cabo fundamentalmente en el lecho rocoso,



# Capítulo II

## **Capítulo II: Metodología de la investigación.**

### **Introducción:**

En el presente capítulo se describe la metodología aplicada en la investigación para la caracterización geotécnica de los materiales de construcción de la presa de residuos Minero-Metalúrgico de la empresa Ernesto Che Guevara a partir de tres etapas principales, donde se parte de la revisión de los trabajos precedentes y se valora a partir de las propiedades físicas mecánicas, la interpretación geofísica y las condiciones hidrogeológicas el comportamiento de los suelos en el área de estudio.

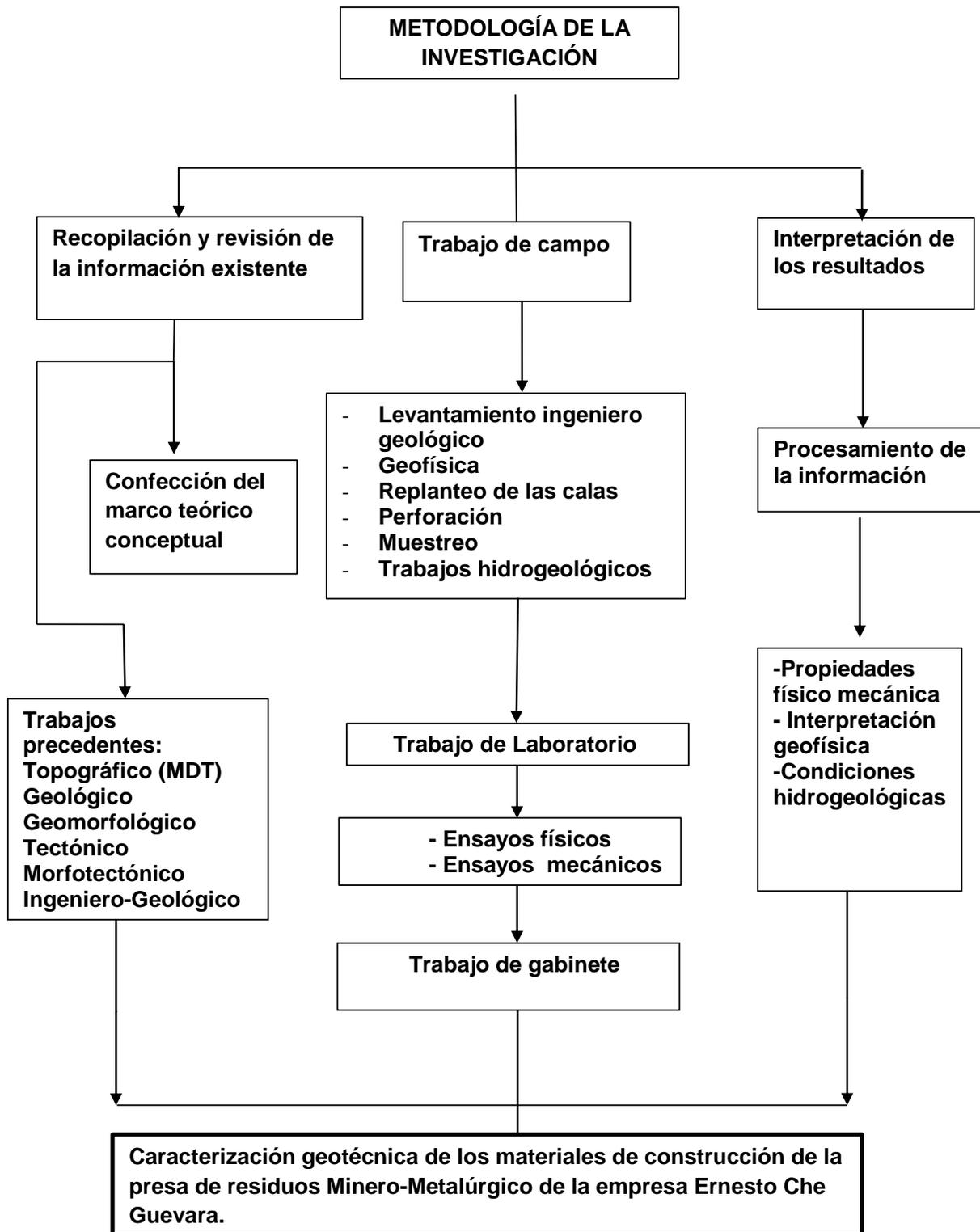


Figura 12: Metodología de las investigaciones desarrolladas.

## **2.1 Trabajos de Campo.**

Los trabajos de campo consistieron en las siguientes actividades:

- Reconocimiento ingeniero geológico del área de emplazamiento de la obra y sus alrededores.
- Replanteo de las calas: Se llevó a cabo el replanteo de las calas según Tarea Técnica entregada a la Comisión de Topografía de la ENIA.
- Perforación: Se perforaron un total de 24 calas distribuidas en las diferentes fases de construcción de la presa de colas, con profundidades que variaron entre 12.0 m y 31.00 m, para un total de 483.25 metros, con máquinas Stratadrill – 36 (**ver figura 13**) de fabricación inglesa, que emplean el método de percusión en todo el espesor de suelo y luego el de rotación cuando se produce el rechazo de los diferentes muestreadores utilizados, que indica la presencia de un estrato resistente o de la roca.

Se destaca que algunas calas no se pudieron perforar en el sitio donde fueron ubicadas, debido a obstáculos existentes como por ejemplo las calas 4 y 5 por la presencia de las tuberías de conducción de colas y zonas empantanadas, en ese entorno hubo que trasladarlas hacia el paso de la carretera adyacente a las conductoras.

### **Características técnicas de la máquina perforadora stratadrill-36**

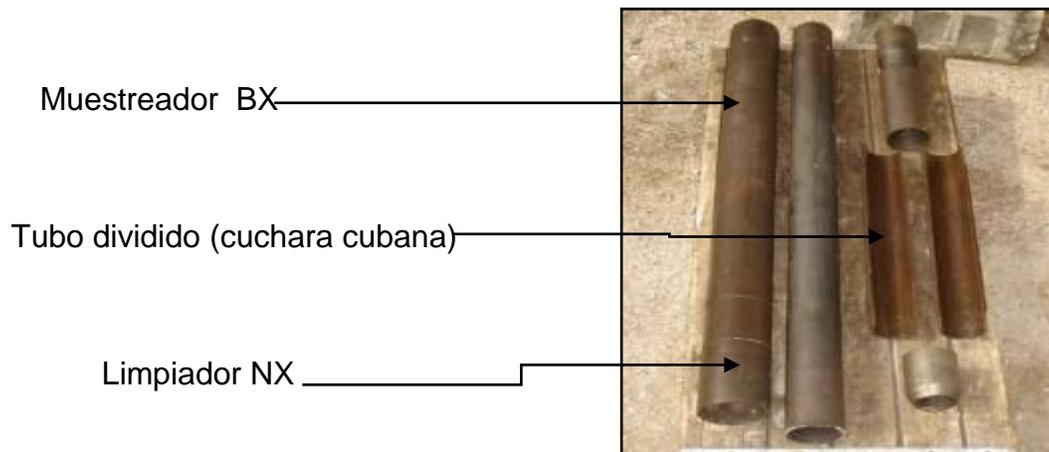
Tiene como profundidad de perforación 440 m (con tubos de perforación de  $\phi=60.3$  mm), un diámetro inicial 112mm y final 59mm. Presenta un rotor con número de revoluciones de 76; 149; 247; 462; 900; 1493 r.p.m, carrera de trabajo 762 min, carga sobre la herramienta 3810 kgf de corte y carga a elevar 5760 kg. (Es giratorio, por lo que permite perforar en cualquier ángulo) bn; un winche o malacate de capacidad con cable directo: 8850 kgf y velocidad de enrollamiento del cable 21; 35; 69 m/min, una bomba de perforación con caudal de 80 l/min y presión de 25 at; como dimensión tiene de largo 2290mm, de ancho 1220mm y de altura 1702mm; un peso sobre el trineo de 2082 kg y sobre el remolque de 2540 kg; un dromo auxiliar con velocidades de 83; 137; 268 m/min y un dromo del wire

fine que tiene 610 m de largo del cable y de diámetro del cable 4.76 mm; motor tipo diesel con potencia de 36 HP a 2000 r.p.m; una torre con altura hasta el eje de la rondana de 5.2m. La posibilidades de trabajo : hinca de tubos muestreadores por medio de golpes o por medio de presión hidráulica para la toma de muestras inalteradas, perforación rotativa con el muestreador doble tubo especial Denison para la toma de muestras inalteradas así como con otros muestreadores simples y dobles, perforación rotativa con el muestreador especial wire fine.



**Figura 13:** Fotografías de la máquina perforadora Stratadrill-36

- También se utilizó el avance hidráulico para la hinca de los tubos shelbys.
- Se utilizaron los siguientes muestreadores: Tubo dividido: Cuchara cubana (0.60 m), muestreador BX (0.90 m) y limpiador LNX (0.90 m) con su sistema de varillas y el martillo de 300 libras. **(Ver figura 14)**

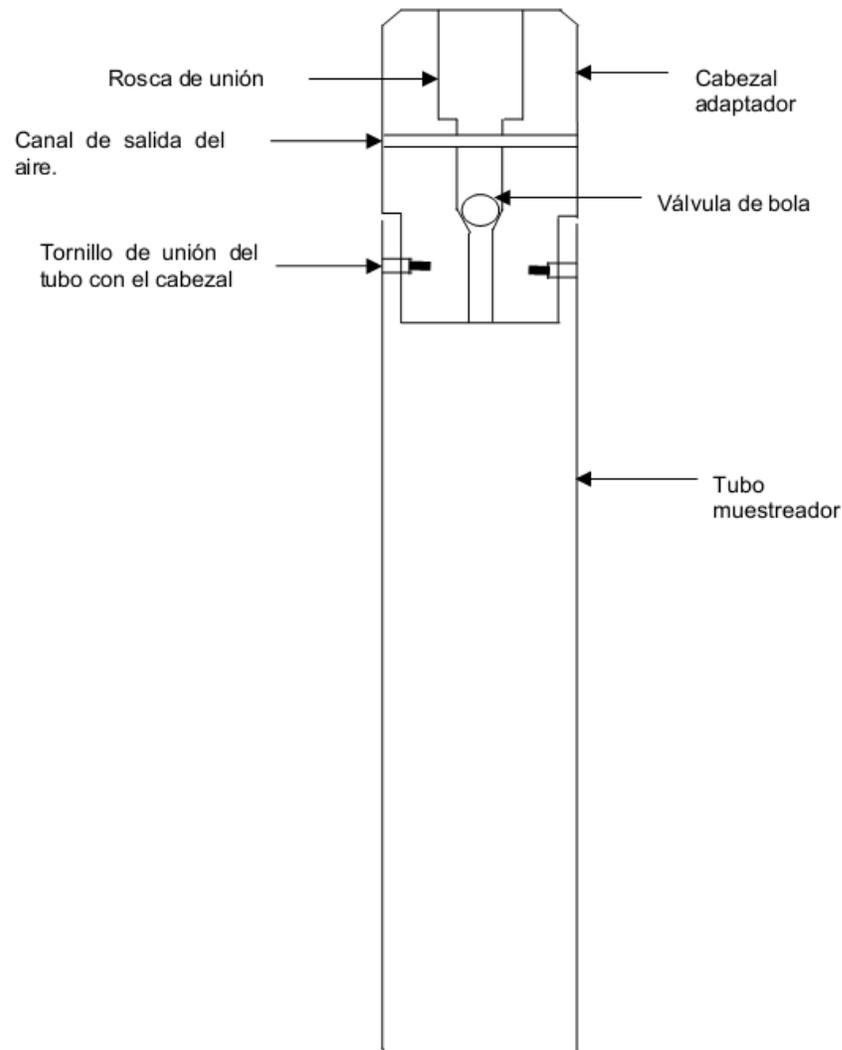


**Figura 14: Fotografía de los muestreadores**

- Descripción tacto-visual de los suelos y rocas recuperados en las calas.
- Muestreo: Se tomaron muestras inalteradas en tubos shelbys con una presión hidráulica y velocidad de hincas de  $160 \text{ kg/cm}^2$  y  $15 - 30 \text{ cm/seg}$  respectivamente, muestras de cuchara en pomos plásticos parafinados y alteradas en bolsos de nylon.

### **Muestreador Shelby**

Es un tubo de pared delgada sin costura, con un grosor de pared de 1,24 mm a 3,05 mm según el diámetro y la longitud. En su extremo inferior presenta un borde cortante con un diámetro 0,01 mm menor que el diámetro interior del resto del tubo, o sea, una tolerancia interior de un 1% generalmente, pero ésta debe aumentar con el aumento de la plasticidad del suelo. La parte superior del tubo se une por medio de tornillos a un cabezal adaptador que tiene en su interior una válvula de retención de bola y un orificio para la salida del aire al exterior. Norma cubana 324:2004 (ver figura 15)



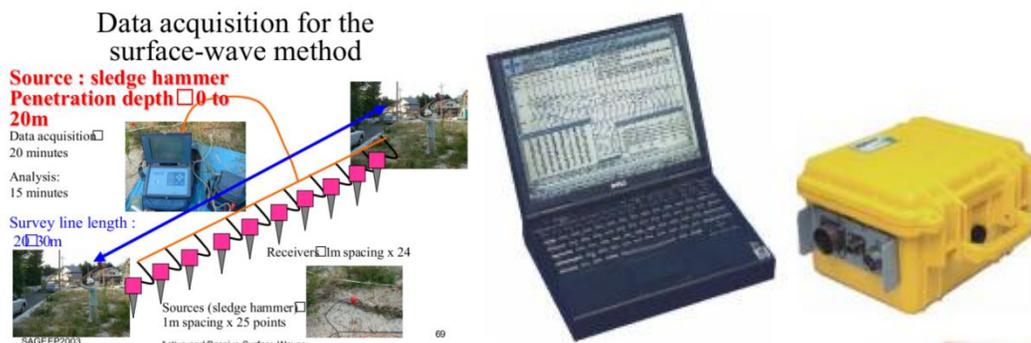
**Figura15:** Esquema del muestreador Shelby

- Trabajos hidrogeológicos: consistieron en la realización de pruebas de recuperación del nivel del agua en las calas (cubeteos), así como la medición de los niveles del agua en las calas.
- Trabajos geofísicos: se hicieron tomografías eléctricas y métodos sísmicos ingenieros en la variante metodológica de ondas superficiales. Donde se procedió a realizar las mediciones Geo-Eléctricas con un equipo multi-electrodo Siscal de 72 canales de medición con distancia entre electrodos de 4 m y para las mediciones sísmicas, un Sismómetro Geode de 24 canales fabricado por Geometrics mediante puestas sísmicas de 92 m de

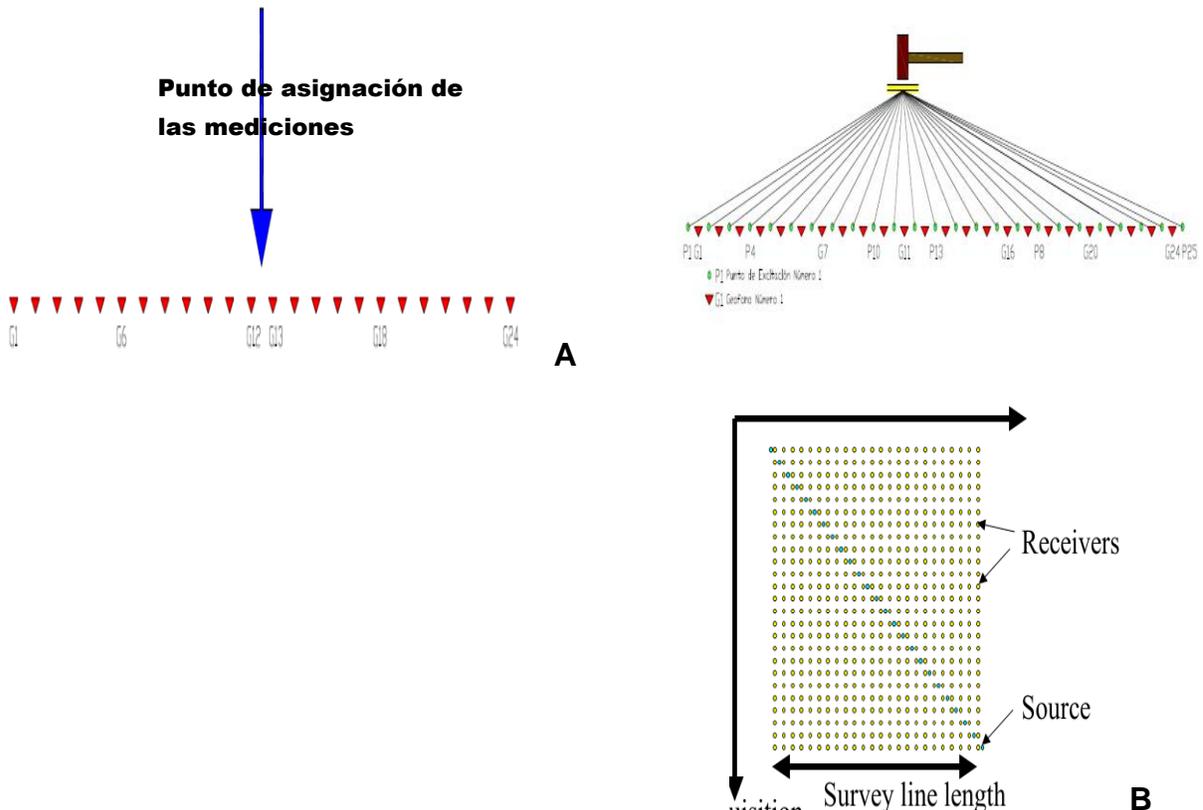
extensión y distancia entre geófonos de 4 m. En estas puestas se realizaron las metodologías pasivas 1D MAM (Mediciones de series microsísmicas) o Refracción Microsísmica (Remi ,por sus siglas en Inglés ) consistente en los registros del ruido ambiente para alcanzar grandes profundidades (mayor de 30 m) y activa 2D MASW (Análisis multicanal de ondas superficiales) realizándose en ambas el procesamiento de ondas superficiales tipo Rayleigh para la obtención de las velocidades Vs. Para todas las metodologías sísmicas se empleó como fuente emisora el golpeo del terreno con una mandarría de 4 kg. El esquema de los dispositivos empleados se ilustra a continuación:



**Figura 16:** (A)Dispositivo de Tomografía Eléctrica y (B) Accesorios para la Excitación de las Ondas Rayleigh.



**Figura17:** Estación Sísmica de 24 canales de la Geometrics



**Figura 18: (A)** Dispositivos de Medición de las Ondas Rayleigh de forma pasiva y **(B)** Dispositivos de Medición de las Ondas Rayleigh de forma activa 2D.

## 2.2 Trabajos de Laboratorio

Los ensayos físicos y mecánicos se realizaron con el objetivo de determinar las propiedades geotécnicas de los suelos, los que se rigieron por las especificaciones de las normas internacionales del grupo ASTM correspondientes, las que se relacionan a continuación: **(ver tabla 1)**

**Tabla 1:** Normas internacionales del grupo ASTM y NC

<ul style="list-style-type: none"><li>• Método de ensayo estándar para el peso específico de los suelos mediante el picnómetro de agua.</li></ul>	ASTM D854-06
<ul style="list-style-type: none"><li>• Método de ensayo estándar para el análisis del tamaño de las partículas de los suelos.</li></ul>	ASTM D422-63. Reaprobada en 2002
<ul style="list-style-type: none"><li>• Método de ensayo estándar para determinar el límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad de los suelos.</li></ul>	ASTM D4318-05
<ul style="list-style-type: none"><li>• Método de ensayo estándar para la determinación en el laboratorio del contenido de agua (humedad) del suelo y roca mediante la masa.</li></ul>	ASTM D-2216-05
<ul style="list-style-type: none"><li>• Determinación del peso específico natural de los suelos</li></ul>	NC-156:2002.
<ul style="list-style-type: none"><li>• Método de ensayo estándar para la determinación de las propiedades de consolidación unidimensional de los suelos.</li></ul>	ASTM D 2435 – 04
<ul style="list-style-type: none"><li>• Resistencia al esfuerzo cortante directo.</li></ul>	NC 325: 2004.
<ul style="list-style-type: none"><li>• Método de ensayo estándar para el ensayo de resistencia a la compresión triaxial no drenado, no consolidado de suelos cohesivos.</li></ul>	ASTM D 2850-03
<ul style="list-style-type: none"><li>• Resistencia a la compresión axial de especímenes de roca.</li></ul>	NC 62: 2000

### 2.3 Trabajos de gabinete

Se analizó y clasificó toda la información recopilada, se procesó toda la información y se interpretó la misma, y con todos los registros primarios de campo y los resultados de laboratorio se estableció el corte ingeniero geológico y las tablas resúmenes de las propiedades físico mecánicas del suelo que se desarrolla en el mismo, permitiendo así la clasificación de este. Para el estudio del suelo se consideraron los siguientes índices:

**Peso específico:** no es más que la relación entre el peso de la parte sólida de la roca y su volumen.

$$\gamma_s = W_s/V_s$$

Dónde:  $\gamma_s$ - Peso específico;  $W_s$ -Peso del sólido;  $V_s$ -Volumen del sólido

Esta característica depende de: del peso específico de los minerales que comprenden el suelo, la existencia de sustancias orgánicas, que disminuyen su valor, la solución de sales simples las cuales también disminuyen este parámetro.

**Peso específico húmedo ( $\gamma_f$ ):** Es la relación del peso de la fase sólida más el peso de líquido contenido en ella y el volumen del sólido más el volumen del líquido.

$$\gamma_f = W_t/V_t = (W_s + W_w) / (V_s + V_w)$$

Dónde:  $\gamma_f$ - Peso específico húmedo;  $W_t$ -Peso total de muestra;  $V_t$ -Volumen total de la muestra;  $W_w$ - Peso de agua;  $V_w$ -Volumen de vacío.

Depende de: la composición mineralógica del suelo, la porosidad, la humedad, del contenido de materia orgánica.

**Peso específico seco ( $\gamma_d$ ):** es la relación entre el peso del suelo absolutamente seco y el volumen de la muestra.

$$\gamma_d = W_s/V_t \text{ o } \gamma_d = \gamma_f / (1 + W)$$

Dónde:  $\gamma_d$  - Peso específico seco;  $\gamma_f$ - Peso específico húmedo;  $W_s$ -Peso seco de la muestra;  $V_t$ -Volumen total de la muestra;  $W$ - Humedad.

**Índice de poros:** es el parámetro que representa la cantidad de poros en una roca o suelo.

$$e = \gamma_s / \gamma_D$$

Dónde: e- Índice de poros;  $\gamma_s$ - Peso específico;  $\gamma_D$ -Densidad seca.

Este índice depende de: la forma y tamaño de las partículas, del grado de homogeneidad de los suelos, la densidad de la composición mineralógica, del grado y carácter de la cimentación con coloide, sales, restos de vegetación, sustancias arcillosas, del carácter del empaquetamiento de las partículas.

**Humedad natural:** representa el contenido de aguas en el interior de los poros de los suelos y rocas representados en %.

En dependencia de esto varían los siguientes parámetros, solidez de los suelos, la deformabilidad, la estabilidad.

$$W = W_s / W_w - W_s; \%$$

Dónde: W- Humedad natural;  $W_s$ -Peso de la roca seca;  $W_w$ -Peso de la roca en estado natural;  $(W_s / W_w)$ -Peso del agua de la roca.

La humedad natural depende de: la composición granulométrica, la existencia de partículas arcillosas y orgánicas, la compactación de la estructura, del grado de dispersión de las arcillas, la composición mineralógica de la parte finamente dispersa, la capacidad de absorción, la composición de los cationes de intercambio.

**Grado de saturación:** expresa la relación de la humedad natural con total higroscopicidad de los suelos (capacidad acuífera).

$$S = W * \gamma_s * (1-n) / n; \%$$

Dónde: S- Grado de saturación; n-porosidad; W- humedad natural;  $\gamma_s$ - peso específico.

Depende de: la porosidad, la relación de punto con respecto al nivel freático, del contenido de materia orgánica, la composición mineralógica.

**Límite líquido (LL):** es la mayor cantidad de humedad que puede tener el suelo sin pasar del estado plástico al semilíquido, o sea la frontera convencional entre ambos estados.

**Límite Plástico (LP):** corresponde a la humedad de la cual el suelo arcilloso de la composición alterable pasa de estado semisólido al plástico.

Ambos límites dependen de, la composición mineralógica de sus partes finalmente dispersa (la montmorillonita es más plástica de la hidrómicas y estas más que las caolinitas), del contenido de sales, partículas limosas y orgánicas, la composición de los cationes de intercambio (el Na<sup>+</sup>- infiere mayor plasticidad que el Ca<sup>+</sup>), la capacidad de absorción, la composición y mineralización del agua que satura el suelo.

**Módulo de deformación (E):** caracteriza las deformaciones totales de los suelos, para un intervalo de carga limitada.

$$E = \alpha_0 / \beta$$

Dónde: E- Módulo de deformación ;  $\alpha_0$ - coeficiente de compresibilidad;

Depende de: la humedad, la composición de la estructura, la solidez de las relaciones estructurales.

**Ángulo de fricción interna ( $\phi$ ):** se da en base al ángulo de inclinación del área por la cual ocurre la destrucción de la muestra, respecto a la horizontal.

$$\Phi = K/e$$

Dónde:  $\Phi$ : Ángulo de fricción interna; K: Coeficiente que depende de la granulometría; e: Índice de poros.

Depende de: la composición de mineralógica, del estado y carácter de la superficie de las partículas, del tamaño de las partículas, la magnitud de la densidad del empaquetamiento de las partículas, la densidad, la homogeneidad de las partículas.

**Cohesión (C):** es la fuerza de la atracción que ejerce las partículas arcillosas entre sí en una unidad de área.

Depende de: la solidez de las relaciones estructurales entre las partículas y agregados que componen el suelo, la composición mineral, la humedad natural.

También se confeccionaron todos los anexos y tablas. Se utilizaron diferentes normas y programas de computación; entre los que pueden mencionarse los siguientes:

- NC 59: 2000. Geotecnia. Clasificación Geotécnica de los suelos.
- NC 46: 1999. Construcciones sismoresistentes. Requisitos básicos para el diseño y construcción
- Surfer 8.0 y 10.0
- Autocad Map 2008
- Paquete de programas de Office 2010

# Capítulo III

### **Capítulo III. Interpretación de los resultados:**

#### **3.1 Resultados de los métodos geofísicos (sísmica y tomografía eléctrica)**

Los métodos geofísicos fueron utilizados para apoyar la investigación, es decir para corroborar la perforación hasta la profundidad investigada. En los **(anexos1-10)** correspondientes a la investigación por las secciones I-XI, se exponen los resultados obtenidos, por Tomografía Eléctrica en forma de un corte de las Resistividades asociadas a la litología presente en aquellos perfiles donde se empleó esta técnica y los resultados de la Sísmica mediante la metodología pasiva en forma de un gráfico que se asigna al centro de la puesta o al centro de la distancia que abarca el procesamiento de la misma dividida en los canales 1-12; 6-18 y 12-24. En estos gráficos se puede observar la variación de las velocidades de las ondas transversales o de cizalla ( $V_s$ ) con la profundidad así como las velocidades longitudinales ( $V_p$ ) calculada a partir de  $V_s$ , además del número de golpes N (SPT) y en un encuadre en la parte inferior, la clasificación del sitio según la velocidad promedio  $V_s$  hasta los 30 m ( $V_{s30}$ ) mediante el código internacional IBC 2000. Además se dan los cortes de velocidad  $V_s$  a lo largo de cada sección obtenidos del procesamiento activo 2D MASW y el cálculo a partir de la velocidad  $V_s$  del número de golpes N (SPT). Se adjunta un gráfico con la tabla de clasificación de los suelos de acuerdo con la  $V_s$  de los mismos según el código internacional IBC 2000. En este gráfico se refleja la línea de velocidad 500 m/s que corresponde al substrato geotécnico Covenin donde según esta norma, para la edificación de construcciones sismo resistentes identifica la transición a un basamento geotécnico más competente y delimita la frontera entre los suelos consolidados y las rocas alteradas (Norma Covenin 1756-2002. Edificaciones Sismo resistentes).

Para una mejor comprensión de los materiales gráficos que se exponen debemos señalar que existe una correlación directa entre los valores de velocidad, principalmente  $V_s$  y el estado de consolidación de los suelos dado por el número de golpes N así como el valor de los módulos dinámicos.

Los rangos de velocidades Vs que se obtienen por secciones son los siguientes:

**Tabla 2:** Rango de velocidades Vs

No. DE SECCION	RANGO DE VELOCIDADES Vs
I	150 – 400
II	145 – 195
III	150 – 220
IV	125 – 220
V	145 – 260
VI	135 – 235
VII	110 – 260
VIII	105 – 310
IX	105 – 180
X	115 – 200
XI	145 - 195

Como puede observarse, es en la sección I donde se abarca el mayor rango de distribución de velocidades Vs por lo que los suelos transitan en ésta, desde blandos, rígidos, hasta consolidados de acuerdo con el Internacional Building Code IBC 2000.

El comportamiento de las secciones II a XI se encuentra entre los extremos dados por los resultados obtenidos en sección I y IX.

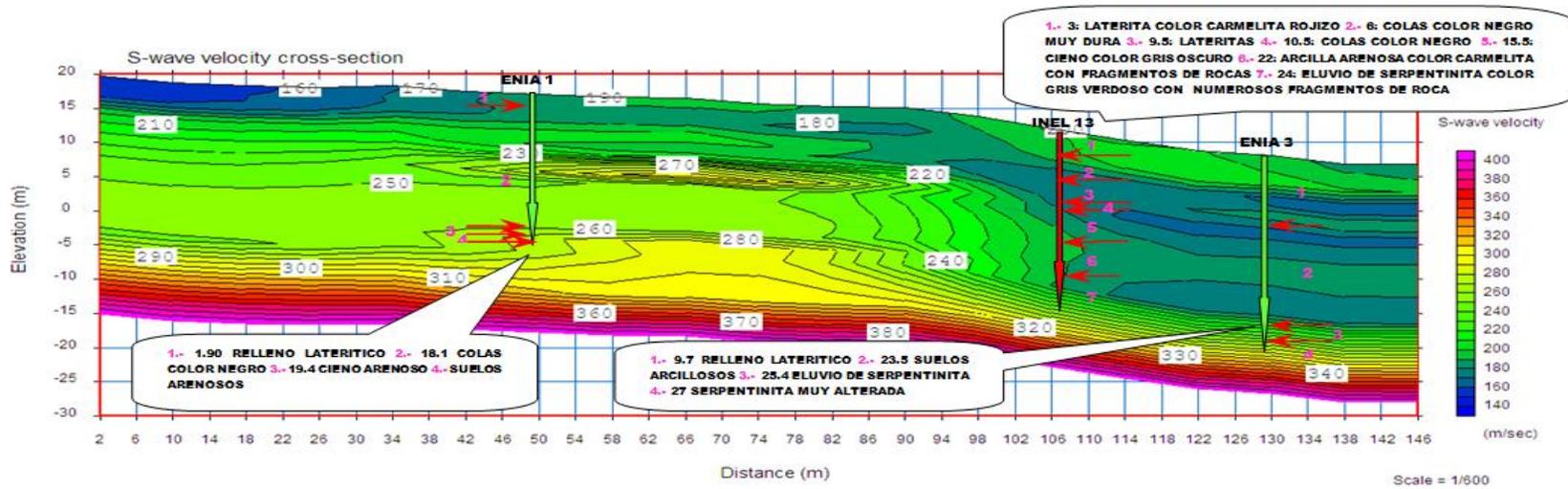


Figura 19: Corte de velocidades de cizalla o Vs según metodología 2D MASW por sección I

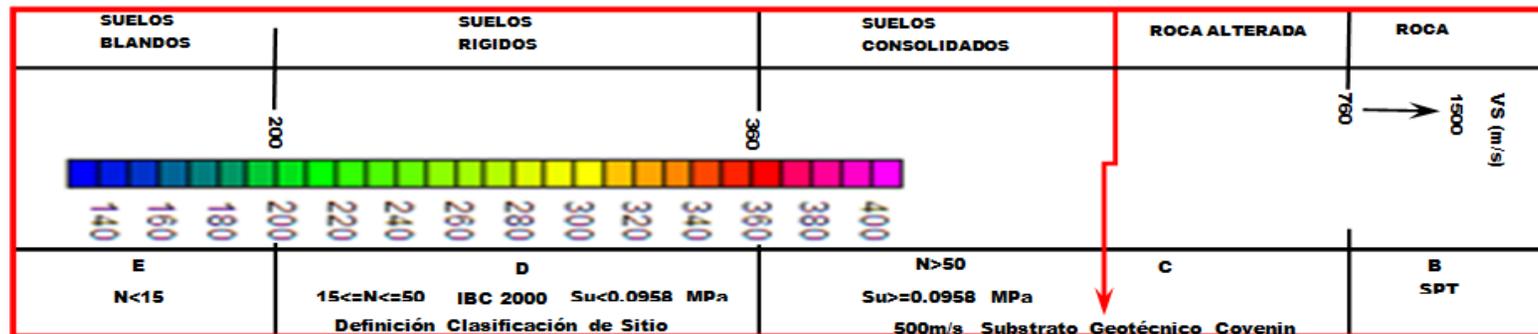
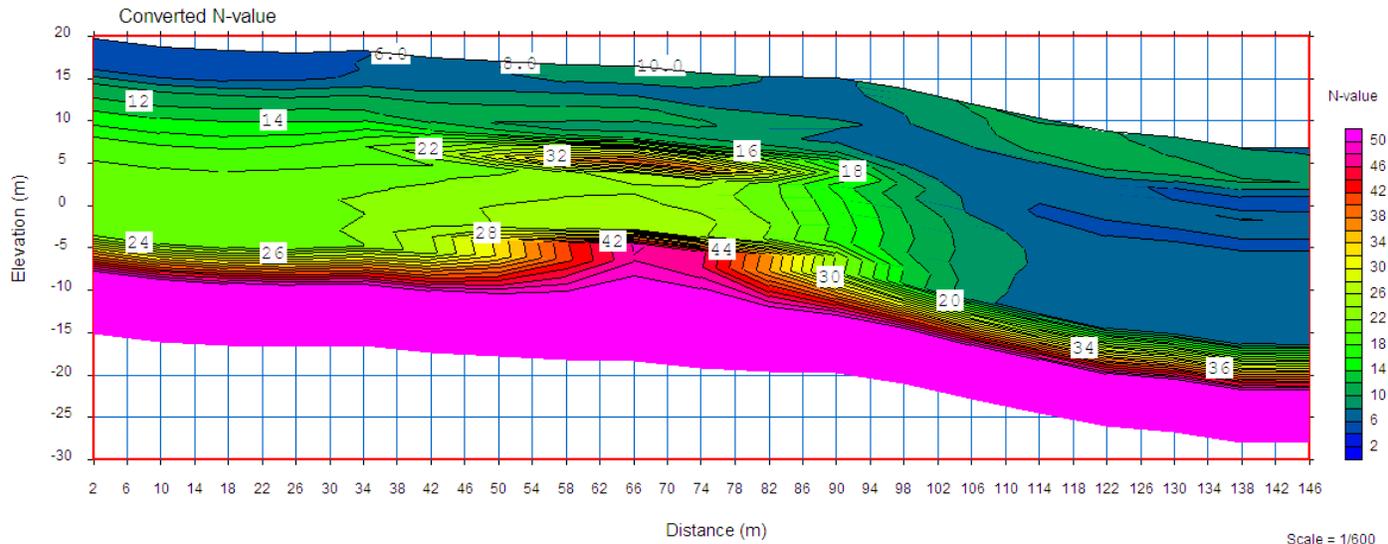


Figura 20: Clasificación del sitio según el IBC 2000 (Internacional Building Code) y Covenin



**Figura 21:** Corte del número de golpes N (SPT) calculado a partir de VS de la sección I

El rango del número de golpes N (SPT) (ver figura 21) cubre toda la escala hasta el rechazo o sea 50 golpes, donde las colas presenta el menor rango, de 2-4 y el mayor está representado por la serpentinita alterada con valores mayores de 37 golpes, debido a que es roca.

En esta sección no se alcanza el rango de suelos consolidados (ver figura 20) manteniéndose en general la velocidad Vs en la mayor parte del corte en el rango correspondiente a los suelos blandos ( $V_s = 140 - 200$  m/s), solo pequeñas porciones del corte en profundidad alcanzan los rangos de suelos rígidos en la primera parte del entorno ( $V_s = 200 - 360$  m/s). (Ver figura 19)

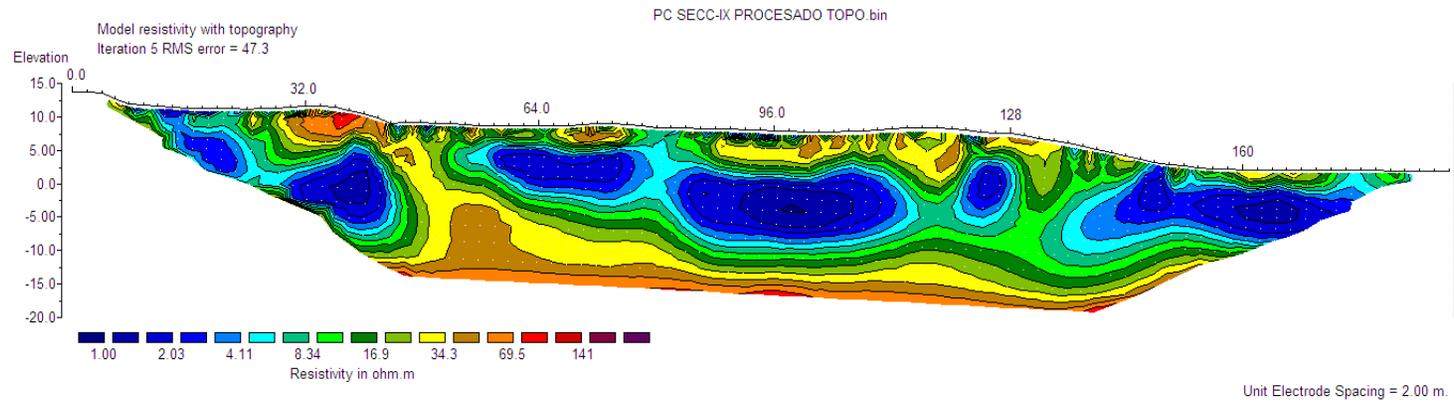


Figura 22: Resultados de tomografía eléctrica sección IX

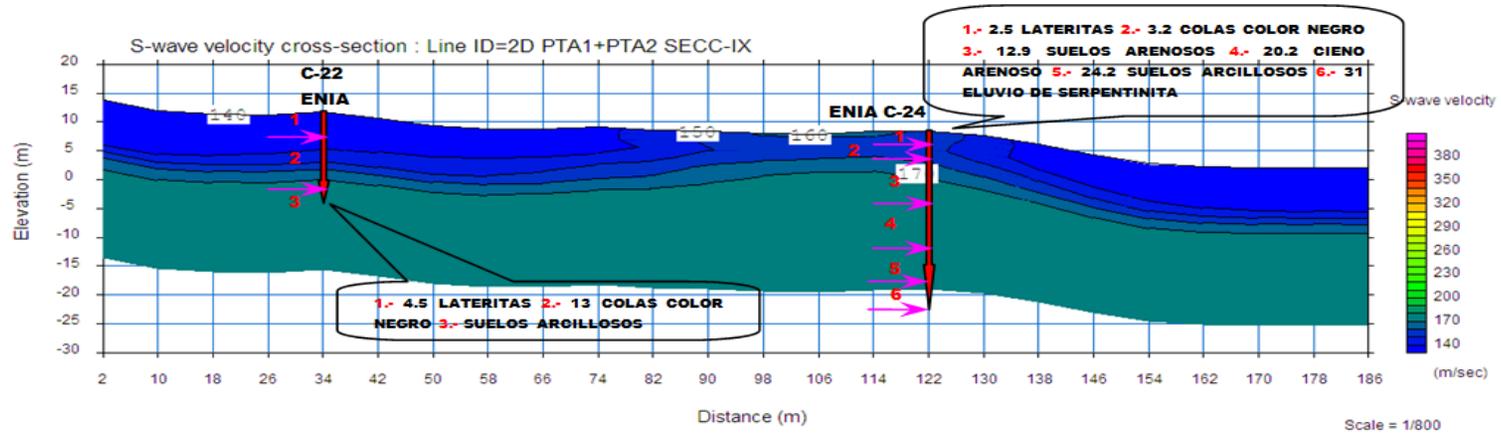
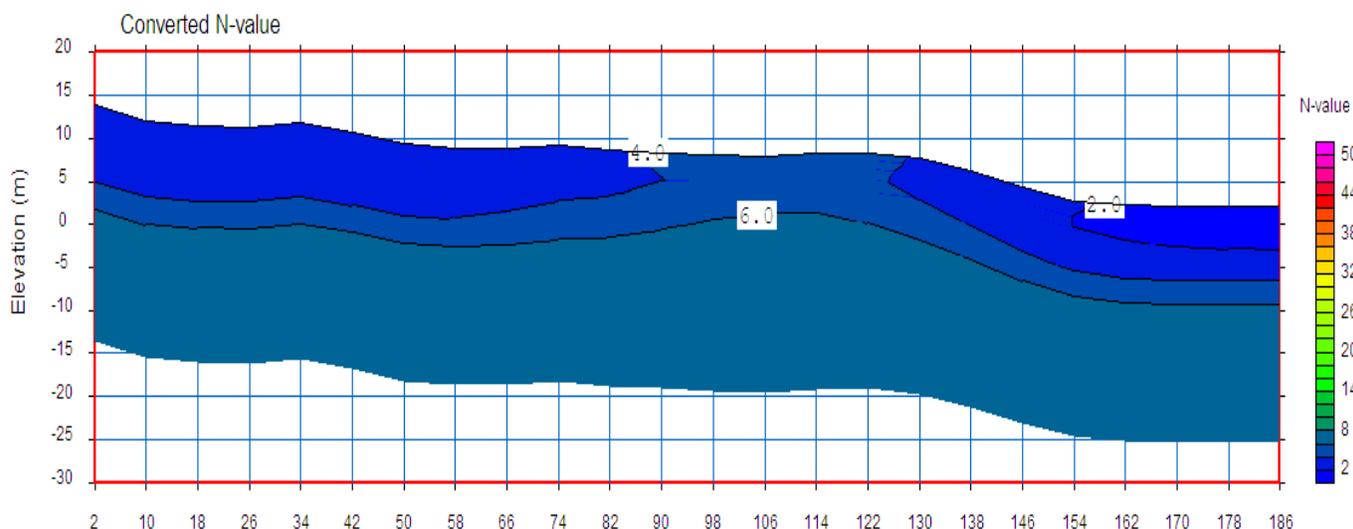


Figura 23: Corte de velocidades de cizalla o Vs según metodología 2D MASW por sección IX.



**Figura24:** Corte del número de golpes N (SPT) calculado a partir de Vs.

Según los resultados de la Tomografía Eléctrica por esta sección IX (ver figura 22), los menores valores de resistividad, están entre 1- 6.23  $\Omega.m$  aproximadamente, identificados con los colores de tonos azules que caracterizan las colas. La primera parte del corte caracterizado por valores de resistividad del orden de 8.34 – 52  $\Omega.m$  se correlaciona con los suelos lateríticos. La porción de mayor profundidad del corte, subyaciendo a la zona de baja resistividad con un rango de resistividad del orden 70 – 105  $\Omega.m$  se correlaciona con los suelos cieno-areno-arcillosos, eluvio de serpentinita y la serpentinita muy alterada, siendo los valores mas altos los del eluvio y roca serpentinita muy alterada.

En esta sección el rango de velocidades de cizalla (Vs) es el de menor valor para todas las secciones investigadas Vs= 105-180 m/s. (ver figura 23)

Es de señalar, que en ninguna de las secciones investigadas se detecta la isolínea de velocidad 500 m/s mediante los trabajos activos 2D MASW (cuyo procesamiento permite obtener los cortes 2D de velocidades (Vs) que de acuerdo con la Norma Covenin para Edificaciones Sismoresistentes, identifica la transición a un basamento geotécnico más competente y delimita la frontera entre los suelos consolidados y las rocas alteradas. Solo el rango de velocidades obtenidos en la sección I se acerca a esta magnitud pues se llega hasta los 400 m/s, pero como

puede observarse en esta , la cala 3 corta el eluvio de serpentinita siendo la velocidad Vs registradas en esta zona según resultados de 2D MASW de 210-250 m/s y para la serpentinita muy alterada , las velocidades (Vs) es de 250-400 m/s (ver figura 19). Observando los resultados 1D MAM (ver anexo1) del procesamiento del ruido ambiental que se asigna en la progresiva del perfil 0+116 de la sección I donde se alcanza una profundidad de 57 m, con un valor de alrededor de 480 m/s que se ajusta mas al valor expresado por la Norma Covenin de 500 m/s para la roca alterada. En las demás secciones se queda muy por debajo el rango de velocidades obtenidos.

### **3.2 Condiciones ingeniero geológico y propiedades físico mecánicas.**

En el área de interés se distribuyen diferentes tipos de suelos y rocas. Los suelos caracterizan las diferentes fases de construcción de la presa de colas, las colas propiamente dichas, los sedimentos aluviales, el cieno, los sedimentos marinos y la zona de intensa meteorización de las peridotitas serpentinizadas y del gabro (eluvio) y las rocas que están representadas en este caso por las ofiolitas (serpentinitas). Al realizar la correlación de los resultados de la perforación, ensayos de campo y los ensayos de laboratorio, se conoció que el corte ingeniero geológico en el área hasta la profundidad de investigación es el que se describe a continuación. (Véanse Perfiles ingeniero geológicos y columnas litológicas, (Anexos 11 y 12).

**Capa 1:** Relleno de suelo laterítico: generalmente de composición areno limosa en ocasiones con finos plásticos y gravas (fragmentos de serpentinita y perdigones de hierro), color carmelita amarillento hasta rojizo, de húmedo a muy húmedo, clasifica como SM (arena limosa) según la NC 59: 2000. Presenta un espesor máximo de 12.20 m en la cala 5 y mínimo de 0.60 m en las calas 8 y 9. Propiedades físico-mecánicas de esta capa se presenta en la tabla 3.

**Tabla 3:** Propiedades físico mecánicas de la capa 1

Finos (< Tamiz 200)	42%
Arena	44%
Grava	14%
Límite Líquido (LL)	52%
Límite Plástico (LP)	34%
Índice Plástico (IP)	18%
Peso específico de los sólidos (Gs)	34.1 kN/m <sup>3</sup>
Humedad Natural (W)	24.7 %
Peso Específico Húmedo (γ <sub>f</sub> )	21.1 kN/m <sup>3</sup>
Peso Específico Seco (γ <sub>d</sub> )	17.0 kN/m <sup>3</sup>
Índice de Poros (e)	1.01
Saturación (S)	83%
Angulo de fricción interna (φ) *	24°
Cohesión (C) *	0.02 MPa
Módulo de deformación (E) *	16 MPa
Coefficiente de Poisson (μ) *	0.30

**Capa 2:** Colas: de composición heterogénea, pasando por una gama de suelos finos (CL, CL-ML, ML, MH y SM, o sea, limo arenosos y arena limosos con algunas gravas, color gris oscuro a negro, generalmente de consistencia muy blanda o con baja compacidad. Presenta algunos perdigones y concreciones de hierro, tiene un espesor máximo de 16.20 m (cala 1) y mínimo de 3.20 m (cala 27). Según la NC 59: 2000 y por valores promedios esta capa clasifica como ML (limo plástico arenoso). Propiedades físico-mecánicas de esta capa se presenta en la tabla 4.

**Tabla 4:** Propiedades físico mecánicas de la capa 2.

Finos (< Tamiz 200)	63%
Arena	33%
Grava	4%
Límite Líquido (LL)	43%
Límite Plástico (LP)	37%
Índice Plástico (IP)	6%
Índice de consistencia (I <sub>c</sub> )	0.13 (muy blanda)
Peso específico de los sólidos (Gs)	36.0 kN/m <sup>3</sup>
Humedad Natural (W)	42.2 %

Peso Específico Húmedo ( $\gamma_f$ )		20.5 kN/m <sup>3</sup>
Peso Específico Seco ( $\gamma_d$ )		14.3 kN/m <sup>3</sup>
Índice de Poros ( e )		1.55
Saturación (S)		98%
Angulo de fricción interna ( $\phi$ )		290
Cohesión (C)		0.025 MPa
Módulo de deformación (E)	$E_{0.0-0.025}$	5.6 MPa
	$E_{0.025-0.05}$	7.6 MPa
	$E_{0.05-0.1}$	14.1 MPa
	$E_{0.1-0.2}$	22.1 MPa
	$E_{0.2-0.4}$	38.0 MPa
Coeficiente de Poisson ( $\mu$ ) *		0.30

Es bueno destacar que los valores obtenidos de resistencia al cortante son altos para esta capa considerando las condiciones extremas a la que la misma se encuentra sometida (saturación alta en casi todo su espesor), donde presenta un bajo valor del ensayo SPT (2-4), existen zonas donde las colas se presentan con valores un poco más altos del ensayo SPT y por lo tanto esas zonas son las que se pudieron ensayar en el laboratorio.

También se debe tener en cuenta que las colas son suelos artificiales, los que presentan un alto contenido de minerales pesados, donde el comportamiento geotécnico puede apartarse un poco de lo acostumbrado.

**Capa 3a:** Suelos arcillosos: representada por arcillas de alta plasticidad hasta arcillas de baja plasticidad arenosas, de color gris verdoso a marrón con vetas grises, en general muy húmedas, con gravas de composición ofiolítica, consistencia firme. El espesor máximo se cortó en la cala 3 (13.80 m) y el mínimo en la cala 27 (1.45 m). Según la NC 59: 2000 clasifica como CH (arcilla muy plástica arenosa). Propiedades físico-mecánicas de esta capa se presenta en la tabla 5.

**Tabla 5:** Propiedades físico mecánicas de la capa 3a

Finos (< Tamiz 200)	70%	
Arena	24%	
Grava	6%	
Límite Líquido (LL)	66%	
Límite Plástico (LP)	29%	
Índice Plástico (IP)	37%	
Peso específico de los sólidos (Gs)	27.8 kN/m <sup>3</sup>	
Humedad Natural (W)	45.2 %	
Peso Específico Húmedo ( $\gamma_f$ )	17.0 kN/m <sup>3</sup>	
Peso Específico Seco ( $\gamma_d$ )	11.7 kN/m <sup>3</sup>	
Índice de Poros ( e )	1.38	
Saturación (S)	91%	
Índice de consistencia	0.56(firme)	
Angulo de fricción interna ( $\phi$ )	60	
Cohesión (C)	0.06 MPa	
Módulo de deformación (E)	E <sub>0.0-0.025</sub>	1.57 MPa
	E <sub>0.025-0.05</sub>	4.90 MPa
	E <sub>0.05-0.1</sub>	5.95 MPa
	E <sub>0.1-0.2</sub>	9.95 MPa
	E <sub>0.2-0.4</sub>	8.50 MPa**
Coeficiente de Poisson ( $\mu$ ) *	0.37	

**Capa 3b:** Suelos arenosos: están incluidas arenas limosas hasta arcillosas de colores verdosos hasta marrón abigarrado, con contenidos menores de un 15 % de gravas de composición ofiolítica, son en general húmedas y de sueltas a poco compactas. El espesor máximo se cortó en la cala 7 (9.20 m) y el mínimo en la cala 1 (0.60 m). Según la NC 59: 2000 clasifica por los valores promedios como SP-SM (arena mal graduada con arcilla o arena limosa) Propiedades físico-mecánicas de esta capa se presenta en la tabla 6.

**Tabla 6:** Propiedades físico-mecánica capa 3b

Finos (< Tamiz 200)	12 %
Arena	81 %
Grava	7 %
Límite Líquido (LL)	35 %
Límite Plástico (LP)	28 %
Índice Plástico (IP)	7 %
Peso específico de los sólidos (Gs)	27.3 kN/m <sup>3</sup>
Humedad Natural (W)	24.8 %
Peso Específico Húmedo ( $\gamma_f$ )	18.0 kN/m <sup>3</sup>
Peso Específico Seco ( $\gamma_d$ )	14.4 kN/m <sup>3</sup>
Índice de Poros ( e)	0.89
Saturación (S)	76 %
Angulo de fricción interna ( $\phi$ ) *	20 <sup>0</sup>
Cohesión (C) *	0.01 MPa
Módulo de deformación (E) *	15.5 MPa
Coeficiente de Poisson ( $\mu$ ) *	0.30

**Capa 3c:** Suelos limosos: son limos arenosos hasta plásticos, con poco contenido de gravas, color verdoso a marrón abigarrado, húmedos, consistencia muy dura. Solo fue cortada en la cala 7. Teniendo en cuenta la NC 59: 2000 esta capa clasifica como ML (limo plástico arenoso). Propiedades físico-mecánicas de esta capa se presenta en la tabla 7.

**Tabla 7:** Propiedades físico mecánicas de la capa 3c

Finos (< Tamiz 200)		64%
Arena		34%
Grava		2%
Límite Líquido (LL)		49%
Límite Plástico (LP)		33%
Índice Plástico (IP)		16%
Peso específico de los sólidos (Gs)		26.4 kN/m <sup>3</sup>
Humedad Natural (W)		25.8 %
Peso Específico Húmedo (Yf)		18.0 kN/m <sup>3</sup>
Peso Específico Seco (Yd)		14.3 kN/m <sup>3</sup>
Índice de Poros ( e)		0.85
Saturación (S)		80%
Índice de consistencia		1.43 (muy dura)
Angulo de fricción interna (φ) *		140
Cohesión (C) *		0.02 MPa
Módulo de deformación (E)	E <sub>0.0-0.025</sub>	3.7 MPa
	E <sub>0.025-0.05</sub>	3.9 MPa
	E <sub>0.05-0.1</sub>	5.3 MPa
	E <sub>0.1-0.2</sub>	27.3 MPa**
	E <sub>0.2-0.4</sub>	40.7 MPa**
Coeficiente de Poisson (μ) *		0.30

**Capa 4a:** Cieno limosos: integrado por limos arenosos hasta plásticos, color gris verdoso a gris oscuro con escasas gravas, en general húmedos, consistencia dura, olor fétido, aparecen en ocasiones restos de raíces de mangle. El espesor máximo se cortó en la cala 16 (5.60 m) y el mínimo en la cala 11 (2.40 m). Según la NC 59: 2000 clasifica como MH (limo plástico con arena). Propiedades físico-mecánicas de esta capa se presenta en la tabla 8.

**Tabla 8:** Propiedades físico mecánicas de la capa 4a

Finos (< Tamiz 200)		67%
Arena		27%
Grava		6%
Límite Líquido (LL)		51%
Límite Plástico (LP)		37%
Índice Plástico (IP)		14%
Peso específico de los sólidos (Gs)		27.3 kN/m <sup>3</sup>
Humedad Natural (W)		40.2 %
Peso Específico Húmedo (γf)		15.7 kN/m <sup>3</sup>
Peso Específico Seco (γd)		11.2 kN/m <sup>3</sup>
Índice de Poros ( e)		1.40
Saturación (S)		76%
Índice de consistencia		0.77 (dura)
Ángulo de fricción interna (φ) *		50
Cohesión (C) *		0.02 MPa
Módulo de deformación (E)	E <sub>0.0-0.025</sub>	1.2 MPa
	E <sub>0.025-0.05</sub>	1.3 MPa
	E <sub>0.05-0.1</sub>	5.5 MPa
	E <sub>0.1-0.2</sub>	11.0 MPa
	E <sub>0.2-0.4</sub>	13.0 MPa
Coefficiente de Poisson (μ) *		0.42

**Capa 4b:** Cieno arenosos: constituido por arenas limosas, color gris oscuro a negro en ocasiones mezclado con sedimentos marinos y finas intercalaciones de arcilla plástica verdosa, con escasas gravas, en general húmeda, compacidad baja, olor fétido. El espesor máximo se cortó en la cala 24 (7.30 m) y el mínimo en la cala 19 (0.60 m). Se incluye dentro del grupo SM (arena limosa) según la NC 59: 2000. Propiedades físico-mecánicas de esta capa se presenta en la tabla 9.

**Tabla 9:** Propiedades físico mecánicas de la capa 4b

Finos (< Tamiz 200)	30%	
Arena	61%	
Grava	9%	
Límite Líquido (LL)	40%	
Límite Plástico (LP)	33%	
Índice Plástico (IP)	7%	
Peso específico de los sólidos (Gs)	27.0 kN/m <sup>3</sup>	
Humedad Natural (W)	49.0 %	
Peso Específico Húmedo ( $\gamma_f$ )	15.6 kN/m <sup>3</sup>	
Peso Específico Seco ( $\gamma_d$ )	10.5 kN/m <sup>3</sup>	
Índice de Poros ( e)	1.57	
Saturación (S)	84%	
Ángulo de fricción interna ( $\phi$ )	70	
Cohesión (C)	0.02 MPa	
Módulo de deformación (E)	E <sub>0.0-0.025</sub>	-
	E <sub>0.025-0.05</sub>	2.47 MPa
	E <sub>0.05-0.1</sub>	3.30 MPa
	E <sub>0.1-0.2</sub>	4.03 MPa
	E <sub>0.2-0.4</sub>	9.00 MPa
Coefficiente de Poisson ( $\mu$ ) *	0.40	

**Capa 5:** Arenas limosas: color gris claro a verdoso, con gravas, en general muy húmedo, estos sedimentos están acompañados por restos de caracoles y también por restos de vegetación de mangle, se presentan con frecuencia compactos hasta baja compacidad. El espesor máximo se cortó en la cala 15 (2.90 m) y el mínimo en la cala 17 (0.60 m). Por la NC 59: 2000 clasifica como SM (arena limosa con grava). Propiedades físico-mecánicas de esta capa se presenta en la tabla 10.

**Tabla10:** Propiedades físico mecánicas de la capa 5

Finos (< Tamiz 200)	30 %
Arena	48 %
Grava	23 %
Límite Líquido (LL)	NP
Límite Plástico (LP)	
Índice Plástico (IP)	
Peso específico de los sólidos (Gs)	28.3 kN/m <sup>3</sup>
Humedad Natural (W)	33.8 %
Peso Específico Húmedo ( $\gamma_f$ )	19.6 kN/m <sup>3</sup>
Peso Específico Seco ( $\gamma_d$ )	14.7 kN/m <sup>3</sup>
Índice de Poros (e)	0.93
Saturación (S)	103 %
Angulo de fricción interna ( $\phi$ ) *	19 <sup>o</sup>
Cohesión (C) *	0.01 MPa
Módulo de deformación (E) *	17.0 MPa
Coeficiente de Poisson ( $\mu$ ) *	0.30

**Capa 6:** Eluvio de serpentinita-gabro: representado por un suelo limoso plástico, en ocasiones con gravas de serpentinita y/o gabro, color gris verdoso amarillento a veces con manchas rojizas, muy húmedo, de consistencia muy dura. El espesor máximo se cortó en la cala 24 (6.80 m) y el mínimo en las calas 3 y 5 (1.90 m). Por la NC 59: 2000 clasifica como ML (limo plástico arenoso). Propiedades físico-mecánicas de esta capa se presenta en la tabla 11.

**Tabla 11:** Propiedades físico mecánicas de la capa 6

Finos (< Tamiz 200)	63%
Arena	30%
Grava	7%
Límite Líquido (LL)	62%
Límite Plástico (LP)	46%
Índice Plástico (IP)	16%
Peso específico de los sólidos (Gs)	27.3 kN/m <sup>3</sup>
Humedad Natural (W)	45.5 %
Peso Específico Húmedo (j <sub>f</sub> )	16.9 kN/m <sup>3</sup>
Peso Específico Seco (j <sub>d</sub> )	11.6 kN/m <sup>3</sup>
Índice de Poros ( e)	1.35
Índice de consistencia (I <sub>c</sub> )	1.03 (muy dura)
Saturación (S)	92%
Angulo de fricción interna (φ) *	100
Cohesión (C) *	0.05 MPa
Módulo de deformación (E) *	9.50 MPa
Coefficiente de Poisson (μ) *	0.30

**Capa 7:** Serpentinita muy meteorizada: se recuperan fragmentos de diferentes dimensiones, color gris verdoso a gris azulado con tonos amarillentos, fueron descritas superficies pulidas en los fragmentos que caracterizan a zonas de fricción. Presenta una resistencia baja y son ablandables al sumergirse en agua. El espesor máximo se cortó en la cala 27 (4.50 m) y el mínimo en la cala 9 (0.35 m). Propiedades físico-mecánicas de esta capa se presenta en la tabla 12.

**Tabla 12:** Propiedades físico mecánicas de la capa 7

Peso específico de los sólidos (Gs)	27.0 kN/m <sup>3</sup>
Humedad (W)	4.14 %
Peso Específico Húmedo ( $\gamma_f$ )	21.2 kN/m <sup>3</sup>
Peso Específico seco ( $\gamma_d$ )	20.4 kN/m <sup>3</sup>
Peso Específico Saturado ( $\gamma_{sat}$ )	22.9 kN/m <sup>3</sup>
Peso Específico Sumergido( $\gamma'$ )	12.9 kN/m <sup>3</sup>
Porosidad (n)	24 %
Saturación (S)	35 %
Resistencia a la compresión axial (Rc nat)	10.5 MPa
Resistencia a la compresión axial (Rc sat)	5.8 MPa
Coefficiente de ablandamiento (Ca)	0.55

Después de realizar un procesamiento matemático de los ensayos SPT realizados (más de 100) en cada una de las calas, tomando como base la información primaria reflejada en los reportes técnicos de las calas y teniendo en cuenta los intervalos de aparición de las diferentes litologías se obtuvo el siguiente resultado: (ver tabla 13).

**Tabla 13:** Tabla del número de golpes promedio y más característico de las diferentes capas o elementos ingeniero geológicos.

No.Capa	No. golpes Promedio del SPT	Valores más característicos
1	20	10 a 34
2	4	2 a 6
3a	16	14 a 25
3b	22	12 a 42
3c	10	10
4a	9	6 a 11
4b	14	4 a 23
5	11	6 a 15
6	33	25 a 37

Se destaca que independientemente de los valores del ensayo SPT ofrecidos, hay valores que fueron discriminados por considerarse que se apartaban de los valores más frecuentes.

### 3.3 Parámetros hidrogeológicos. (Profundidad del nivel del agua y coeficiente de filtración)

Durante los trabajos de campo se cortó agua en todas las calas; estas están muy influenciadas por el contenido de agua de las colas que se depositan, como presa al fin esos niveles pueden compararse con la línea de corriente superior de las presas. El manto acuífero y su nivel freático deben estar relacionados con los depósitos aluviales y marinos que constituyen la base en la que se apoyan los diques y el depósito de colas. (Ver tabla 14)

**Tabla 14:** Medición de los niveles del agua en las calas.

No. cala	Profundidad del nivel del agua en metros	Fecha de medición	No. cala	Profundidad del nivel del agua en metros	Fecha de medición
1	3.82	27/02/2013	15	2.55	13/01/2013
3	*	*	16	2.60	21/01/2013
4	1.90	14/03/2013	17	5.43	23/01/2013
5	2.30	20/03/2013	19	4.50	25/01/2013
6	8.85	10/12/2012	21	*	*
7	6.10	9/12/2012	22	*	*
8	2.30	18/12/2012	24	7.14	16/02/2013
9	3.47	15/12/2012	25	3.10	19/02/2013
10	1.27	24/12/2012	27	3.00	27/02/2013
11	1.61	12/01/2013	28	4.65	24/02/2013
12	2.10	26/12/2012	29	*	*
13	2.26	21/12/2012			

\* El nivel del agua se cortó pero no se pudo medir por derrumbes en las calas.

La profundidad máxima del nivel de agua fue en la cala 6 a 8.85 m y el mínimo en la cala 10 a 1.27m, todos los niveles fueron cortados en las colas y relleno laterítico, por lo que se considera que son el resultado de las aguas residuales del proceso tecnológico.

Los coeficientes de filtración obtenidos por la vía de los cubeteos realizados en algunas calas y en el espesor considerado arrojaron los siguientes resultados:(ver tabla 15)

**Tabla 15:** Cubeteos en las calas.

No. Cala	Intervalo del ensayo en metros	Valor del coeficiente de filtración		Clasificación
		m/día	cm/seg	
11	1.60-4.14	0.233	$2,7 \cdot 10^{-4}$	Semipermeable
15	1.46-4.66	0.023	$2,6 \cdot 10^{-5}$	Poco permeable
16	2.76-9.18	0.003	$3,5 \cdot 10^{-6}$	Muy poco permeable
17	5.40-5.76	0.012	$1,4 \cdot 10^{-5}$	Poco permeable

En estas calas donde se realizó cubeteo el intervalo del ensayo en metros corresponde con la colas y el relleno laterítico, donde los coeficientes de filtración obtenidos clasifican al medio desde muy poco permeable hasta semipermeable.

## **Conclusiones:**

1. El corte ingeniero geológico está representado por once elementos ingeniero geológicos, los que se agrupan en las siguientes litologías: Relleno de lateritas (1), colas (2), sedimentos aluviales (3a, 3b y 3c), cieno (4a y 4b)), sedimentos marinos (5), eluvio de serpentinita-gabro (6), la roca (7) y una litología encontrada que se le denominó relleno antrópico (8) por su contenido de fragmentos de carbón antracita, cristales de azufre, etc.
2. El nivel de las aguas en las calas fue cortado a diferentes profundidades pero se considera que son el resultado de las aguas residuales del proceso tecnológico. Los coeficientes de filtración obtenidos por la vía del cubeteo clasifican al medio desde muy poco permeable hasta semipermeable.
3. A partir de los resultados obtenidos del comportamiento de las velocidades de ondas transversales  $V_s$  y el cálculo a partir de éstas del número de golpes  $N$  (STP), fue posible la clasificación desde el punto de vista Ingeniero-Geológico de los suelos presentes en el área de estudio mediante la aplicación del Internacional Building Code IBC 2000.
4. Teniendo en cuenta los resultados de las propiedades ingenieriles de los suelos, la zona más favorable desde el punto de vista de la estabilidad es la que contiene la sección I donde el rango de velocidades  $V_s$  se encuentra entre 150 – 400 m/s y la más desfavorable, la zona que contiene la sección IX donde el rango de velocidades  $V_s$  se encuentra entre 105 – 180 m/s.
5. Los resultados de tomografía eléctrica se presentan entre los valores de resistividad de 1- 105  $\Omega$ .m, las colas y las serpentinitas alteradas respectivamente.

**Recomendaciones:**

1. Con el propósito de frenar el desarrollo creciente de los efectos de la erosión se deben contemplar medidas ingenieriles para mitigar o eliminar el avance de este fenómeno.
2. Realizar controles de compactación al material que se coloca actualmente en la presa, pues no se está realizando; el material se coloca en el dique sin ningún rigor técnico.
3. Se debe considerar que en las colas (capa 2), por ser suelos artificiales provenientes del producto final de un proceso tecnológico, intervienen en su constitución mineralógica metales pesados y otras sustancias químicas que le pueden inferir un comportamiento ingenieril atípico.

## **Bibliografía**

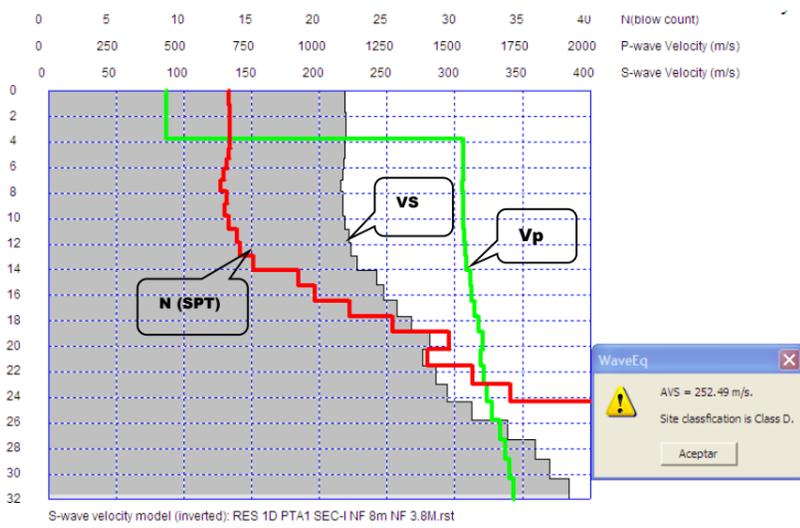
- ADAMOVICH A. & CHEJOVICH, V.D. 1963. Estructuras geológicas y minerales útiles de la región Nipe - Cristal, provincia de Oriente. Informe, ONRM.
- BLANCO J Y PROENZA J, 1994: Terrenos geológicos de Cuba Oriental. Revista Minería y Geología.
- BADILLO, J, E. Mecánica de suelo (Tomo I). Limusa, Noruega Editorial
- BARRERA S; LARA J. (1998). Geotechnical Characterization of Cycloned Sands for the Seismic Design of Tailings Deposits. 3rd International Congress on Environmental Geotechnics. Lisboa
- BARRERA S; RIVEROS C. (2000). Sand Transport and Placement. Tailings and Mine Waste Fort Collins. Colorado. USA
- COBIELLA, J.L. 1978: Estratigrafía y paleogeografía del Paleógeno de Cuba oriental. Tesis Doctoral. Centro de Información. ISMM.
- CAMPOS, Y, 2010. Comportamiento de las propiedades físicas .y la compactación de los materiales que constituyen los diques de la presa de colas de la Empresa Comandante Pedro Soto.
- DÁNCELA, M. 1987. Comportamiento geotécnico de presas de residuos bajo acciones estáticas y dinámicas. Tesis doctoral, Escuela técnica superior de ingenieros de caminos, canales y puertos de la Universidad politécnica de Madrid.
- FORMELL, F.; ORO, J.R 1980. Sobre los procesos de redeposición del Yacimiento Punta Gorda. Ciencia de la Tierra y el Espacio.
- GUARDADO,R ; HERNÁNDEZ ,T ,2013, Caracterización geotécnica de los suelos de las presas de relaves mineros – práctica cubana de en la industria del níquel.
- JUNGHANS M.; HELING C. 1998. Historical mining, uranium tailings and waste disposal at one site: Can it be managed? A hydrogeological analysis., In

- BALKEMA (ed.), Proceedings of the International Conference on Tailings and Mine Waste , Fort Collins, CO, USA 26-28 January 1998, 117-126.
- ITURRALDE-VINENT, M.A. (1996). Geología de las ofiolitas de Cuba. En: Iturralde-Vinent, M. (ed). Ofiolitas y arcos volcánicos de Cuba. IGCP Project 364. Special contribution n.1, p. 83-120.
- ICOLD. 2001. Bulletin 121: Tailing dams. Risk of dangerous occurrences. Lessons learnt from practical experiences. Paris.
- INRH (INSTITUTO NACIONAL DE RECURSOS HIDRÁULICOS) (1986a). Informe sobre la contaminación por sulfatos de la terraza del río Moa.
- INRH (INSTITUTO NACIONAL DE RECURSOS HIDRÁULICOS) (1986b). Informe hidrogeológico sobre las terrazas del río Moa.
- L RUCKS; F. GARCÍA; A. KAPLÁN; J. PONCE DE LEÓN; M. HILL. 2004. Propiedades Físicas Del Suelo. Montevideo – Uruguay.
- MARKLAND, A; EURENIUS, J. 1976. Stability investigations of an existing tailing dam. 12th International Congress on Large Dams. ICOLD, México, 407-417.
- NORMA CUBANA 324:2004; Geotecnia. Toma de muestras inalteradas de suelo con muestreadores de paredes finas.
- NORMA CUBANA 59: 2000. Geotecnia. Clasificación Geotécnica de los suelos.
- NORMA CUBANA 46:1999. Construcciones sismo resistentes. Requisitos básicos para el diseño y construcción
- NORMA COVENIN 1756-2002. Edificaciones Sismo resistentes).
- OLDECOP,L; RODRÍGUEZ, R (Estabilidad y seguridad de depósitos de residuos mineros) Instituto de Investigaciones Antisísmicas “Ing. Aldo Bruschi” Universidad Nacional de San Juan Facultad de Ingeniería Av. Libertador (Oeste) 1290 Provincia de San Juan (Argentina). Departamento de Química Facultad de Ciencias Universitat de Girona Campus de Montilivi 17071 Girona (España)

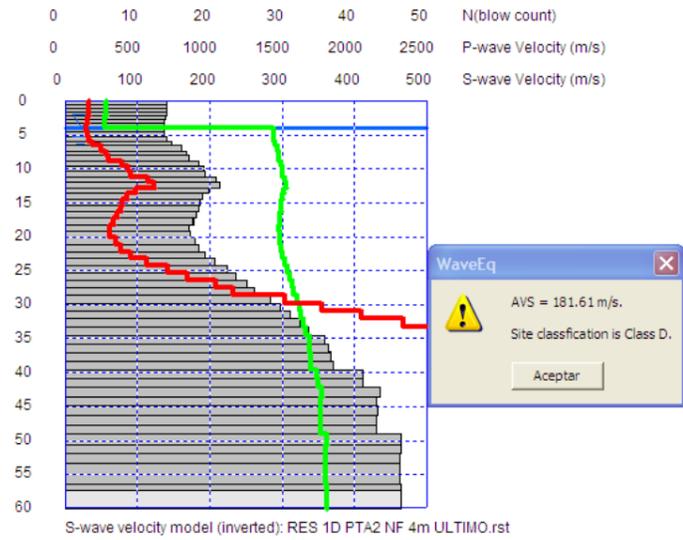
- PROENZA, J.; F. GERVILLA; J.C. MELGAREJO Y J.L. BODINIER. (1999) Al – and Cr-rich chomites from the Mayarí – Baracoa ophiolite belt (Eastern Cuba):
- QUINTANA, H. (1998). Diques de estériles. *Industria y Minería*, 33, 52-56.
- QUINTAS F. (1989) Análisis estratigráfico y paleogeografía de cretácico superior y del paleógeno en la provincial Guantánamo y áreas cercanas. ISMMM. tesis doctoral p 161.
- RODRÍGUEZ, A. (1998 b) estudio morfotectónico de Moa y áreas adyacentes para la evaluación de riesgos de génesis tectónica. *Revista Minería Y Geología*, v.12, n.3, 2005. ISMMM.
- RODRÍGUEZ, R. (2002). Estudio experimental de flujo y transporte de cromo, níquel y manganeso en residuos de la zona minera de Moa (Cuba): influencia del comportamiento hidromecánico. Tesis Doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, p 17-19.
- SÁNCHEZ, F. 2007. Seguridad de presas: Al análisis y control de como elemento de patologías de origen geotécnico. Tesis doctoral.
- SOCIEDAD MINERA CERRO VERDE S.A.A. ASIENTO MINERO CERRO VERDE – UCHUMAYO Casilla Postal 299 Arequipa, Perú. 2004. Diseño a nivel de factibilidad de la presa de relaves .
- VAN ZYL, D.; ROBERTSON, A. MAC G. 1980. Subsurface drainage of tailings impoundments: some design, construction and management considerations. Symposium on uranium mill tailings management, Fort Collins, Colorado, November 24-X-1980. Geotechnical Engineering Program, Civil Engineering Department, Colorado State University
- WELS, C.; ROBERTSON, A. MAC G. 2003. "Conceptual model for estimating water recovery in tailings". In proceedings of the 10th International Conference on Tailings and Mine Waste, Vail, Colorado, USA, 12-15 October, 2003, pp. 87-94.

**Anexos:**

**PROGRESIVA 0+048**

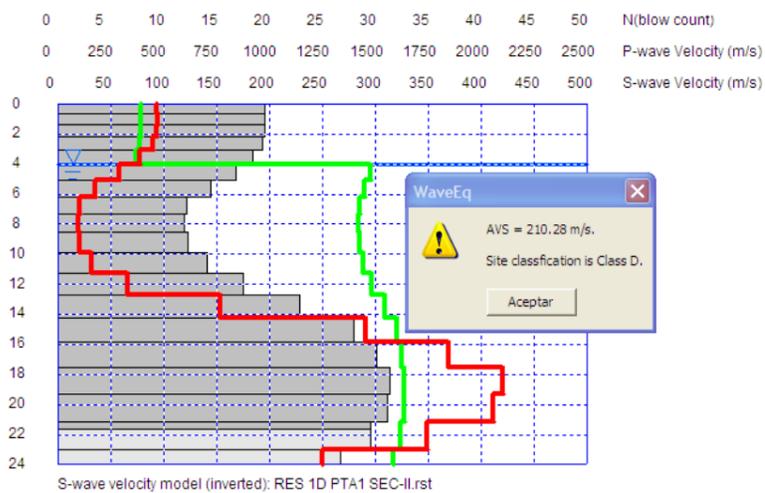


**PROGRESIVA 0+116**

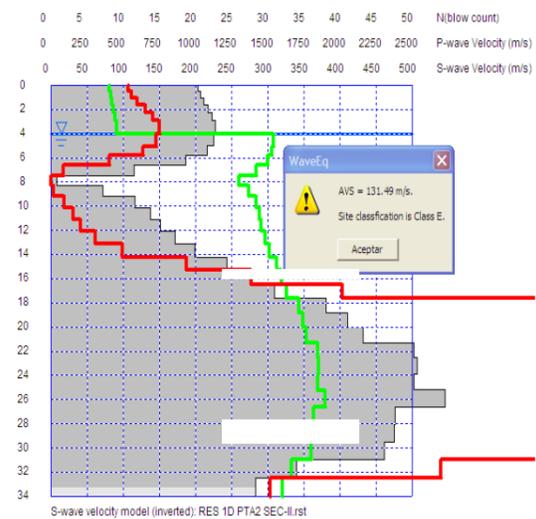


**Anexo 1: Corte de velocidades de cizalla o Vs en las progresivas correspondientes al centro de las puestas sísmicas PTA1 y PTA2 de la sección – I según método pasivo de registro del ruido ambiental (1D MAM)**

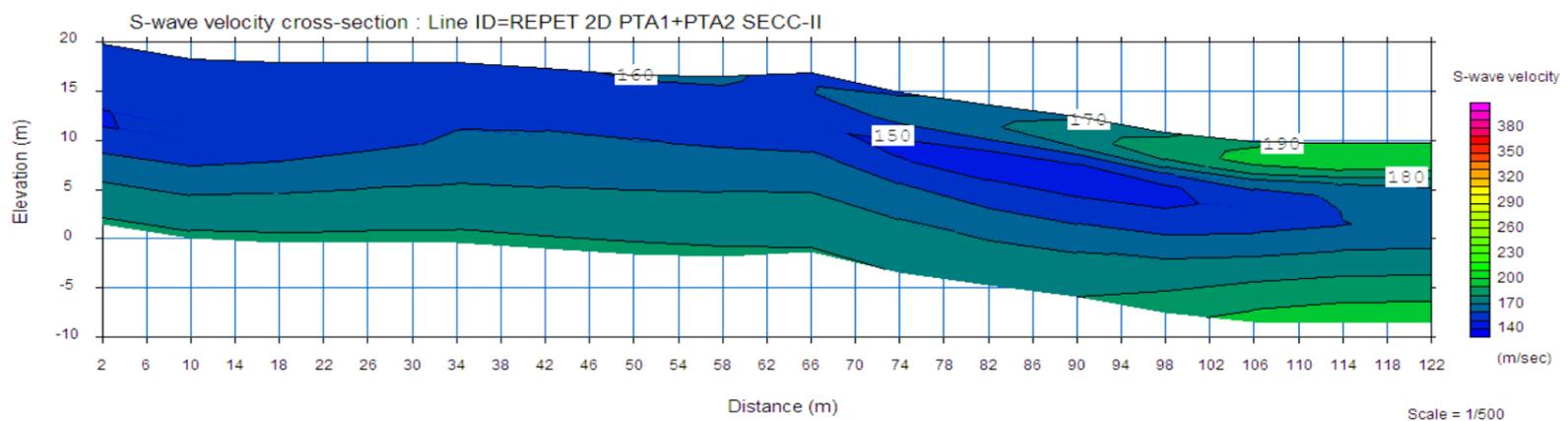
**PROGRESIVA 0+100**



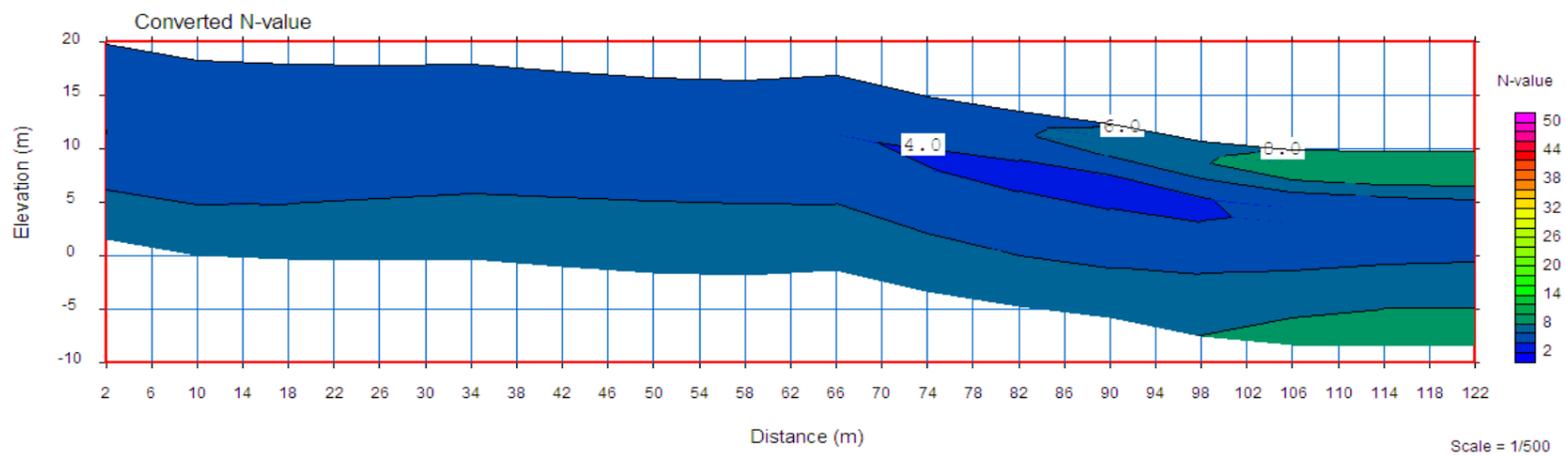
**PROGRESIVA 0+048**



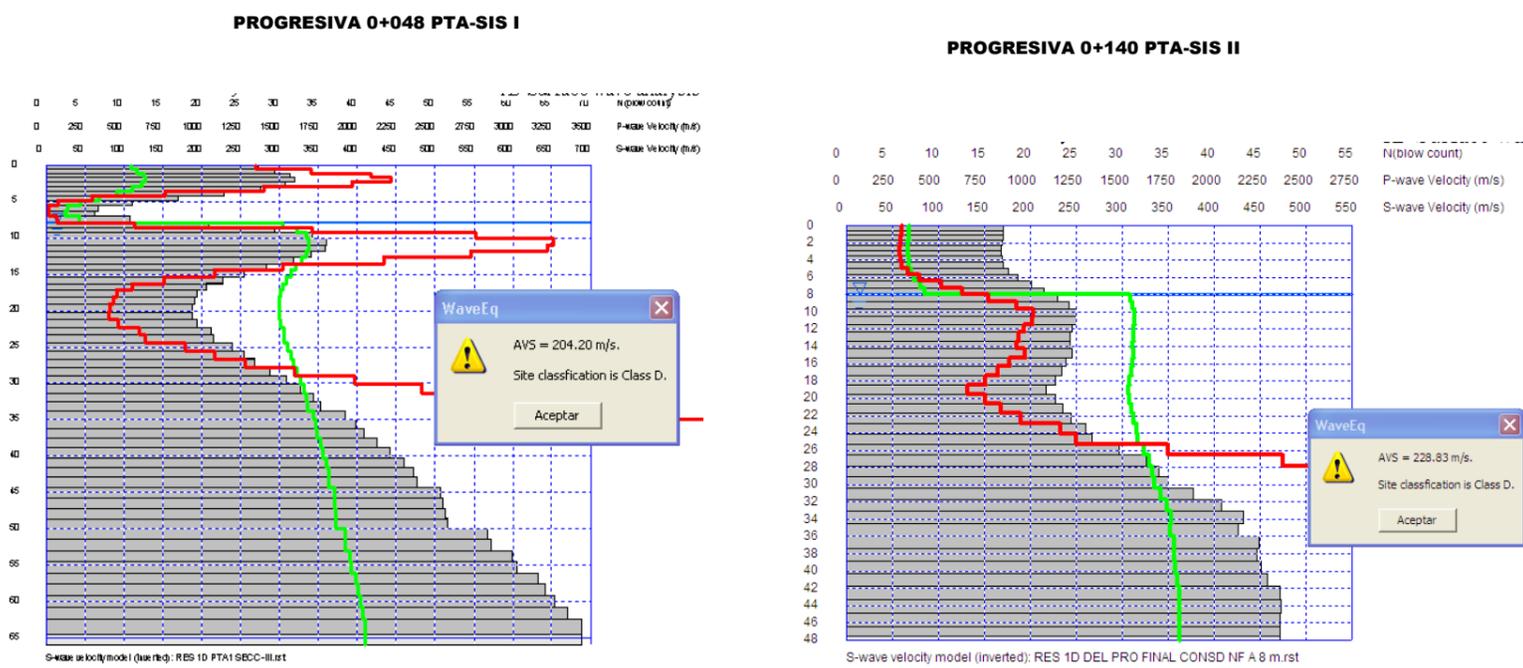
**Anexo 2: Corte de velocidades de cizalla o Vs en las progresivas correspondientes al centro de las puestas sísmicas PTA1 y PTA2 de sección – II según método pasivo de registro del ruido ambiental (1D MAM)**



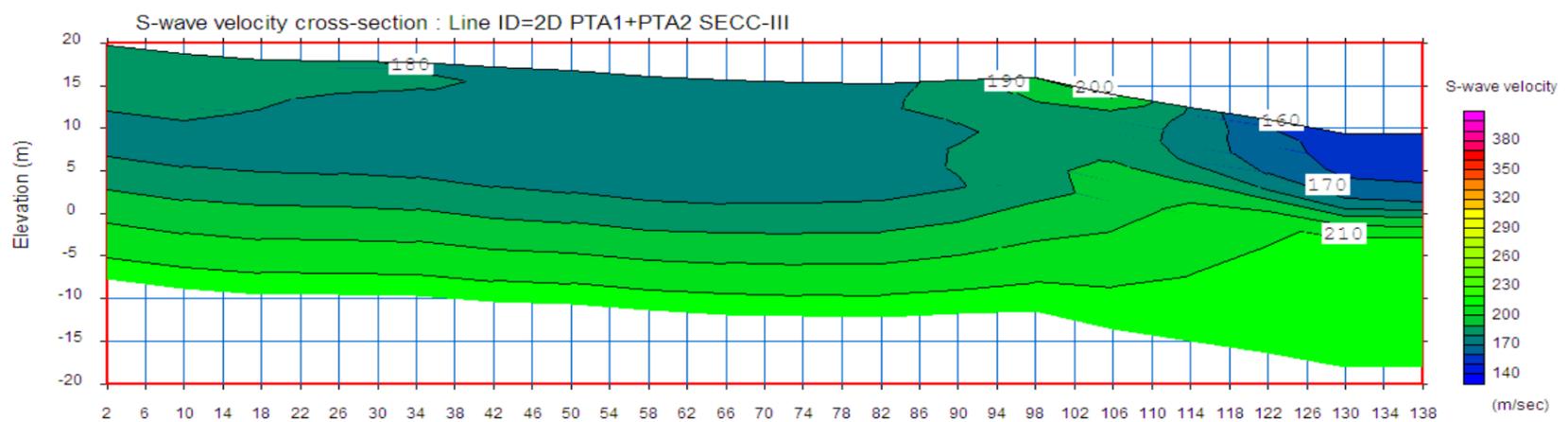
**Anexo 2a: Corte de velocidades de cizalla o Vs según 2D MASW por sección II**



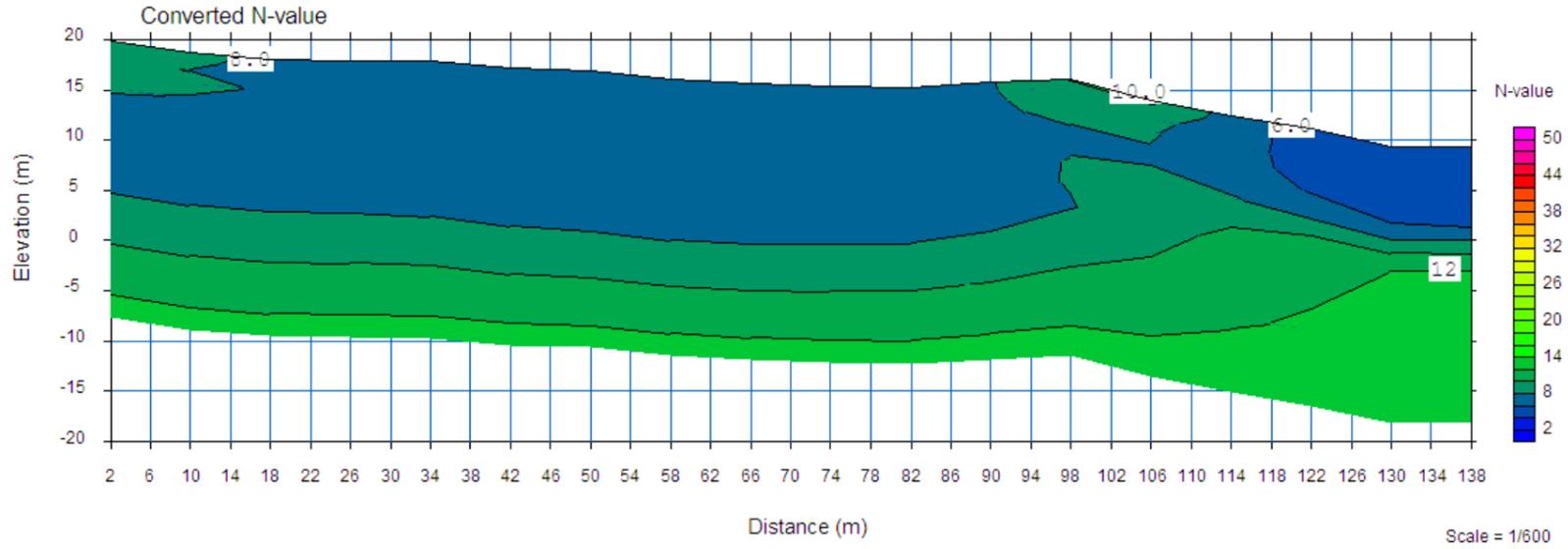
Anexo2c: Corte del número de golpes N (SPT) calculado a partir de Vs sección II



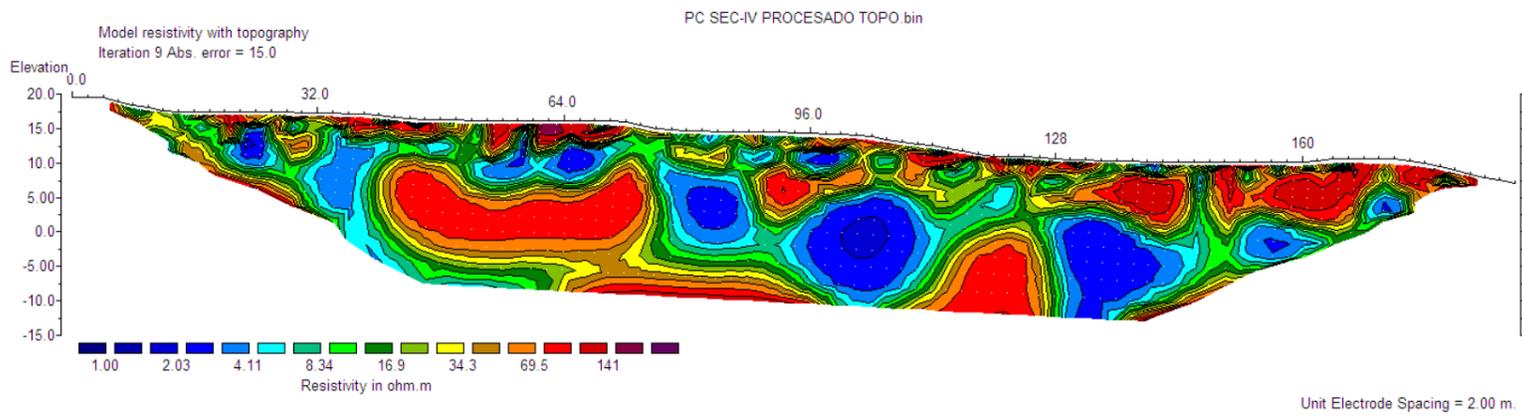
Anexo 3: Corte de velocidades de cizalla o vs en las progresivas correspondientes al centro de las puestas sísmicas PTA1 y PTA2 de la sección – III según método pasivo de registro del ruido ambiental (1D MAM)



Anexo 3a: Corte de velocidades de cizalla o Vs según metodología 2D MASW por sección III

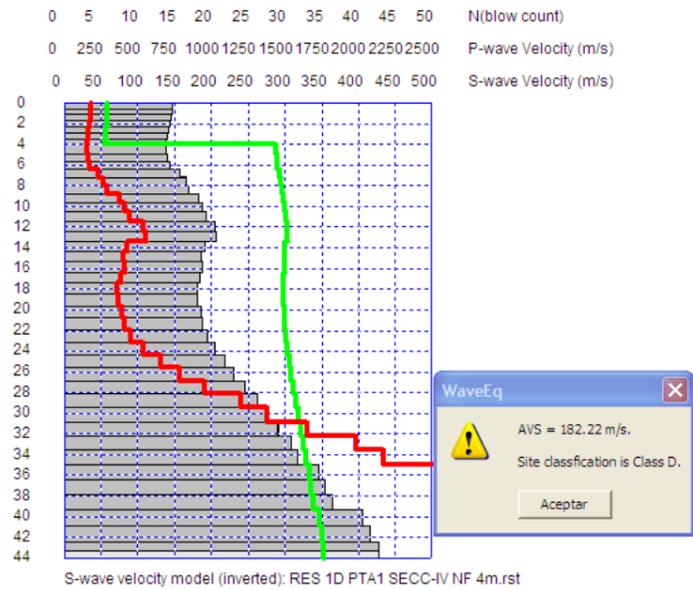


Anexo 3b: Corte del número de golpes N (SPT) calculado a partir de Vs sección III

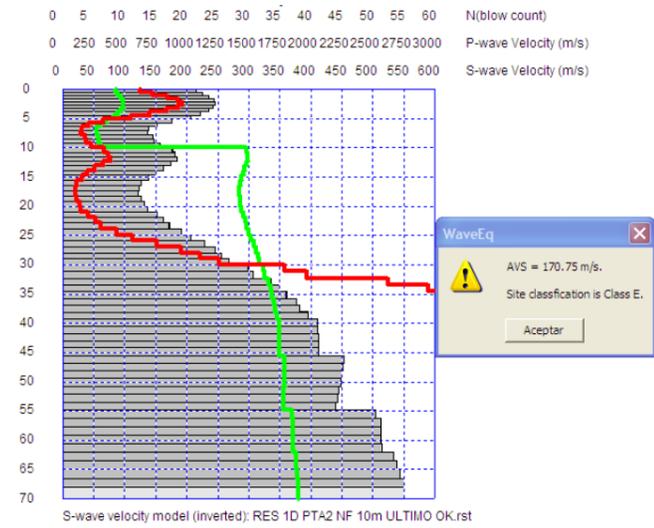


Anexo 4: Resultados de tomografía eléctrica por PC sección IV

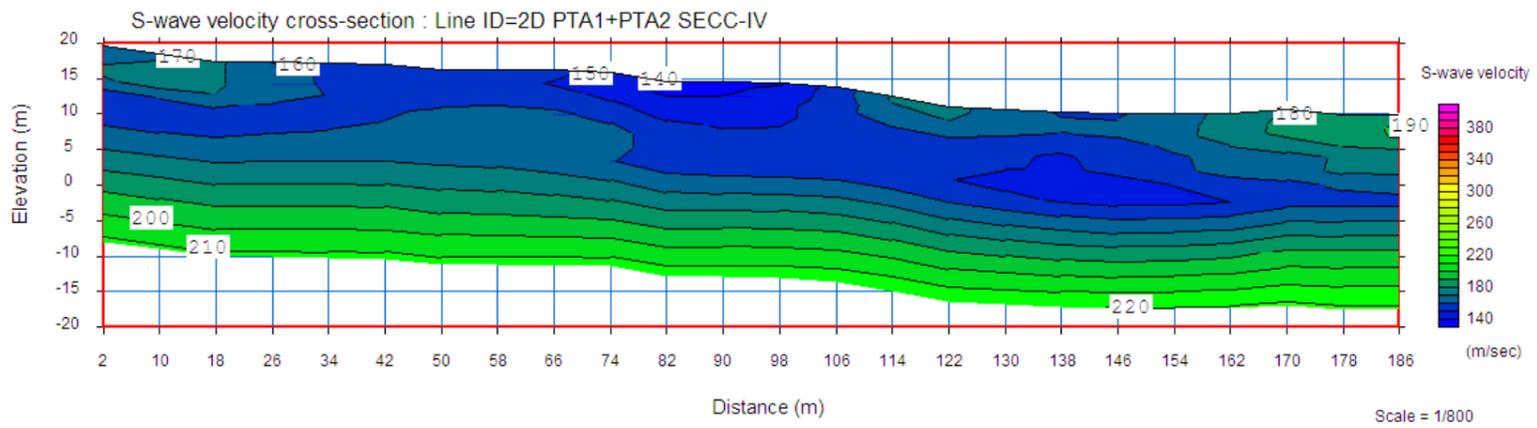
PROGRESIVA 0+048



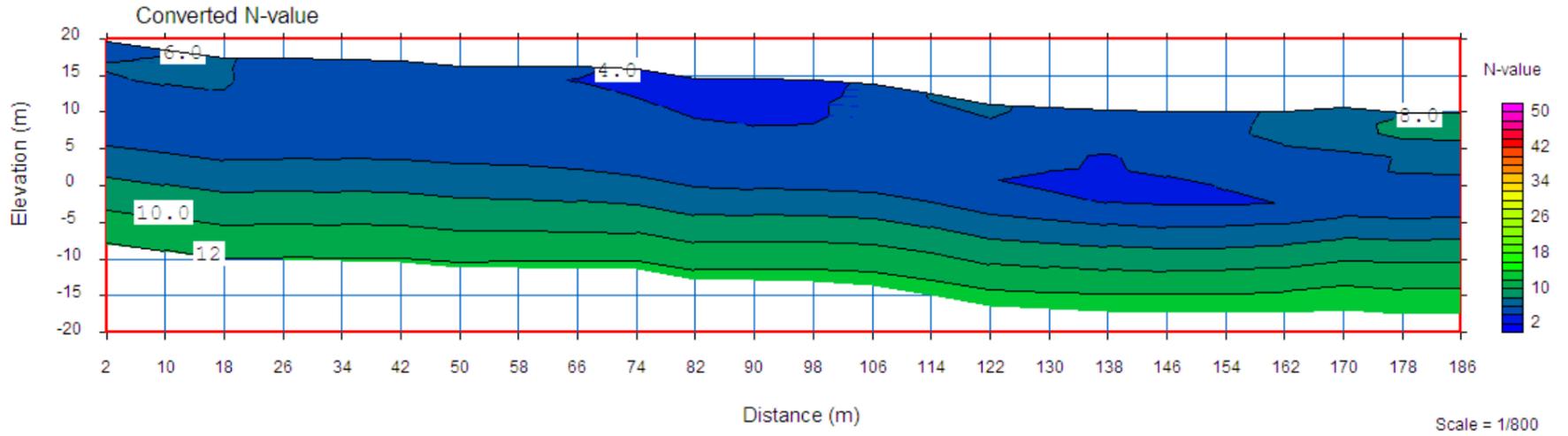
PROGRESIVA 0+140



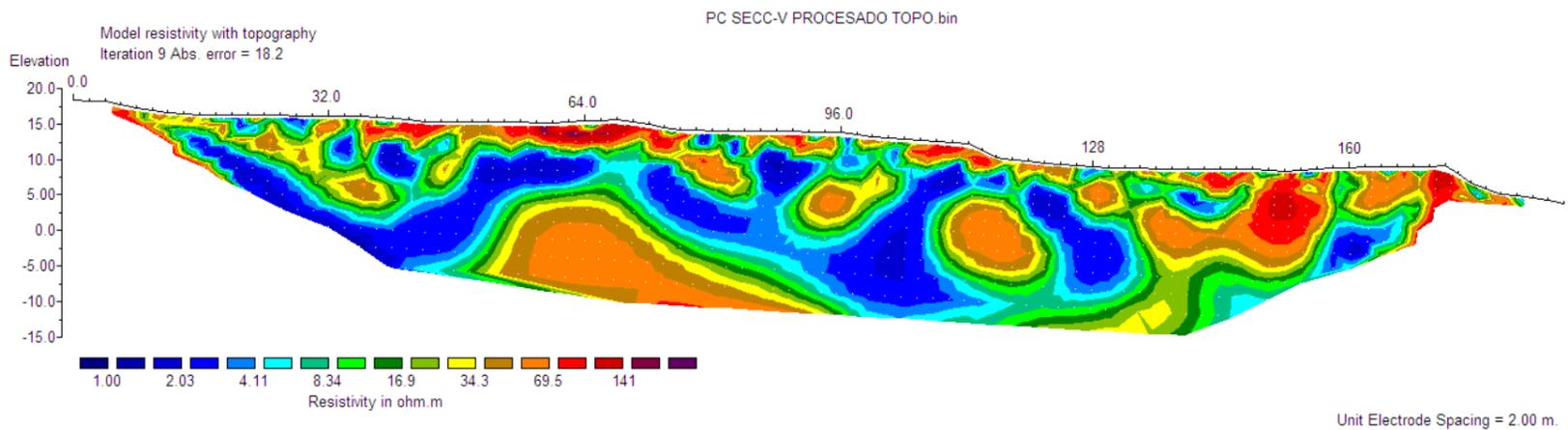
Anexo 4a: Corte de velocidades de cizalla o Vs en las progresivas correspondientes al centro de las puestas sísmicas PTA1 y pta2 de la sección – IV según método pasivo de registro del ruido ambiental (1D MAM)



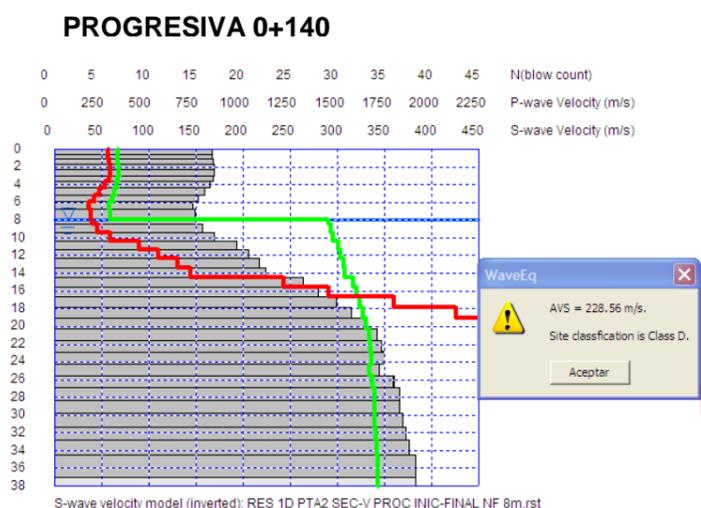
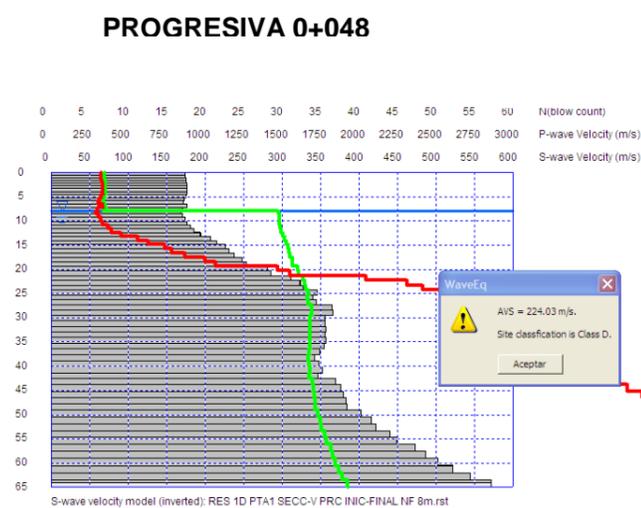
**Anexo4b: Corte de velocidades de cizalla o Vs según metodología 2D MASW por sección IV**



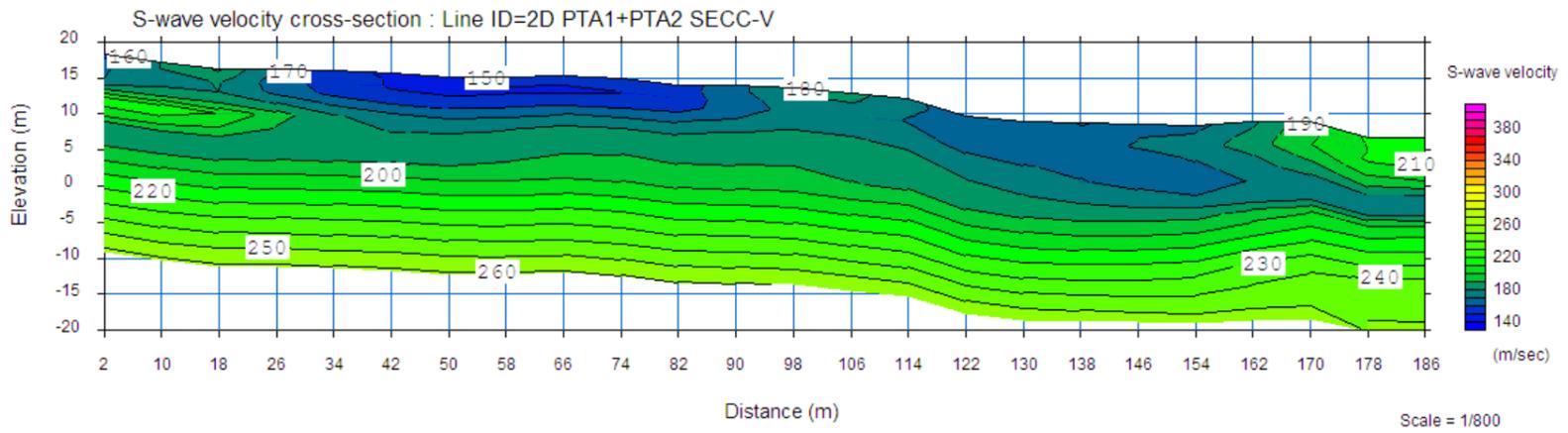
**Anexo4c: Corte del número de golpes N (SPT) calculado a partir de Vs sección IV**



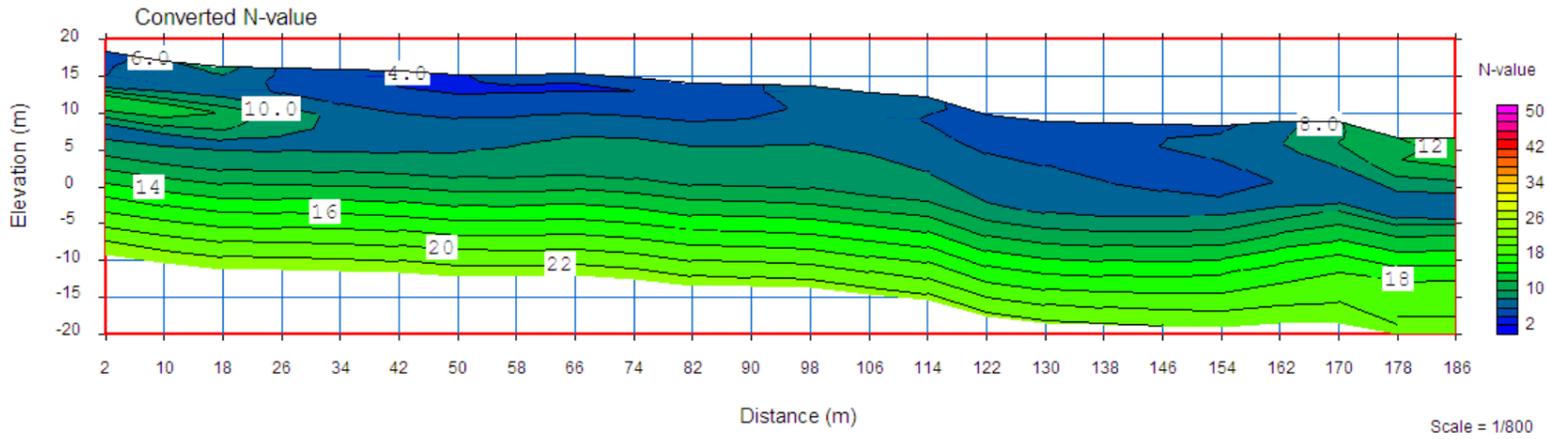
**Anexo5: Resultados de tomografía eléctrica por PC sección V**



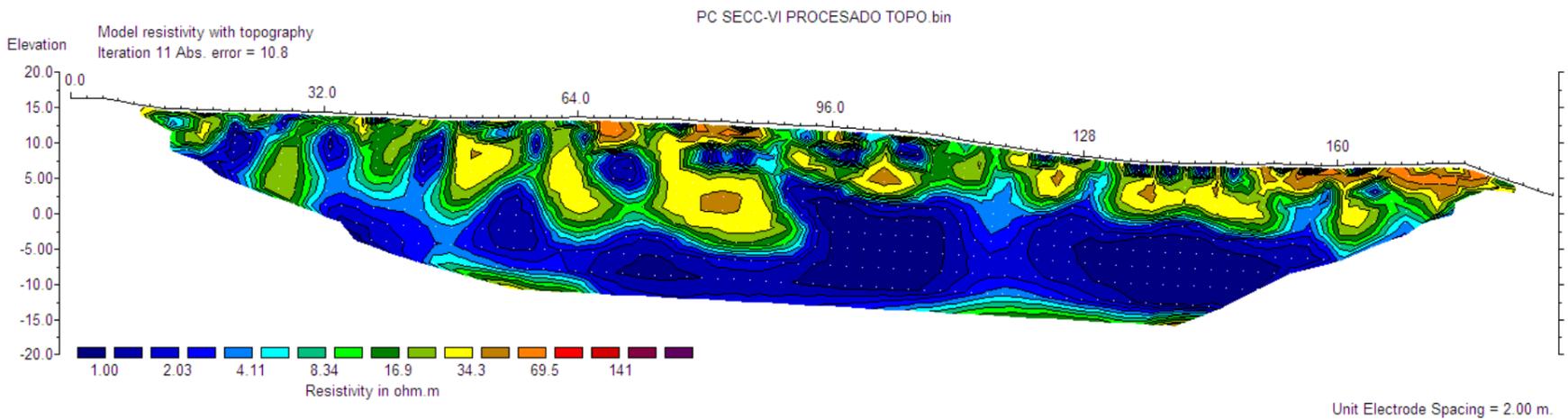
**Anexo5a: Corte de velocidades de cizalla o Vs en las progresivas correspondientes al centro de las puestas sísmicas PTA1 y PTA2 de la sección – V según método pasivo de registro del ruido ambiental (1D MAM)**



**Anexo5b: Corte de velocidades de cizalla o Vs según metodología 2D MASW por sección V**



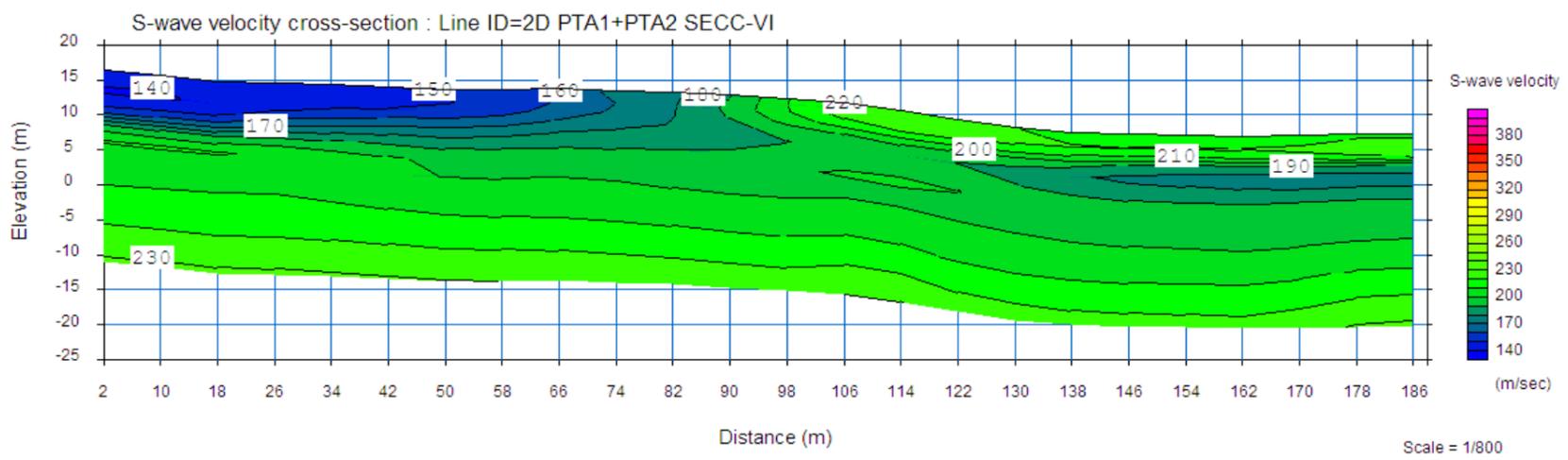
**Anexo5c: Corte del número de golpes N (SPT) calculado a partir de Vs sección V**



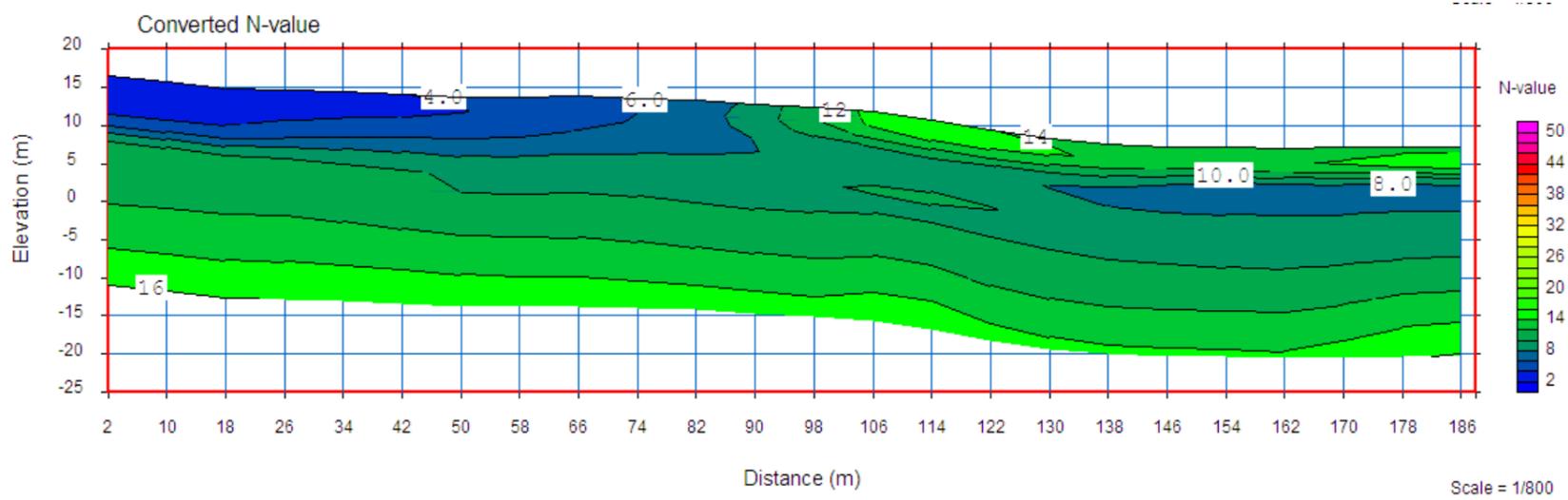
**Anexo6: Resultados de tomografía eléctrica por P. central sección VI**



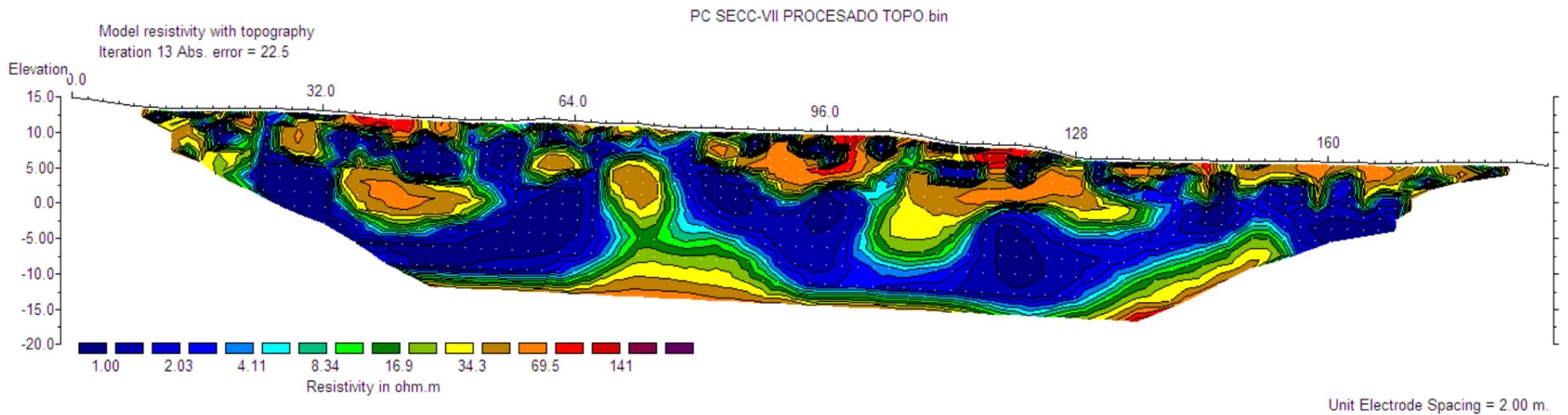
**Anexo6a: Corte de velocidades de cizalla o Vs en las progresivas correspondientes al centro de las puestas sísmicas PTA1 y PTA2 de la sección – VI según método pasivo de registro del ruido ambiental (1D MAM)**



**Anexo6b: Corte de velocidades de cizalla o Vs según metodología 2D MASW por sección VI**

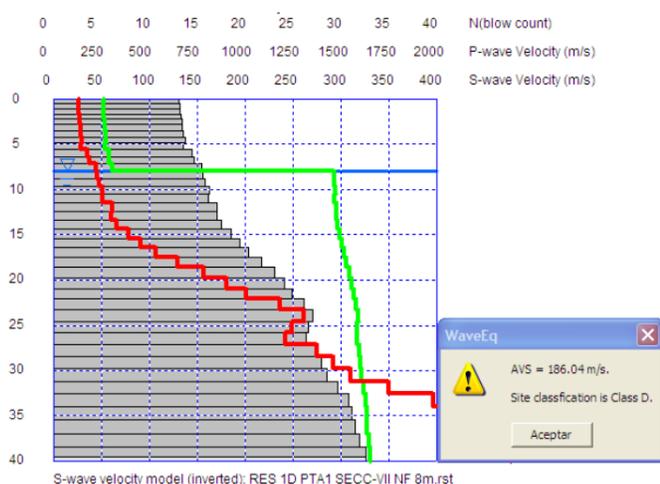


**Anexo6c: Corte del número de golpes N (SPT) calculado a partir de Vs sección VI**

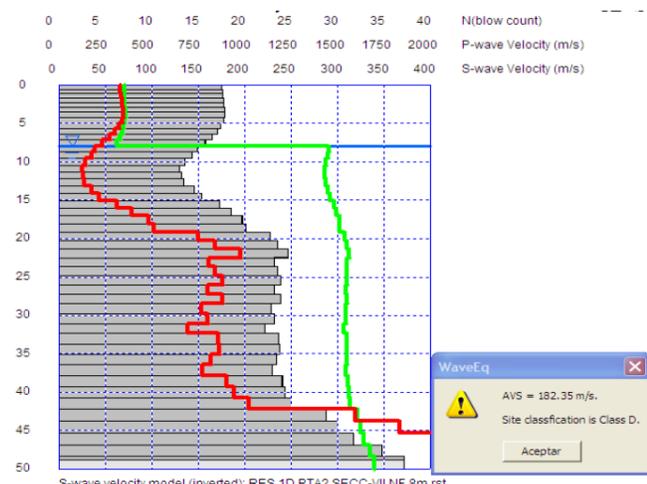


**Anexo7: Resultados de tomografía eléctrica por p. central sección VII**

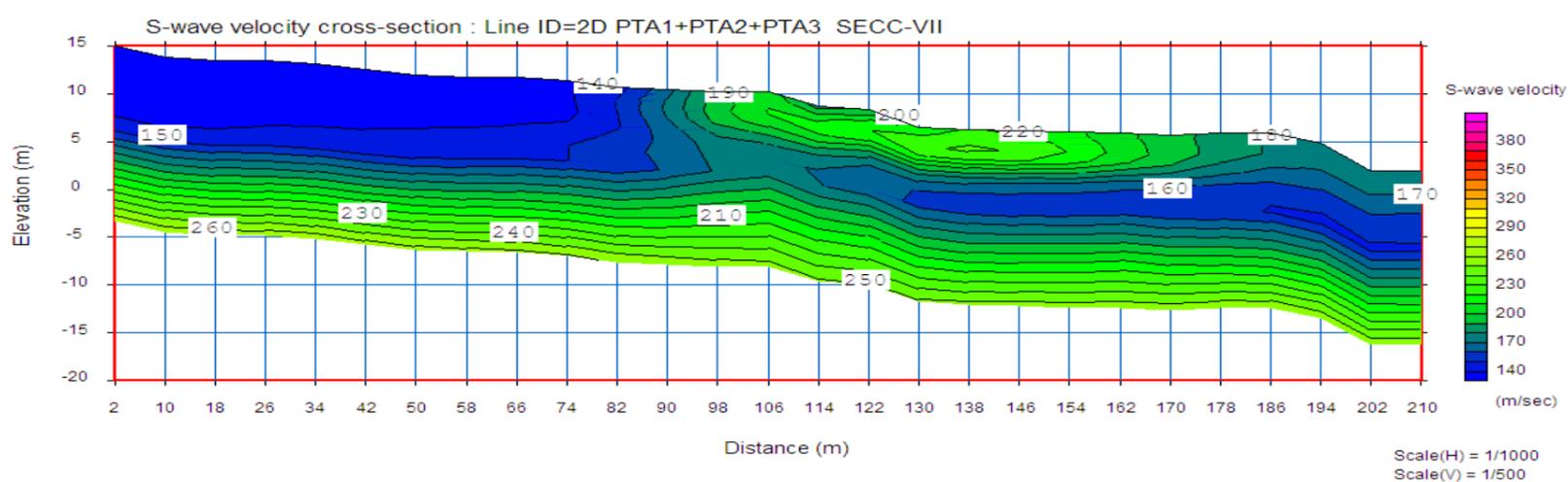
**PROGRESIVA 0+048**



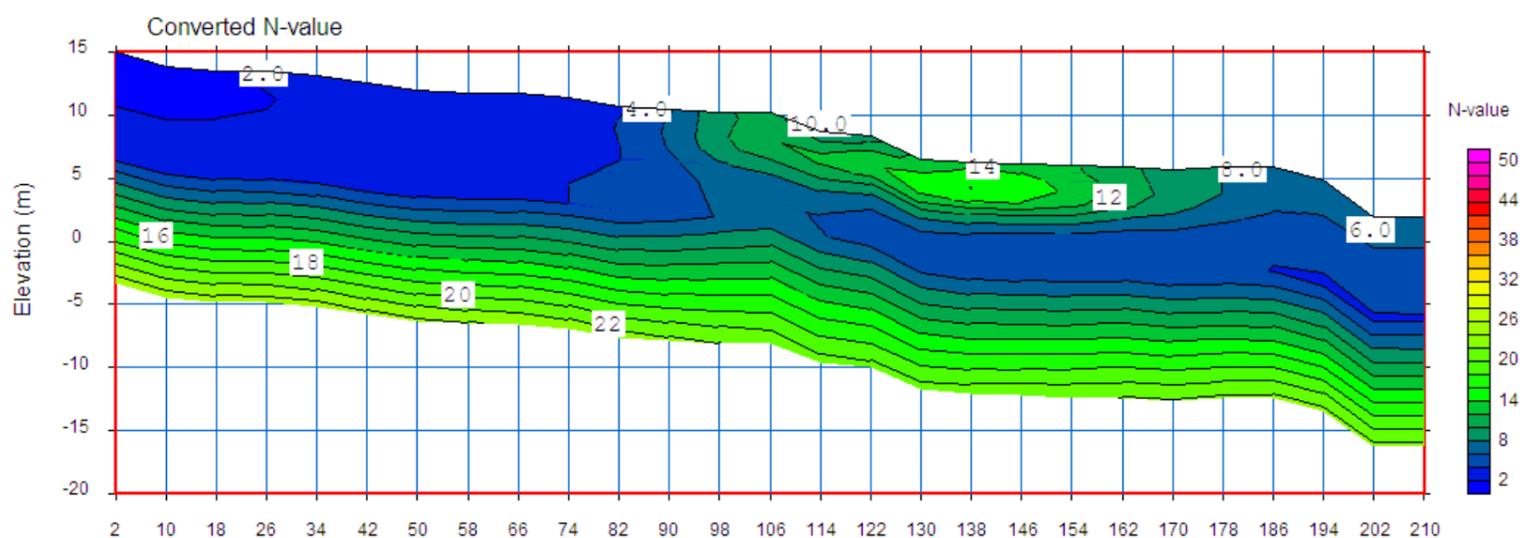
**PROGRESIVA 0+160**



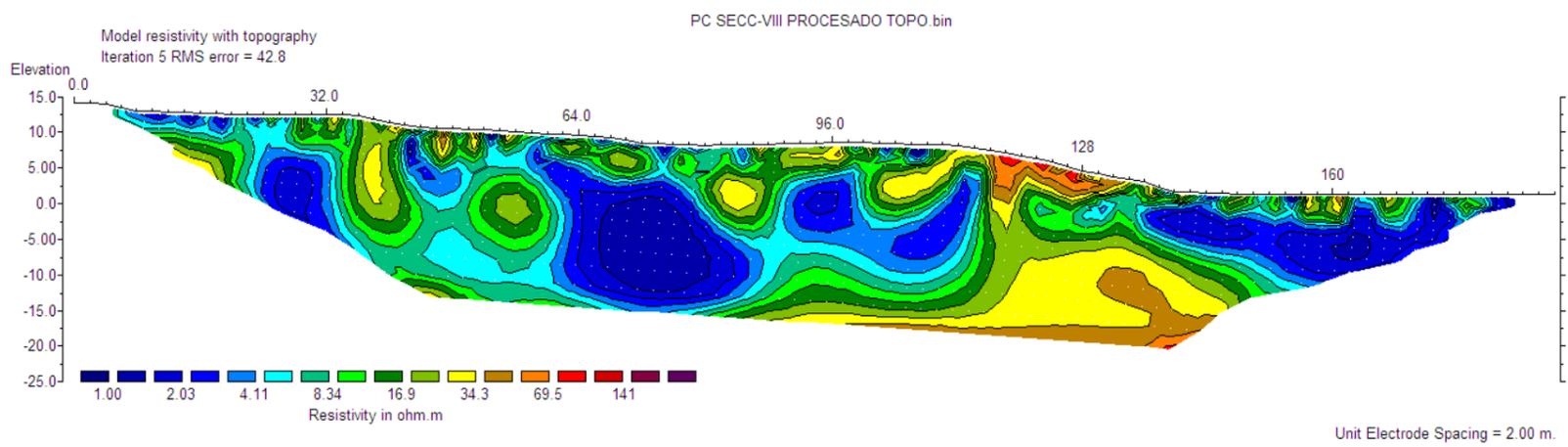
**Anexo7a: Corte de velocidades de cizalla o Vs en las progresivas correspondientes al centro de las puestas sísmicas PTA1 y PTA2 de la sección – VI según método pasivo de registro del ruido ambiental (1D MAM)**



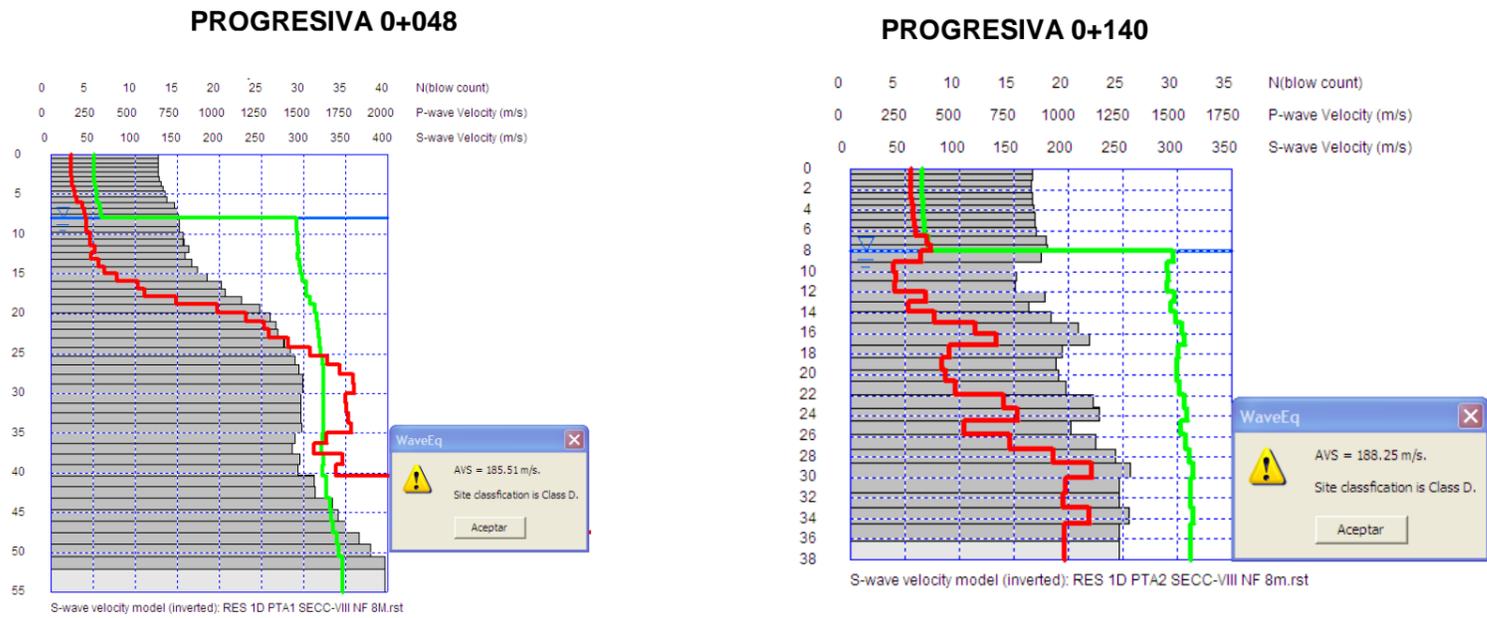
**Anexo7b: Corte de velocidades de cizalla o Vs según metodología 2D MASW por sección VII**



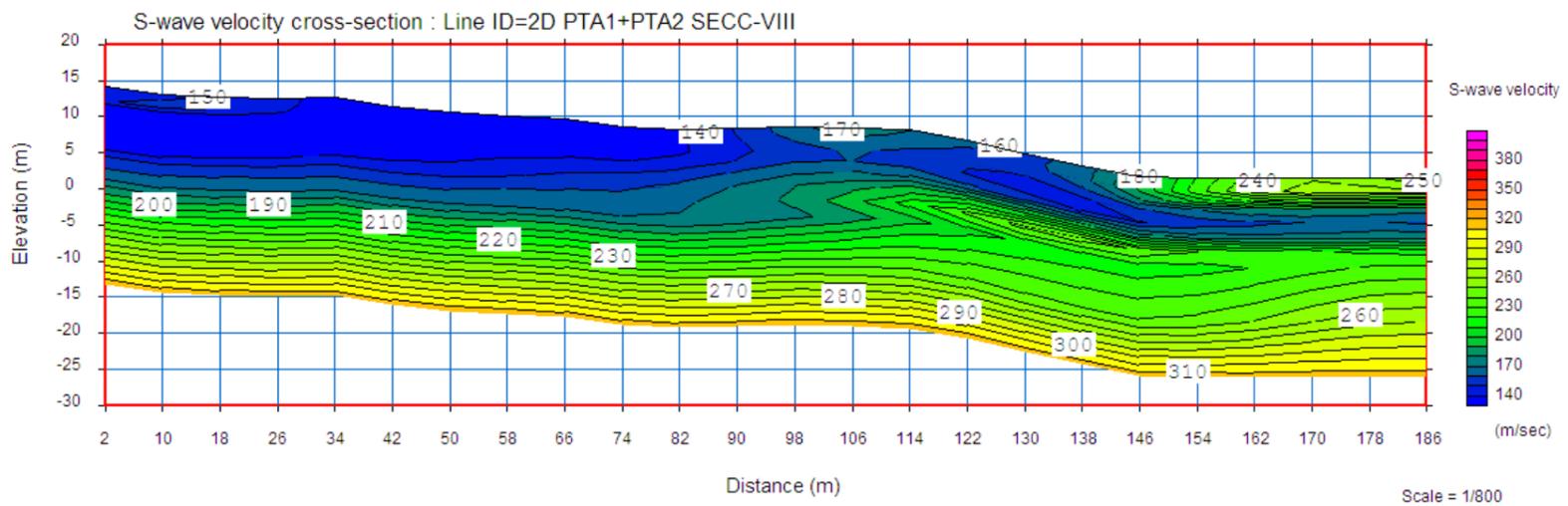
**Anexo7c: Corte del número de golpes N (SPT) calculado a partir de Vs sección VII**



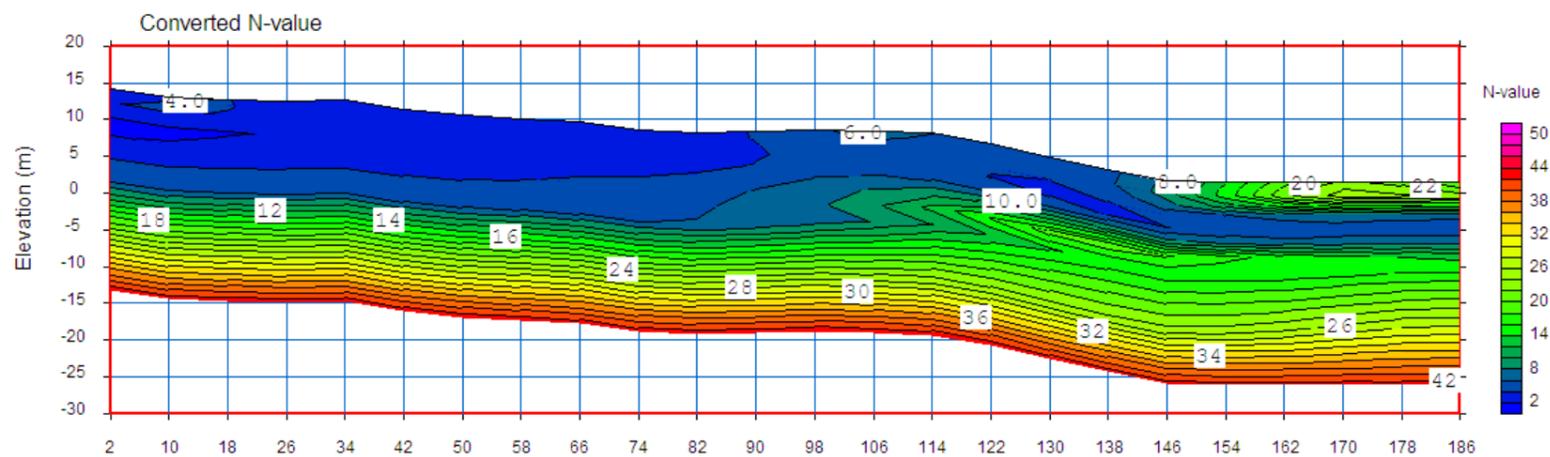
**Anexo8: Resultados de tomografía eléctrica por p. central sección VIII**



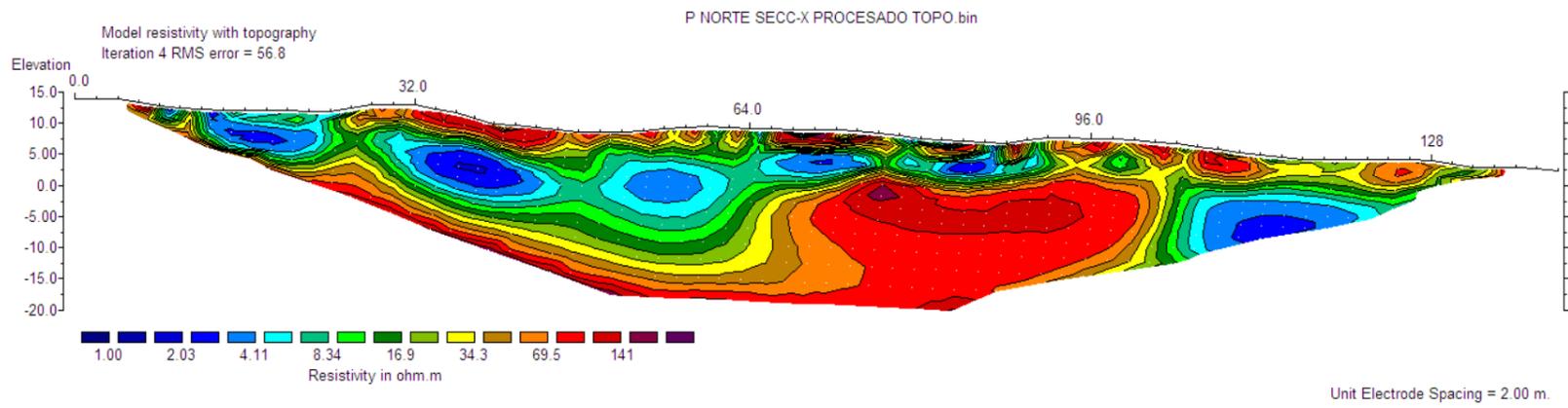
**Anexo8a: Corte de velocidades de cizalla o Vs en las progresivas correspondientes al centro de las puestas sísmicas PTA1 y PTA2 de la sección – VIII según método pasivo de registro del ruido ambiental (1D MAM)**



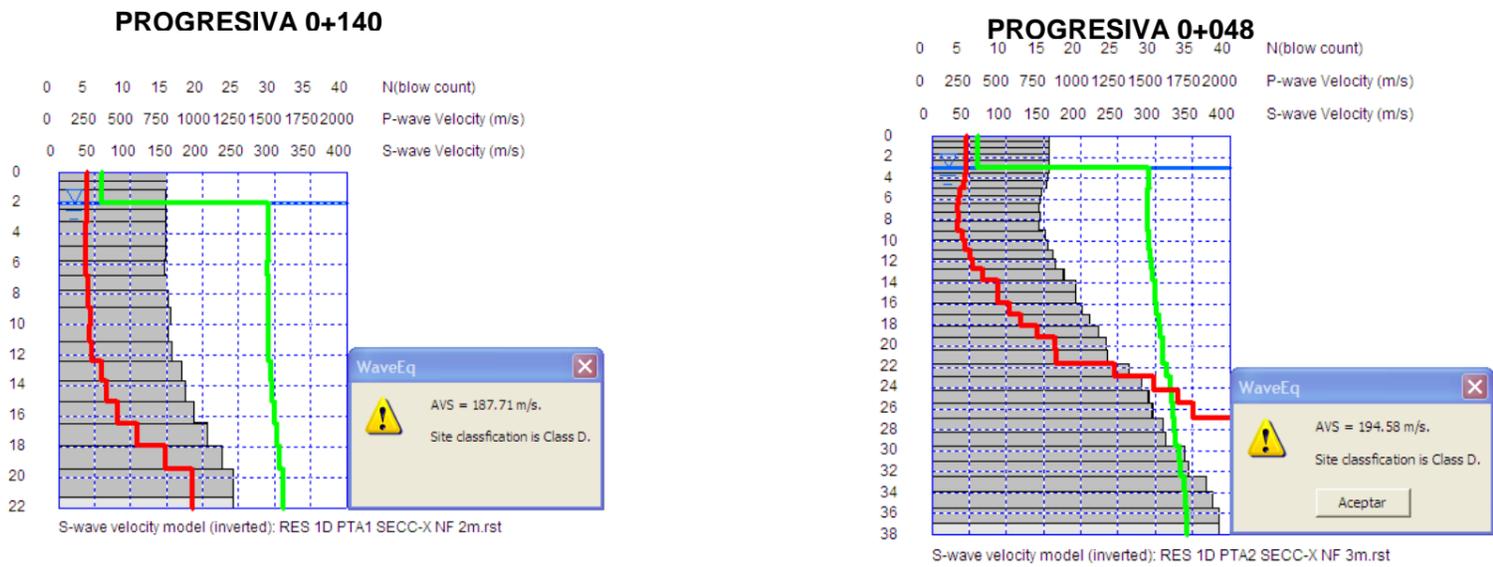
**Anexo8b: Corte de velocidades de cizalla o vs según metodología 2D MASW por sección VIII**



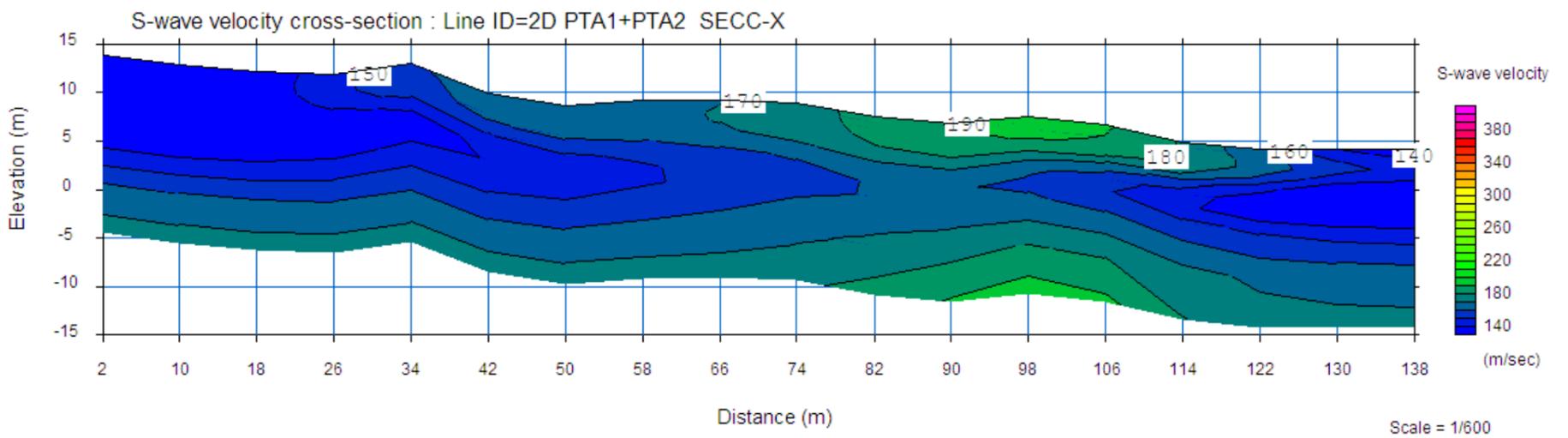
**Anexo8c: Corte del número de golpes N (SPT) calculado a partir de Vs sección VIII**



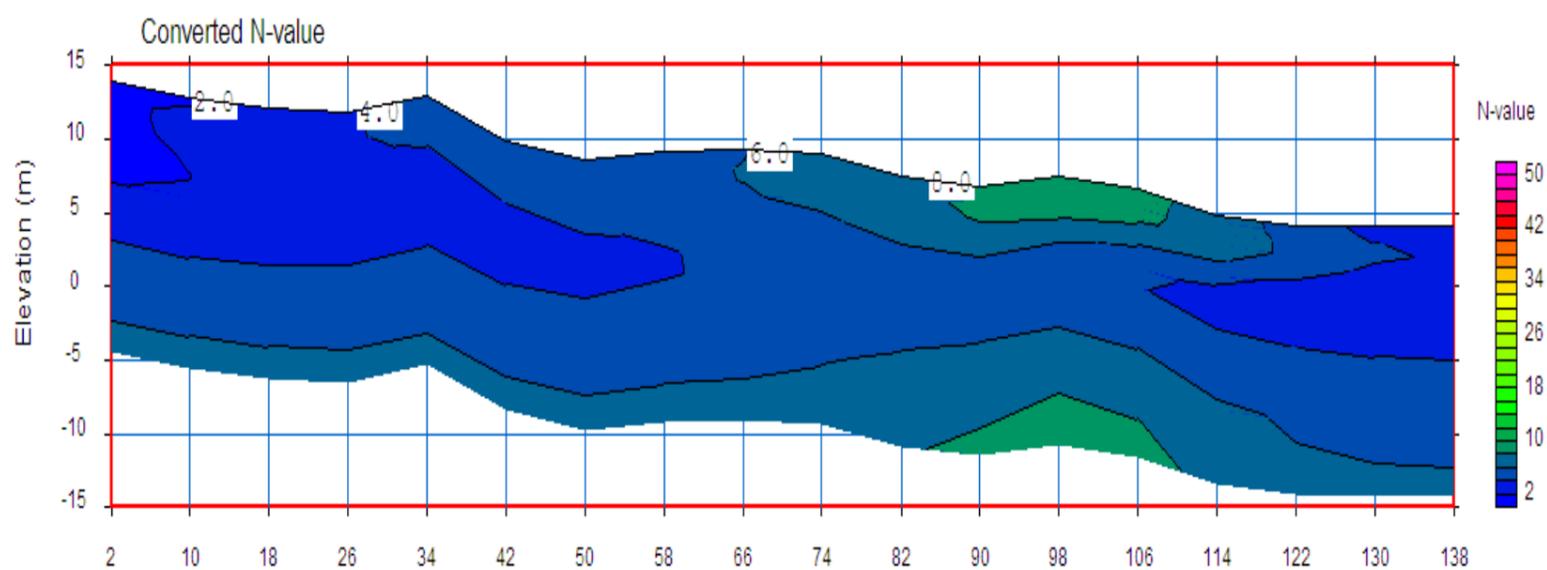
**Anexo9: Resultados de tomografía eléctrica por p. central sección X**



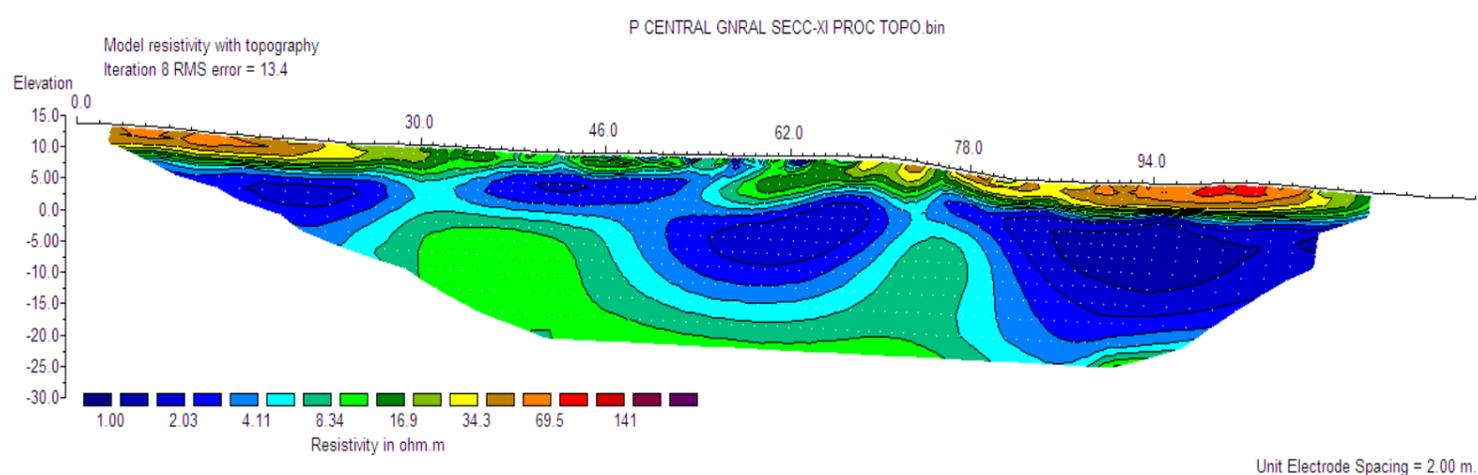
**Anexo9a: Corte de velocidades de cizalla o Vs en las progresivas correspondientes al centro de las puestas sísmicas PTA1 y PTA2 de la sección – X según método pasivo de registro del ruido ambiental (1D MAM)**



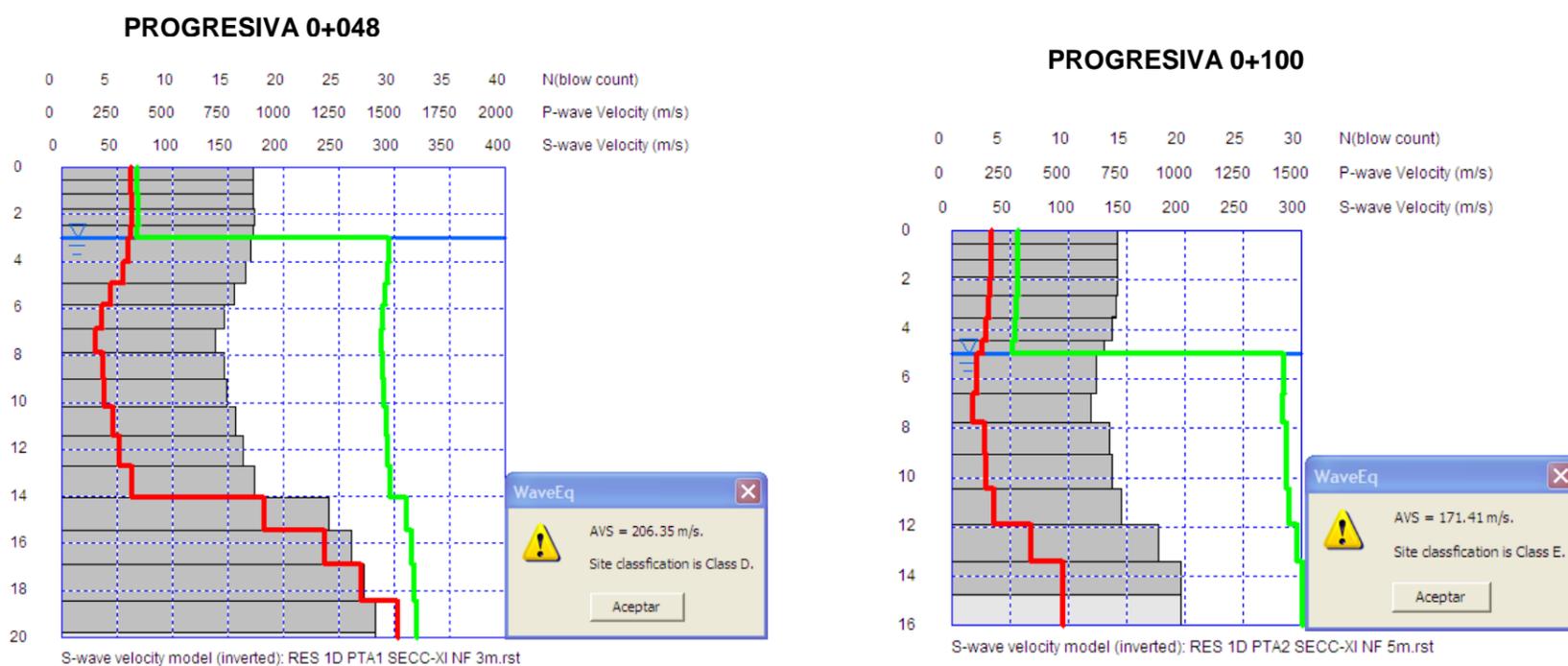
**Anexo9b: Corte de velocidades de cizalla o Vs según metodología 2D MASW por sección X**



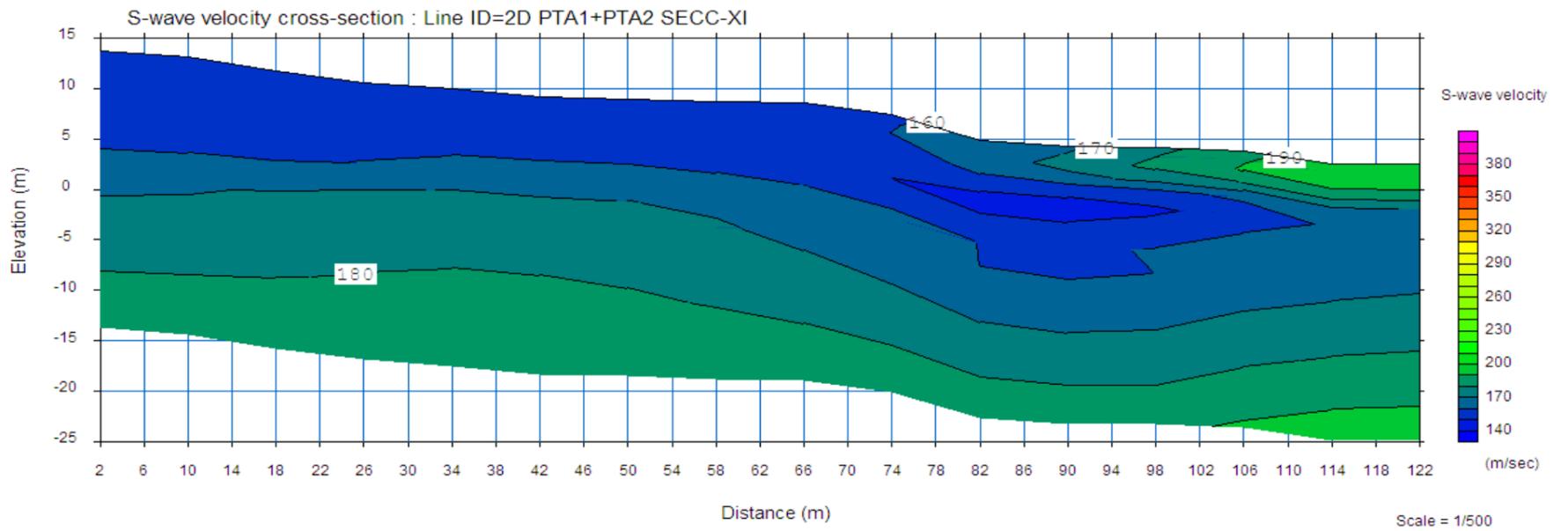
Anexo9c: Corte del número de golpes N (SPT) calculado a partir de Vs sección X



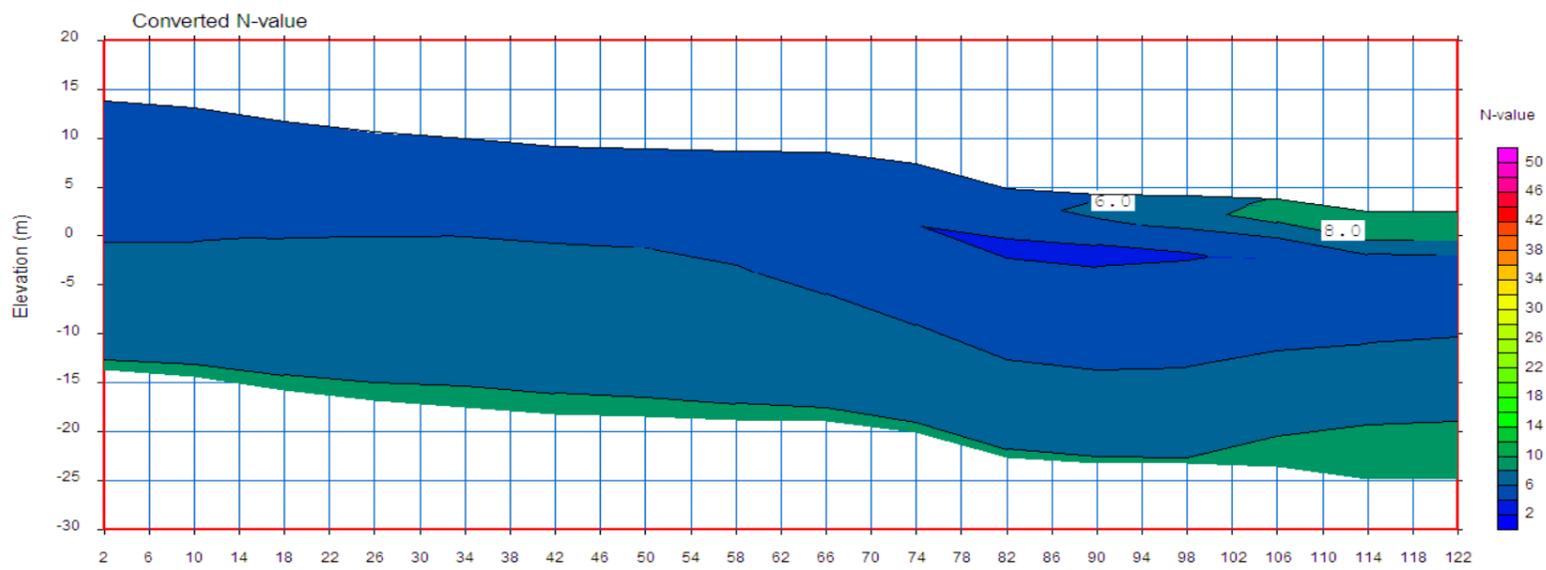
Anexo10: Resultados de tomografía eléctrica por p. central sección XI



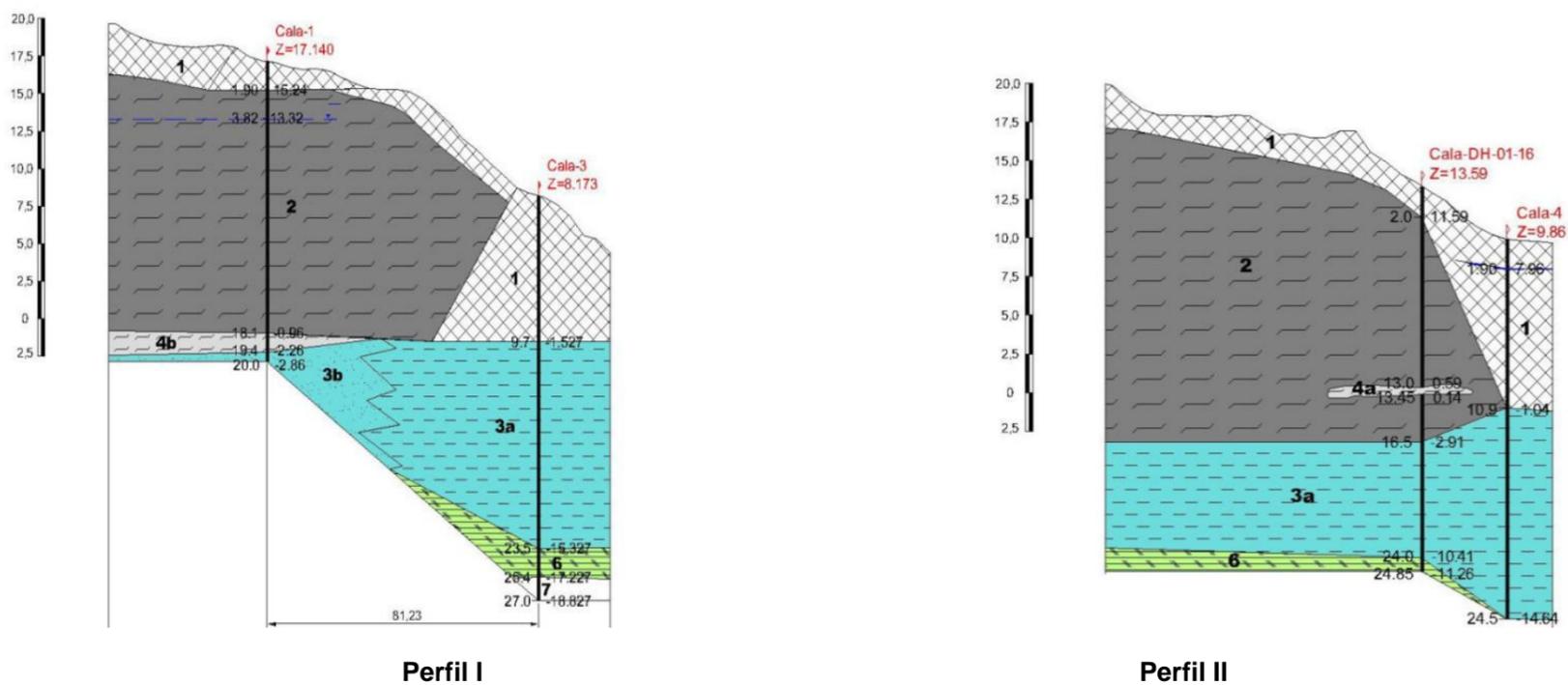
Anexo10a: Corte de velocidades de cizalla o vs en las progresivas correspondientes al centro de las puestas sísmicas PTA1 y PTA2 de la sección – XI según método pasivo de registro del ruido ambiental (1D MAM)

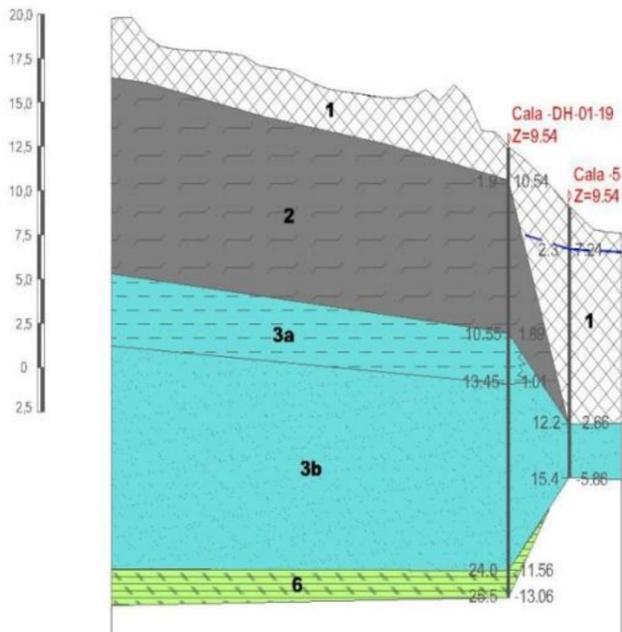


Anexo10b: Corte de velocidades de cizalla o Vs según metodología 2D MASW por sección XI

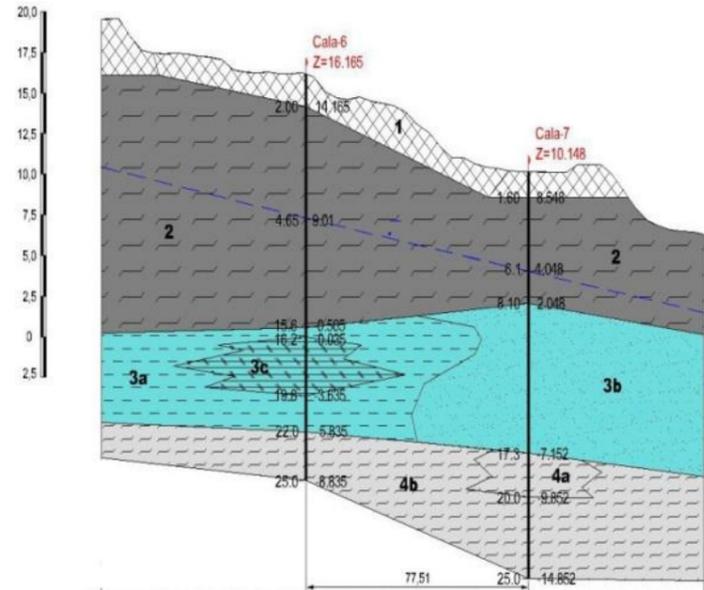


Anexo10c: Corte del número de golpes N (SPT) calculado a partir de Vs sección XI

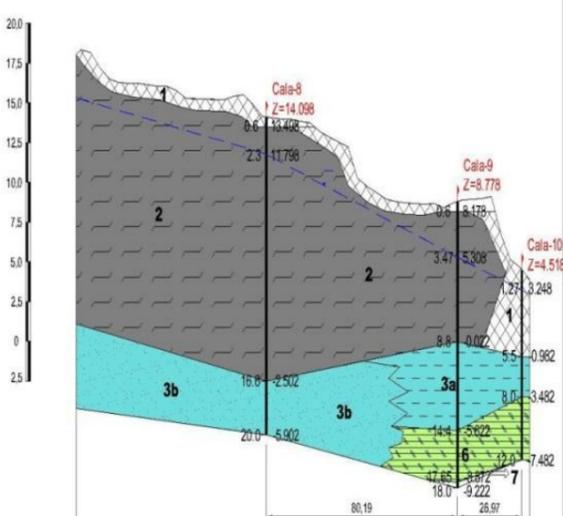




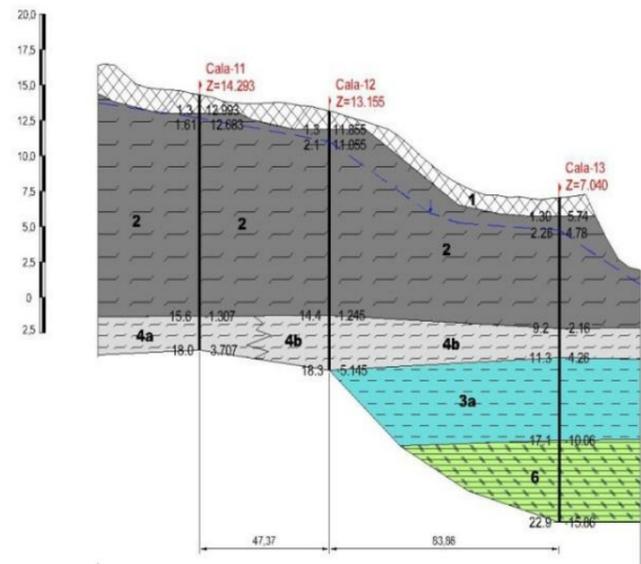
Perfil III



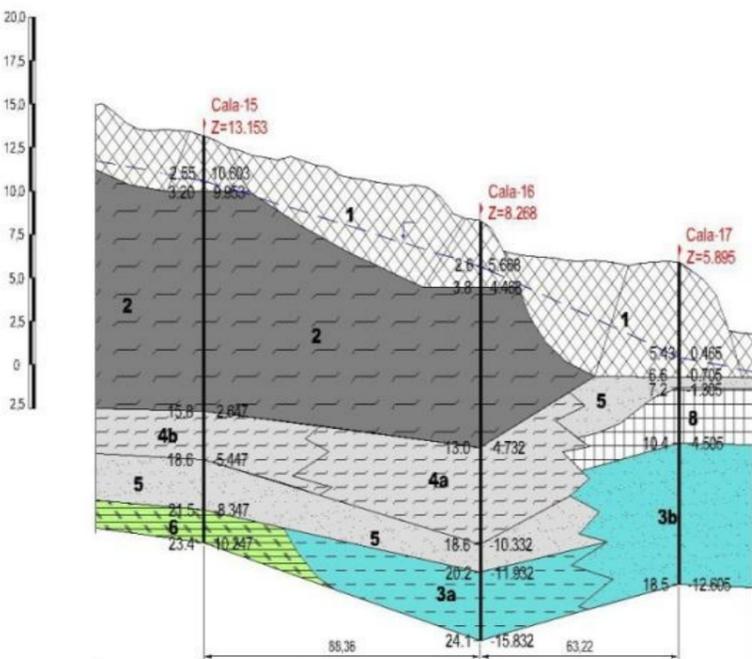
Perfil IV



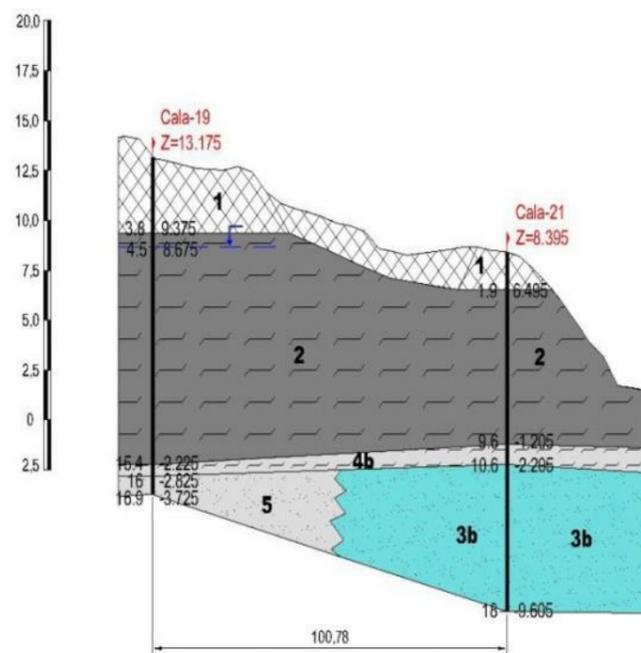
Perfil V



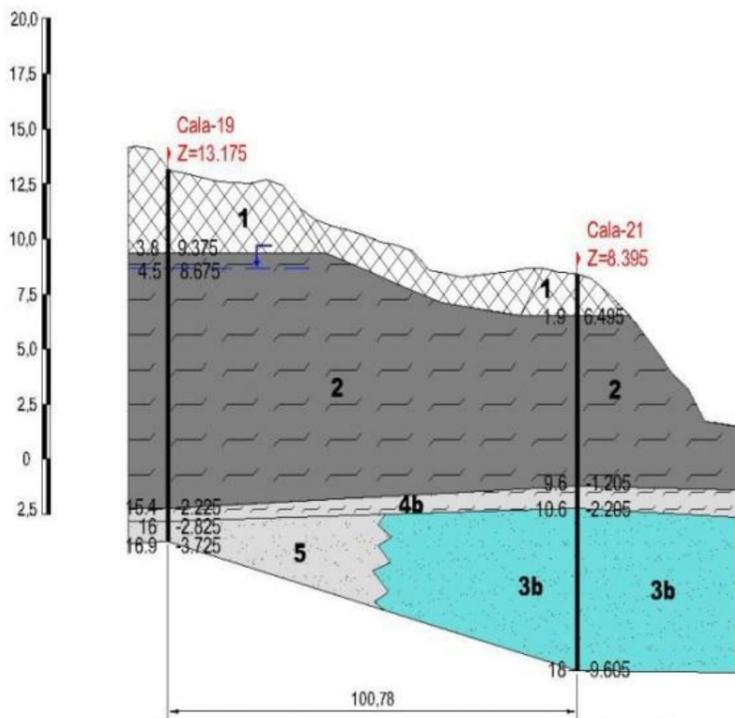
Perfil VI



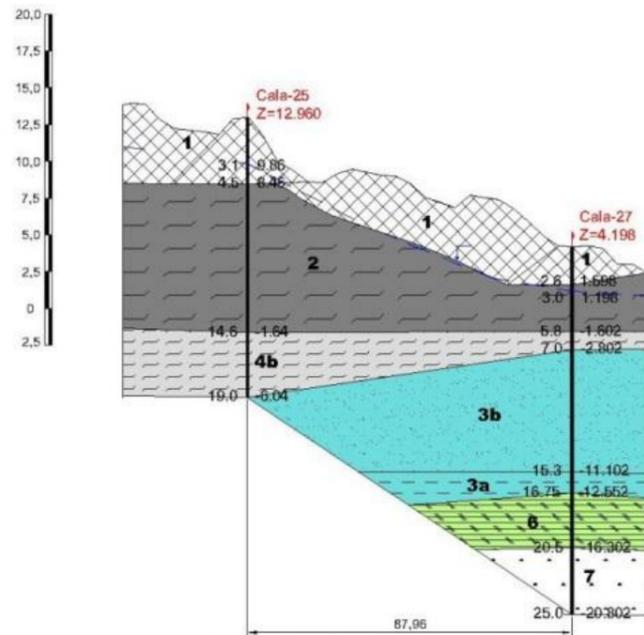
Perfil VII



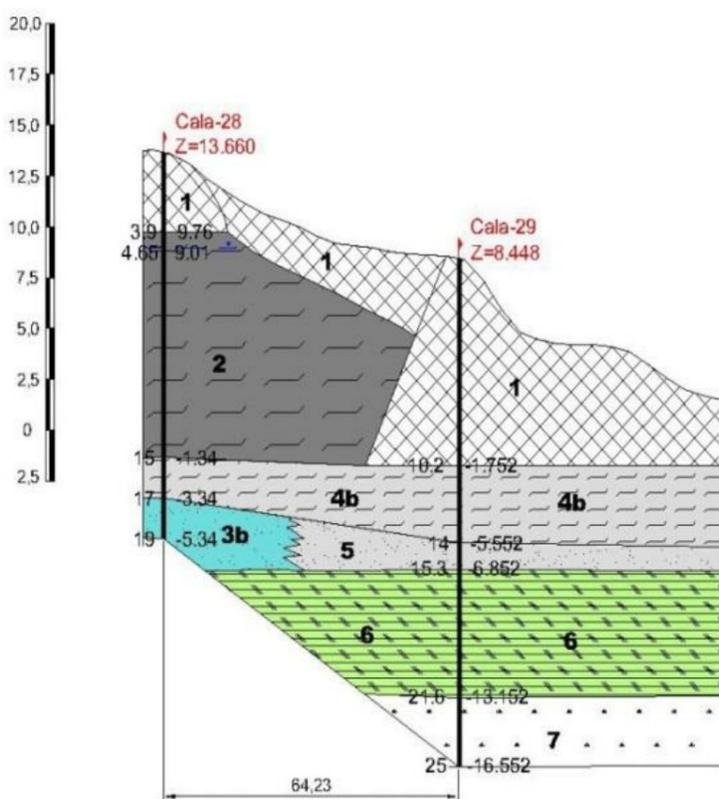
Perfil VIII



Perfil IX



Perfil X



Perfil XI

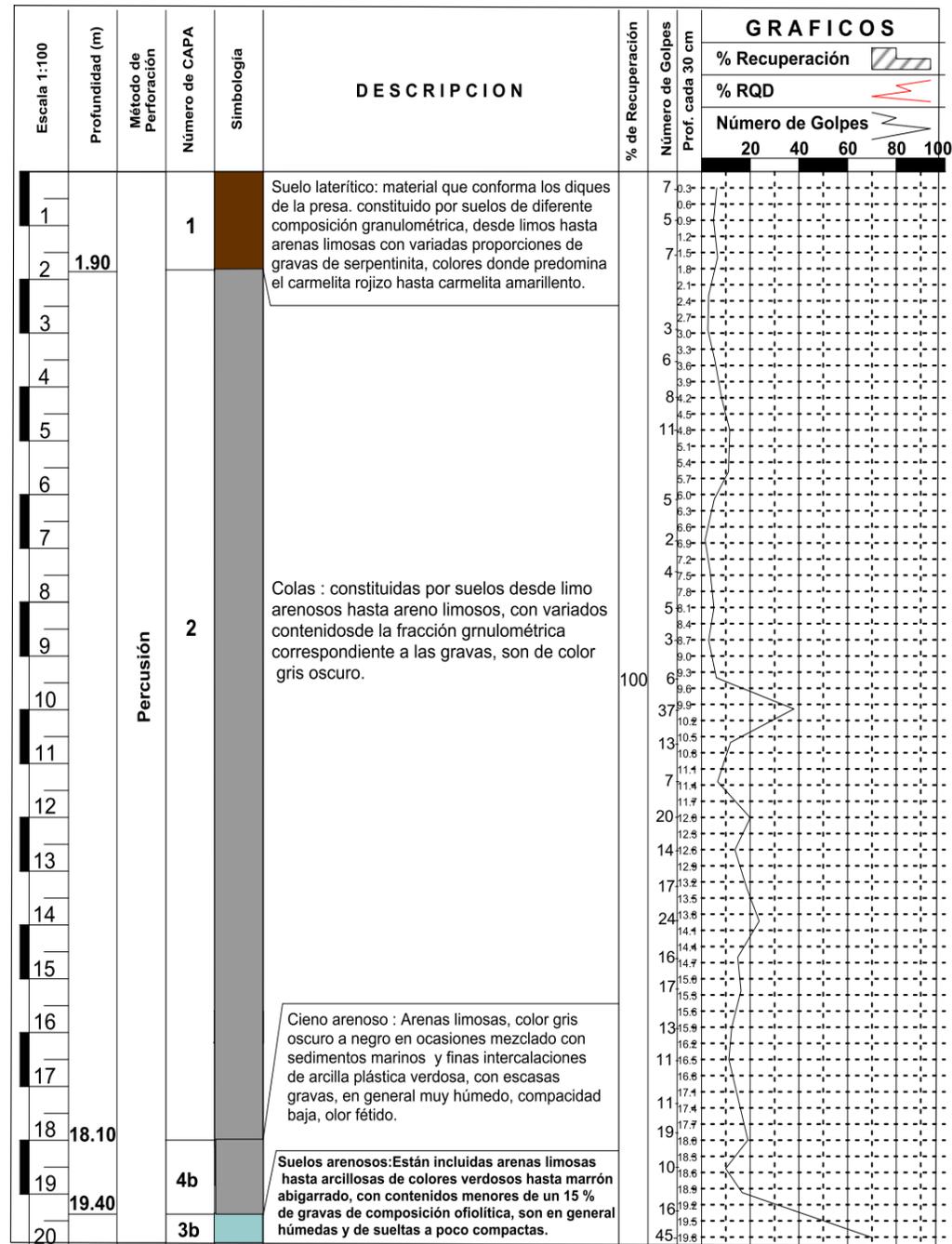
**Leyenda**

- 1** Relleno laterítico
- 2** Cola
- 3a** Suelos arcillosos
- 3b** Suelos arenosos
- 3c** Suelos arcillosos
- 4a** Cieno limoso
- 4b** Cieno arenoso
- 5** Arenas limosas
- 6** Eluvio de serpentina - gabro
- 7** Serpentina muy alterada
- 8** Relleno antropico

**Anexo 11: Perfiles ingeniero geológicos con su leyenda**

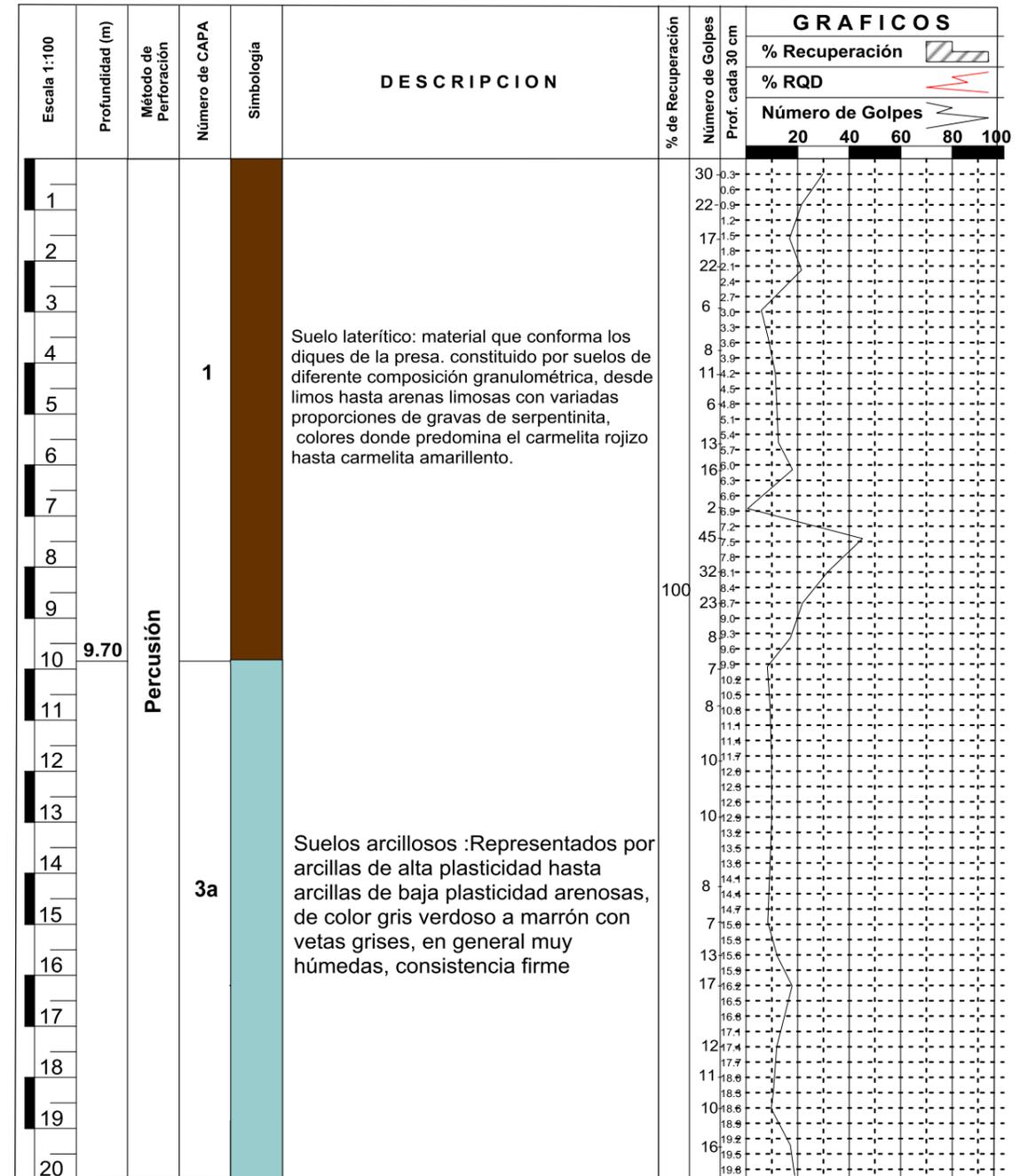
## Anexo 12: Columnas litológicas

OBRA: Presa de Colas ECG	Fecha de perforación: 26-02-2013
CALA: 1 COORDENADAS X: 701235.609 Y: 222709.642 Z: 16.165	Prof. del Nivel Freático (m): 3.82
Profundidad Total (m): 25.00	Cota del Nivel Freático (m):



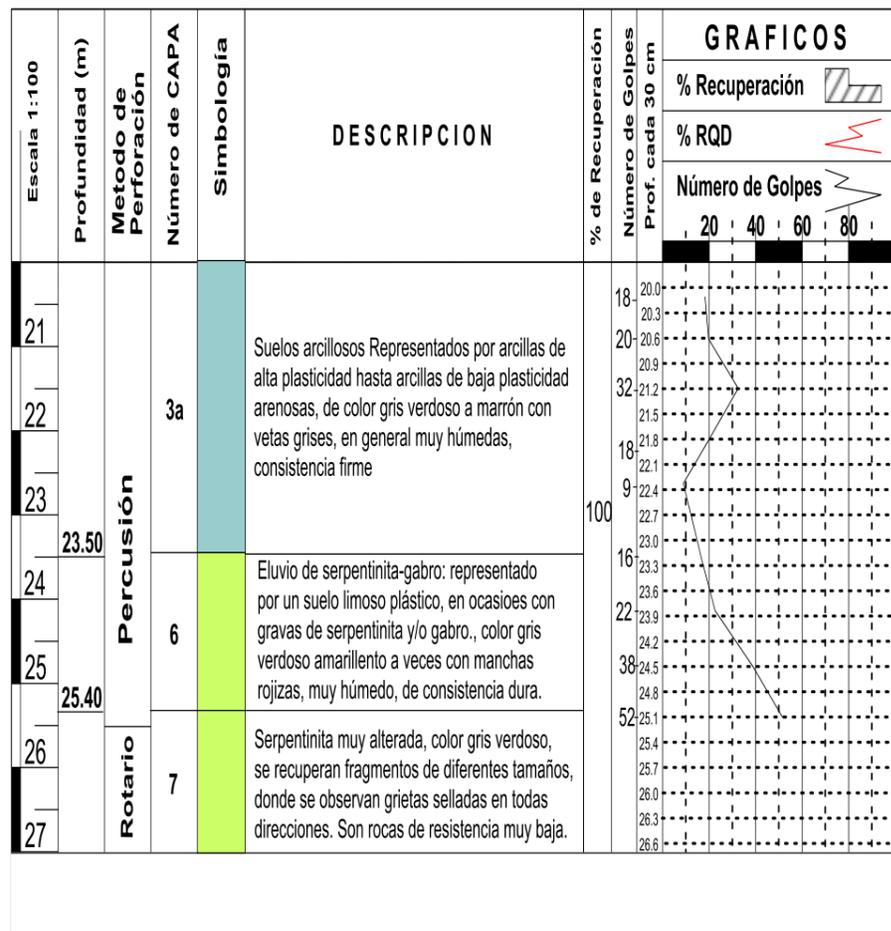
Cala 1

OBRA: Presa de Colas ECG	Fecha de perforación: 12-03-2013
CALA: 3 COORDENADAS X: 702485.644 Y: 222604.424 Z: 8.173	Prof. del Nivel Freático (m): 3.20
Profundidad Total (m): 27.00	Cota del Nivel Freático (m):



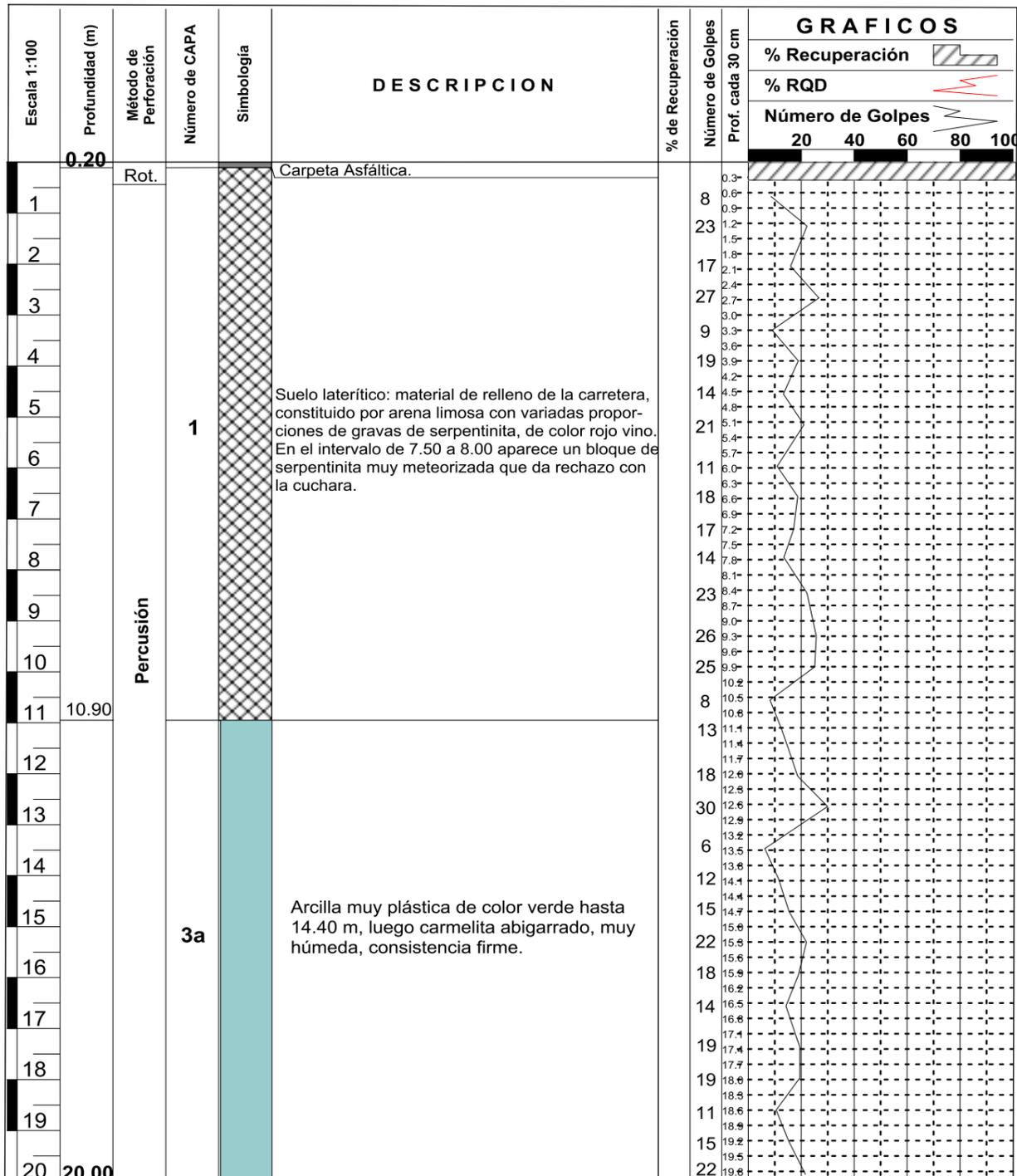
Cala 3

OBRA : Presa de Cola ECG				Fecha de perforación: 12-03-2013
CALA: 3 Cont	COORDENADAS X:	Y:	Z:	Prof. del Nivel Freático (m): 3.20
Profundidad Total (m): 27.00				Cota del Nivel Freático (m):



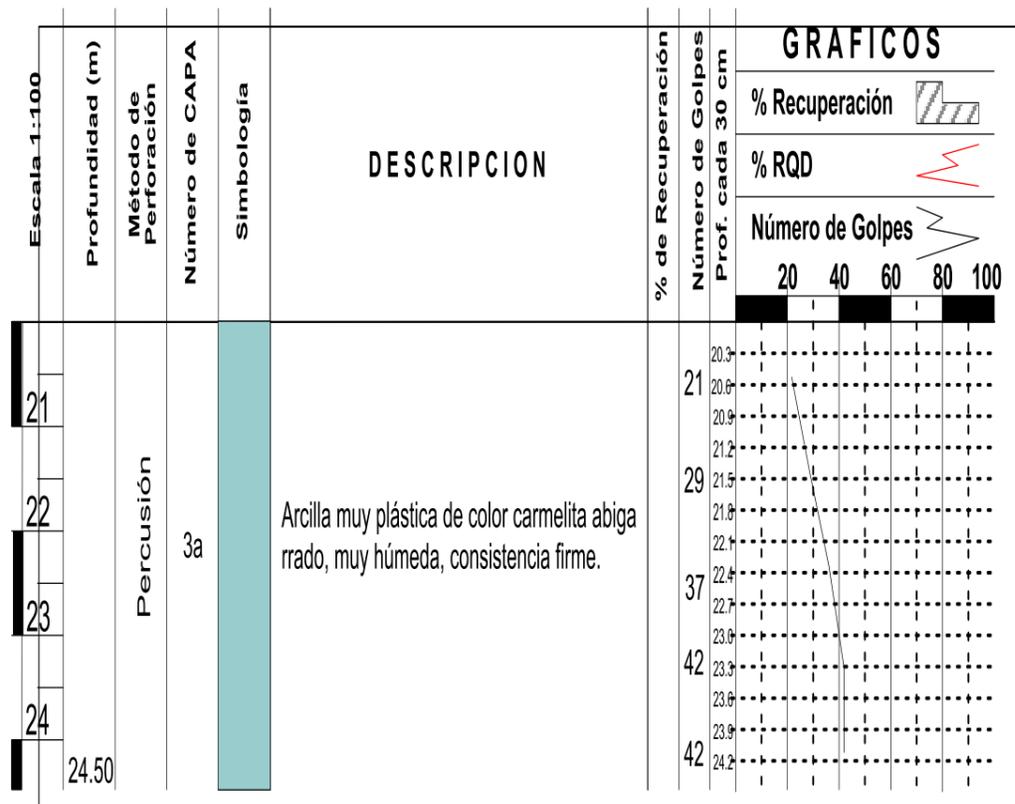
Cont. Cala 3

OBRA: Presa de Colas ECG				Fecha de perforación: 26-03-2013
CALA: 4	COORDENADAS X:	Y:	Z:	Prof. del Nivel Freático (m): 1.90
Profundidad Total (m): 24.50				Cota del Nivel Freático (m): 7.96



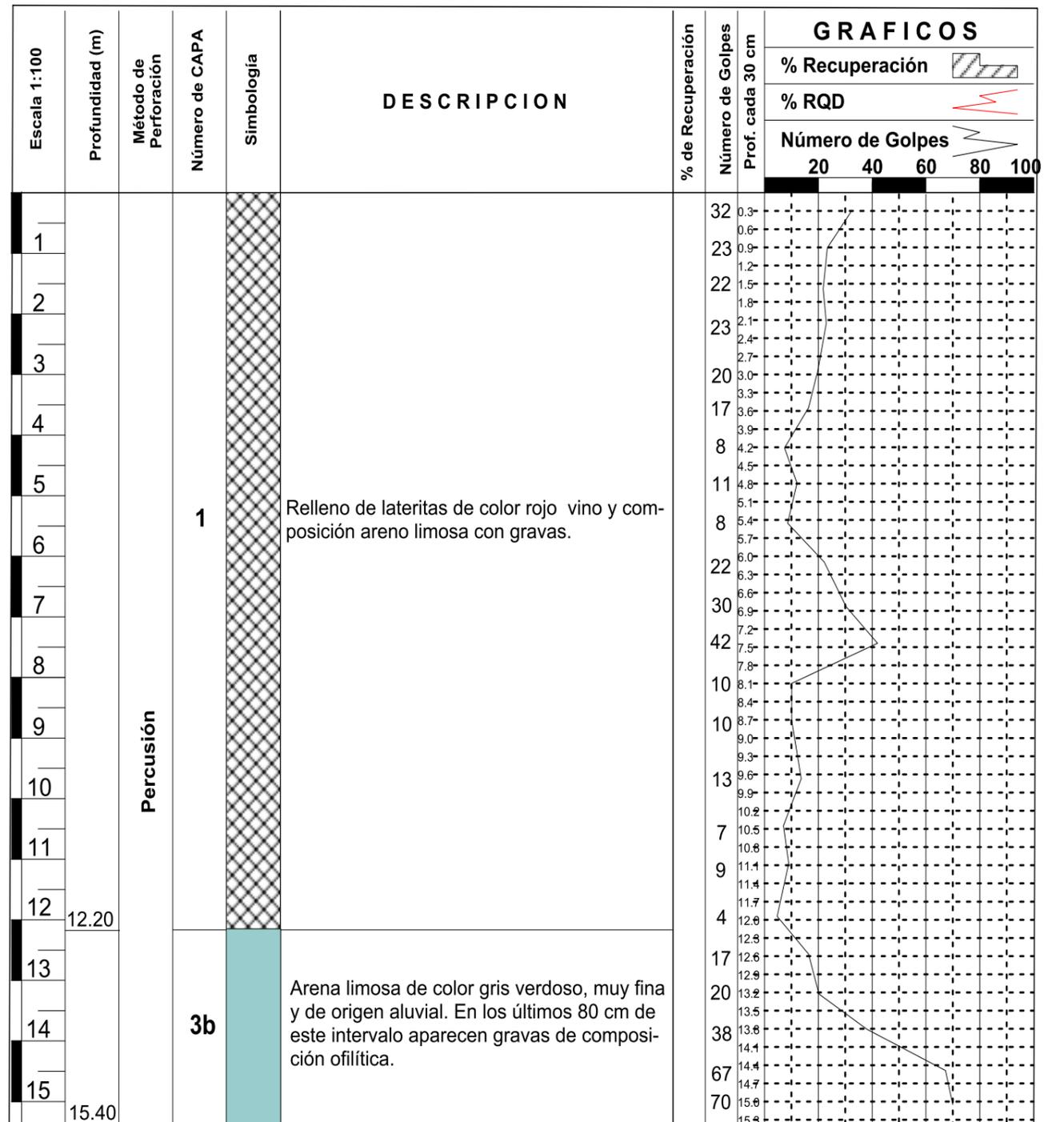
Cala 4

OBRA : Presa de Colas ECG		Fecha de perforación:26-03-2013
CALA: 4 (cont)	COORDENADAS X:702278.98 Y:222385.32 Z: 9.86	Prof. del Nivel Freático (m): 1.90
Profundidad Total (m): 24.50		Cota del Nivel Freático (m): 7.96



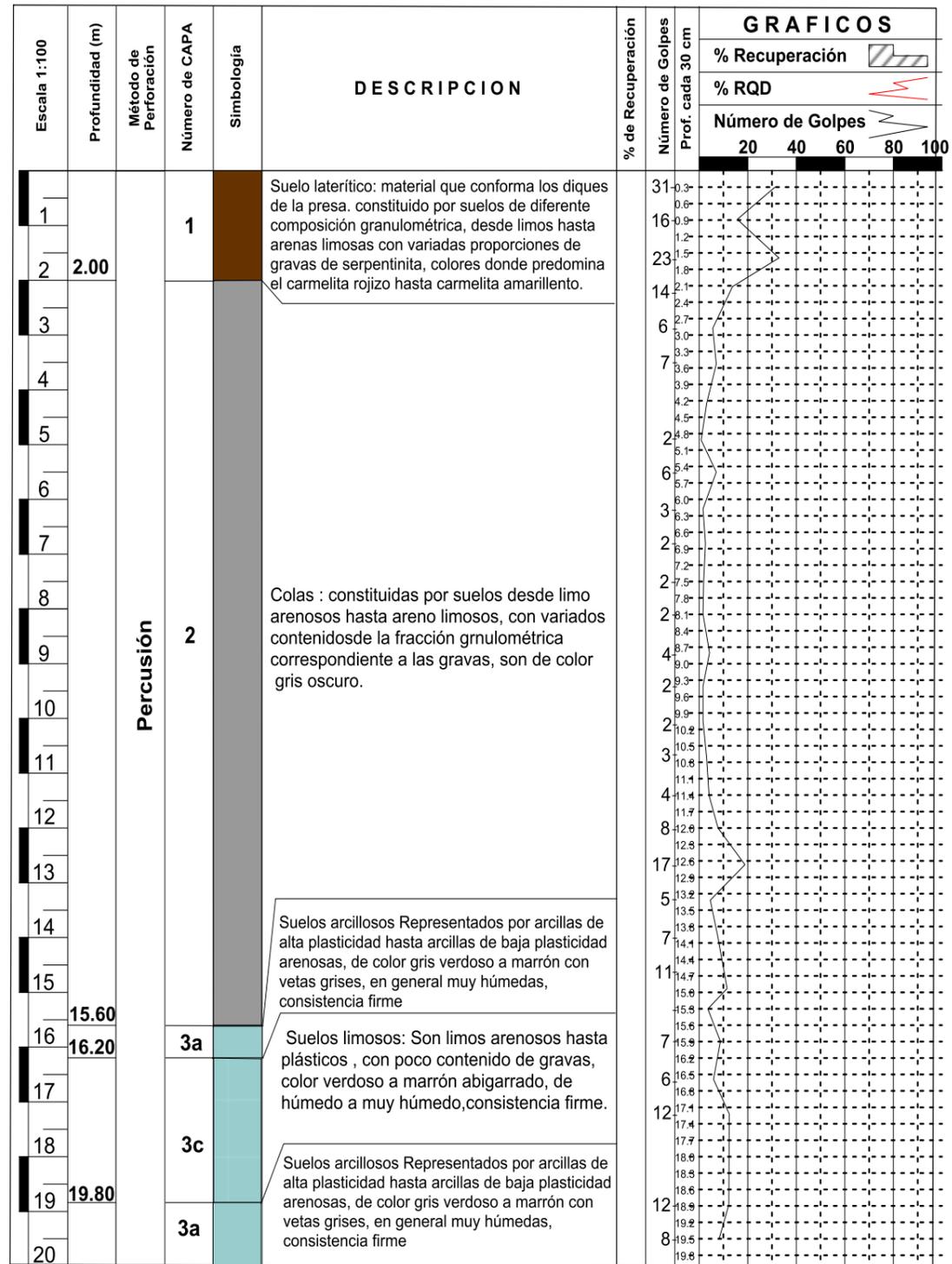
Cont. Cala 4

OBRA: Presa de Colas ECG			Fecha de perforación:20-03-2013
CALA: 5	COORDENADAS X:701385.30 Y:222396.18 Z: 9.54	Prof. del Nivel Freático (m):2.30	
Profundidad Total (m): 15.40			Cota del Nivel Freático (m): 7.24



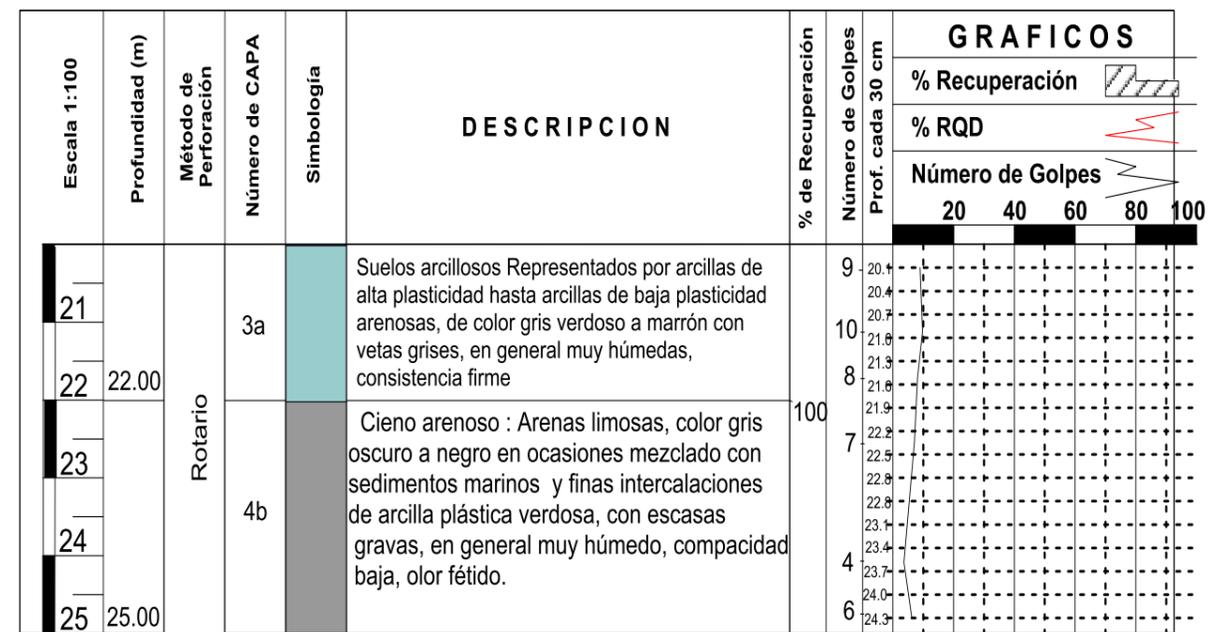
Cala 5

<b>OBRA: Presa de Colas ECG</b>			<b>Fecha de perforación: 10-12-2012</b>
<b>CALA: 6</b>	<b>COORDENADAS X:701235.609 Y:222709.642 Z:16.165</b>	<b>Prof. del Nivel Freático (m): 8.85</b>	
<b>Profundidad Total (m): 25</b>			<b>Cota del Nivel Freático (m):</b>



Cala 6

<b>OBRA : Presa de Colas ECG</b>			<b>Fecha de perforación: 10-12-2012</b>
<b>CALA: 6 cont.</b>	<b>COORDENADAS X:701232.609 Y:222709.642 Z:16.165</b>	<b>Prof. del Nivel Freático (m):</b>	
<b>Profundidad Total (m): 25.00</b>			<b>Cota del Nivel Freático (m):</b>



Cont. Cala 6

OBRA: Presa de Colas ECG

Fecha de perforación: 07-12-2012

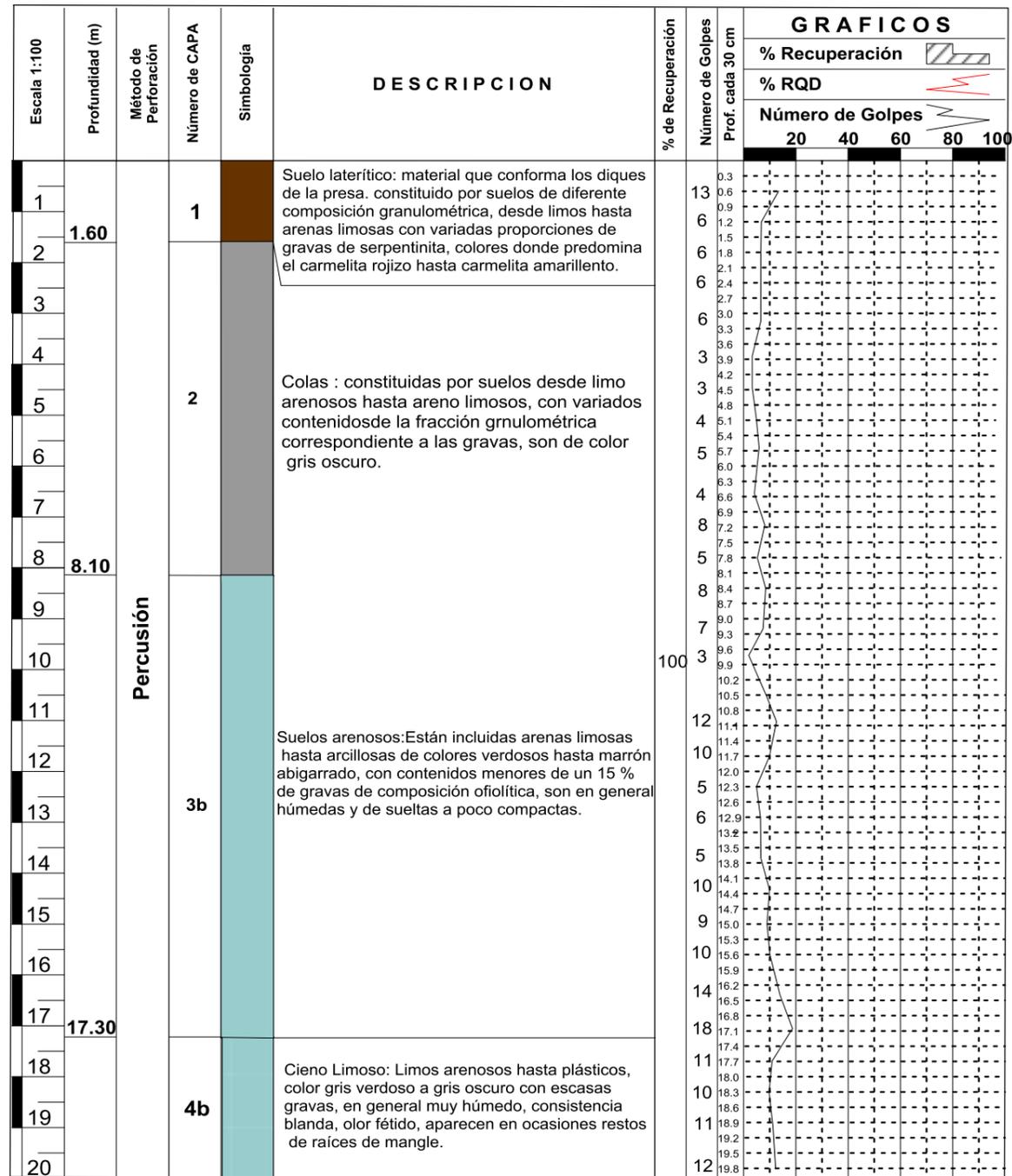
CALA: 7

COORDENADAS X:701163.607 Y:222738.346 Z:10.148

Prof. del Nivel Freático (m):

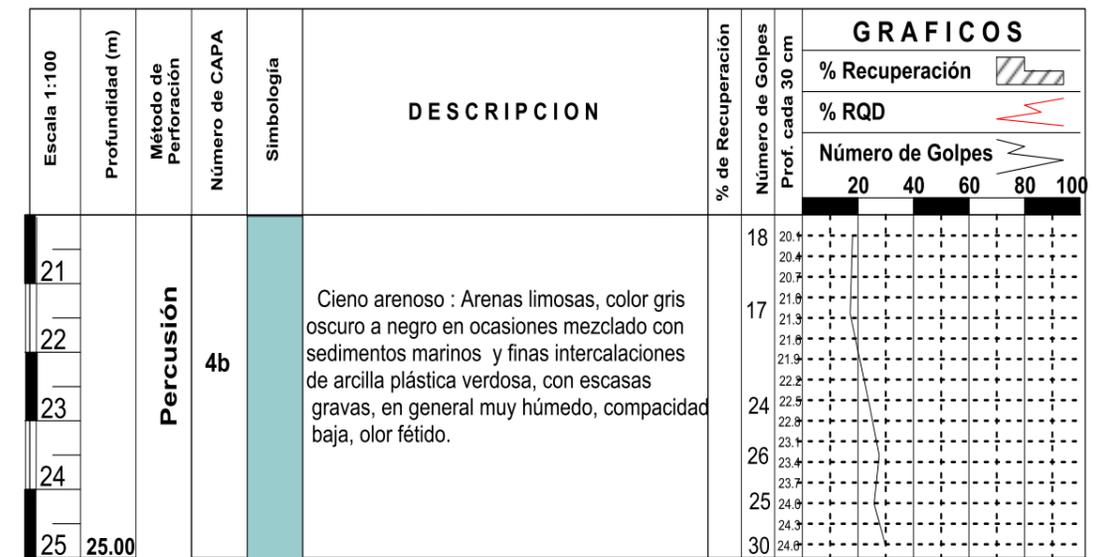
Profundidad Total (m): 25.00

Cota del Nivel Freático (m):



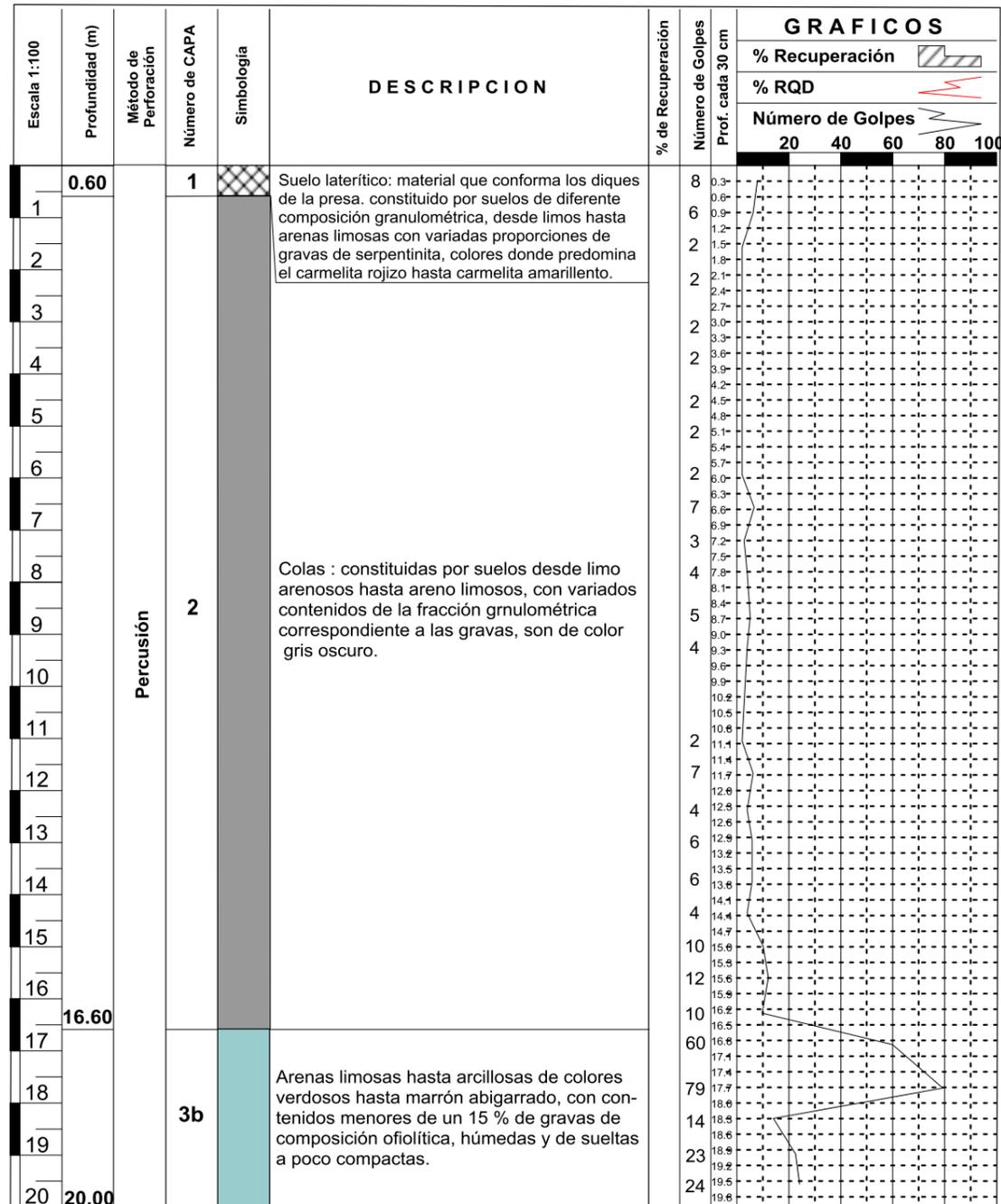
Cala 7

OBRA : Presa de Colas ECG	Fecha de perforación: 9-12-2012
CALA: Cala 7 Cont.	COORDENADAS X:701163.607 Y:222738.346 Z:10.148
Profundidad Total (m):25.00	Prof. del Nivel Freático (m):
	Cota del Nivel Freático (m):



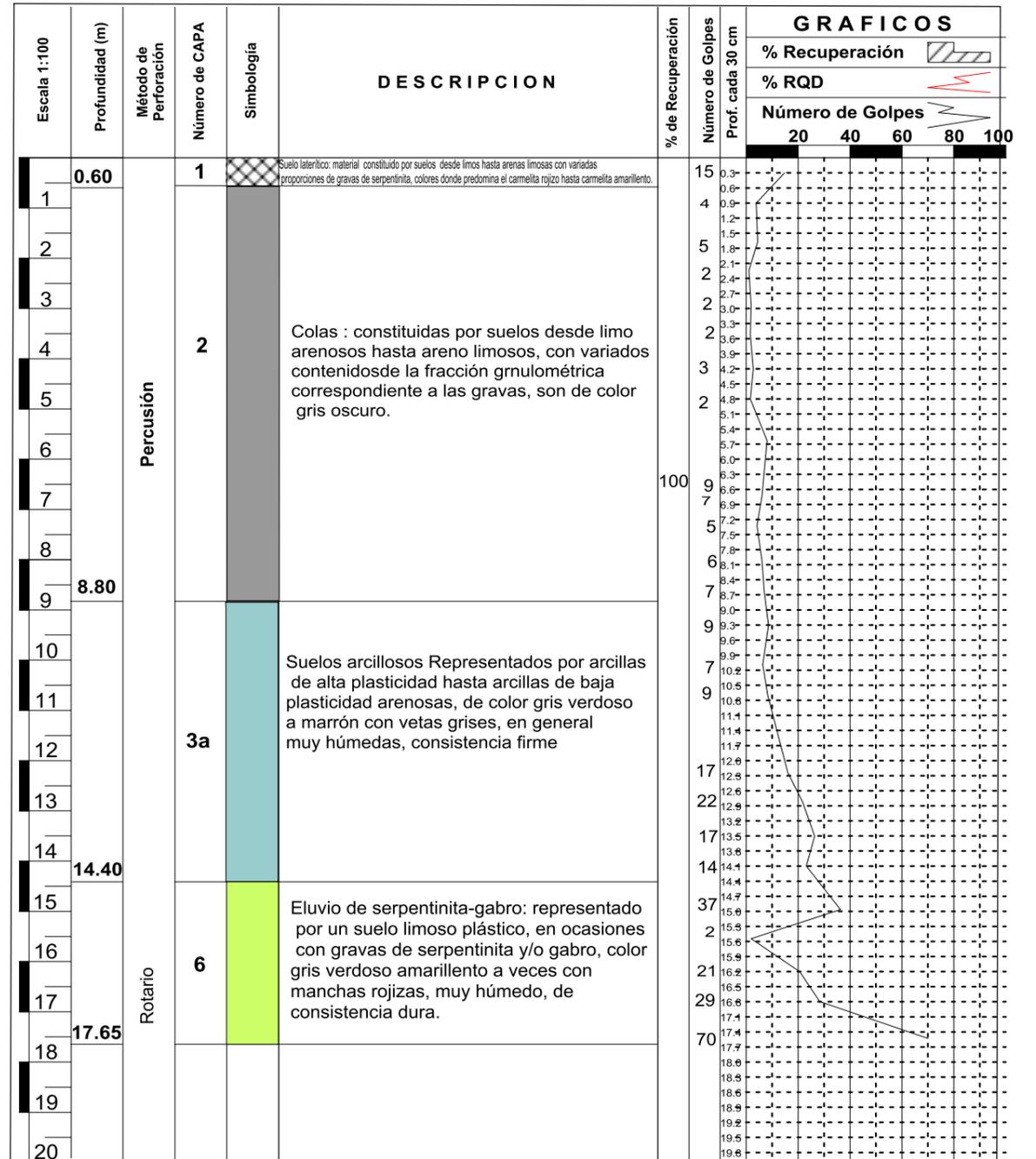
Cont. Cala 7

<b>OBRA: Presa de Colas ECG</b>		<b>Fecha de perforación:18-12-2012</b>	
<b>CALA: 8</b>	<b>COORDENADAS X:701446.626 Y:223193.863 Z:14.098</b>	<b>Prof. del Nivel Freático (m):2.30</b>	
<b>Profundidad Total (m): 20.00</b>		<b>Cota del Nivel Freático (m):14.098</b>	



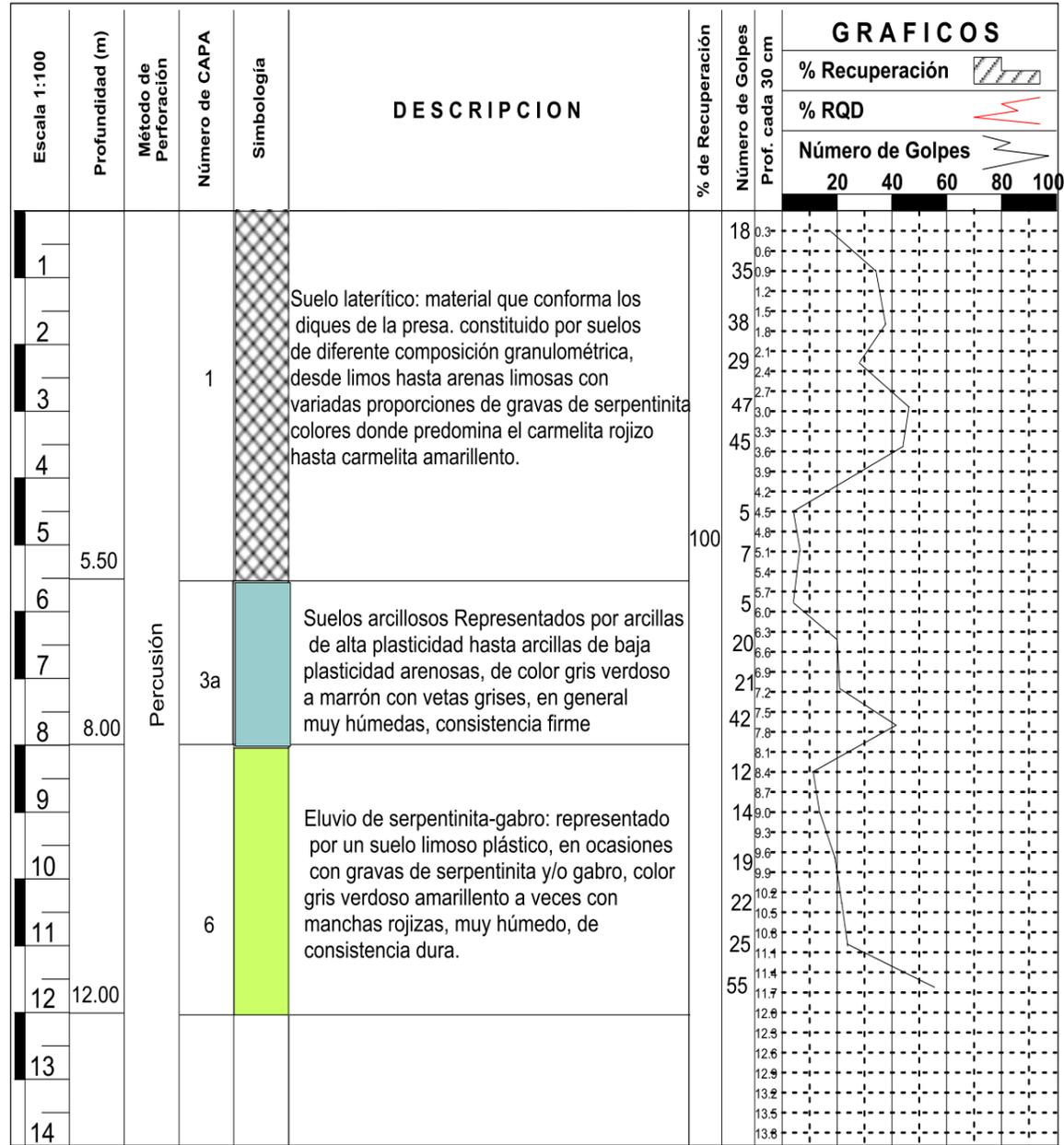
**Cala 8**

<b>OBRA: Presa de Colas ECG</b>		<b>Fecha de perforación:12-12-2012</b>	
<b>CALA: 9</b>	<b>COORDENADAS X:701372.111 Y:223223.507 Z: 8.778</b>	<b>Prof. del Nivel Freático (m): 3.47</b>	
<b>Profundidad Total (m): 20.00</b>		<b>Cota del Nivel Freático (m):</b>	



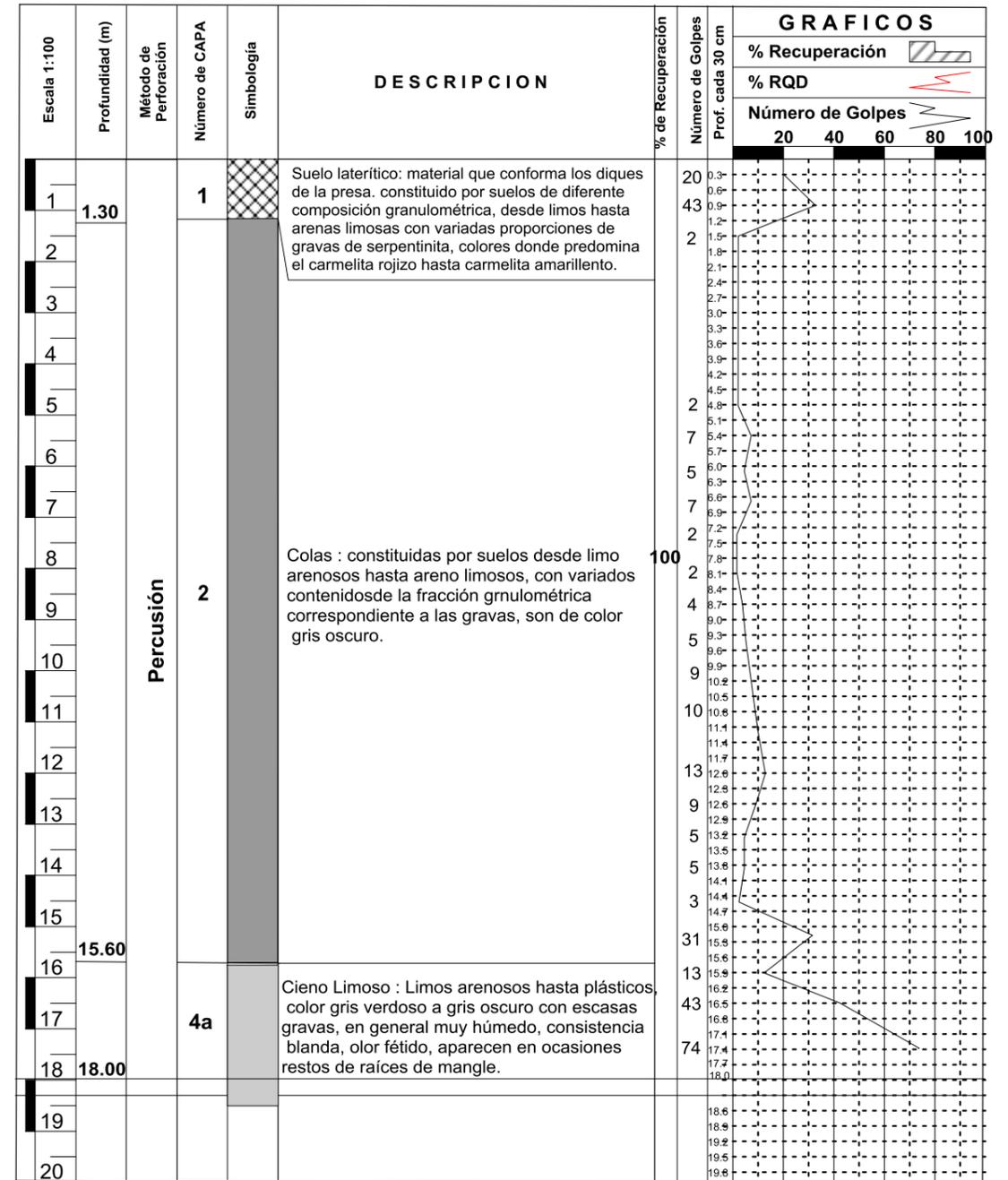
**Cala 9**

OBRA: PRESA DE COLA ECG		Fecha de perforación: 24-12-012
CALA: 10	COORDENADAS X:701346.840 Y:223232.954 Z: 4.518	Prof. del Nivel Freático (m): 1.27
Profundidad Total (m) : 12.00		Cota del Nivel Freático (m):



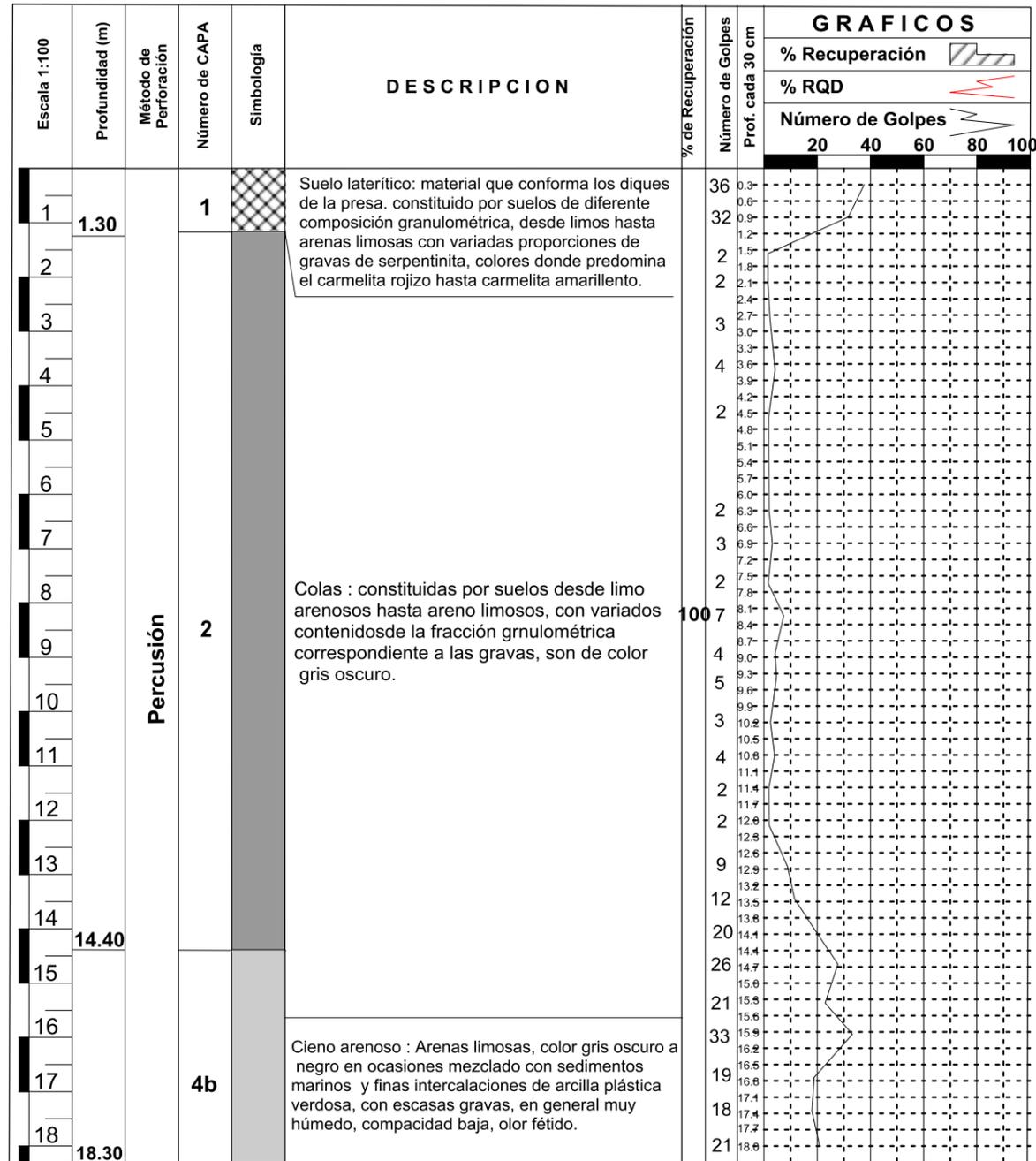
Cala 10

OBRA: Presa de Colas ECG		Fecha de perforación:10-01-13
CALA: 11	COORDENADAS X:701693.304 Y:223630.467 Z:14.293	Prof. del Nivel Freático (m): 3.00
Profundidad Total (m): 18.00		Cota del Nivel Freático (m):



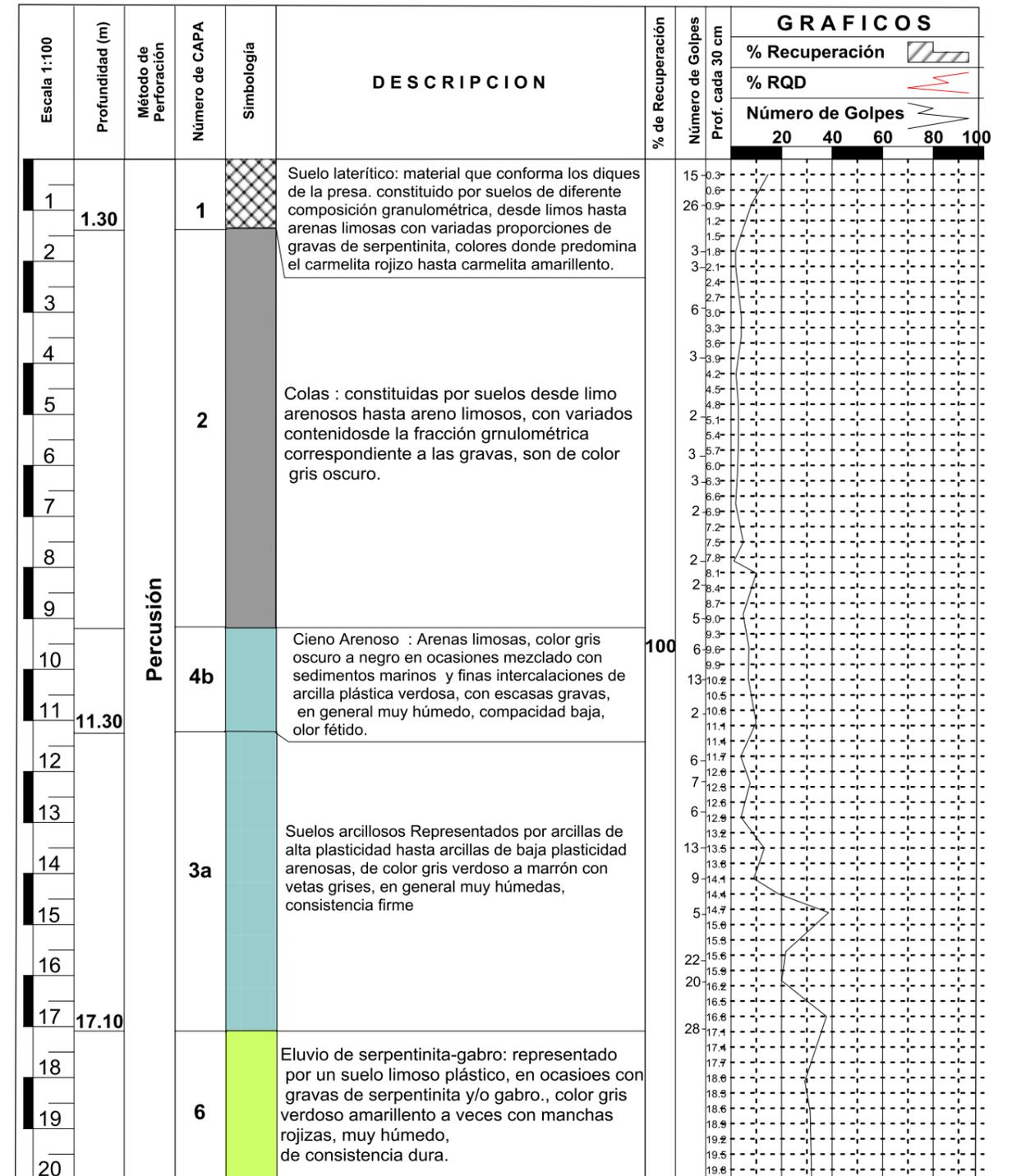
Cala 11

<b>OBRA: Presa de Colas ECG</b>			Fecha de perforación:16-12-2012
<b>CALA: 12</b>	<b>COORDENADAS</b>	X:701648.635 Y:223646.226 Z:13.155	Prof. del Nivel Freático (m): 3.00
Profundidad Total (m): 18.30			Cota del Nivel Freático (m):



Cala 12

<b>OBRA: Presa de Colas ECG</b>			Fecha de perforación:18-12-2012
<b>CALA: 13</b>	<b>COORDENADAS</b>	X:701573.267 Y:223683.767 Z: 7.040	Prof. del Nivel Freático (m): 2.26
Profundidad Total (m): 22.90			Cota del Nivel Freático (m): 4.780



Cala 13

OBRA : Presa de Cola ECG		Fecha de perforación: 18-12-2012
CALA: 13 Cont	COORDENADAS X:701573.267 Y:223683.767 Z:7.040	Prof. del Nivel Freático (m): 2.26
Profundidad Total (m): 22.90		Cota del Nivel Freático (m):

Escala 1:100	Profundidad (m)	Metodo de Perforación	Número de CAPA	Simbología	DESCRIPCION	% de Recuperación	Número de Golpes Prof. cada 30 cm	GRAFICOS			
								% Recuperación	% RQD	Número de Golpes	
21		Percusión	6		Eluvio de serpentinita-gabro: representado por un suelo limoso plástico, en ocasiones con gravas de serpentinita y/o gabro., color gris verdoso amarillento a veces con manchas rojizas, muy húmedo, de consistencia dura.		32	20.0			
22	20.3										
22.90							40	20.6			
							27	20.9			
							43	21.2			
								21.5			
								21.8			
								22.1			
								22.4			

Cont. Cala 13

OBRA: Presa de Colas ECG			Fecha de perforación:12-01-2013
CALA: 15	COORDENADAS X:702134.604 Y:223765.634 Z:13.153	Prof. del Nivel Freático (m): 2.26	
Profundidad Total (m): 23.40			Cota del Nivel Freático (m): 10.893

Escala 1:100	Profundidad (m)	Metodo de Perforación	Número de CAPA	Simbología	DESCRIPCION	% de Recuperación	Número de Golpes Prof. cada 30 cm	GRAFICOS			
								% Recuperación	% RQD	Número de Golpes	
1		Percusión	1		Suelo laterítico: material que conforma los diques de la presa. constituido por suelos de diferente composición granulométrica, desde limos hasta arenas limosas con variadas proporciones de gravas de serpentinita, colores donde predomina el carmelita rojizo hasta carmelita amarillento.		15	0.3			
2	0.6										
3	1.2										
4	1.8										
5	2.4										
6	3.0										
7	3.6										
8	4.2										
9	4.8										
10	5.4										
11	6.0										
12	6.6										
13	7.2										
14	7.8										
15	8.4										
16	9.0										
17	9.6										
18	10.2										
19	10.8										
20	11.4										
1		4b	2		Colas : constituidas por suelos desde limo arenosos hasta areno limosos, con variados contenidos de la fracción granulométrica correspondiente a las gravas, son de color gris oscuro.		2	2.0			
2	2.4										
3	2.8										
4	3.2										
5	3.6										
6	4.0										
7	4.4										
8	4.8										
9	5.2										
10	5.6										
11	6.0										
1		5	4b		Cieno Arenoso : Arenas limosas, color gris oscuro a negro en ocasiones mezclado con sedimentos marinos y finas intercalaciones de arcilla plástica verdosa, con escasas gravas, en general muy húmedo, compactidad baja, olor fétido.		13	10.2			
2	10.6										
3	11.0										
4	11.4										
5	11.8										
6	12.2										
7	12.6										
8	13.0										
9	13.4										
10	13.8										
1		5	5		Arenas limosas, color gris claro a verdoso , con gravas, en general muy húmedo, estos sedimentosestán acompañados por restos de caracoles y también por restos de vegetación de mangle, se presentan con frecuencia compactos hasta baja compactidad.		19	14.4			
2	14.8										
3	15.2										
4	15.6										
5	16.0										
6	16.4										
7	16.8										
8	17.2										
9	17.6										
10	18.0										
1		5	5				11	18.3			
2	18.6										
3	18.9										
4	19.2										
5	19.5										
6	19.8										
7	20.1										
8	20.4										
9	20.7										
10	21.0										

Cala 15

Anexo 5

<b>OBRA : Presa de Cola ECG</b>		<b>Fecha de perforación: 12-01-2013</b>
<b>CALA: 15 Cont</b>	<b>COORDENADAS X:702134.604 Y:223765.634 Z: 13.153</b>	<b>Prof. del Nivel Freático (m): 2.55</b>
<b>Profundidad Total (m): 23.40</b>		<b>Cota del Nivel Freático (m):</b>

Escala 1:100	Profundidad (m)	Método de Perforación	Número de CAPA	Simbología	DESCRIPCION	% de Recuperación	GRAFICOS	
							Número de Golpes Prof. cada 30 cm	Número de Golpes
21	21.40	Percusión	5	█	Arenas limosas, color gris claro a verdoso , con gravas, en general muy húmedo, estos sedimentosestán acompañados por restos de caracoles y también por restos de vegetaciónde mangle, se presentan con frecuencia compactos hasta baja compacidad.	13	20.0	
22	21.40		6		13	20.9		
23	23.40		6		20	21.2		
					Eluvio de serpentinita-gabro: representado por un suelo limoso plástico, en ocasiones con gravas de serpentinita y/o gabro., color gris verdoso amarillentoa veces con manchas rojizas, muy húmedo, de consistencia dura.	25	22.4	
						45	23.0	

Cont. Cala 15

<b>OBRA: Presa de Colas ECG</b>		<b>Fecha de perforación:18-01-2013</b>
<b>CALA: 16</b>	<b>COORDENADAS X:702135.603 Y:223853.993 Z:8.268</b>	<b>Prof. del Nivel Freático (m): 2.60</b>
<b>Profundidad Total (m): 24.10</b>		<b>Cota del Nivel Freático (m):</b>

Escala 1:100	Profundidad (m)	Método de Perforación	Número de CAPA	Simbología	DESCRIPCION	% de Recuperación	GRAFICOS	
							Número de Golpes Prof. cada 30 cm	Número de Golpes
1		Percusión	1	█	Suelo laterítico: material que conforma los diques de la presa. constituido por suelos de diferente composición granulométrica, desde limos hasta arenas limosas con variadas proporciones de gravas de serpentinita, colores donde predomina el carmelita rojizo hasta carmelita amarillento.	25	0.3	
2	28					0.9		
3	3.80		18	1.5				
4			3	2.1				
5			8	3.0				
6			3	3.3				
7			4	3.9				
8			4	4.2				
9			4	4.5				
10			4	4.8				
11			4	5.1				
12			9	5.7				
13	13.00		3	6.0				
14			2	6.3				
15			2	6.6				
16			4	6.9				
17			4	7.2				
18			4	7.5				
19	18.60		3	7.8				
20	20.20		5	8.1				
			8.4					
			8.7					
			9.0					
			9.3					
			9.6					
			9.9					
			10.2					
			10.5					
			10.8					
			11.1					
			11.4					
			11.7					
			12.0					
			12.3					
			12.6					
			12.9					
			13.2					
			13.5					
			13.8					
			14.1					
			14.4					
			14.7					
			15.0					
			15.3					
			15.6					
			15.9					
			16.2					
			16.5					
			16.8					
			17.1					
			17.4					
			17.7					
			18.0					
			18.3					
			18.6					
			18.9					
			19.2					
			19.5					
			19.8					
			20.1					

Cala 16

OBRA : Presa de Colas ECG	Fecha de perforación: 18-01-2013
CALA: Cala 16 Cont. COORDENADAS X:702135.603 Y:223853.993 Z:8.268	Prof. del Nivel Freático (m): 2.60
Profundidad Total (m): 24.10	Cota del Nivel Freático (m):

Escala 1:100	Profundidad (m)	Método de Perforación	Número de CAPA	Simbología	DESCRIPCION	% de Recuperación	Número de Golpes Prof. cada 30 cm	GRAFICOS			
								% Recuperación	% RQD	Número de Golpes	
21		Percusión	3a		Suelos arcillosos Representados por arcillas de alta plasticidad hasta arcillas de baja plasticidad arenosas, de color gris verdoso a marrón con vetas grises, en general muy húmedas, consistencia firme		20.1				
22	20.4										
23	20.7										
24	21.6										
24.10	21.9										
	22.2										
	22.5										
	22.8										
	23.1										
	23.4										
	23.7										

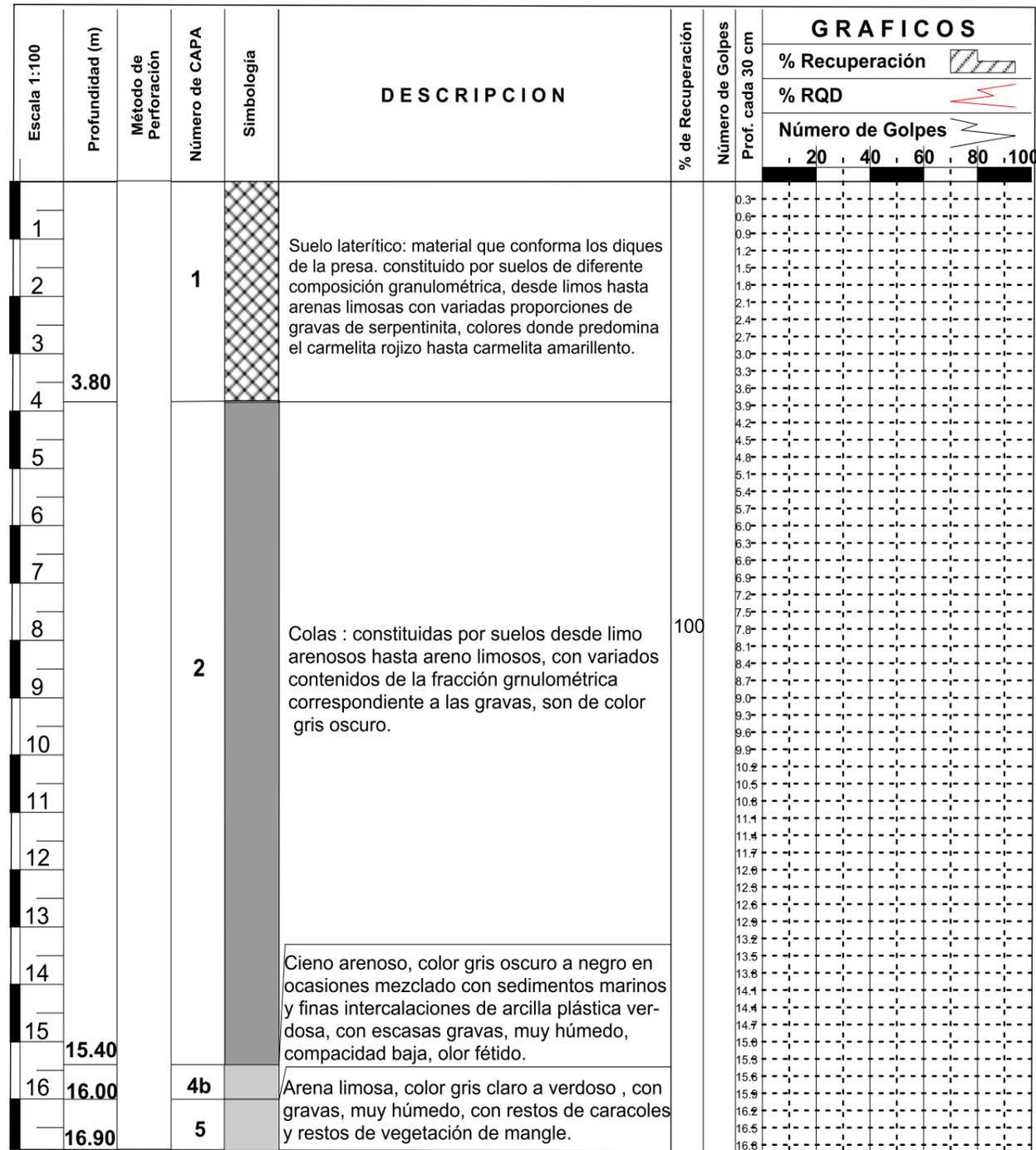
Cont. Cala 16

OBRA: Presa de Colas ECG	Fecha de perforación: 22-01-2013
CALA: 17 COORDENADAS X:702138.360 Y:223817.218 Z: 5.895	Prof. del Nivel Freático (m): 5.43
Profundidad Total (m): 20	Cota del Nivel Freático (m):

Escala 1:100	Profundidad (m)	Método de Perforación	Número de CAPA	Simbología	DESCRIPCION	% de Recuperación	Número de Golpes Prof. cada 30 cm	GRAFICOS			
								% Recuperación	% RGD	Número de Golpes	
1		Percusión	1		suelo laterítico: material que conforma los diques de la presa constituido por suelos de diferente composición granulométrica desde limos hasta arenas limosas con variadas proporciones de gravas de serpentina, colores donde predomina el carmelita rojizo hasta carmelita amarillento		1				
2							4.6				
3							4.6				
4							4.6				
5							4.6				
6							4.6				
6.60							4.6				
7	6.60						4.6				
7.20	7.20						4.6				
8							4.6				
9		5	8		Relleno antrópico constituido por una mezcla de laterita color rojo vino, fragmento de carbón, antracita, cristales de azufre		3				
10							6				
10.40							6				
11		3b			Están incluidas arenas limosas hasta arcillosas de color verdoso hasta marrón abigarrado, con contenido menores de un 15% de gravas de composición ofiolítica, son en general umedas y de sueltas a poco compactas.		7				
12							17				
13							24				
14							6				
15							6				
16							6				
17							6				
18							6				
18.50	18.50						6				
19							6				
20		6									

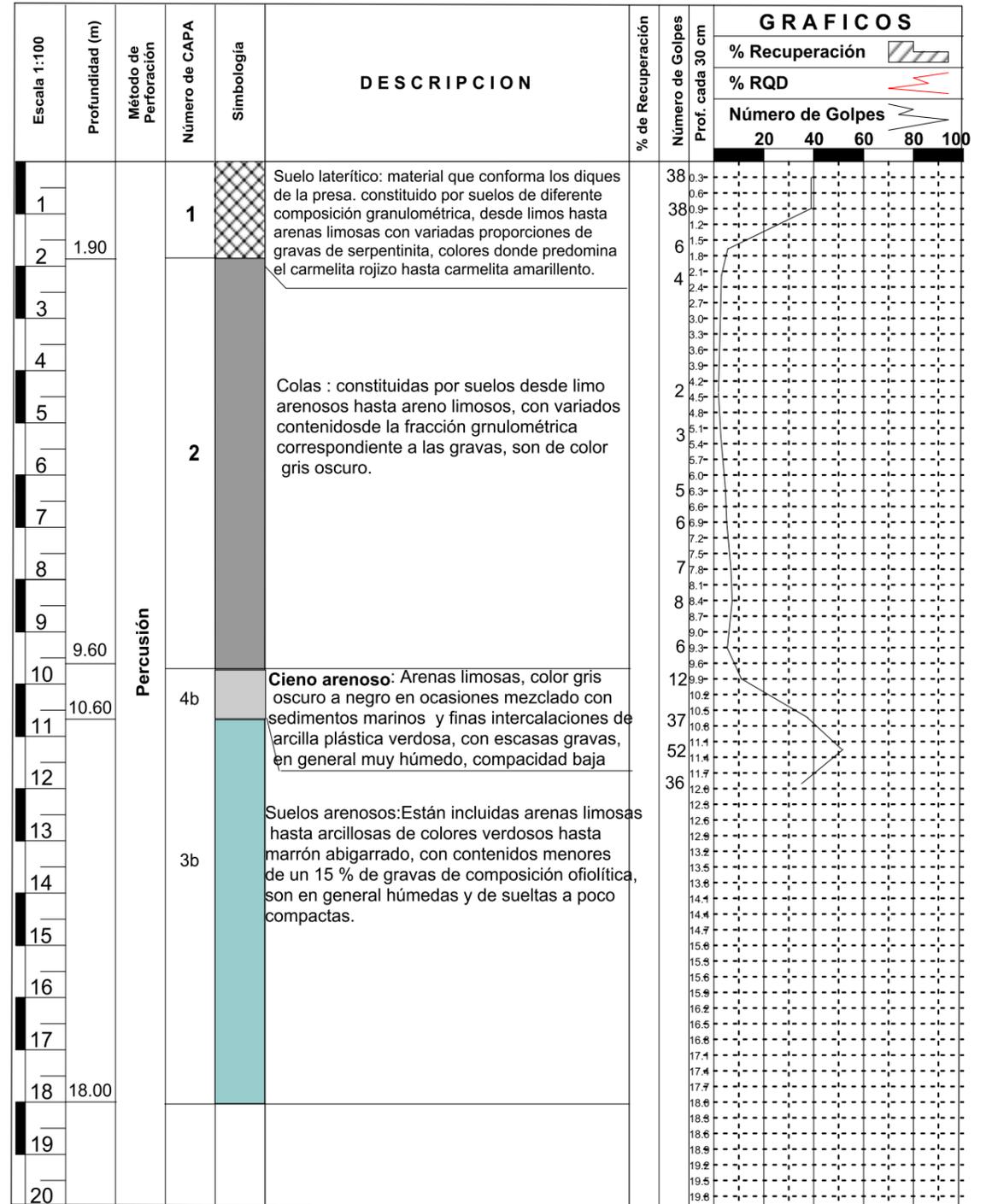
Cala 17

<b>OBRA: Presa de Colas ECG</b>		<b>Fecha de perforación:18-12-2012</b>	
<b>CALA: 19</b>	<b>COORDENADAS X:702767.294 Y:223830.577 Z:13.175</b>	<b>Prof. del Nivel Freático (m): 4.50</b>	
<b>Profundidad Total (m): 16.90</b>		<b>Cota del Nivel Freático (m): 8.675</b>	



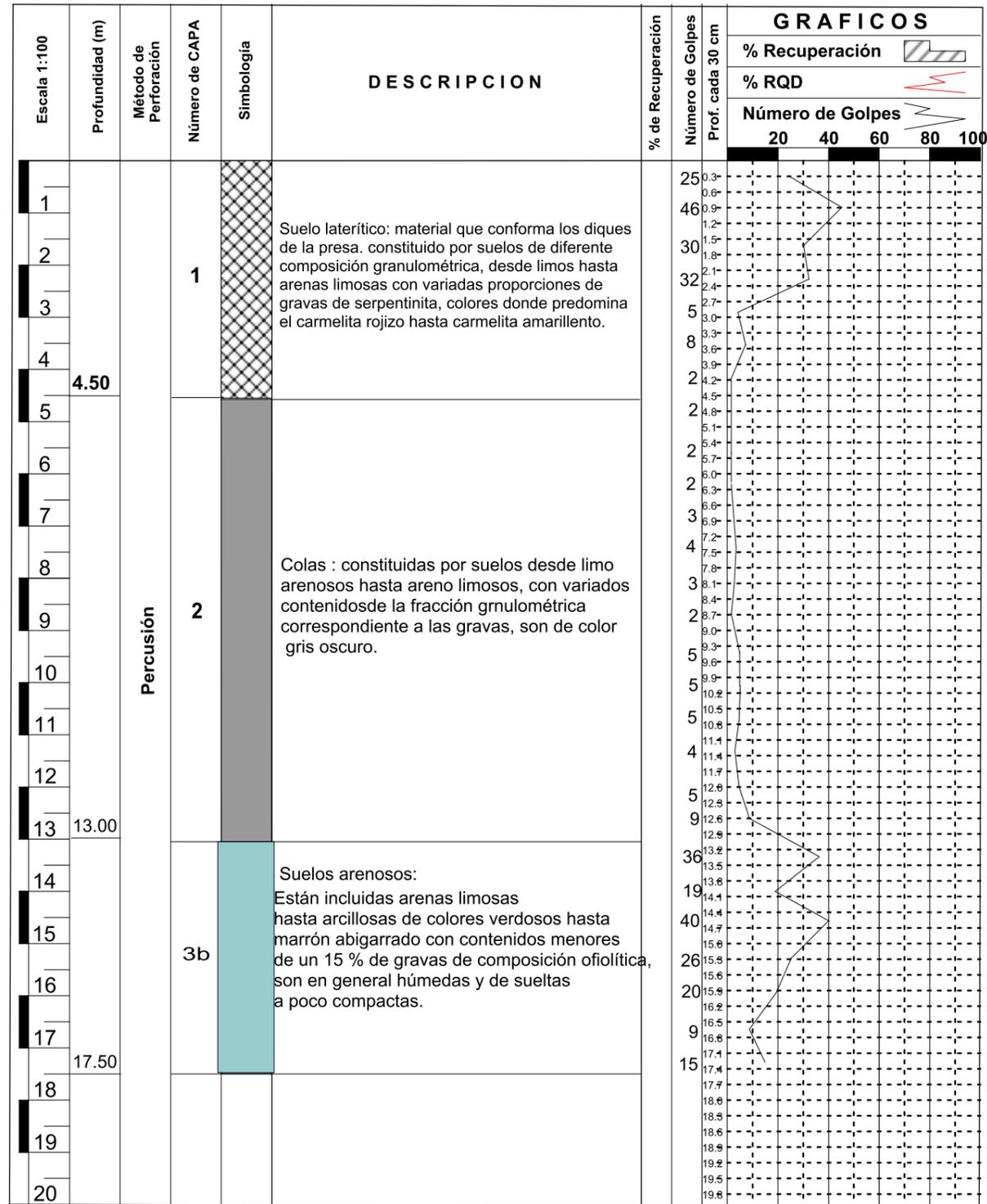
Cala 19

<b>OBRA: Presa de Colas ECG</b>		<b>Fecha de perforación:25-01-2013</b>	
<b>CALA: 21</b>	<b>COORDENADAS X:702805.833 Y:223923.693 Z:8.395</b>	<b>Prof. del Nivel Freático (m):</b>	
<b>Profundidad Total (m): 20.00</b>		<b>Cota del Nivel Freático (m):</b>	



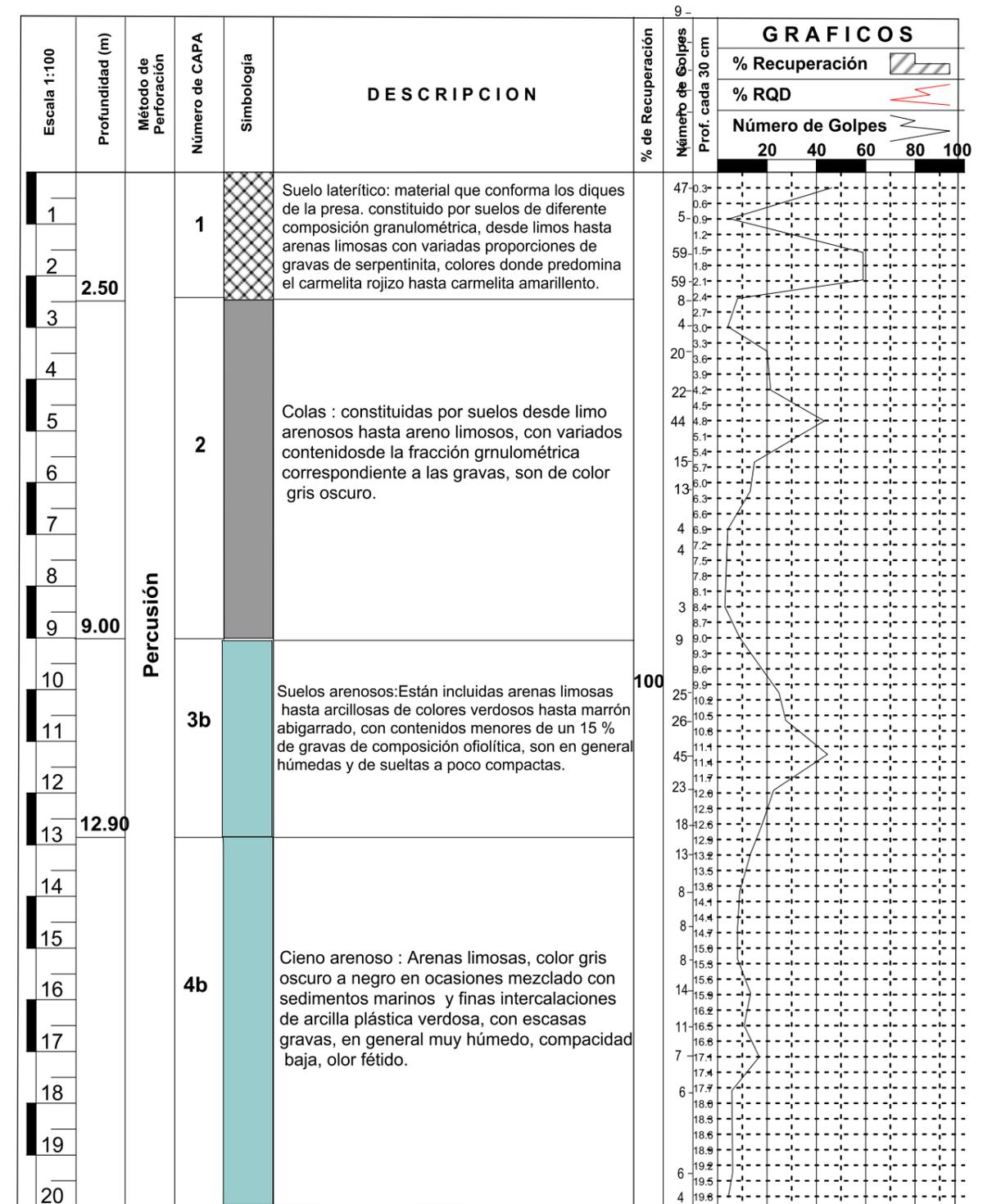
Cala 21

<b>OBRA: Presa de Colas ECG</b>			<b>Fecha de perforación: 21-02-2013</b>
<b>CALA: 22</b>	<b>COORDENADAS X: 703154.419 Y: 223608.405 Z: 11.793</b>	<b>Prof. del Nivel Freático (m):</b>	
<b>Profundidad Total (m): 20</b>			<b>Cota del Nivel Freático (m):</b>

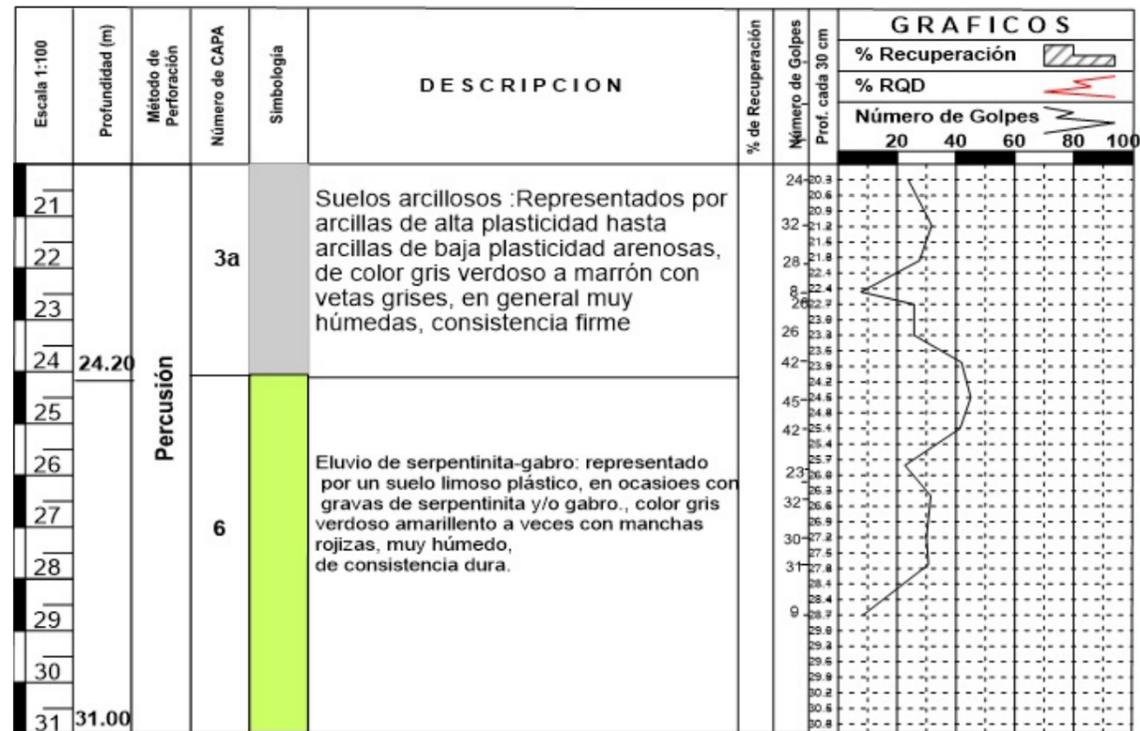


**Cala 22**

<b>OBRA: Presa de Colas ECG</b>			<b>Fecha de perforación: 8-02-2013</b>
<b>CALA: 24</b>	<b>COORDENADAS X: 703227.158 Y: 223655.237 Z: 8.445</b>	<b>Prof. del Nivel Freático (m): 7.14</b>	
<b>Profundidad Total (m): 31.0</b>			<b>Cota del Nivel Freático (m):</b>

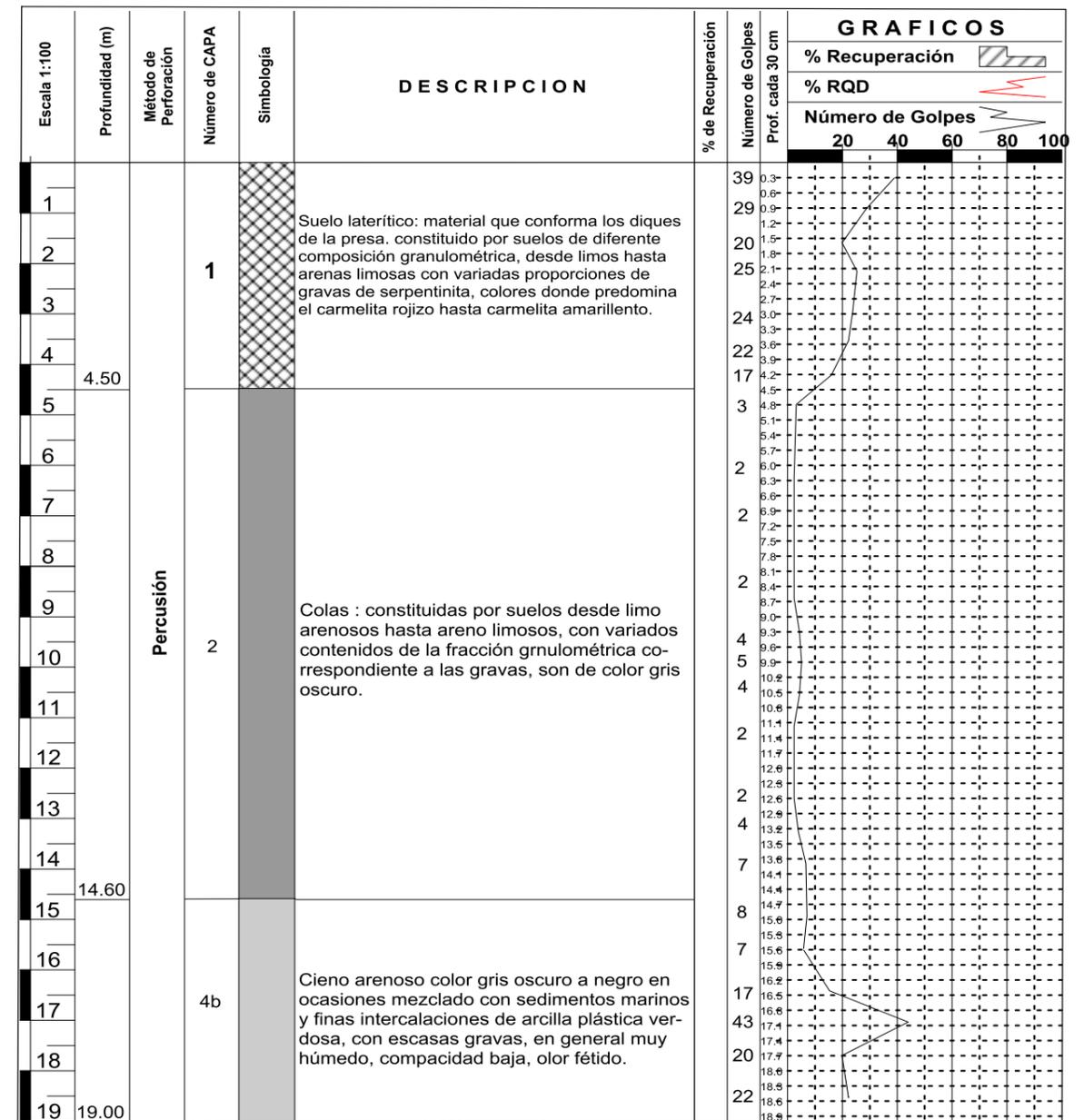


**Cala 24**



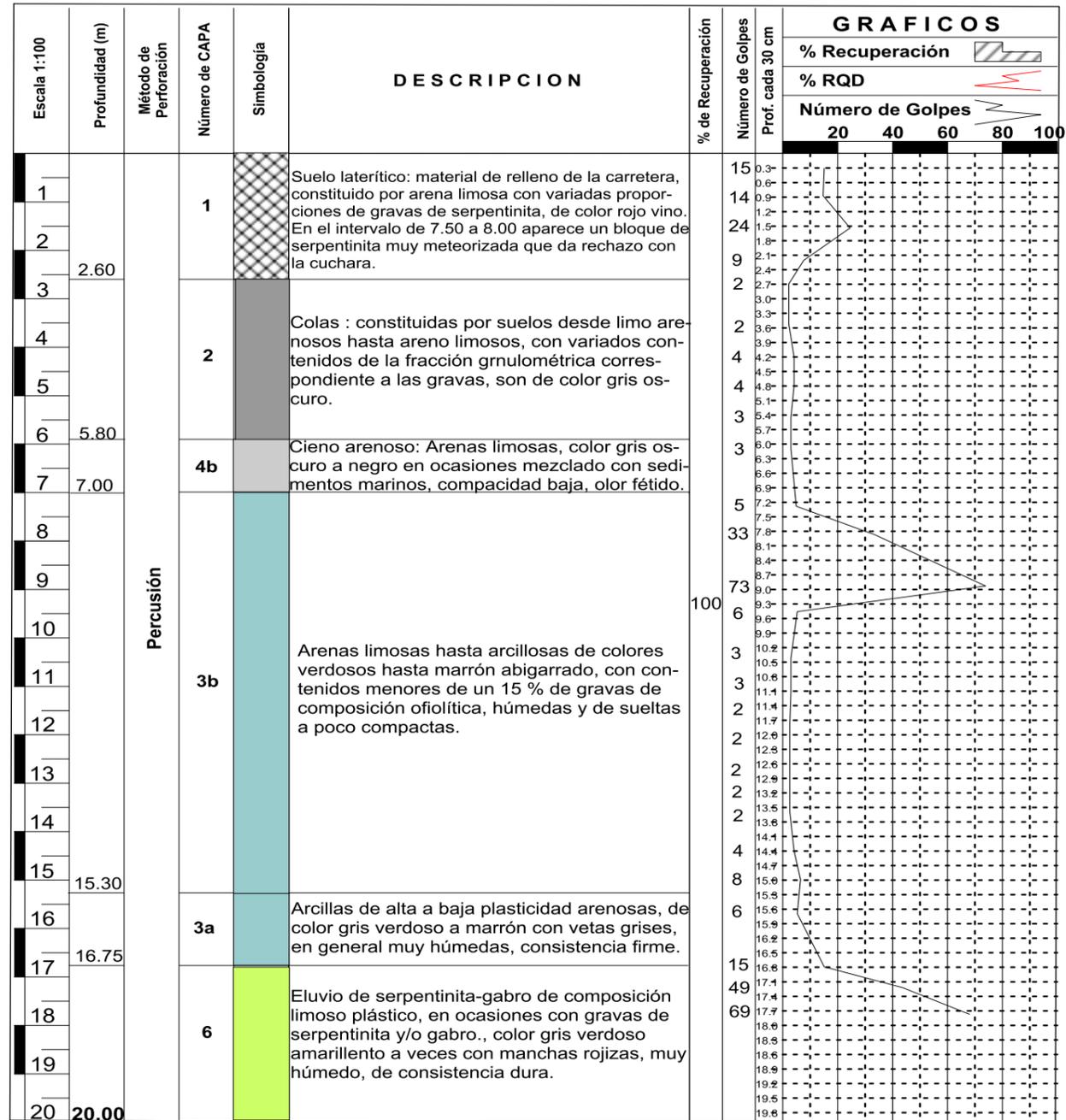
Cont. Cala 24

<b>OBRA: Presa de Colas ECG</b>			Fecha de perforación: 15-02-2013		
CALA: 25	COORDENADAS X: 703292.154 Y: 223224.582 Z: 12.960		Prof. del Nivel Freático (m): 3.10		
Profundidad Total (m): 19.00			Cota del Nivel Freático (m): 8.46		



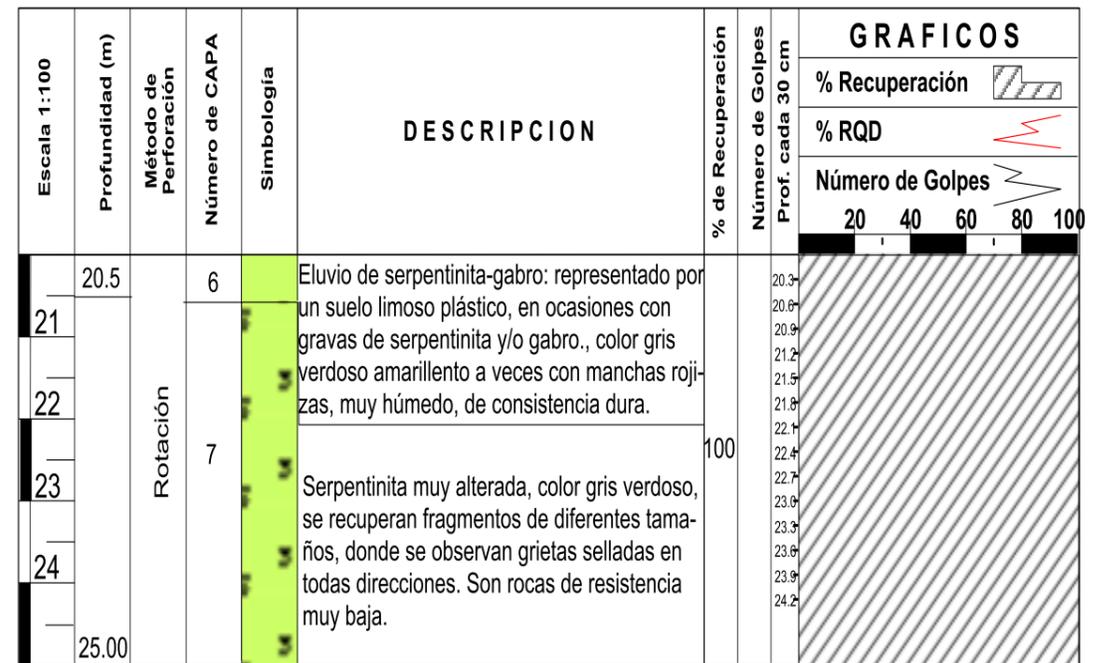
Cala 25

<b>OBRA: Presa de Colas ECG</b>			<b>Fecha de perforación:26-03-2013</b>
<b>CALA: 27</b>	<b>COORDENADAS X: 703368.83 Y: 223181.42 Z: 4.198</b>		<b>Prof. del Nivel Freático (m):3.00</b>
<b>Profundidad Total (m): 25.00</b>			<b>Cota del Nivel Freático (m):1.198</b>



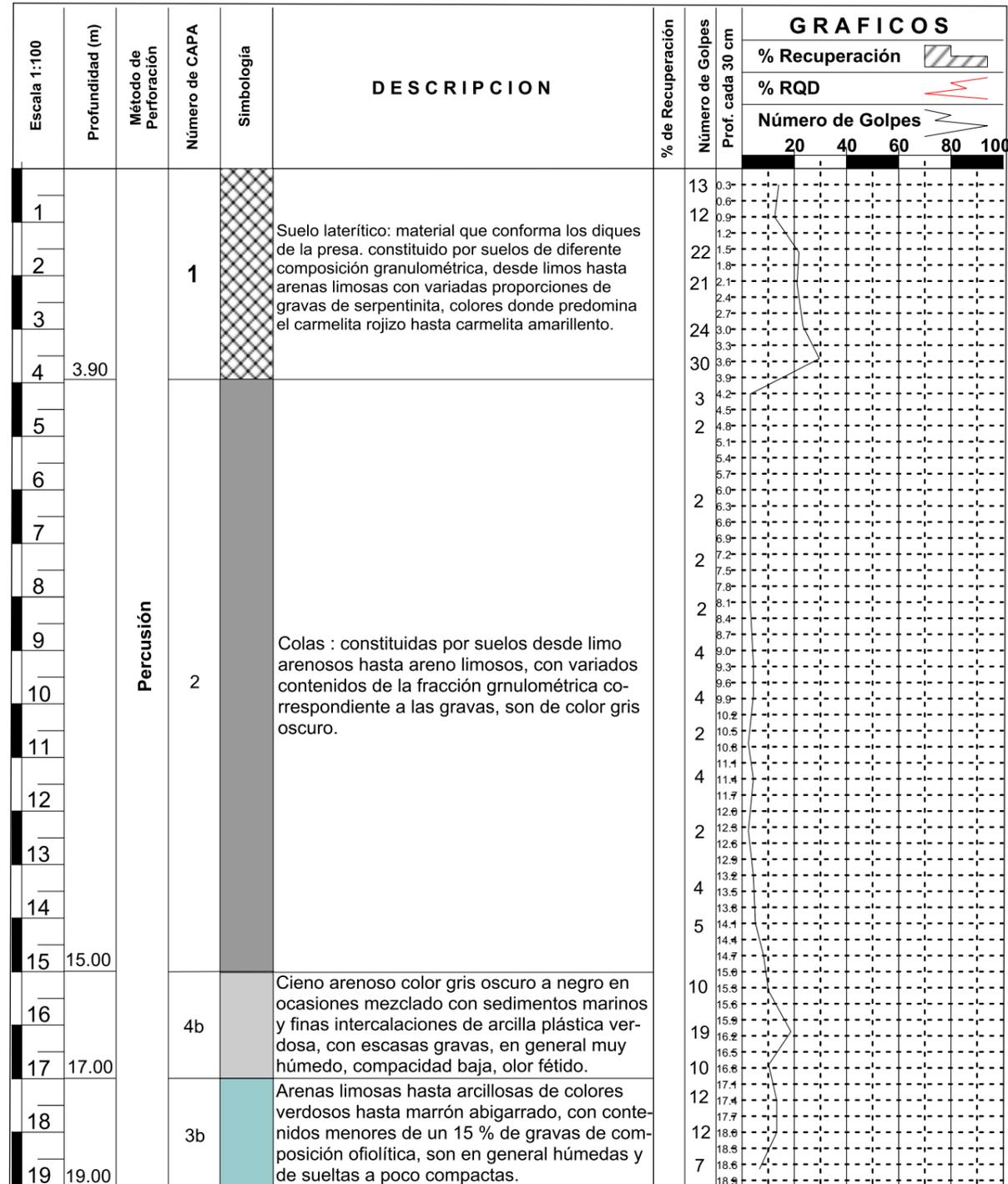
Cala 27

<b>OBRA : Presa de Colas ECG</b>			<b>Fecha de perforación:26-03-2013</b>
<b>CALA: 27(cont)</b>	<b>COORDENADAS X: 703368.83 Y: 223181.42 Z: 4.198</b>		<b>Prof. del Nivel Freático (m): 3.00</b>
<b>Profundidad Total (m): 25.00</b>			<b>Cota del Nivel Freático (m): 1.198</b>



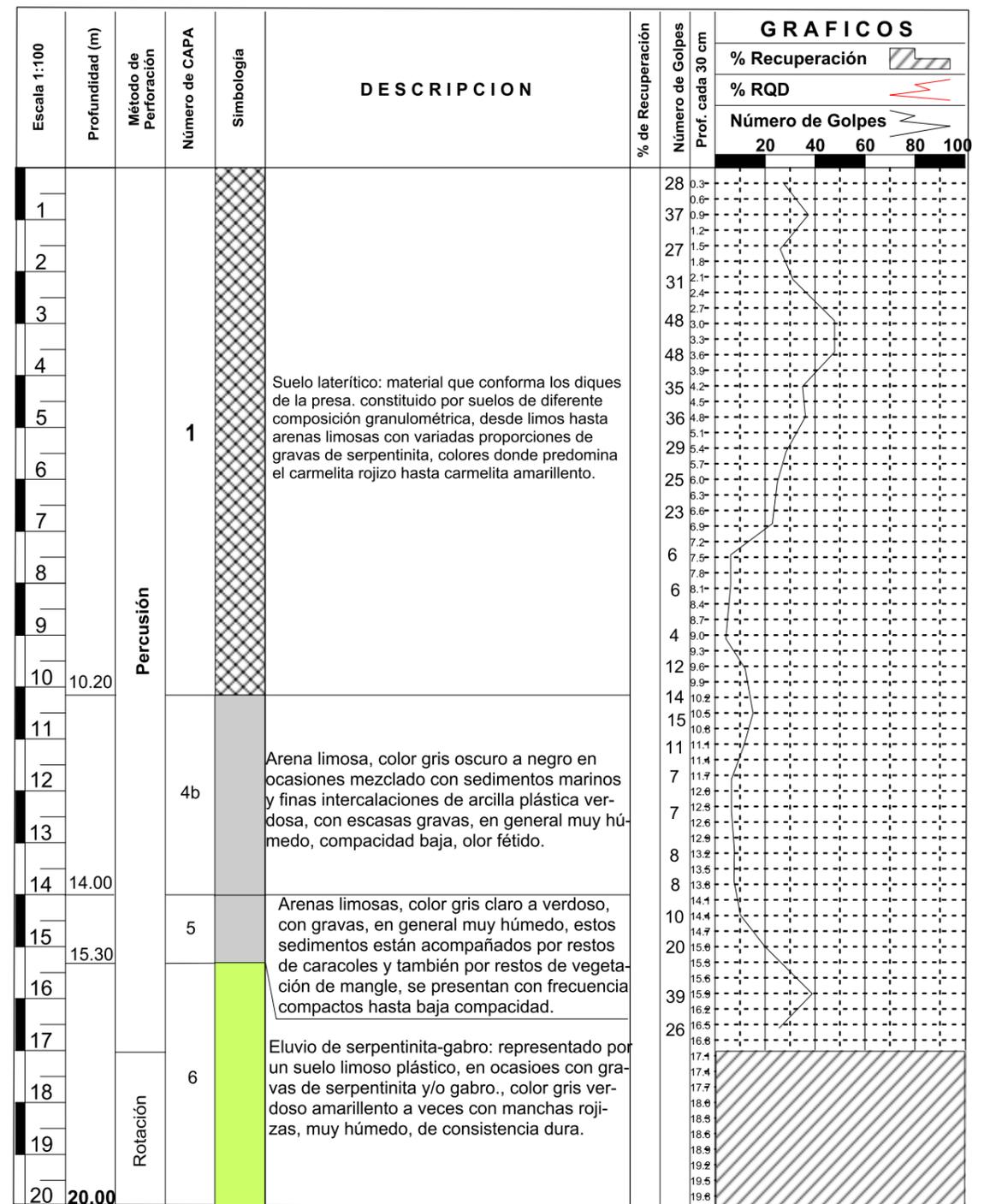
Cont.Cala 27

<b>OBRA: Presa de Colas ECG</b>			Fecha de perforación: 24-02-2013
CALA: 28	COORDENADAS	X: 702968.458 Y: 222984.815 Z: 13.660	Prof. del Nivel Freático (m): 4.65
Profundidad Total (m): 19.00			Cota del Nivel Freático (m): 9.01



Cala 28

<b>OBRA: Presa de Colas ECG</b>			Fecha de perforación: 16-03-2013
CALA: 29	COORDENADAS	X: 702970.132 Y: 222920.572 Z: 8.448	Prof. del Nivel Freático (m):
Profundidad Total (m): 25.00			Cota del Nivel Freático (m):



Cala 29

OBRA : Presa de Colas ECG			Fecha de perforación:16-03-2013
CALA: 29 (cont)	COORDENADAS X:	Y:	Z:8.448
Profundidad Total (m): 25.00			Prof. del Nivel Freático (m):
			Cota del Nivel Freático (m):

Escala 1:100	Profundidad (m)	Método de Perforación	Número de CAPA	Simbología	DESCRIPCION	% de Recuperación	Número de Golpes Prof. cada 30 cm	GRAFICOS				
								% Recuperación	% RQD	Número de Golpes		
								20	40	60	80	100
21	21.6	Rotación	6		Eluvio de serpentinita-gabro: representado por un suelo limoso plástico, en ocasiones con gravas de serpentinita y/o gabro., color gris verdoso amarillento a veces con manchas rojizas, muy húmedo, de consistencia dura.	100	20.3					
22				20.6								
23				20.9								
24				21.2								
	25.00		7		Serpentinita muy alterada, color gris verdoso, se recuperan fragmentos de diferentes tamaños, donde se observan grietas selladas en todas direcciones. Son rocas de resistencia muy baja.		21.5					
				21.8								
				22.1								
				22.4								
							22.7					
							23.0					
							23.3					
							23.6					
							23.9					
							24.2					

Cont. Cala 29

