

Universidad de Pinar del Río Hnos. Saíz Montes de Oca

Facultad de Geología y Mecánica

Dpto. de Geología



TRABAJO DE DIPLOMA

**TÍTULO: EFECTIVIDAD DEL MÉTODO DE SONDEO ELÉCTRICO
PARA ESTUDIOS INGENIERO-GEOLÓGICOS EN LA
FORMACIÓN PASO REAL**

AUTOR: JOSÉ MARÍA ELÁ NDONG NCHAMA

**TUTORES: MSc. ING. JOSÉ A. GARCÍA GUTIÉRREZ
MSc. ING. ORESTES DÍAZ VALDÉS
MSc. ING. NELSON A. GONZÁLEZ CABRERA**

Tesis de Diploma presentada en opción al Título de Ingeniero Geólogo

Pinar del Río, 27 mayo de 2011

PENSAMIENTO

PÁGINA DE ACEPTACIÓN

[Inserte aquí la notificación de aprobación de la Universidad]

Presidente del Tribunal

Secretario

Vocal

Ciudad y fecha:

DECLARACIÓN DE AUTORIDAD

Yo, JOSÉ MARÍA ELÁ NDONG NCHAMA, declaro que soy autor de este Trabajo de Diploma y que autorizo a la Universidad de Pinar del Río y a la Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas, a hacer uso del mismo, con la finalidad que estime conveniente.

Firma: _____



JOSÉ MARÍA ELÁ NDONG NCHAMA

Autoriza la divulgación del presente trabajo de diploma bajo licencia Creative Commons de tipo **Reconocimiento No Comercial Sin Obra Derivada**, se permite su copia y distribución por cualquier medio siempre que mantenga el reconocimiento de sus autores, no haga uso comercial de las obras y no realice ninguna modificación de ellas. La licencia completa puede consultarse en: <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.5/ar/legalcode>

Autoriza al Departamento de Geología de la Facultad de Geología y Mecánica, adscrito a la Universidad de Pinar del Río, a distribuir el presente trabajo de diploma en formato digital bajo la licencia Creative Commons descrita anteriormente y a conservarlo por tiempo indefinido, según los requerimientos de la institución, en el repositorio de materiales didácticos disponible en: sitio <ftp://geologia.upr.edu.cu>

Autoriza al Dpto. de Geología adscrito a la Universidad de Pinar del Río a distribuir el presente trabajo de diploma en formato digital bajo la licencia Creative Commons descrita anteriormente y a conservarlo por tiempo indefinido, según los requerimientos de la institución, en el repositorio de tesis disponible en: <http://revistas.mes.edu.cu>

AGRADECIMIENTOS

A la Revolución Cubana por su gran aporte al desarrollo de los países del Tercer Mundo, especialmente a la República de Guinea Ecuatorial en las esferas de la salud y educación.

Al Gobierno de mi país, especialmente a nuestra embajada en Cuba y a sus funcionarios, señores Machimbo, Pancracio y Edú, por haberme conseguido la beca de estudios.

A los profesores de la Facultad de Geología y Mecánica de la Universidad de Pinar del Río y a los especialistas de la Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas, especialmente a mis tutores Orestes Díaz, Nelson A. Gonzáles y José Antonio García Gutiérrez por haber confiado en mí.

A mis familiares: Antonio Ndumu, Francisco Salvador Ndong Esono, José Luis Obama, Yolanda Afang, Margarita Nsue, Rosa Angono, Wendy Mangué, Baltasar Danilo, Miriam, Vilma Ester, Eleuterio, Reyna, Pastor Ovono, Maura Abuy, por ser la familia que somos, orgullosos de nosotros mismos, por eso hermanos, soy quien soy hoy en día.

A mis compañeros y amigos que hicieron de este largo camino un viaje más ameno: Kelvis Alejandro, Raúl Mesa, y familia, Salvador Ondó, Ochaga Moro, Reynier Alonso, Jesica Pedrez, Santiago Ondó, Alejandro, Mariano, Dairon, Marlon Echilson, Wanderley, Charly, Dunia, Juan A. Juan Nze, Liberato, Carlos Bee, Alcantara, Ruben, Lujo, Luciano, Gustavo, Julio, Crispín Abaga, Satiago, Fermin, Bonifacio, Carlos Valdivia, Jorge Luis Joanna, Marisleydis, que a pesar de las vicisitudes siempre estaban ahí apoyándome.

A la señora Saida, Carmen y familia, Roberto, David, China, Rosa, Masiel, Jorge, Joel, Diego, Hernán, Mailin, por ese gran apoyo, confianza y amistad que me brindaron.

DEDICATORIA

Dedico a este ser divino que me permite compartir con familiares y amigos cada uno de mis momentos.

A mis padres: Salvador Ndong Esono Afang, Faustino Nguema Esono Afang (Que en paz descansen), mi madre Rosario Nchama Ndong, Escolástica Abuy Abaga, mi abuela Catalina Miyon; que desde mi tierna infancia me indicaron el camino de la escuela como vía a seguir para ser alguien en la vida.

A mis familiares, profesores, amigos y conocidos; que creyeron en mí, y me apoyaron siempre en los momentos difíciles especialmente:

A la Sra.Teresa Efúa Asangono, que tras quedarme huérfano de padre me acogió en el seno de su familia como un hijo más, para que no me faltara de nada.

A mi hermana querida Lucía, por su cariño, aprecio, afecto dedicación, confianza, apoyo y ser parte de este maravilloso proyecto.

RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo principal estudiar la efectividad del método de sondeo eléctrico en estudios ingeniero-geológicos realizados sobre la Formación Paso Real, la se extiende desde Guane, extremo occidental de la provincia de Pinar del Río, hasta la provincia de Holguín.

Para su realización se seleccionaron dos áreas de estudio en la ciudad de Pinar del Río, donde se utilizaron los métodos de SEV y de tomografía eléctrica. Se elaboraron mapas de tipos de curvas, mapas de contorno del espesor de los suelos de cubierta, determinados por SEV y por calas, y mapas de isoohmas de resistividad eléctrica real a diferentes profundidades, los que sirvieron de base para analizar las posibilidades del método de sondeo eléctrico en la solución de diferentes tareas ingeniero-geológicas.

Los resultados principales de la investigación fueron:

- Los cortes geoeléctricos predominantes son los tipos 2C ($\rho_1 < \rho_2$), 2C ($\rho_1 > \rho_2$) y H, tanto cuando aflora a la superficie o cuando está cubierta por suelos de la Formación Guane.
- Los mejores resultados con la aplicación del sondeo eléctrico se obtienen en la diferenciación de los suelos de cubierta, la determinación de su espesor y la separación litológica de los depósitos de la Formación Paso Real según su arcillosidad y grado de intemperismo.
- El análisis efectuado permitió concluir que la inclusión del SEV y/o la tomografía eléctrica permite aumentar la efectividad y racionalidad de los estudios ingeniero-geológicos en este contexto geológico.

SUMMARY

The present investigation had as main objective to study the effectiveness of the resistivity electric sounding in engineer-geologic studies carried out on the Paso Real Formation, that extends from Guane, western end of the Pinar del Rio Province, until the Holguín's Province.

For their realization two study areas were selected in the city of Pinar del Río, where the methods of VES and electrical tomography were used. There were elaborated maps of types of curves, contour maps of the thickness of the cover soils, determined by VES and boring holes, and maps of isohms of real electric resistivity for different depths, that served as base to analyze the possibilities of the method of electric sounding in the solution of different engineer-geologic tasks.

The main results of the investigation were:

- The predominant geoelectrical sections are the types 2C ($\rho_1 < \rho_2$), 2C ($\rho_1 > \rho_2$) and H, so much when it appears to the surface or when it is covered for soils of the Guane Formation.
- The best results with the application of the electric sounding are obtained in the differentiation of the cover soils the determination of their thickness and the lithologic separation of the deposits of the Paso Real Formation according to their clay content.
- The analysis allowed to conclude that the inclusion of the VES y/o the electric tomography allows to increase the effectiveness and rationality of the engineer-geologic studies in this geologic context.

ÍNDICE

PENSAMIENTO	I
PÁGINA DE ACEPTACIÓN	II
DECLARACIÓN DE AUTORIDAD	III
AGRADECIMIENTOS	IV
DEDICATORIA	V
RESUMEN	VI
SUMMARY	VII
ÍNDICE	VIII
INTRODUCCIÓN	1
DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN	2
<i>Problema</i>	2
<i>Objeto de estudio</i>	2
<i>Objetivo general</i>	2
<i>Objetivos específicos</i>	2
<i>Hipótesis</i>	3
<i>Beneficios esperados</i>	3
CAPÍTULO 1: ANTECEDENTES	4
1.1 BREVE HISTORIA DE LOS MÉTODOS DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA	4
1.2 SONDEO ELÉCTRICO VERTICAL	5
1.3 TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA 2D Y 3D	8
1.4 CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS DE LA FORMACIÓN PASO REAL	9
CAPÍTULO 2: MATERIALES Y MÉTODOS	15
2.1 ÁREAS DE ESTUDIO SELECCIONADAS	15
<i>2.1.1 Edificios Microdistrito 4</i>	16
<i>2.1.2 Sector Borrego</i>	16
2.2 SISTEMAS GEOELÉCTRICOS DE OBSERVACIÓN	16
<i>2.2.1 Edificios Microdistrito 4</i>	17
<i>2.2.2 Sector Borregos</i>	18
2.3 METODOLOGÍA PARA EL PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN	21
<i>2.3.1 Sondeo eléctrico vertical 1D</i>	21
<i>2.3.2 Procesamiento de tomografía eléctrica</i>	23
CAPÍTULO 3: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS	26
3.1 GRADO DE ESTUDIO GEOFÍSICO	26
3.2 INTERPRETACIÓN DE LAS MEDICIONES GEOFÍSICAS	26
<i>3.2.1 Edificios Microdistrito 4</i>	26
<i>3.2.2 Sector Borregos</i>	34
3.3 EFECTIVIDAD DEL SONDEO ELÉCTRICO EN LA FORMACIÓN PASO REAL	39
CONCLUSIONES	41
RECOMENDACIONES	42
BIBLIOGRAFÍA	43
ANEXOS	45

RELACIÓN DE TABLAS

Tabla 2.3. Geometría de las redes.....	25
Tabla 3.1. SEV paramétricos en el Microdistrito 4.....	27
Tabla 3.2. Tipos de curvas en los SEV paramétricos.....	28
Tabla 3.3. Estadística de los resultados de la interpretación de los SEV.	28
Tabla 3.4. Estadística espesor de cubierta sobre Formación Paso Real.	31
Tabla 3.5. Evaluación calidad de las redes de espesor de cubierta.	33
Tabla 3.6. Efectividad del método de sondeo eléctrico sobre Formación Paso Real.....	40

RELACIÓN DE FIGURAS:

Fig. 1.1. Aberturas sucesivas en un SEV.	6
Fig. 1.2. Modelos de cortes geoelectricos de dos capas. (a) $\rho_1 > \rho_2$ y (b) $\rho_1 < \rho_2$	6
Fig. 1.3. Modelos de cortes geoelectricos de tres capas. (a) $\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$, (b) $\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$	6
Fig. 1.4. Corte de 2 capas con un prisma conductor en la parte superior (Loke, 2004).....	7
Fig. 1.5. Curvas de SEV de 2 capas con una heterogeneidad superficial (Loke, 2004).....	8
Fig. 1.6. Disposición de electrodos y secuencia de mediciones en una tomografía 2D (Loke, 2004).....	9
Fig. 2.1. Mapa geológico regional con ubicación de las áreas de estudio.....	15
Fig. 2.2. Mapa de ubicación de los SEV geofísicos.	17
Fig. 2.3. Mapa de ubicación de los SEV paramétricos.	18
Fig. 2.4. Modelo bidimensional del subsuelo en la interpretación de datos de resistividad según el método de tomografía eléctrica 2D.....	19
Fig. 2.5. Dispositivo Wenner-Schlumberger y pseudosección correspondiente.	19
Fig. 2.6. Mapa de ubicación de los perfiles geofísicos y calas en el área de estudio.....	20
Fig. 2.7. Diagrama de bloques del procesamiento de los SEV 1D.....	21
Fig. 2.8. Modelo de procesamiento para calculo de coordenadas de los puntos en los perfiles.	23
Fig. 2.9. Expresiones para el cálculo de las coordenadas según el cuadrante.	24
Fig. 3.1. Mapa de ubicación de calas y puntos de SEV paramétricos.....	27
Fig. 3.2. Patrones de curvas de 2 capas típicas de la Formación Paso Real.	29
Fig. 3.3. Patrones de curvas de 3 capas típicas de la Formación Paso Real.....	30
Fig. 3.4. Mapa de tipos de curvas.	30
Fig. 3.5. Mapa de contornos de espesor de cubierta a partir de los SEV.	32
Fig. 3.6. Mapa de contornos de espesor de cubierta a partir de las calas.....	32
Fig. 3.7. Mapa de contornos de diferencias en el espesor de cubierta a partir de las calas y SEV.....	34
Fig. 3.8. Imagen eléctrica con elementos de interpretación geológica en el perfil 1, sector Borregos.	36
Fig. 3.9. Mapas de contornos de resistividad verdadera a diferentes profundidades.....	37

Fig. 3.10. Mapas de contornos del espesor de la cubierta. Sector Borregos.	38
--	----

RELACIÓN DE ANEXOS:

Anexo 2.1. Microlocalización de las áreas de estudio.	45
Anexo 3.1. Grado de estudio geofísico en la Formación Paso Real.	46
Anexo 3.2. Resultados del SEV paramétrico 1.....	47
Anexo 3.3. Resultados del SEV paramétrico 16.....	48

INTRODUCCIÓN

La aplicación en Cuba de la exploración eléctrica con fines de búsqueda de aguas subterráneas y como apoyo a las investigaciones ingeniero-geológicas se remonta a mediados de la década de los sesenta del pasado siglo, con los trabajos realizados por una brigada geofísica del Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos, bajo la dirección del ingeniero geofísico soviético Alexis Kuba y la participación del geólogo cubano Osvaldo Morúa (Kuba, 1969). Al mismo tiempo, se deben a este especialista de la antigua Unión Soviética, las primeras tablas de las resistividades eléctricas de las calizas y de los suelos areno arcillosos cubanos a partir de la interpretación de los sondeos eléctricos, así como una sistematización de los cortes geoelectricos característicos en diferentes regiones de Cuba, donde están presentes las rocas calizas, y su significación para la búsqueda de reservas de agua explotable (Kuba, sin fecha).

En los años posteriores, se incrementó y generalizó a todas las empresas que realizan investigaciones ingeniero-geológicas la aplicación de la geofísica, fundamentalmente los métodos de sondeo y perfilaje eléctricos, sísmica de refracción y, más recientemente, la obtención de imágenes eléctricas de resistividad real (tomografía eléctrica 2D). El empleo de la geofísica ha permitido aumentar significativamente la efectividad de los estudios ingeniero-geológicos y disminuir los costos de investigación, a la vez que constituye un medio eficaz para la protección del medio ambiente al reducir las perforaciones, las cuales a menudo sirven de vía a los agentes contaminantes hacia los mantos freáticos.

En la provincia de Pinar del Río, el empleo de la geofísica en la ingeniería geológica, especialmente el método de sondeo eléctrico vertical (SEV), se consolida en la dependencia provincial de la Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas (ENIA) a partir del año 1980, donde se han realizado hasta el presente más de 1500 sondeos eléctricos por la metodología tradicional, así como una cantidad creciente de imágenes eléctricas con el equipamiento Syscal Junior, en estudios que abarcan la mayoría de las formaciones geológicas descritas en el territorio provincial. También se cuenta con un volumen apreciable de trabajos por este método en la dependencia provincial del Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos.

Sin embargo, a pesar de este notable nivel de utilización de los métodos geofísicos en diferentes tipos de objetivos y contextos ingeniero-geológicos, la cantidad de estudios de generalización desarrollados, como los referidos para el período inicial de aplicación de la geofísica, resultan prácticamente nulos, lo que constituye, indudablemente, una limitación para evaluar las reales potencialidades del SEV en diferentes condiciones ingeniero-geológicas.

El presente trabajo de diploma se enmarca dentro de un proyecto de investigación desarrollado conjuntamente entre la Unidad de Investigaciones para la Construcción de Pinar del Río, ENIA, y el Departamento de Geología de la Universidad de Pinar del Río “Hnos. Saíz Montes de Oca”, encaminado a utilizar la información acumulada durante años de aplicación del SEV y, más recientemente del método de tomografía eléctrica, para establecer patrones de comportamiento de la resistividad eléctrica en las formaciones geológicas más representativas de la provincia de Pinar del Río, como vía para evaluar las potencialidades de este método geofísico para la solución de tareas ingeniero-geológicas.

Diseño de la investigación

Problema

Carencia de patrones de comportamiento del método de sondeo eléctrico vertical (SEV) en la solución de tareas ingeniero-geológicas en obras situadas sobre depósitos de la Formación Paso Real, lo que origina dificultades en la selección del complejo de métodos de investigación.

Objeto de estudio

Formación Paso Real en la provincia de Pinar del Río.

Objetivo general

Determinar la efectividad del método de sondeo eléctrico vertical para los estudios ingeniero-geológicos en depósitos de la Formación Paso Real.

Objetivos específicos

1. Definir el nivel de aplicación alcanzado con el uso del SEV en investigaciones de obras ubicadas sobre esta formación.

2. Determinar los tipos de cortes geoelectricos que mejor caracterizan las condiciones ingeniero-geológicas de la Formación Paso Real.
3. Definir las ventajas y limitaciones del sondeo eléctrico (SEV y tomografía eléctrica) para dar respuesta a diferentes tareas que demandan los estudios ingeniero-geológicos.

Hipótesis

Disponer de razones científicas sobre la efectividad de aplicación del método de sondeo eléctrico vertical, para estudios ingeniero-geológicos de obras situadas en depósitos de la Formación Paso Real, permitirá una mejor selección de los métodos de investigación, propiciando reducir los costos y dando respuestas más rápidas.

Beneficios esperados

- Permite aumentar la efectividad de la geofísica en futuros trabajos de ingeniería geológica, con reducción de costos de investigación.
- Proveer material de consulta para entidades que aplican el SEV, profesores y estudiantes de geofísica y geología.
- Base metodológica para estudios similares en otras formaciones geológicas.

CAPÍTULO 1: ANTECEDENTES

En el presente capítulo, se realiza una revisión de los fundamentos de los métodos de sondeo eléctrico en sus variantes tradicional (SEV) y contemporánea (tomografía eléctrica), haciendo hincapié en las limitaciones de la primera variante. Contiene también una descripción sumaria de las características geológicas de la Formación Paso Real, la cual constituye el contexto geológico de estudio en la tesis.

1.1 Breve historia de los métodos de resistividad eléctrica

Los primeros intentos de utilización de los métodos eléctricos datan de 1830, cuando Robert W. Fox observó corrientes eléctricas fluyendo en las minas de cobre de Cornish - Inglaterra, como resultado de reacciones químicas dentro de las vetas de los depósitos (Ward, 1980 en Molina, 2006). Fred H. Brown, en el período de 1883 a 1891, y Alfred Williams y Leo Daft en 1897, hicieron el primer intento en determinar la diferencia en la resistividad del terreno asociada con depósitos de oro. La primera aproximación práctica de los métodos eléctricos, donde el terreno es estimulado por una fuente controlada y son medidos los potenciales que resultan, fue hecha por Schlumberger en 1912.

El concepto de resistividad aparente se introdujo alrededor de 1915 por Wenner del U. S. Bureau of Standards y por Schlumberger en Francia. Wenner utilizó un arreglo de electrodos equiespaciados, el cual aun lleva su nombre, mientras que Schlumberger y colaboradores estandarizaron una configuración en que los electrodos de potencial están muy unidos, llamada disposición Schlumberger.

Durante los siguientes 70 años aproximadamente, las variantes más empleadas del método de resistividad fueron las denominadas como sondeo eléctrico vertical y perfilaje eléctrico (conocida en España y otros países como calicata eléctrica). En la primera de ellas, el centro del dispositivo de electrodos permanece fijo mientras se incrementa la separación entre electrodos con el objetivo de aumentar la penetración de la corriente y obtener información de las partes más profundas del subsuelo.

En el caso del perfilaje eléctrico, el espaciamiento entre electrodos permanece constante y se desplaza todo el dispositivo a lo largo de una línea. Con esto se logra obtener información

sobre los cambios laterales en la resistividad del suelo, mientras que para obtener una representación de las variaciones en profundidad es necesario emplear dispositivos con varias separaciones de electrodos.

En los últimos 25 años han aparecido nuevos métodos geofísicos de alta resolución bien adaptados para suministrar información precisa sobre la profundidad, espesor y continuidad lateral de las capas del subsuelo, dando lugar a una nueva disciplina conocida con el nombre de Near Surface Geophysics. Para este tipo de estudios es especialmente efectiva la técnica geofísica denominada tomografía eléctrica, que puede considerarse como fruto de la evolución de los métodos geoelectricos clásicos (Loke, 2002).

1.2 Sondeo eléctrico vertical

En el caso específico de esta variante, se estudia la variación de la resistividad aparente (ρ_a) en función de la profundidad de investigación. El principio físico-geológico parte del hecho de que la fracción de corriente eléctrica con que se energiza el terreno, hasta determinada profundidad, aumenta con el incremento de la separación de los electrodos del dipolo emisor (AB), o con el incremento de la distancia entre emisor (AB) y receptor (MN). Así, tendremos que las rocas que mayor influencia tendrán en los valores de la ρ_a obtenida, son aquellas a través de las cuales circule una parte significativa de la corriente, o dicho de otra forma, las heterogeneidades de la resistividad eléctrica existentes hasta dicha profundidad serán aquellas que influirán significativamente en la distribución espacial del ΔU_{MN} . Por su parte, las rocas ubicadas a una profundidad mayor apenas influirán en la distribución de los potenciales en la superficie y, por ende, en los valores de ρ_a .

Por tanto, el método básico consistirá en ir incrementando sucesivamente la distancia AB (que implica modificar la geometría del dispositivo), para garantizar que cada vez las líneas de corriente circulen a una mayor profundidad, procedimiento que se traduce en ir investigando paulatinamente el corte en la vertical, sin mover el punto central al cual se refieren las observaciones (fig. 1.1).

Se destaca que normalmente los sondeos de resistividad 1D involucran entre 10 a 20 lecturas. Para interpretar los datos del sondeo 1D, se presume normalmente que el subsuelo consiste de

capas horizontales homogéneas e isotrópicas. Para estos casos, la resistividad del subsuelo cambia únicamente con la profundidad, pero no cambia en la dirección horizontal (fig. 1.2 y 1.3).

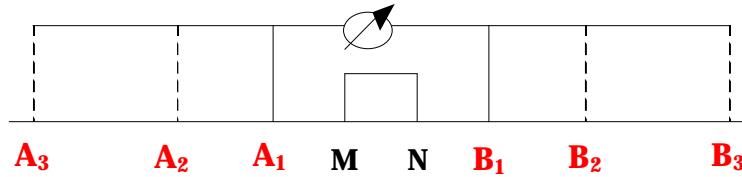


Fig. 1.1. Aberturas sucesivas en un SEV.

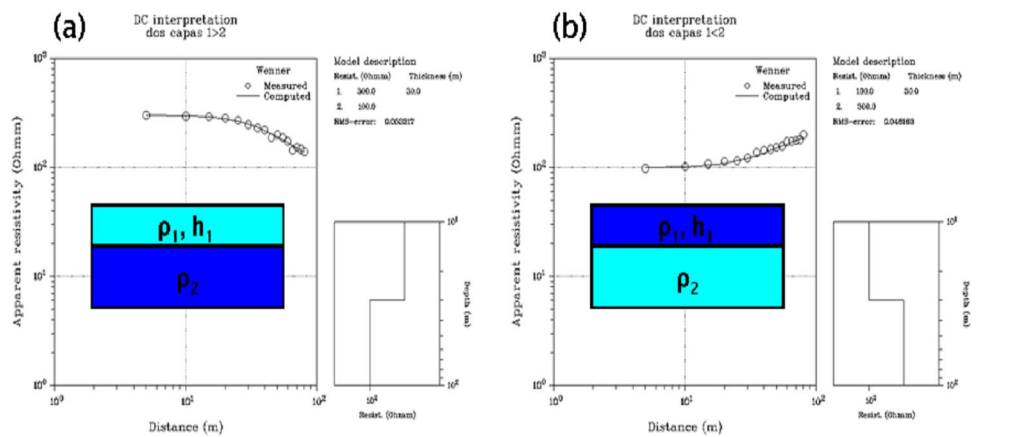


Fig. 1.2. Modelos de cortes geoelectricos de dos capas. (a) $\rho_1 > \rho_2$ y (b) $\rho_1 < \rho_2$.

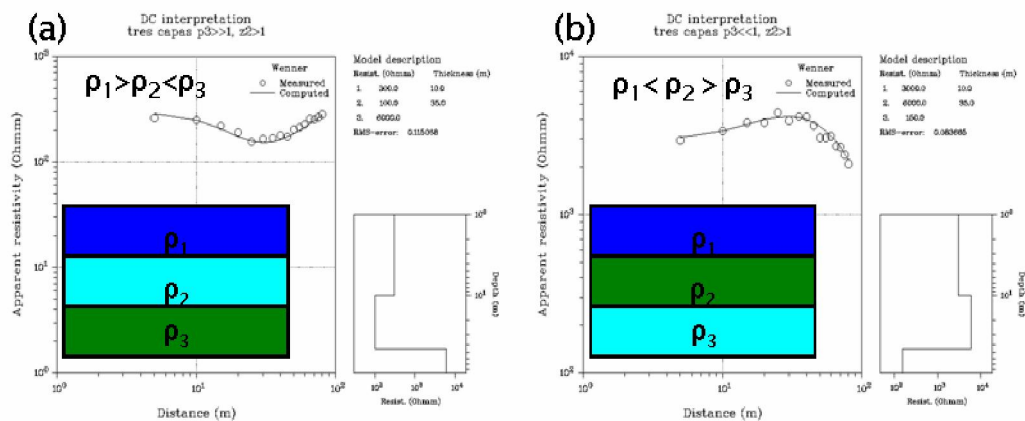


Fig. 1.3. Modelos de cortes geoelectricos de tres capas. (a) $\rho_1 > \rho_2 > \rho_3$, (b) $\rho_1 < \rho_2 < \rho_3$.

Para la interpretación cuantitativa de las curvas medidas, se emplearon durante muchos años juegos de curvas teóricas, sobre todo modelos de 2 y 3 capas, hasta que, paralelamente al desarrollo de las microcomputadoras, se han desarrollado diferentes software de

interpretación. Uno de los más versátiles es el IPI2WIN, elaborado en el Dpto. de Geofísica de la Universidad Estatal de Moscú, diseñado para la interpretación automática o semiautomática de curvas de sondeo eléctrico vertical obtenidas con varios de los arreglos de electrodos más utilizados (Bobatchev et al, 2000).

Ø Limitaciones del SEV

La mayor limitación del método de SEV es que no se toman en cuenta las variaciones laterales de la resistividad eléctrica, las que son, probablemente, la regla y no la excepción. No tener en cuenta este efecto puede resultar en errores en los valores interpretados de la resistividad eléctrica y de los espesores (Loke, 2004). A este respecto, el referido autor presenta en su monografía un corte de 2 capas donde $\rho_1 = 10$ ohm.m, $h_1 = 3$ m y $\rho_2 = 100$ ohm.m, con una heterogeneidad superficial de forma rectangular de baja resistividad (1 ohm.m) (fig. 1.4).

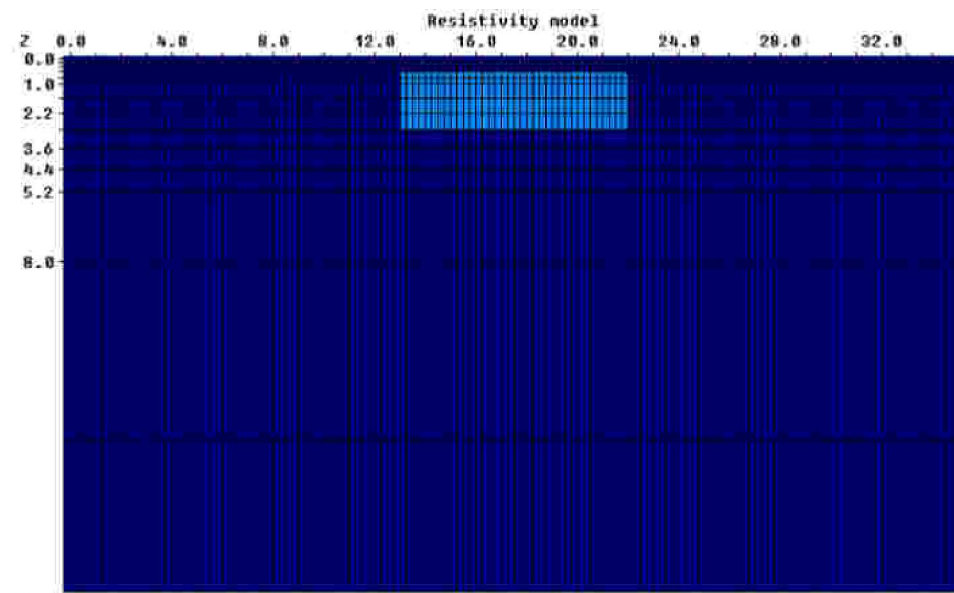


Fig. 1.4. Corte de 2 capas con un prisma conductor en la parte superior (Loke, 2004).

En la siguiente figura, se muestra la curva de SEV obtenida con el dispositivo Schlumberger con centro a 6 m a la izquierda de la heterogeneidad. Se muestran 3 curvas: la teórica sin la heterogeneidad y las medidas con MN= 1 y 3 m (fig. 1.5).

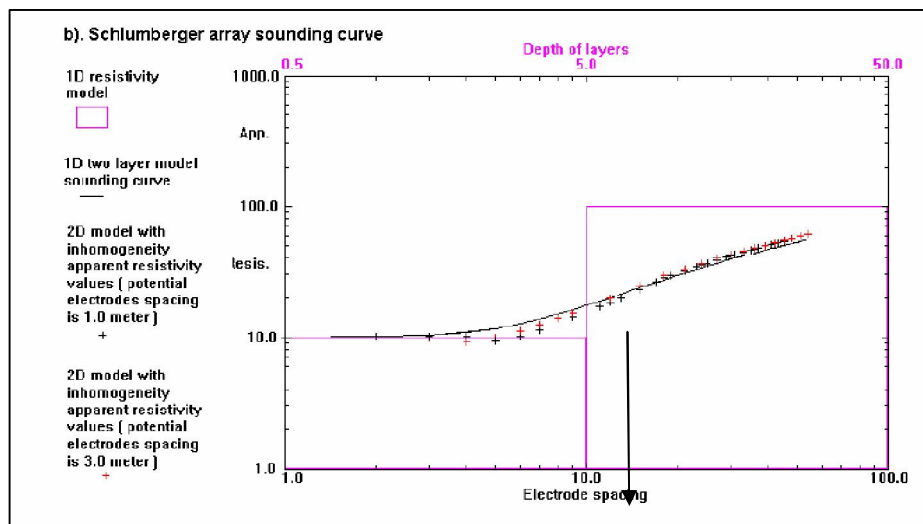


Fig. 1.5. Curvas de SEV de 2 capas con una heterogeneidad superficial (Loke, 2004).

En la figura se aprecia que para valores de $AB/2 < 15$, los valores de ρ_a son menores que el modelo de 2 capas, mientras que para $AB/2 > 17$ m, ρ_a . Estas dos situaciones se producen cuando el electrodo de corriente está antes o después de la heterogeneidad.

La razón principal por la que el sondeo eléctrico vertical 1D continúa siendo usado es el bajo costo del equipamiento en relación con la información útil que es posible obtener en condiciones geológicas favorables.

1.3 Tomografía eléctrica 2D y 3D

En las últimas 2 décadas se han registrado avances tecnológicos significativos, tanto en el equipamiento de campo como en los software para el procesamiento de la información, lo cual ha condicionado el desarrollo de los sistemas de observación geoelectrónicos 2D y 3D, también conocidos como tomografía eléctrica. La resolución de estos casos generales implica considerar en el planteo y resolución del problema una mayor cantidad de variables, no tomadas en cuenta en los métodos tradicionalmente utilizados en 1D.

La determinación y cálculo de resistividad real en 2D y 3D se basa en los algoritmos desarrollados e implementados por M. H. Loke & Barker (López et al, 2006). A través de estos algoritmos se puede optimizar la interpretación de los estudios geoelectrónicos,

pudiéndose obtener la respuesta de ambientes geológicos y anomalías complejas, las cuales no pueden ser solucionadas satisfactoriamente considerando modelos de distribución de resistividad en una (1D) o a veces incluso en dos dimensiones (2D).

Las investigaciones de resistividad dan una imagen de la distribución de resistividad del subsuelo (fig. 1.6). Para convertir esa imagen en una estructura geológica, es muy importante y necesario conocer como varía este parámetro en los diferentes tipos de materiales que constituyen el subsuelo y en las estructuras geológicas del área bajo estudio.

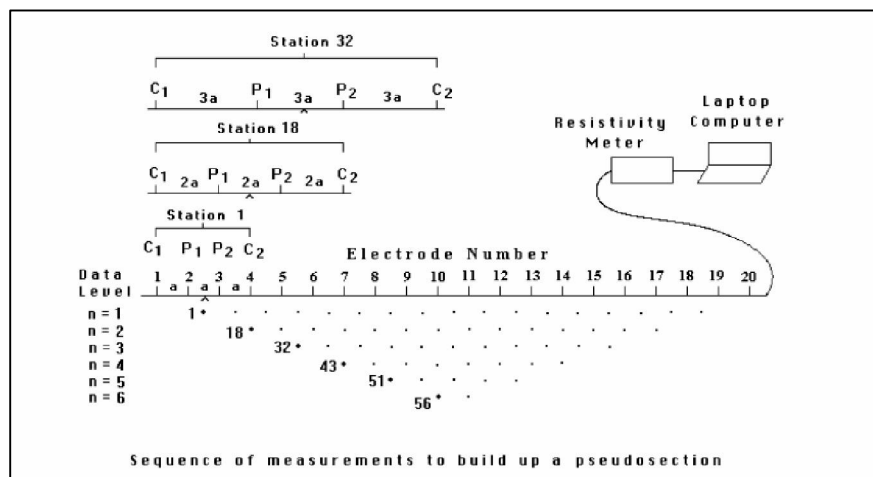


Fig. 1.6. Disposición de electrodos y secuencia de mediciones en una tomografía 2D (Loke, 2004).

1.4 Características geológicas de la Formación Paso Real

La Formación Paso Real es la de mayor distribución en Cuba, constituyendo una faja discontinua entre Guane en el extremo occidental de Cuba y el sur de la provincia de Holguín. En dicha unidad son característicos los cambios litológicos abruptos tanto vertical como lateralmente. Predominan las alternancias de calizas y margas, siendo las calizas arcillosas, biotritico-arcillosas y, más subordinadamente, biohémicas, dolomitizadas y calcarenitas. Las calizas arcillosas por desagregación originan pseudoconglomerados calcáreos de matriz margoso-arenácea; en general, son masivas. Las margas, al igual que las calizas, son fosilíferas. Pueden aparecer intercalaciones de areniscas, limolitas calcáreas y arcillas, principalmente, esmectitas, que contienen en algunos horizontes piritita, yeso, halita y lignito.

En la zona donde esta unidad aflora en Pinar del Río ha sido observado un conglomerado polimíctico de matriz margosa, fosilífera (Furrazola y Núñez, 1997, IGP, 1994).

La estratificación se ve marcada por los cambios litológicos; así las rocas carbonáticas poseen colores crema y blancuzco y las margosas colores grisáceos y verdosos. La estratigrafía es frecuentemente lenticular. En general predominan colores crema, blancuzco y grisáceo en los horizontes carbonáticos, y grisáceo y verdoso en los terrígenos.

En la parte más occidental de Cuba se relaciona discordantemente en su límite inferior con las formaciones Artemisa, Capdevila, Loma Candela, Los Negros, San Cayetano, Santa Teresa, Vía Blanca y los Grupos Mariel y Universidad. Está cubierta concordantemente por la Formación Güines, y discordantemente por las formaciones Siguanea, Vedado, Villarroja, Guane y Guevara; transiciona lateralmente con la formación Güines.

La Fm. Paso Real posee una fauna fósil de foraminíferos, ostrácodos, moluscos y corales abundantes, dentro de los cuales los más representativos son: Foraminíferos: *Bolivina mexicana*, *Globigerinoides spp.*, *Globorotalia kugleri*, *Lepidocyclina dilatata*, *Miogypsina antillea*; Ostrácodos: *Aurila spp.*, *Cyterella burcki*, *Loxoconcha andersoni*, *Triebelina crumena*; Moluscos: *Argopecten cercadicus*, *Anomia simplex*, *Cardita dominicana*, *Fissuridea alternata*, *Glycimeris canalis*, *Lucina dominguensis*, *Ostrea spp.*; Equinoides: *Cassidulus spp.*, *Clypeaster spp.*; Coral: *Montastrea imperatoris*.

Toda esta asociación faunal permite datar la unidad con una edad que abarca desde el Oligoceno Superior hasta el Mioceno Superior basal. Las cuencas lagunares y sublitorales evidentemente no fueron sometidas a un igual ritmo de subsidencia en todo el territorio nacional en el período de acumulación de los sedimentos de esta unidad, pues sus espesores son variables, oscilando entre las decenas de metros hasta los 1 365 m (pozo Candelaria 1).

En el área de estudio, los depósitos de recubrimiento de la Formación Paso Real más frecuentes pertenecen a las formaciones Guane, Guevara y depósitos cuaternarios de génesis eluvial, deluvial y aluvial.

Formación Guane (Kartashov et al, 1976)

Se desarrolla por el borde norte de la Llanura Meridional de la provincia de Pinar del Río. Está formada por conglomerados, arenas silíceas arcillas arenosas, gravas angulosas y subangulosas, débilmente cementadas por arcillas. Presentan sus depósitos estratificación indefinida lenticular y más raramente cruzada. En su parte alta contiene concreciones ferruginosas y hardpan. Presenta colores abigarrados.

Yace transgresivamente sobre la Formación Paso Real y está cubierta discordantemente por la Formación Guevara. No se han reportado fósiles índices. De acuerdo a su posición estratigráfica se le ha asignado una edad Plioceno Superior-Pleistoceno Inferior. El espesor de sus sedimentos, según datos de perforaciones, puede alcanzar hasta 50 m.

Formación Guevara (Kartashov et al, 1976).

Se desarrolla en la parte baja de la Llanura Meridional de la provincia de Pinar del Río. Está formada por arcillas plásticas (montmorilloníticas y montmorillonito-caoliníticas), arenas silíceas, gravas finas, fragmentos de corazas ferríticas (hardpan). Presenta alto contenido de pisolitas y nódulos ferríticos. La estratificación es indefinida, paralela y su coloración es variable, abigarrada.

Yace discordantemente sobre las formaciones Guane y Paso Real; está cubierta discordantemente por la Fm. Villarroja. No se han reportado fósiles índices. Por su posición estratigráfica se le ha asignado una edad Pleistoceno Inferior-Medio. El espesor de sus sedimentos no excede los 50 m.

Según Martínez y Fernández de Lara (1985), citados en Quintáns et al (1991), la Formación Paso Real tiene una composición carbonatada y está constituida fundamentalmente por las siguientes rocas: calizas clásticas organógenas, arcillas carbonatadas, margas y calcarenitas. A veces en la parte superior de la formación se encuentra una capa fina de arcilla montmorillonita. La Formación Paso Real yace sub-horizontalmente sobre las secuencias más antiguas.

Localmente esta formación está representada por calizas organógenas detríticas de color crema amarillento a gris con clastos en gris oscuro, muy rica en fauna fósil de origen marino, bien conservados. Se observa en estas calizas la lixiviación del carbonato, lo que hace que los

testigos recuperados presenten una forma irregular, con cavidades en ocasiones. Además, se observan grietas y oquedades, unas cerradas y otras rellenas de material arcilloso, marga, caliza recristalizada, pudiendo estar oxidadas.

Según la composición de estas calizas, se describen calizas margosas y calizas detríticas de estructura y textura porosa. La textura de estas calizas va desde porosa hasta masiva. Se describen en ocasiones finas intercalaciones de marga de color verdoso dentro de ese estrato rocoso. Existen zonas débiles en esta secuencia, representadas por espesores de arcilla, que contienen, en ocasiones, inclusiones de gravas y fragmentos de caliza. También margas de color crema-amarillento y, a veces, verdoso y gris, de textura porosa o masiva. Su estructura puede ser pelítica, organógena relíctica y detrítica. En general son rocas deleznales.

La arenisca calcárea es de grano fino y medio, variando su color desde amarillento a grisáceo, con texturas masiva y porosa. Además, la Formación Paso Real está caracterizada localmente por aleurolitas no carbonatadas, de colores abigarrados con vetas en ocre y violáceo. Algo significativo es el estrato de argilita carbonoso-calcárea, de color gris oscuro, con restos de fósiles de pequeños tamaños, con abundante materia orgánica muy foliada y que presenta inclusiones de cuarzo.

Sobreyacen a estas rocas las secuencias del Plioceno-Pleistoceno (N_2-Q_1), representadas por secuencias terrígenas de espesores significativos que ocupan áreas extensas en las llanuras y en los valles intramontanos. El área de distribución de estos sedimentos coincide con un relieve llano poco ondulado.

La composición litológica de estos depósitos es arcillosa-arenosa y, en general, homogénea y constante. Litológicamente en el corte se observan cambios de coloración que van desde gris-amarillo-naranja-rojizo-rosáceo. Por supuesto, el color y la sucesión de diferentes tonos está motivada por los diferentes grados de hidratación de los hidróxidos de hierro.

En nuestra área estos depósitos son aluviales marinos (am N_2-Q_1) y se describen como arena arcillosa, arcilla arenosa y arcilla, variando sus colores desde carmelita-rojizo-amarillento-ocre-pardo con gravitas de cuarzo y perdigones de hierro en las zonas más superficiales.

Quintáns *et al* (1991) describen los resultados de ensayos petrográficos realizados a varios testigos de perforación durante su investigación:

Ü Nombre: Caliza organógena

Estructura: Organógena

Textura: Masiva

Descripción: Roca integrada por restos de macro y microfauna con un cemento microcristalino de calcita del tipo basal (predomina el cemento sobre el número de fósiles), arcilla 5%

Ü Nombre: Argilita carbonosa calcárea

Estructura: Pelítico-microcristalina

Textura: Masiva

Descripción: Roca arcillosa con concreciones calcáreas en las que se destacan algunos microfósiles y materia orgánica abundante que le da la tonalidad de la roca. Los clastos de cuarzo son de tamaño 0,25 mm y 1%. Aparecen clastos de cuarcita de 0,1 mm.

Ü Nombre: Marga calcárea organógena

Estructura: Microcristalina-organógena

Textura: Masiva

Descripción: Roca integrada por un agregado microcristalino de calcita y abundantes microfósiles calcáreos (70%). También aparecen cristales pequeños (0,02 mm) de cuarzo en forma de clastos (3%). El 25% de la roca lo integra material arcilloso finamente disperso.

Referido a la tectónica del área, señalan que no existe un desarrollo importante de estructuras plicativas ni disyuntivas, enmarcándose en el piso estructural Eoceno Inferior-Mioceno Inferior y Medio. En cuanto a las juntas observadas en los testigos, se plantea que son continuas, formando un sistema, con rumbo perpendicular al eje del túnel, abertura contra el buzamiento de 45-90⁰. Estas diaclasas aparecen cerradas y otras abiertas, con un ancho promedio menor de 5 mm, rellenas en ocasiones de material arcilloso o de calcita recrystalizada.

Fenómenos físico-geológicos

El fenómeno físico-geológico característico de la Formación Paso Real es el carso, muy propagado en la localidad de Pinar del Río. En el área de la ciudad estudiada por Quintáns *et al* (1991) se observan en los testigos recuperados de la perforación oquedades con cavidades

y, en otros casos, aparece un carso incipiente. Algo muy puntual se detectó durante la perforación de una de las calas, donde se reportó como incidencia la caída del tren de varilla desde 21,0 hasta 26,0 m. En el resto de las calas no se detectaron anomalías de este tipo, no observándose presencia de otro fenómeno de esta índole, como podría ser empantanamiento, sifonamiento, etc.

CAPÍTULO 2: MATERIALES Y MÉTODOS

El capítulo contiene la ubicación y características generales de las áreas seleccionadas para evaluar la efectividad del método de sondeo eléctrico, así como los sistemas de observación empleados para la adquisición de los datos. También se relacionan los materiales cartográficos y el esquema metodológico de procesamiento de la información, incluyendo el software empleado.

2.1 Áreas de estudio seleccionadas

Las áreas de estudio están situadas en el Reparto Hermanos Cruz, hacia el extremo nororiental de la ciudad de Pinar del Río, municipio del mismo nombre, donde afloran, o están cubiertos por una delgada capa de suelos, los depósitos de la Formación Paso Real. El área de estudio Edificios Microdistrito 4 se encuentra ubicada en las coordenadas Lambert Sistema Cuba Norte siguientes: X (E)=224 204 e Y(N)=291 274 de la hoja cartográfica 3483-II-a-5 a escala 1:10 000. Por su parte, el área de estudio Sector Borregos se encuentra ubicada en las coordenadas Lambert Sistema Cuba Norte siguientes: X (E)= 224 798 e Y(N)= 291 425 de la misma hoja cartográfica a escala 1:10 000 (anexo 2.1). En la figura 2.1 se muestra la ubicación de las áreas de estudio en el mapa geológico regional de la ciudad de Pinar del Río.

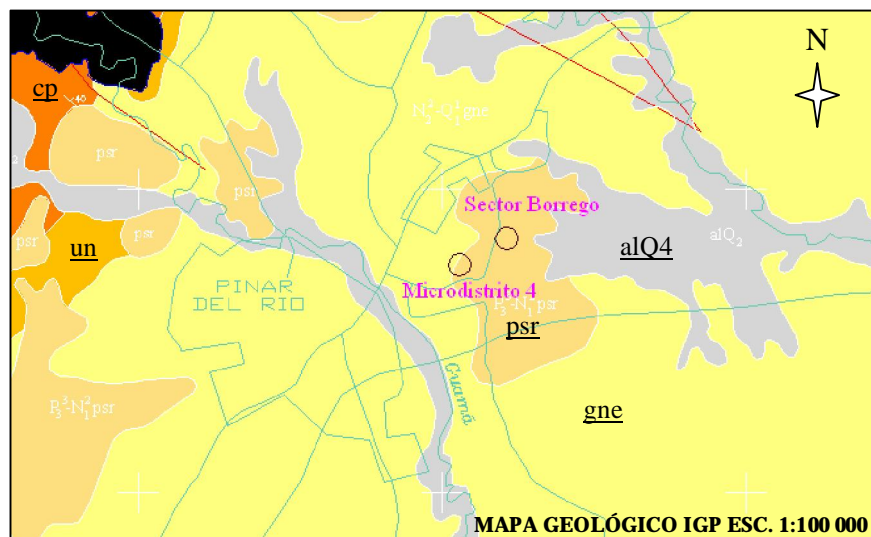


Fig. 2.1. Mapa geológico regional con ubicación de las áreas de estudio.

(cp: Fm. Capdevila; un: Fm. Universidad; psr: Fm. Paso Real; gne: Fm. Guane; alQ4: Depósitos aluviales)

2.1.1 Edificios Microdistrito 4

Los trabajos geológicos y geofísicos realizados tuvieron como objetivo estudiar las condiciones del subsuelo para la cimentación de edificios multifamiliares de cuatro y cinco plantas. El trabajo de perforación realizado fue de 35 calas a una profundidad de 8 metros y una cala hidrogeológica a 25 metros, para un total de unos 305 metros, realizándose el muestreo de suelos y rocas para la determinación de las propiedades físico-mecánicas en el laboratorio (Vilaú, 1988).

La geología del área está representada por suelos, posiblemente de edad Plioceno Superior-Pleistoceno Inferior, pertenecientes a la Formación Guane, sirviéndole de cobertura a las arcillas carbonatadas, margas y calizas de la Formación Paso Real. El nivel freático, según la cala hidrogeológica, se encuentra a una profundidad de 8,5 metros.

Las mediciones geofísicas se realizaron como apoyo a los trabajos de perforación para precisar las condiciones del corte litológico entre calas.

2.1.2 Sector Borrego

Los trabajos tuvieron como finalidad el estudio de las condiciones de cimentación para la proyección de una obra subterránea. Se aplicó un complejo de métodos de investigación incluyendo trabajos topográficos, métodos geofísicos de superficie, perforación con selección de testigos para ensayos geotécnicos y trabajos hidrogeológicos. Se realizó la perforación de 22 calas, con una profundidad entre 6m y 15m, para un total de 259 metros perforados (De la Torre et al, 2010).

El relieve de la zona es generalmente ondulado, con cotas que oscilan desde la 45m hasta 60m sobre el NMM. La base del corte geológico está representada por sedimentos terrígeno-carbonatados de la Formación Paso Real, sobre los cuales se extienden suelos arcillo-arenosos, probablemente pertenecientes a la Formación Guane. El nivel freático no fue cortado hasta la profundidad de investigación.

2.2 Sistemas geoelectricos de observación

Los sistemas geoelectricos de observación utilizados, para la adquisición de los datos, fueron sondeos eléctricos verticales 1-D y tomografía eléctrica 2D.

2.2.1 Edificios Microdistrito 4

El método empleado fue el de SEV 1D, ejecutándose las mediciones en cuatro perfiles, tres longitudinales (O-E) y uno transversal (N-S) al área de estudio. La distancia entre puntos de SEV fue variable (11-66 m), en dependencia de la red de calas proyectadas. Se utilizó el dispositivo Schlumberger con una abertura máxima de la línea de alimentación (AB_{máx}) de 100 m, empleándose como equipo de medición un AE-72 de fabricación soviética. El total de puntos de SEV realizados fue de 28 (fig. 2.2), de los cuales 9 se ubicaron junto a calas (SEV paramétricos), como se aprecia en la figura 2.3.

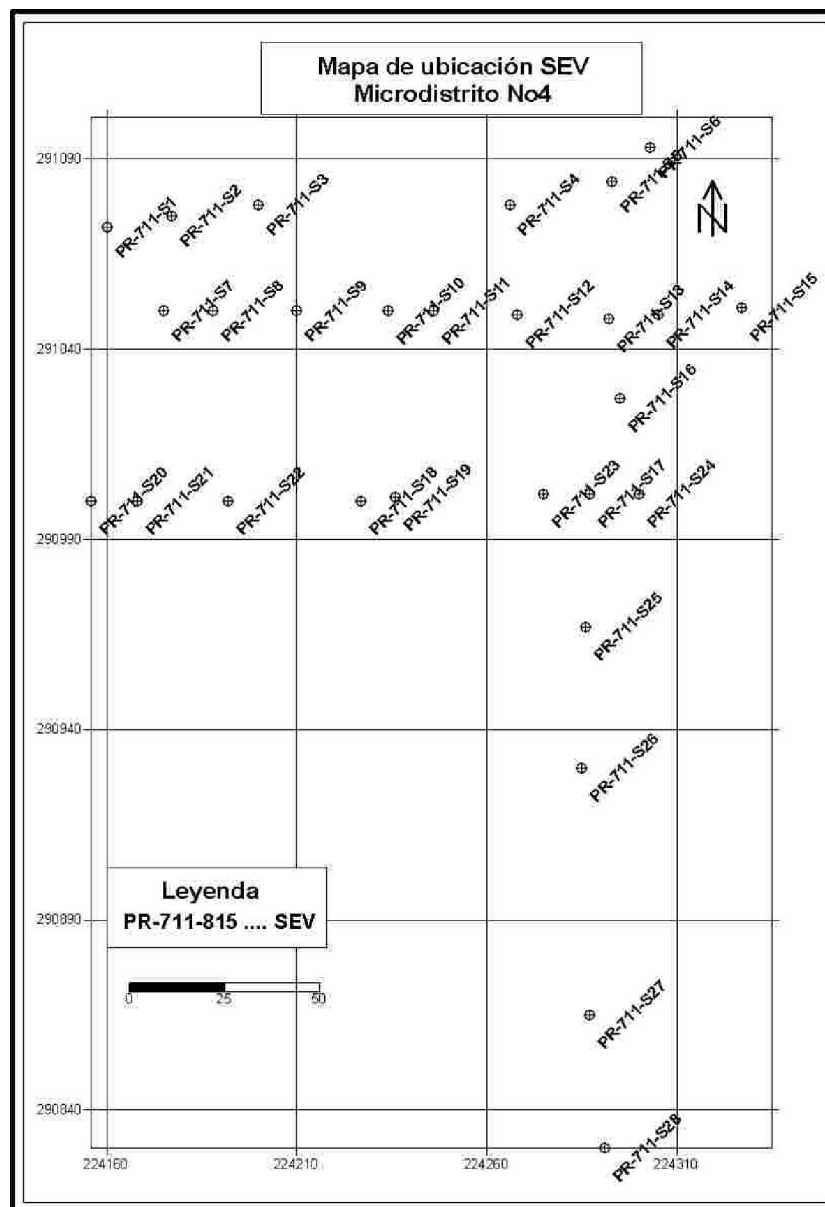


Fig. 2.2. Mapa de ubicación de los SEV geofísicos.

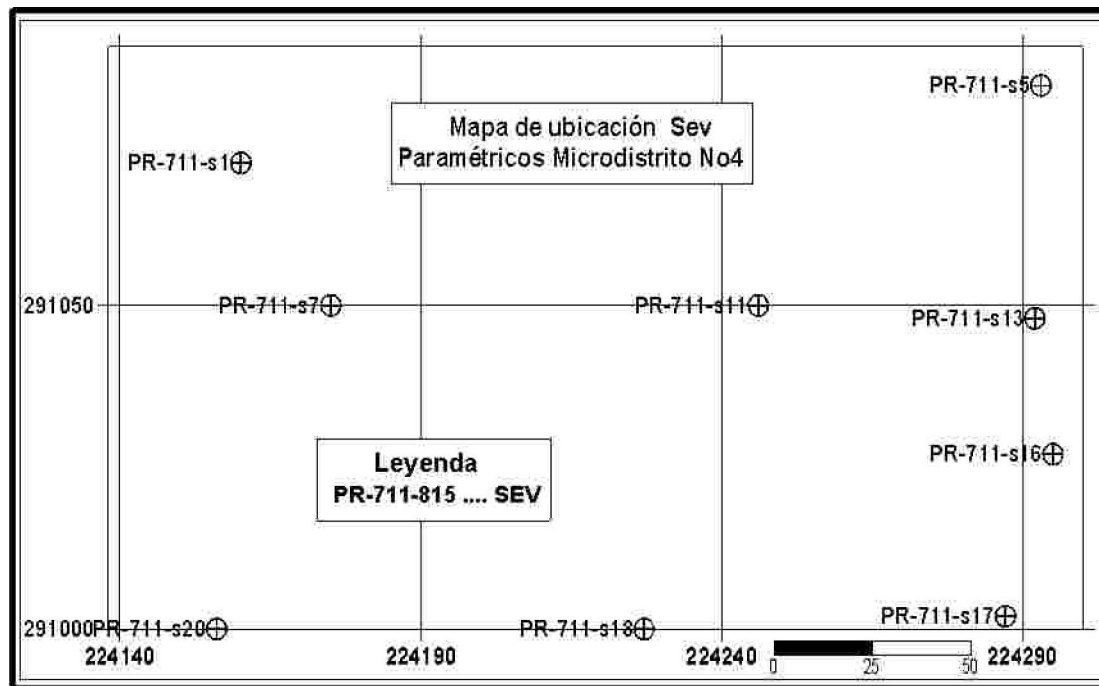


Fig. 2.3. Mapa de ubicación de los SEV paramétricos.

2.2.2 Sector Borregos

La tomografía eléctrica 2D puede obtener mejores resultados en áreas con geología y anomalías moderadamente complejas (Griffiths y Barrer en López et al, 2006). Las mediciones se efectúan usando un número grande de electrodos (25 o más) conectados a un cable multi-núcleo. Una microcomputadora portátil junto con un conector electrónico se usa para automáticamente seleccionar los cuatro electrodos correspondientes para cada medida.

La pseudosección da una idea aproximada de la distribución de resistividad del subsuelo y una visión deformada del subsuelo, porque la forma de los contornos depende del tipo de arreglo o configuración electródica utilizada, así como también, de la resistividad del subsuelo.

Un modelo más preciso del subsuelo es un modelo bidimensional (2D), donde la resistividad cambia tanto en la dirección vertical como en la dirección horizontal a lo largo de la línea del levantamiento (fig. 2.4).

b) Modelo 2D

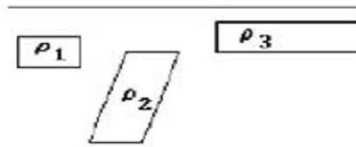


Fig. 2.4. Modelo bidimensional del subsuelo en la interpretación de datos de resistividad según el método de tomografía eléctrica 2D.

Se ejecutó el método de tomografía eléctrica 2D en las principales trazas por las que se proyecta la construcción de la obra subterránea. Para la adquisición de los datos, se desplegó el dispositivo Wenner-Schlumberger (fig. 2.5), utilizando un sistema combinado de cuatro electrodos múltiples acoplados a un cable que cuenta con 48 nodos, los que son gobernados por el sistema inteligente, que les ordena las combinaciones para las que fueron previamente programadas. Las distancias entre electrodos de medición fueron de 2 y 3 m, en dependencia de la longitud de los perfiles a investigar, alcanzándose una profundidad de investigación entre 15 m y 17 m, indistintamente.

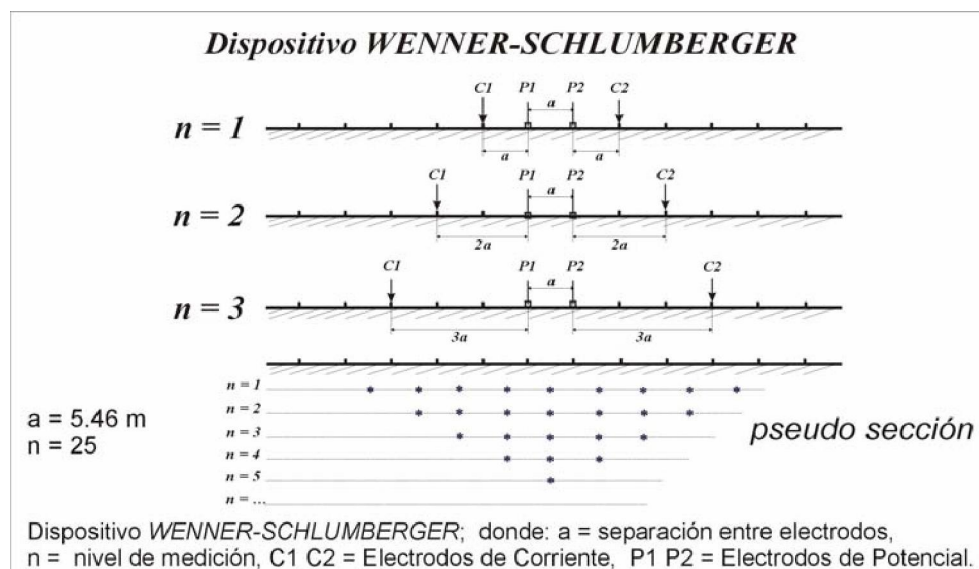


Fig. 2.5. Dispositivo Wenner-Schlumberger y pseudosección correspondiente.

En total se ejecutaron 10 perfiles, los cuales se muestran en el mapa con la ubicación de las calas correspondientes (fig. 2.6) y se obtuvieron 30 imágenes eléctricas, empleándose un equipo de medición Syscal Junior (Iris Instruments, Francia).

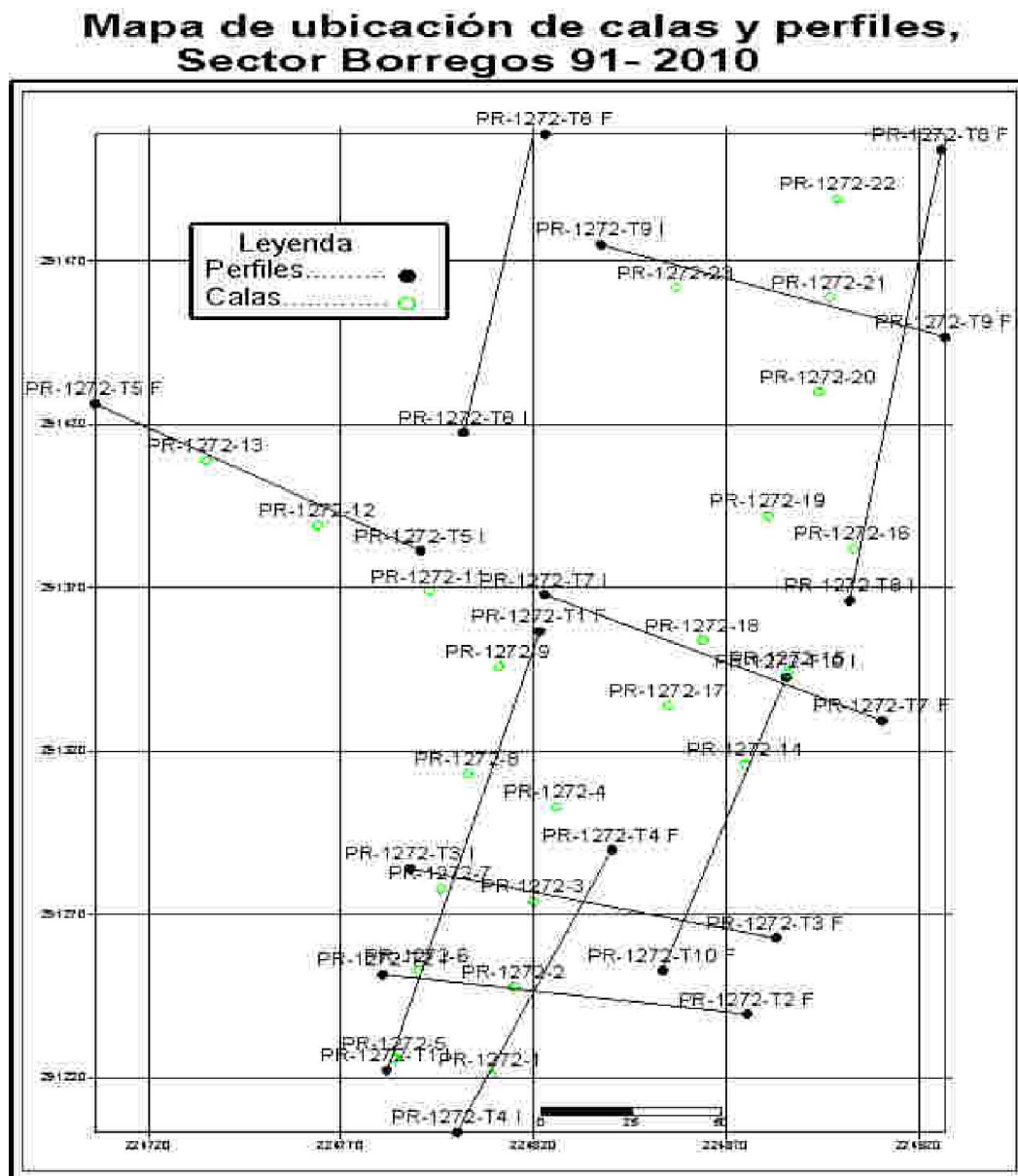


Fig. 2.6. Mapa de ubicación de los perfiles geofísicos y calas en el área de estudio.

2.3 Metodología para el procesamiento de la información

La información se procesó a partir de la interpretación de los sondeos eléctricos verticales-1D, así como de las tomografías eléctricas mediante el software Res2dinv y Surfer; además se realizaron análisis estadísticos de los resultados de la estimación de diferentes parámetros.

2.3.1 Sondeo eléctrico vertical 1D

En la figura 2.7 aparece un esquema con la metodología utilizada para el procesamiento de la información, resultado de la aplicación del SEV 1D en el Microdistrito No. 4.

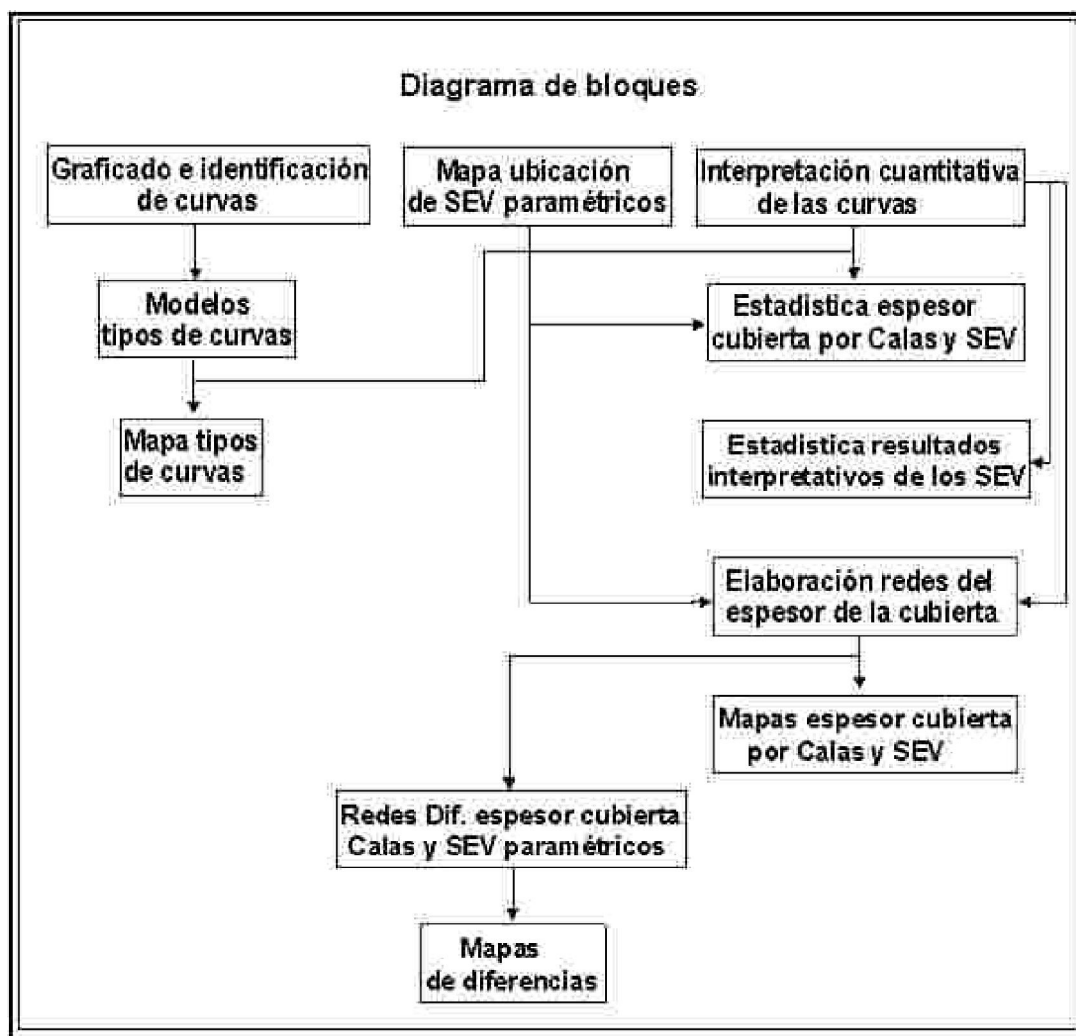


Fig. 2.7. Diagrama de bloques del procesamiento de los SEV 1D.

A partir de la interpretación cualitativa de los SEV, consistente en el graficado e identificación de los tipos de curvas obtenidos, se establecieron los modelos de tipos de curvas en dependencia de la situación de las características del corte, aspecto que se

complementa con la elaboración del mapa de tipos de curvas. Para el desarrollo de esta tarea también se tiene en cuenta calibrar los modelos establecidos con el mapa de ubicación de SEV paramétricos.

Por otra parte, con la ejecución de la interpretación cuantitativa de las curvas de SEV1D, un primer procesamiento propuesto es la realización del análisis estadístico de los resultados obtenidos en la cobertura sobre la Formación Paso Real, a partir de la red de calas y SEV disponibles en el sector y comparar estos resultados.

Otro procedimiento consiste en, partiendo de la red de puntos de SEV paramétricos, establecer la geometría de las redes a elaborar. Este procedimiento consiste en determinar las coordenadas límites del sector, así como el intervalo adecuado para los nodos de la red, utilizándose para ello la siguiente expresión (Oasis Montaj, 1998):

$$\Delta r = (0.25 - 0.5) \cdot \sqrt{\frac{\text{área}(m^2)}{\# \text{ de puntos}}}$$

Se emplea como interpolador el correspondiente a la distancia inversa a una potencia, tomando en cuenta la posibilidad de esta función de dar más peso a los puntos de la red de observaciones, con lo cual se cumple el objetivo de estimar una tendencia del comportamiento del espesor de cobertura sobre la Formación Paso Real.

Fueron elaboradas las redes correspondientes al espesor de cubierta de la Formación Paso Real, tanto para la red de puntos de SEV interpretados, como para la red de calas presentes en el sector norte. Con el objetivo de evaluar la calidad de las redes, se realizó el análisis de residuos, calculándose el RMS (raíz del cuadrado medio), cuyos resultados permiten evaluar la efectividad del método.

Otra vía utilizada en la propuesta metodológica es empleando el álgebra de redes, mediante el cálculo de una red de diferencias de los espesores de cobertura entre las calas y SEV paramétricos, con el objetivo de identificar aquellas zonas de mayores diferencias y los modelos de curvas correspondientes.

2.3.2 Procesamiento de tomografía eléctrica

El objetivo de esta etapa del procesamiento de la información consiste en la elaboración de mapas de contornos de resistividad verdadera a diferentes profundidades, obtenidos con la tomografía eléctrica 2D. Las bases de datos originales del procesamiento de la información con este sistema de observación presentan el inconveniente que solo incluyen las coordenadas iniciales y finales de los perfiles, así como los valores de las distancias entre los puntos en cada perfil. Para poder obtener las redes de observación correspondientes, se hizo necesario aplicar un procedimiento que permitiera, sobre la información antes señalada, interpolar los valores de las coordenadas para cada punto en todos los perfiles existentes en el área. En la figura 2.8 aparece un esquema con el modelo del procedimiento para estimar las coordenadas de los puntos de un perfil, conocidas sus coordenadas de inicio y la distancia entre los puntos.

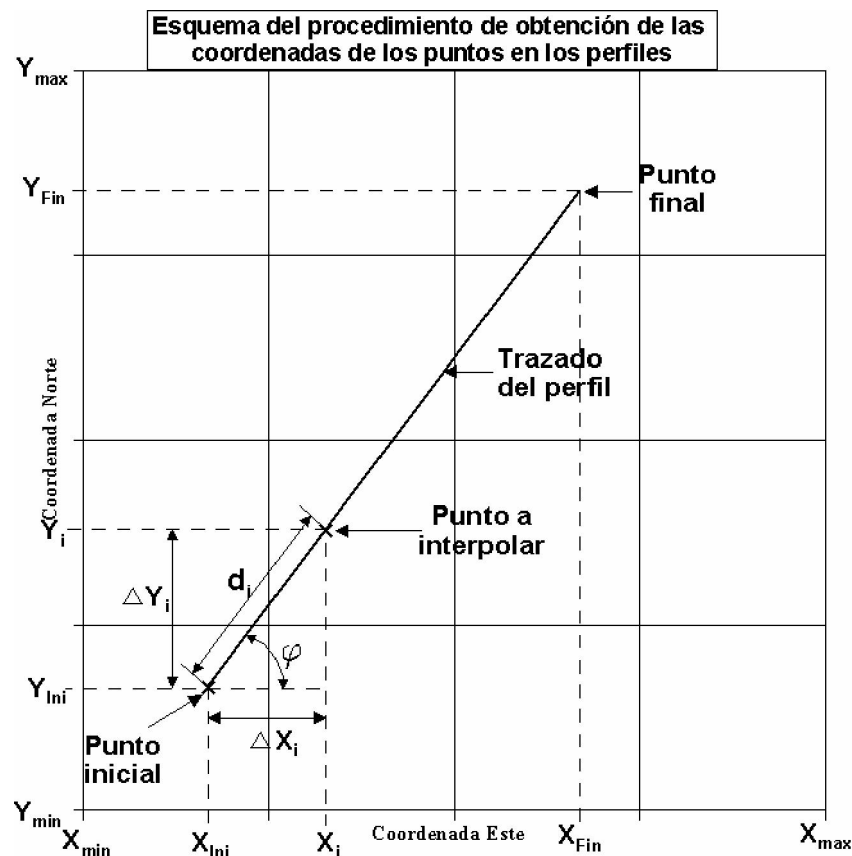


Fig. 2.8. Modelo de procesamiento para calculo de coordenadas de los puntos en los perfiles.

Partiendo de las coordenadas conocidas de los puntos inicial y final de cada perfil, el primer procedimiento consiste en el cálculo del ángulo del perfil respecto al este geográfico, mediante la expresión:

$$\varphi = \tan^{-1} \left[\frac{Y_F - Y_I}{X_F - X_I} \right]$$

Una vez obtenido este ángulo, es posible calcular los incrementos, tanto en la coordenada X, como en la Y, mediante las siguientes expresiones:

Incremento en coordenada X: $\Delta X_i = d_i \cdot \cos(\varphi)$

Incremento en coordenada Y: $\Delta Y_i = d_i \cdot \sin(\varphi)$

Las expresiones para el cálculo de las coordenadas de los puntos en los perfiles, así como el signo de estos incrementos, depende de la orientación del perfil, como se aprecia en la figura 2.9.

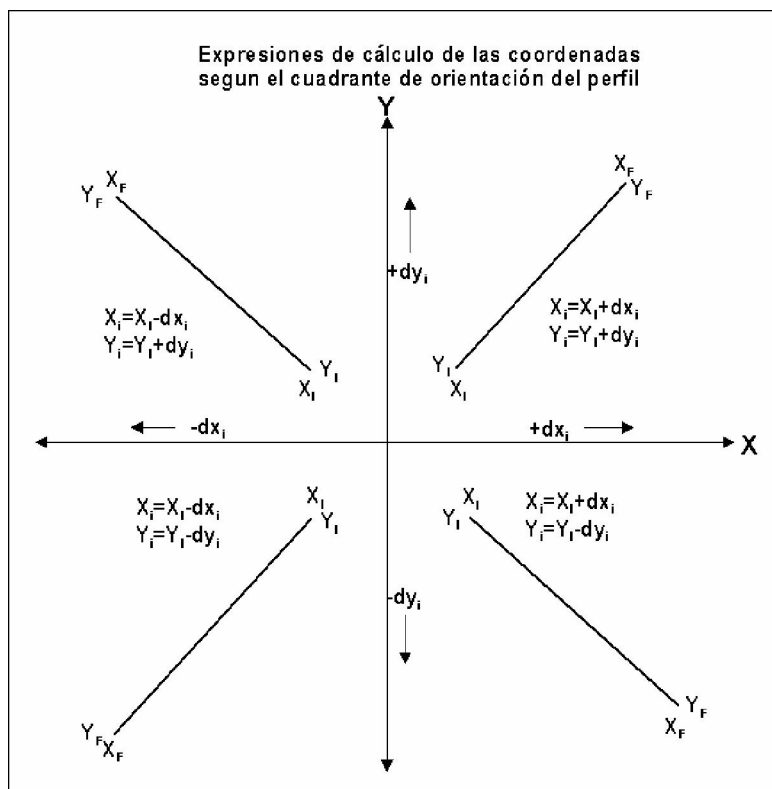


Fig. 2.9. Expresiones para el cálculo de las coordenadas según el cuadrante.

Para calcular el intervalo de red adecuado, según el área y el número de puntos disponibles en la base de datos, se empleó la siguiente expresión:

$$\Delta r = (0.25 - 0.5) \cdot \sqrt{\frac{\text{área}(m^2)}{\# \text{ de puntos}}}$$

El resultado de la aplicación de esta expresión indicó un intervalo entre 7x7 m a 14x14 m, tomándose finalmente una red de 10x10 m. A partir de estos resultados, fue seleccionada la geometría de las redes a elaborar, que tienen los siguientes parámetros (tabla 2.3)

Tabla 2.3. Geometría de las redes.

	Min	Max	Espaciamiento
Coordenada X	224780	224930	10
Coordenada Y	291200	291510	10

Se empleó como interpolador el correspondiente a la distancia inversa a una potencia, tomando en cuenta la posibilidad de esta función de dar más peso a los puntos de la red de observaciones, con lo cual se cumple el objetivo de estimar una tendencia del comportamiento de las resistividades a diferentes profundidades de la Formación Paso Real.

CAPÍTULO 3: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

El capítulo tiene como objetivo final mostrar los resultados de la interpretación de los materiales geofísicos obtenidos en las dos áreas de estudio seleccionadas, donde están presentes los depósitos de la Formación Paso Real. En primer lugar, se presenta un mapa de grado de estudio geofísico en sedimentos de la Formación Paso Real y más jóvenes, correspondiente a la parte sur de la provincia de Pinar del Río.

Para finalizar el capítulo, se realiza una valoración de la efectividad del método de sondeo eléctrico en la solución de diferentes tareas ingeniero-geológicas en la Formación Paso Real.

3.1 Grado de estudio geofísico

La Formación Paso Real presenta una amplia propagación en la Llanura Sur de la provincia de Pinar del Río, aflorando en su borde septentrional, donde el relieve se hace más ondulado y comienza la denominada zona premontañosa. En la mayor parte del territorio esta formación constituye el horizonte rocoso y está cubierta por sedimentos más jóvenes del Plioceno y Cuaternario (Cabrera, 2002).

La Llanura Sur constituye la región de mayor desarrollo económico de la provincia, fundamentalmente agrícola y agroindustrial, siendo asiento de numerosas inversiones ejecutadas en la década de los ochenta del pasado siglo, cuando se experimentó un notable auge constructivo en el país. Esto dio lugar al incremento considerable de los estudios geotécnicos, incluyendo la aplicación de métodos geofísicos, particularmente sondeo eléctrico vertical (SEV 1D) y, en menor medida, sísmica de refracción y magnetometría (anexo 3.1).

3.2 Interpretación de las mediciones geofísicas

3.2.1 Edificios Microdistrito 4

Ø Análisis de los SEV paramétricos

Del total de puntos de SEV medidos en esta área, se ubicaron 9 junto a calas con el objetivo de parametrizar las curvas de SEV con el corte litológico de las calas (tabla 3.1). La ubicación de los SEV paramétricos se muestra en la figura 3.1.

Las curvas de los SEV paramétricos 1 y 16 (anexos 3.2 y 3.3) ilustran las dos situaciones presentes en el área de estudio. En el primer caso (SEV 1, cala 1), el corte es del tipo 2C ($\rho_1 > \rho_2$), donde $\rho_1 = 150$ ohm.m, y caracteriza la presencia de una cubierta resistiva de suelo arcillo-arenoso sobre la Formación Paso Real, definida por una baja resistividad eléctrica (22 ohm.m).

En el segundo caso (SEV 16, cala 16), en que aflora la Formación Paso Real, el corte geoelectrico es de tipo H ($\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$), pero ρ_1 es de solo 36 ohm.m, indicativo de que está ausente la cubierta de suelo más resistivo.

Tabla 3.1. SEV paramétricos en el Microdistrito 4.

SEV	Cala	X	Y	Z
1	1	224160	291072	41.3
20	4	224156	291000	44.6
18	7	224227	291000	44.8
7	8	224175	291050	42.4
11	11	224246	291050	41.8
16	16	224295	291027	44.6
17	18	224287	291002	46.2
5	21	224293	291084	41.5
13	23	224292	291048	43.0

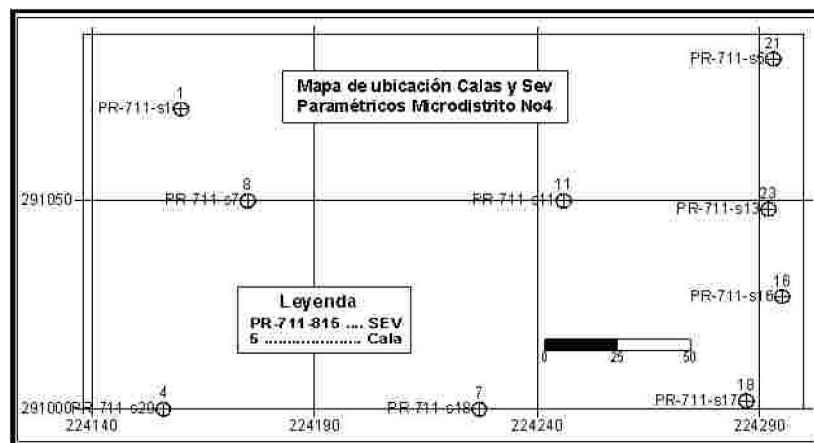


Fig. 3.1. Mapa de ubicación de calas y puntos de SEV paramétricos.

En la tabla 3.2 se muestra el análisis estadístico de los tipos de cortes geoelectricos en los 9 sondeos paramétricos.

Tabla 3.2. Tipos de curvas en los SEV paramétricos.

Tipo de curva	Cantidad	% del total
$\rho_1 > \rho_2$	4	44.4
$\rho_1 < \rho_2$	1	11.2
$\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$	4	44.4
Total	9	100.0

La presencia de la Formación Paso Real en el corte se caracteriza por una disminución de la resistividad eléctrica, entre las secuencias sobreyacentes y las rocas de la misma. Ese comportamiento se manifiesta en algo más del 88.8% de los SEV analizados.

La tabla 3.3 recoge el procesamiento estadístico de las interpretaciones de los SEV paramétricos del Microdistrito 4. La primera capa del corte geoelectrico, que sobreyace a la Formación Paso Real, presenta una resistividad eléctrica promedio de 104 ohm.m y un rango de espesores entre 0.7 m y 3.4 m. Por su parte, la capa geoelectrica que representa a la Formación Paso Real se caracteriza por presentar valores de resistividad eléctrica muy bajos, con una media de 24.6 ohm.m y espesores en el rango entre 5.5 m a 8.5m. La tercera capa geoelectrica del corte, no cortada por la perforación en la mayoría de los casos, se supone que corresponde a un cambio litológico intraformacional, presumiblemente condicionado a un incremento en la presencia de carbonatos, trayendo como consecuencia un aumento ligero en su resistividad eléctrica, hasta un valor promedio de 54 ohm.m.

Tabla 3.3. Estadística de los resultados de la interpretación de los SEV.

Parámetro	ρ_1 (ohm.m)	h_1 (m)	ρ_2 (ohm.m)	h_2 (m)	ρ_3 (ohm.m)
Mín	36.0	0.7	14.0	5.5	45.0
Máx	120.2	3.4	42.0	8.5	70.0
Media	104.0	2.0	24.6	7.3	54.0

Parámetro	ρ_1 (ohm.m)	h_1 (m)	ρ_2 (ohm.m)	h_2 (m)	ρ_3 (ohm.m)
Desv. estándar	104.0	0.9	8.2	1.4	11.5
Desv. promedio	79.9	0.7	6.0	1.2	8.5
Coef. variación	66.0	36.7	24.3	16.4	15.7

Ø Mapa de tipos de curvas

En las figuras 3.2 y 3.3 se muestran algunos ejemplos típicos de curvas de SEV en el área Microdistrito 4. Como se aprecia en el caso de los modelos de 2 capas, la rama final de las curvas tienden a valores muy similares en todos los casos, indicando siempre que $\rho_1 > \rho_2$. En cuanto a los modelos de 3 capas, están representados por curvas tipo H ($\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$), apreciándose de nuevo un patrón de comportamiento muy estable en la tendencia en los valores de la resistividad aparente de la segunda capa (intermedia), del corte geoelectrico. El mapa general de tipos de curvas se presenta en la figura 3.4.

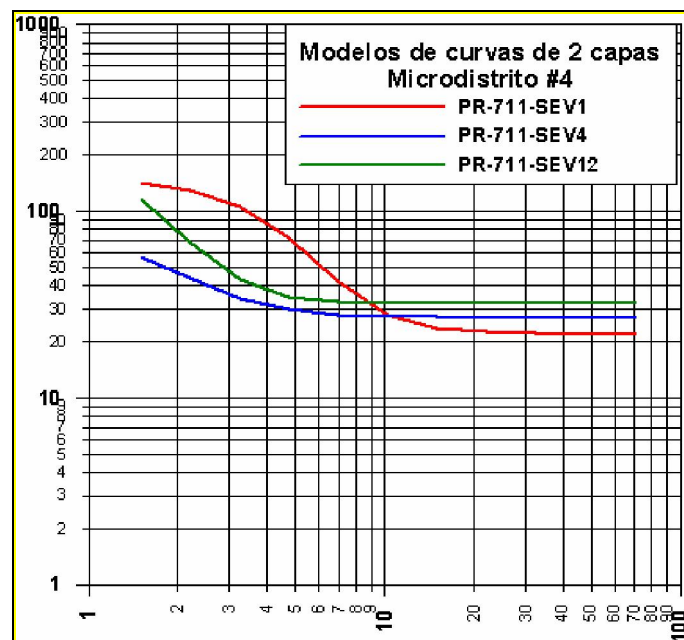


Fig. 3.2. Patrones de curvas de 2 capas típicas de la Formación Paso Real.

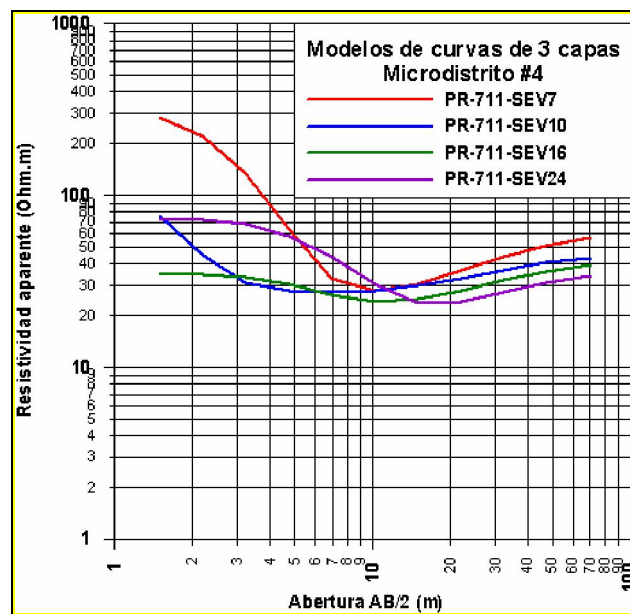


Fig. 3.3. Patrones de curvas de 3 capas típicas de la Formación Paso Real.

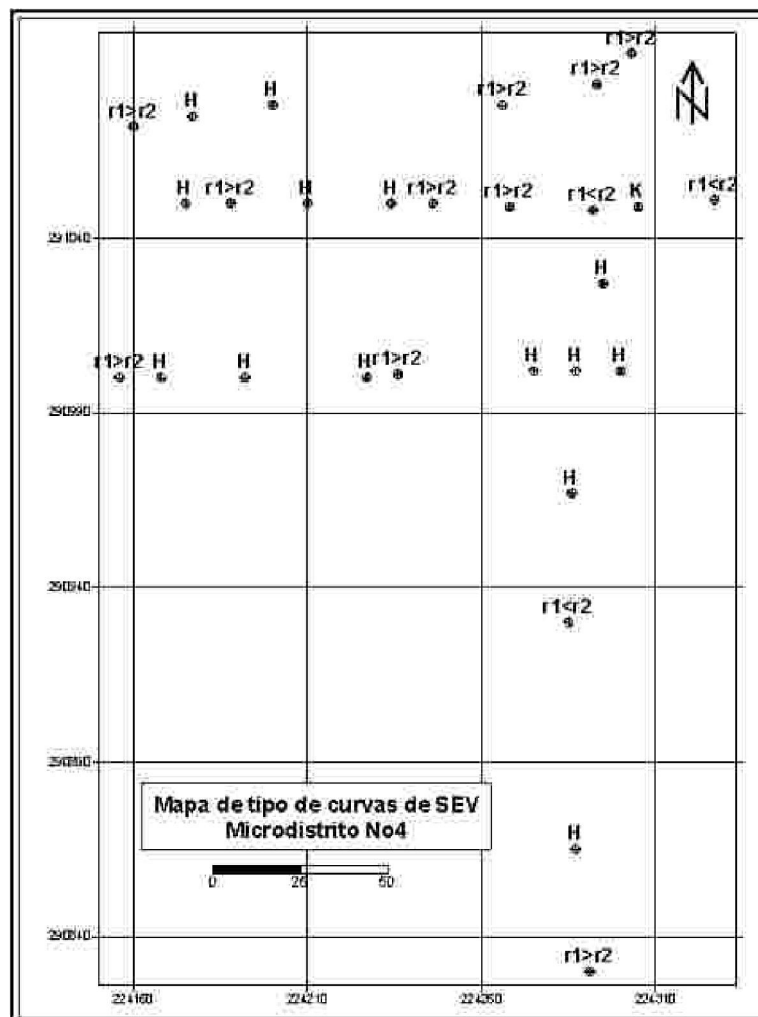


Fig. 3.4. Mapa de tipos de curvas.

Ø Espesor de la cubierta

Como parte del procesamiento, se realizó un análisis del espesor de la cubierta estimado por los SEV paramétricos y el determinado en las calas (tabla 3.4). Los resultados de los análisis estadísticos realizados al espesor de la cubierta de Paso Real por los SEV y las calas, muestra una diferencia de 0.7 m entre los parámetros medidos.

Tabla 3.4. Estadística espesor de cubierta sobre Formación Paso Real.

Parámetro	Espesor de cubierta	
	Por calas	Por SEV
Promedio	1.3	2.0
Mín	0.0	0.7
Máx	2.7	3.4
Desviación estándar	1.2	0.8

Los mapas de contornos de espesores de cubierta, para los SEV y calas, muestran las posibles zonas de la superficie donde aflora la Formación Paso Real (fig. 3.5 y 3.6).

A partir del análisis estadístico de los espesores de SEV, podemos observar que los espesores de cubierta que van del rango 2 a 3 m, de coloración rosado a rojo en el mapa, corresponden al techo donde la Formación Paso Real aflora en la superficie, y de 0 a 2 m, de coloración azul fuerte a claro, corresponden al techo de Paso Real donde aflora la Formación Guane en la superficie (fig. 3.5).

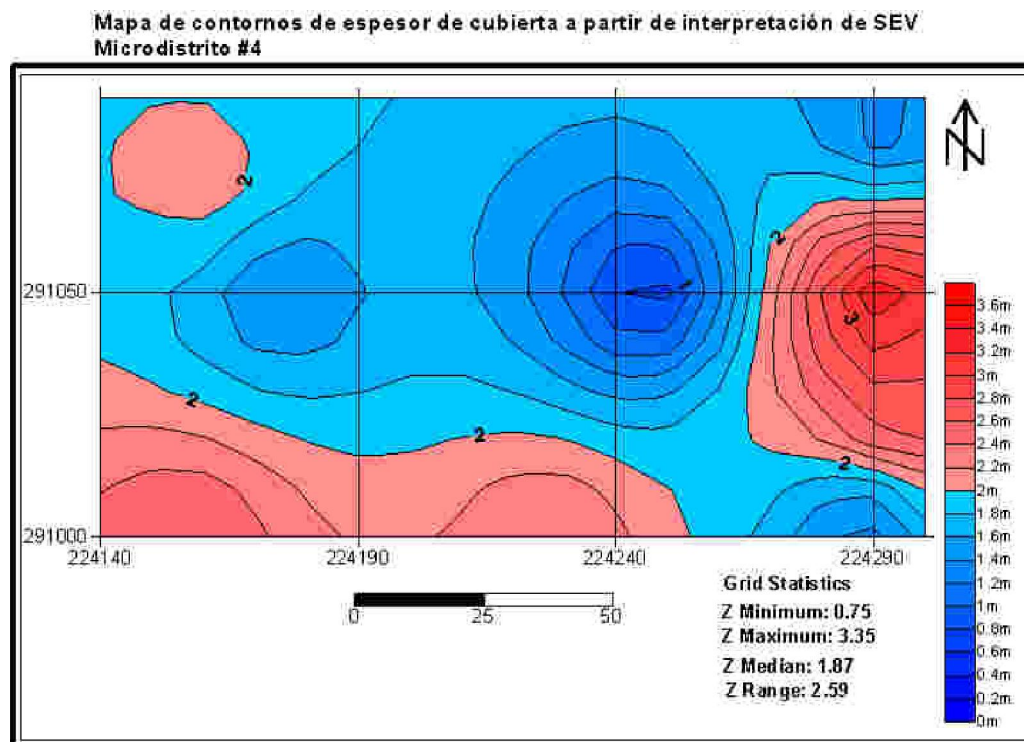


Fig. 3.5. Mapa de contornos de espesor de cubierta a partir de los SEV.

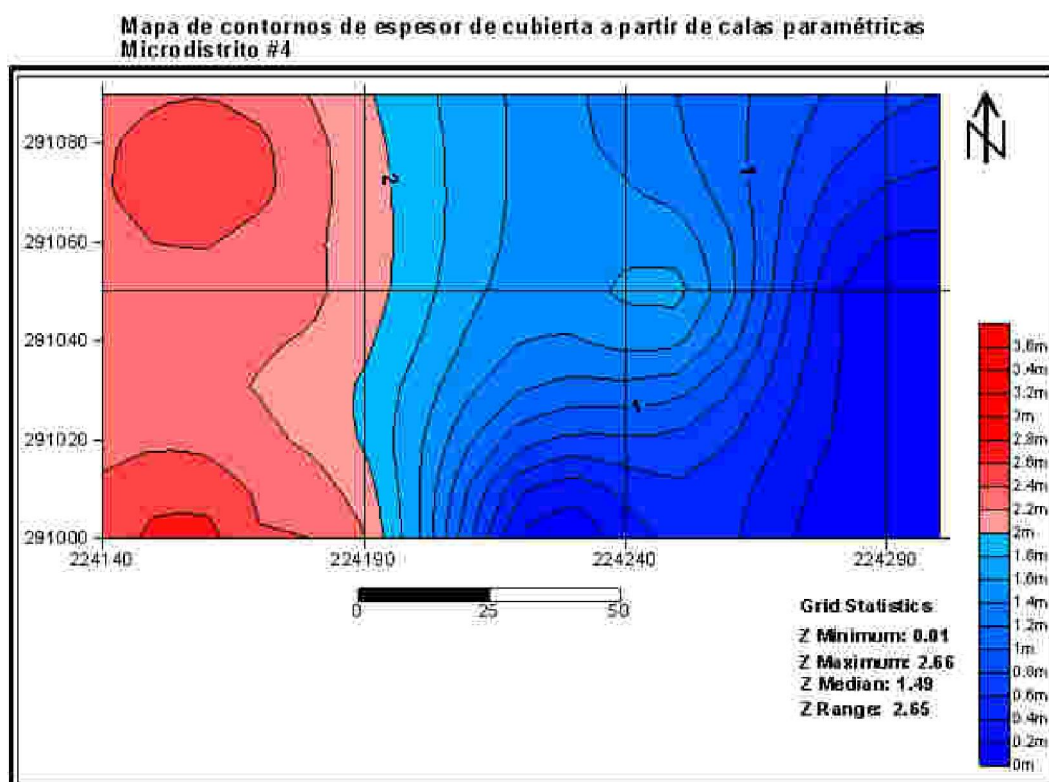


Fig. 3.6. Mapa de contornos de espesor de cubierta a partir de las calas.

A partir del análisis estadístico de los espesores de las calas, podemos observar que los espesores de la cubierta que van del rango 1 a 2.6 m, de coloración azul claro a rosado en el mapa, corresponden al techo de la Formación Paso Real donde aflora la Formación Guane en la superficie, y de 0 a 1 m, de coloraciones azules, corresponden a las zonas donde la Formación Paso Real aflora directamente a la superficie (fig. 3.6). El error obtenido en la estimación del espesor de cubierta, empleando el SEV, es de ± 11.8 cm; similar al obtenido utilizando las calas (tabla 3.5).

Tabla 3.5. Evaluación calidad de las redes de espesor de cubierta.

Parámetro	Calas espesor de cubierta	SEV espesor de cubierta
Suma cuadrados (SM)	0.32	0.32
SM/(n-1)	0.01	0.01
RMS	± 11.4	± 11.8

A partir del análisis estadístico de diferencias en el espesor de cubierta a partir de las calas y SEV, se puede observar que los espesores de la cubierta que van del rango 0 a 0.5 m, de coloración marón en el mapa, corresponden al techo de la Formación Paso Real donde aflora la Formación Guane en la superficie, de -3.0 a 0.0 m, de coloración azul, corresponden a las zonas donde Paso Real aflora en la superficie (fig. 3.7).

Como otra vía para evaluar las diferencias entre el espesor de cubierta de las calas y las estimadas por los SEV se calcularon los residuos entre la red de las calas y los espesores de cubierta en los puntos de SEV y se estimó el RMS (raíz del cuadrado medio), dando como resultado un error de ± 1.41 m.

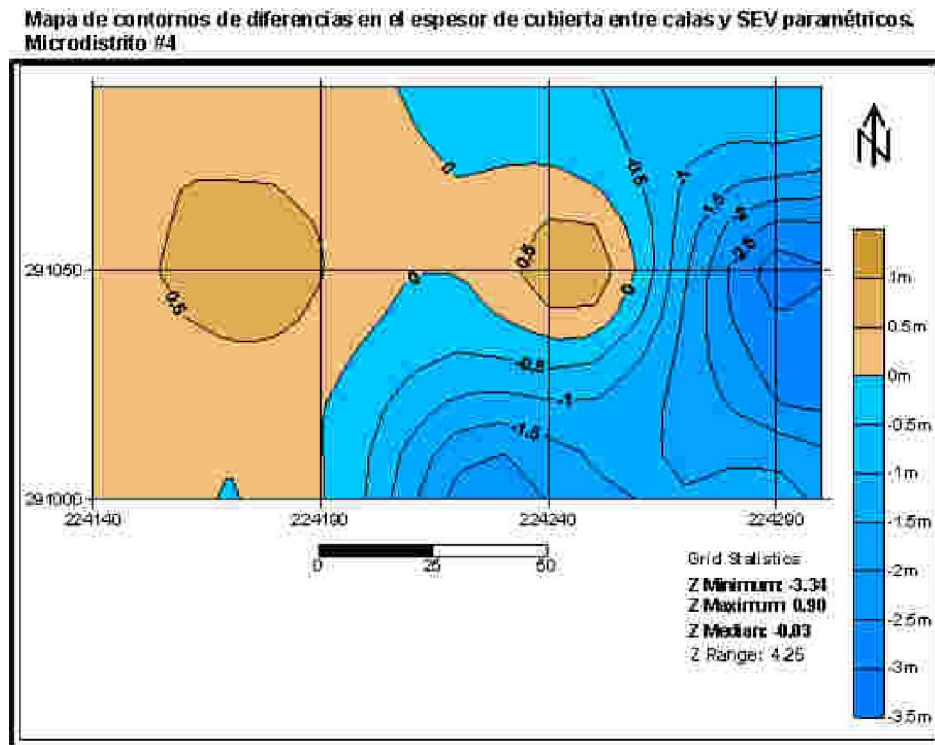


Fig. 3.7. Mapa de contornos de diferencias en el espesor de cubierta a partir de las calas y SEV.

3.2.2 Sector Borregos

Los resultados del procesamiento de los datos de tomografías se muestran en forma de imágenes eléctricas en perfiles, mapas de contornos a diferentes profundidades y mapas de contornos del espesor de la cubierta.

Ø Imágenes eléctricas en perfiles

Los resultados de los trabajos geofísicos se presentan en forma de secciones tomográficas para las líneas investigadas. De forma general, el rango de valores de la resistividad eléctrica varió en un rango muy amplio: desde valores mínimos de 16 ohm.m e inferiores, llegando hasta 2 ohm.m, hasta valores máximos de 800 ohm.m y superiores, que llegan en lugares aislados hasta 1400 ohm.m.

Realizando un análisis comparativo de los valores de resistividad eléctrica para las diferentes secciones procesadas en el área de estudio, de conjunto con los datos de los sondeos mecánicos realizados en cada perfil, se establecieron las siguientes regularidades para la resistividad eléctrica de los suelos del corte geológico:

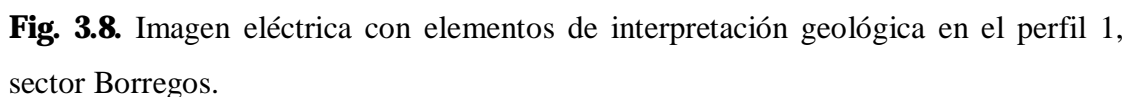
- Las anomalías que se corresponden con el rango de valores de resistividad eléctrica más alto del área (170 a 800 y más ohm.m), que aparecen de forma discontinua en la parte superior de los diferentes cortes, y con espesores pequeños comprendidos entre 1 y 3 m, se asocian a suelos arcillo-arenosos limosos, de colores variables (desde gris hasta amarillo rojizo), con baja humedad en general y muy deleznales, acompañados de gravas y fragmentos de cuarzo de diferentes diámetros y proporciones en cada uno de los perfiles. En estos suelos el valor de la resistividad eléctrica está relacionado con los siguientes factores: contenido de la fracción gruesa, representada por gravas y fragmentos de cuarzo; contenido de arcilla del suelo; y, grado de saturación de agua.

En la fig. 3.8 se muestran la imagen eléctrica y el corte geológico esquemático del perfil 1, donde se observa que los valores de mayor resistividad eléctrica de la capa superior se extienden entre la estación 69 y la 141.

Las anomalías de la resistividad eléctrica real que se delimitan en el rango de valores de 60 ohm.m hasta 170 ohm.m, considerando estas con un comportamiento intermedio en cuanto a sus intensidades para el área, de espesores variables, se pueden asociar con una alternancia caótica de margas y calizas muy meteorizadas, las que se encuentran por demás en estado semirrocoso, además de calizas organógenas, arcillas carbonatadas y margas con fracción gruesa.

Las anomalías de resistividad eléctrica real comprendidas en el rango de valores inferiores a 16 ohm.m hasta 60 ohm.m, considerándose las anomalías más débiles en intensidades para esta área de investigación, sus espesores son variables, los de mayores potencias de capas y a la vez los de mayor distribución espacial en la mayoría de los cortes presentados. Desde el punto de vista ingeniero geológico, se vinculan con suelos del tipo, en lo fundamental, arcillo-arenosos carbonatados, los que presentan intercalaciones de calizas de colores blancos con oquedades cársticas, inmersos todos en una matriz con predominio de componentes arcillosos.

El comportamiento en profundidad de la resistividad eléctrica puede ser analizado mediante los mapas de contornos realizados a tres profundidades, 2 a 2.5, 6.5 y 15 m (fig. 3.9). En el mapa correspondiente a la parte superficial del corte, los sectores más resistivos están asociados con los suelos arenosos de cubierta, mientras que los mínimos de resistividad eléctrica indican los sectores donde aflora la Fm. Paso Real, como se aprecia en la fig. 3.10.



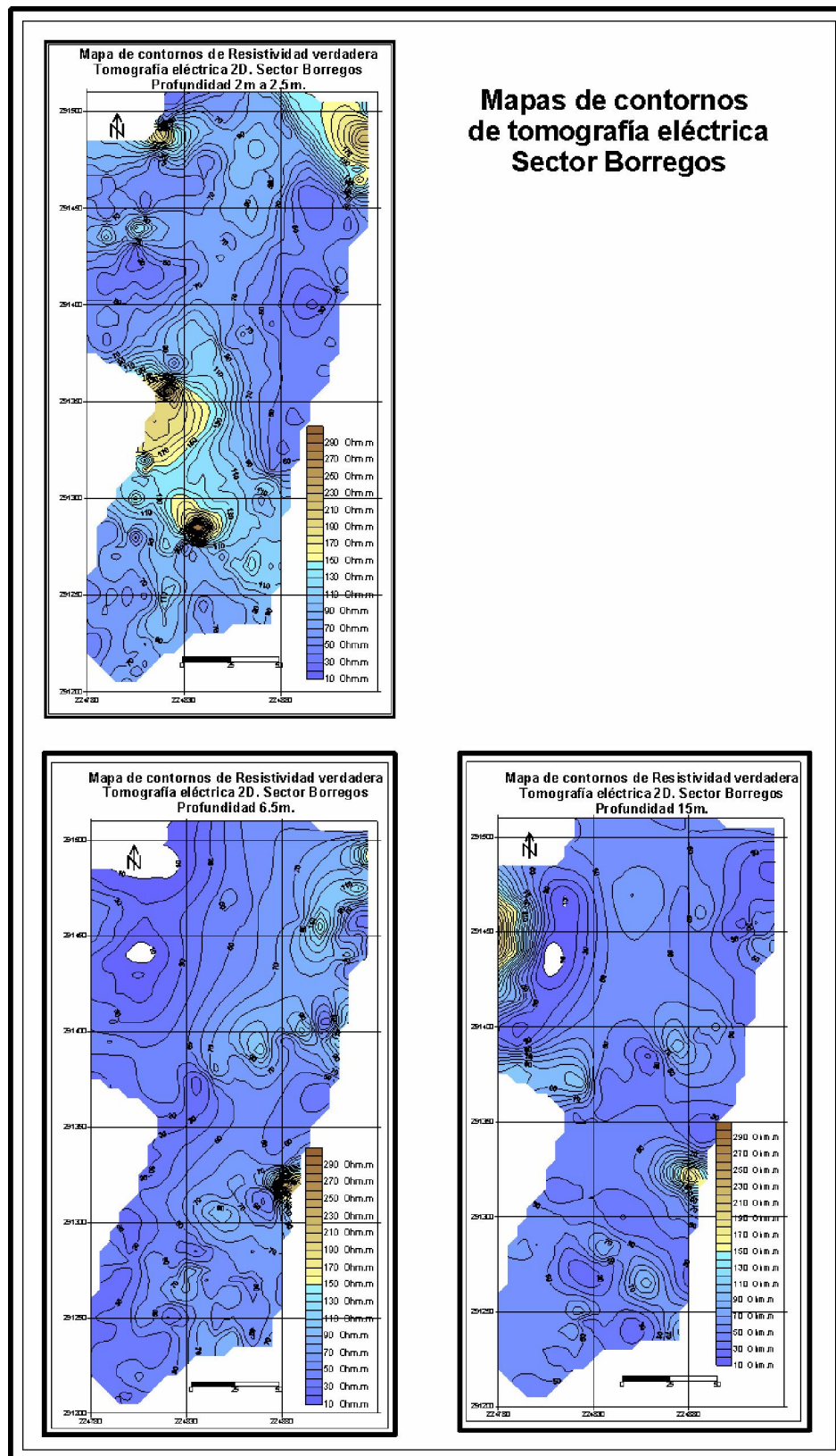


Fig. 3.9. Mapas de contornos de resistividad verdadera a diferentes profundidades.

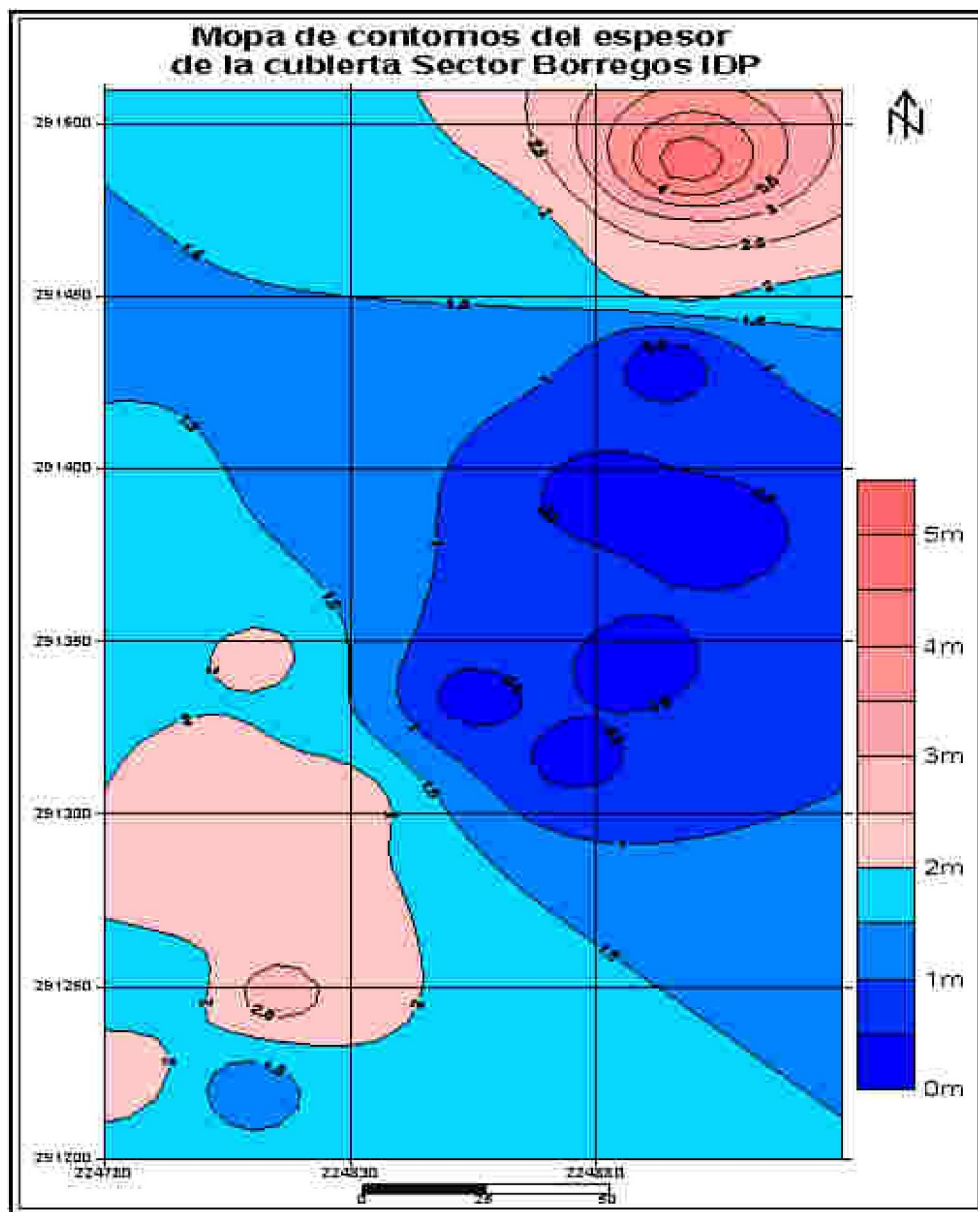


Fig. 3.10. Mapas de contornos del espesor de la cubierta. Sector Borregos.

En los cortes dados a mayor profundidad (6.5 y 15 m), donde están presentes los depósitos de esta formación, las zonas más resistivas están relacionados con un mayor contenido de carbonatos en las rocas, mientras que la disminución de la resistividad señala la presencia de mayor arcillosidad (arcillas carbonatas o margas) en el corte.

3.3 Efectividad del sondeo eléctrico en la Formación Paso Real

A partir del análisis de los materiales geológicos y geofísicos en las dos áreas de estudio seleccionadas, se obtuvieron un grupo de resultados sobre las ventajas y limitaciones del empleo del método de sondeo eléctrico (SEV 1D y tomografía 2D), durante la solución de diferentes tareas de los estudios ingeniero-geológicos, en áreas de características geológicas similares.

Ü Diferenciación litológica de los suelos de cubierta

La presencia en superficie de los depósitos de la Fm. Paso Real y/o los productos de su meteorización se destacan por valores bajos de resistividad eléctrica (10-40 ohm.m) en la primera capa geoelectrica. En el caso del SEV, los tipos de cortes geoelectricos característicos son: 2C ($\rho_1 < \rho_2$) y H con $\rho_1 < 60$ ohm.m.

Por otra parte, cuando los sedimentos de la Formación Paso Real están cubiertos por suelos arcillo-arenosos de baja humedad, típicos de la Fm. Guane, los valores de la resistividad eléctrica de la capa superior están comprendidos entre 170-800 y más ohm.m. Los tipos de cortes característicos son 2C ($\rho_1 > \rho_2$) y H con $\rho_1 > 60$ ohm.m.

Ü Determinación del espesor de los suelos de cubierta

Los resultados alcanzados demuestran que esta tarea puede ser resuelta con aceptable precisión por el sondeo eléctrico, sobre todo cuando los suelos de cubierta se diferencian apreciablemente por su alta resistividad eléctrica, tal como se observó en las áreas de estudio. En el Microdistrito 4, la diferencia entre los valores obtenidos en los SEV paramétricos y en las calas fue, como promedio, de 0.7 m, mientras que los residuos entre la red de calas y los valores de SEV arrojaron un RMS (raíz del cuadrado medio) de ± 1.41 m.

Ü Diferenciación litológica de los depósitos de la Fm. Paso Real

Este punto fue mejor estudiado en el sector Borregos, a partir de los mapas de isoohmas elaborados a profundidades de 6.5 y 15 m, donde están presentes los depósitos de esta formación. Aunque la evidencia aportada por las calas es incompleta debido a su insuficiente profundidad y descripción generalizada del corte, pudo apreciarse que las zonas más resistivas

están relacionados con un mayor contenido de carbonatos en las rocas, mientras que la disminución de la resistividad señala la presencia de mayor arcillosidad (arcillas carbonatadas, margas) en el corte.

Ü Determinación de la profundidad del nivel freático

La determinación del nivel freático dentro de los depósitos de la Fm. Paso Real se dificulta por la baja resistividad eléctrica que caracteriza normalmente a estos sedimentos, por lo que resulta difícil determinar por este método la presencia del nivel freático.

A manera de resumen, se presenta la siguiente tabla sobre la efectividad del método de sondeo eléctrico en este contexto geológico (tabla 3.6), la cual debe servir de base para servir de guía en la futura elección del método en investigaciones ingeniero-geológicas.

Tabla 3.6. Efectividad del método de sondeo eléctrico sobre Formación Paso Real.

No.	Tarea ingeniero-geológica	Grado de aplicación
1	Diferenciación de los suelos de cubierta: Fm. Guane / Fm. Paso Real	Favorable
2	Espesor de la cubierta	Favorable
3	Diferenciación litológica de los depósitos de la Fm. Paso Real	Favorable
4	Profundidad del nivel freático	Limitado

CONCLUSIONES

Las principales conclusiones de la tesis son las siguientes:

1. El método de sondeo eléctrico vertical (SEV) ha sido empleado con bastante frecuencia durante los estudios ingeniero-geológicos en la Llanura Sur de Pinar del Río, en áreas donde están presentes, cubiertos o no, los depósitos de la Formación Paso Real, contabilizándose un total de 28 obras y 627 puntos de SEV.
2. Los cortes geoeléctricos predominantes son los tipos 2C ($\rho_1 < \rho_2$), 2C ($\rho_1 > \rho_2$) y H, tanto cuando aflora a la superficie o cuando está cubierta por suelos de la Formación Guane. Los depósitos de la Formación Paso Real en las áreas estudiadas se caracterizan, generalmente, por una resistividad eléctrica menor de 80-100 ohm.m.
3. Los mejores resultados con la aplicación del SEV se obtienen en la diferenciación de los suelos de cubierta, la determinación de su espesor y la separación litológica de los depósitos de la Formación Paso Real según su arcillosidad y grado de intemperismo.
4. El análisis efectuado permitió concluir que la inclusión del SEV y/o la tomografía eléctrica, permite aumentar la efectividad y racionalidad de los estudios ingeniero-geológicos en este contexto geológico.

RECOMENDACIONES

1. Ampliar la metodología aplicada a otras formaciones geológicas de la provincia donde se hayan realizado mediciones por este método geofísico.
2. Complementar los trabajos de sondeo eléctrico con otros métodos geofísicos terrestres y de pozo durante los estudios ingeniero-geológicos.

BIBLIOGRAFÍA

1. Bobatchev, A. A., I. N. Modin y V. A. Shevnin (2000). IPI2WIN. Guía del usuario. Univ. Estatal de Moscú, Rusia. Formato digital, 25 p.
2. Cabrera Bermúdez, J. (2002). “Catastro ingeniero geológico y ambiental de la provincia de Pinar del Río.” Tesis doctoral. Univ. P. del Río, Cuba, 100 p.
3. De la Torre Tabares, P., O. Chávez Pérez et al (2010). “Informe ingeniero-geológico Túneles Populares Rpto. Hermanos Cruz”. UIC Pinar del Río, ENIA, 32 p.
4. Furrázola Bermúdez, G. F. y K. E. Núñez Cambra (Compiladores) (1997). Estudios sobre Geología de Cuba. Ed. CNDIG, Inst. Geología y Paleontología, La Habana, 528 p.
5. González de Vallejo, L. I., M. Ferrer et al. (2002). Ingeniería geológica. Editorial Pearson Educación, Madrid.
6. IGP (1994). Léxico estratigráfico de Cuba. (Versión digital). Inst. Geología y Paleontología, La Habana.
7. Kuba, A. (1969). “Informe sobre los resultados de los trabajos geofísicos con fines de búsqueda de aguas subterráneas y como apoyo a las investigaciones ingeniero geológicas en el año 1968.” Dpto. Hidrogeología e Ing. Geológica, Inst. Nac. de Rec. Hidráulicos. La Habana, Cuba. (Copia mecanografiada)
8. Kuba, A. (sin fecha). “Utilización de la exploración eléctrica para la búsqueda e investigación de las aguas subterráneas.” (Copia mecanografiada).
9. López, A., M. Loke, G. Fanton y E. Cara E. (2006). Técnicas prácticas para investigación de resistividad en dos y tres dimensiones (tomografía eléctrica 2D y 3D). www.geoelectrical.com, 36 pp.
10. Loke, M. (2004). Tutorial : 2-D and 3-D electrical imaging surveys. www.geoelectrical.com, 136 pp.
11. Martínez, D. y R. Fernández de Lara (1985). “Informe sobre los trabajos del levantamiento geológico y búsqueda a escala 1:50 000 en la parte central de la provincia de Pinar del Río”. Arch. Prov. Pinar del Río.
12. Molina Padrón, W. L. (2006). “Comparación de los métodos 1-D y 2-D de resistividad eléctrica por medio de sondeos tipo Wenner, dipolo-dipolo y Wenner-Schlumberger con la utilización de los programas DCINV, RES2DMOD y RES2DINV”, Proyecto de grado, Ingeniería Geofísica, Universidad Simón Bolívar, Sartenejas, Venezuela, 128 p.
13. NC 59:2000. Geotecnia. Clasificación geotécnica de los suelos. Oficina Nacional de Normalización, La Habana, Cuba, 25 p.

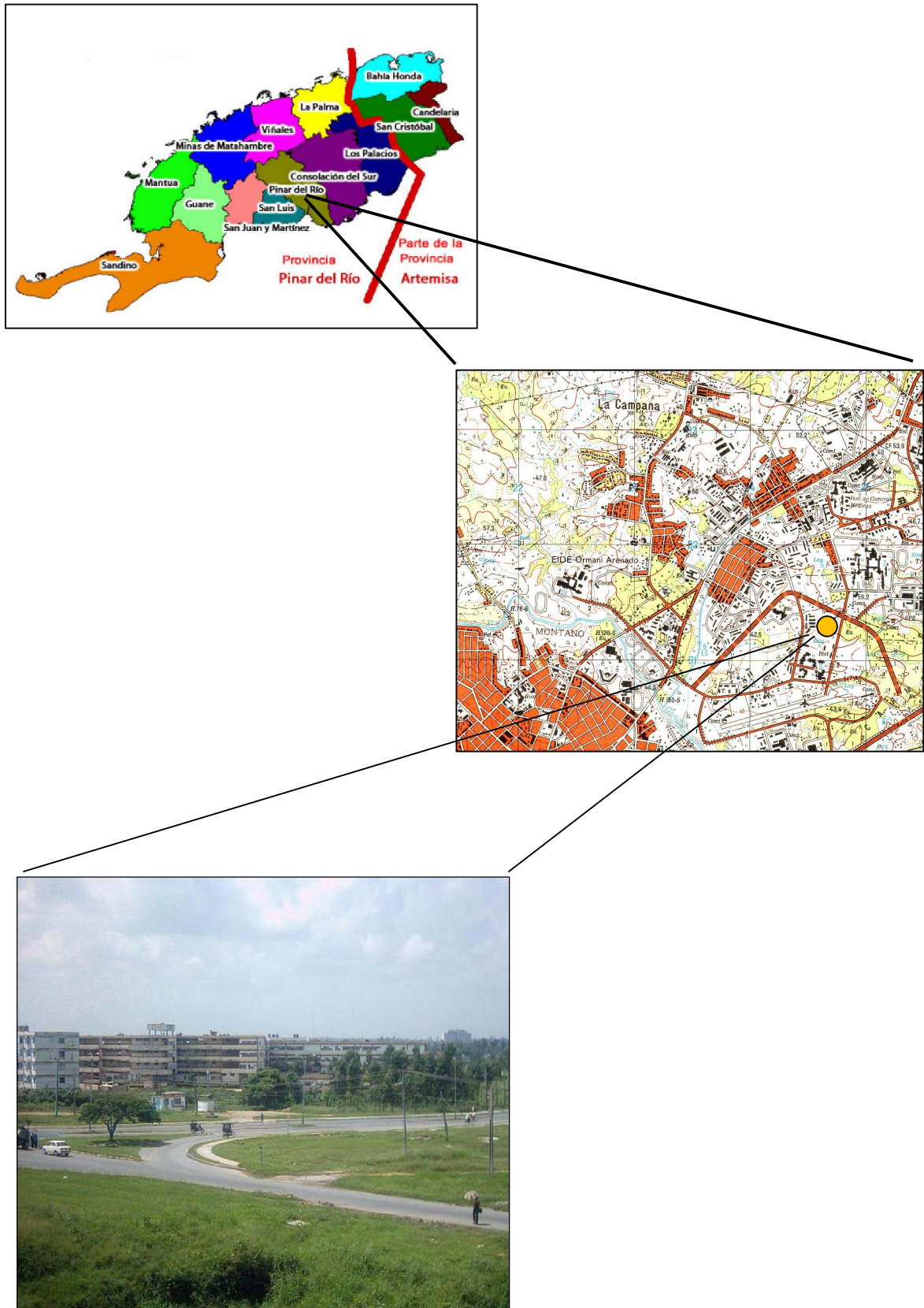
14. Oasis Montaj (1998). Oasis Montaj v. 5.0. Gridding tutorial. Formato digital.
15. Peck, R. B., W. E. Hanson y T. H. Thorburn (1952). Foundation Engineering. Ed. Revolucionaria. La Habana.
16. Price, D. G. (2009). Engineering Geology. Principles and Practice. Ed. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. Formato digital, 450 p.
17. Quintáns Gómez, M., P. R. González Ferro y M. J. Díaz González (1991). “Informe ingeniero-geológico Túneles Populares Reparto Diez de Octubre”. Establecimiento No. 1 Investigaciones Aplicadas, Pinar del Río, 29 p.
18. Vilaú Urquiaga, E. (1988). “Informe ingeniero-geológico edificios Nos. 22,23,24 y 25 GP-70-5, edificios Nos. 17, 18, 19, 20, 21, 34, 35 y 36 GP-IV-5 y edificio No. 14 SP-72 Microdistrito 4 Hnos. Cruz”. Est. No. 1 Inv. Aplicadas P. Río, 13 p, tablas y 4 anexos gráficos.

Bibliografía básica

1. Conferencias 2 y 3 del curso Geofísica II de la carrera de Ingeniería Geológica, Fac. de Geología y Mecánica, Univ. de P. Río. Preparación: Orestes Díaz, Dpto. de Geología.
2. Danko, J. y A. Azze Pavón (1968). Geoelectricidad I. Ed. ISPJAE, 502 p.
3. Keller, G. V. y F. C. Frischknecht (1970). Electrical methods in geophysical prospecting. Ed. Revolucionaria (Tomado de edición de 1966), 519 p.

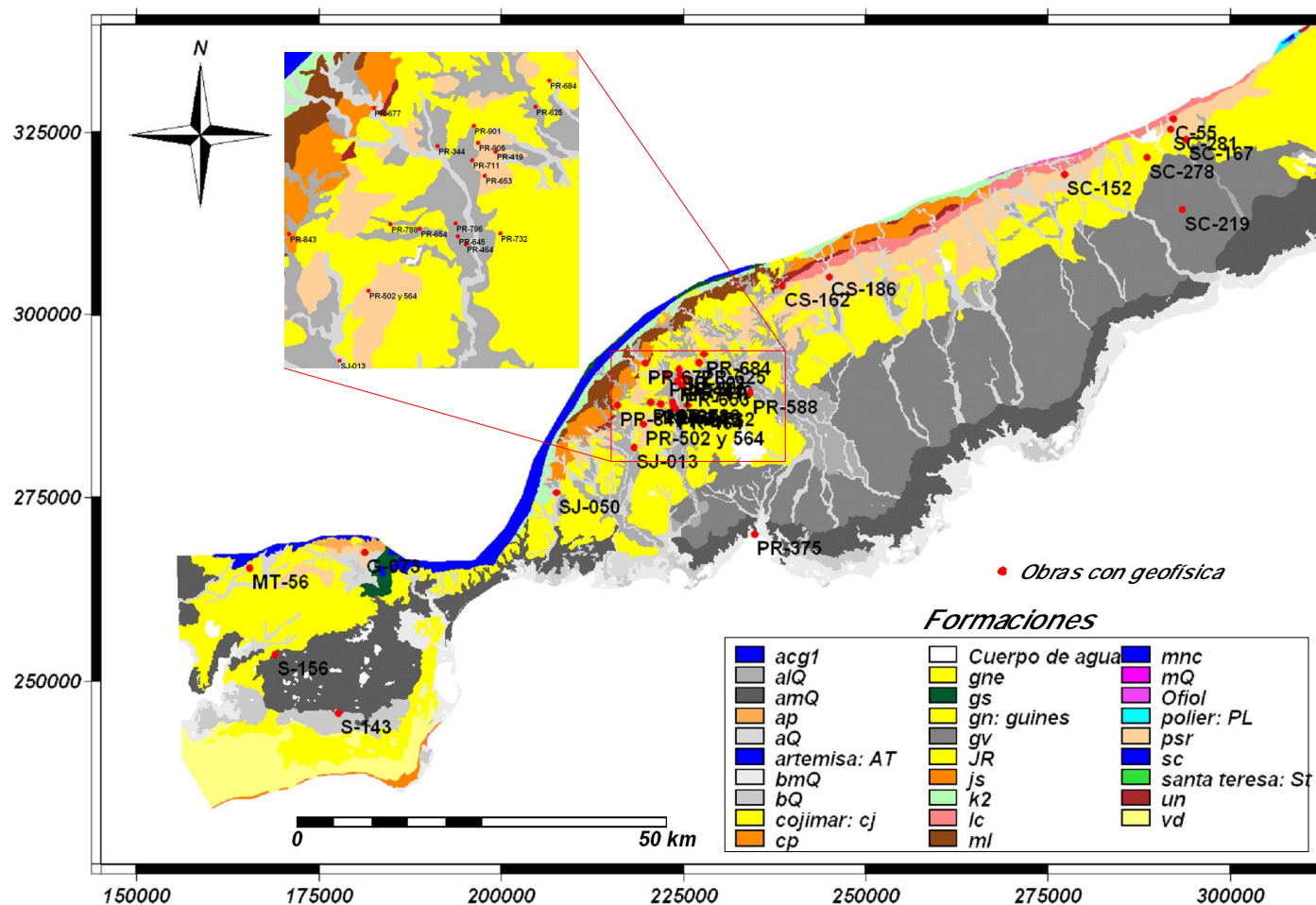
ANEXOS

Anexo 2.1. Microlocalización de las áreas de estudio.



Anexo 3.1. Grado de estudio geofísico en la Formación Paso Real.

(Fuente: Archivo técnico UIC P. Río, ENIA, 1978-2003).



Anexo 3.3. Resultados del SEV paramétrico 16.

