



Universidad Nacional Autónoma de México

FACULTAD DE INGENIERÍA

**CARACTERIZACIÓN GEOHIDROLÓGICA
MEDIANTE SONDEOS ELÉCTRICOS VERTICALES
EN EL ÁREA DE LA
CT PETACALCO, GRO.**

T E S I S

Que para obtener el título de:
INGENIERO GEOFÍSICO
p r e s e n t a :
DANIEL SAUCEDO QUIÑONES

México, D.F.

1996

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

7
Rij



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

TESIS

COMPLETA

DEDICATORIA

A mis padres y hermanos con cariño, especialmente a Germán por su gran apoyo durante el desarrollo de mi carrera profesional.

A mi esposa e hijas que con su cariño me motivan a seguir adelante

AGRADECIMIENTOS

A los Ingenieros Gustavo Díaz Velarde Peres y Salvador García Durán, por las facilidades otorgadas para llevar a cabo la presente, especialmente al primero ya que sus "insistentes e incisivos" comentarios, me motivaron a terminar el trámite pendiente.

Al Dr. en Ing. Antonio Uribe Carrajal por sus comentarios y paciente dirección en el desarrollo del trabajo de tesis.

A los compañeros de los departamentos de Geohidrología y Geofísica que de una manera u otra me ayudaron a lograr este objetivo.

A la Dra. Lourdes Ferrer Phmacock por la edición del presente trabajo y al Ing. Rogelio Pérez Angón por la revisión al mismo.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCION
60-I-041

SR. DANIEL SAUCEDO QUIÑONES
Presente

En atención a su solicitud, me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor Dr. Antonio Uribe Carvajal, y que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de Ingeniero Geofísico:

**CARACTERIZACION GEOHIDROLOGICA MEDIANTE SONDEOS ELECTRICOS
VERTICALES EN EL AREA DE LA C.T. PETACALCO, GRO.**

- I INTRODUCCIÓN**
- II GEOLOGIA DEL AREA**
- III TEORIA DEL SONDEO ELECTRICO VERTICAL**
- IV INTERPRETACION GEOFISICA**
- V INTEGRACION GEOLOGICA-GEOFISICA**
- VI CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**
- BIBLIOGRAFIA**

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que se deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar examen profesional.

Atentamente

"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

Ciudad Universitaria, a 16 de mayo de 1995

EL DIRECTOR



ING. JOSE MANUEL COVARRUBIAS SOLIS

JMCS'RLLR'tjh.

CONTENIDO

| | Pág. |
|--|-----------|
| 1. INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| 2. GEOLOGÍA..... | 13 |
| 2.1. Geología Regional. | 13 |
| 2.2. Estratigrafía. | 16 |
| 2.3. Geología Estructural | 23 |
| 2.4. Tectónica y Sismicidad | 25 |
| 2.5. Geología Histórica. | 27 |
| 2.6. Hidrología. | 28 |
| 2.6.1. Características Geohidrológicas de la Cuenca | 28 |
| 2.7. Unidades Geohidrológicas | 30 |
| 3. TEORÍA DEL SONDEO ELÉCTRICO VERTICAL (SEV) | 34 |
| 3.1. Propiedades Electromagnéticas de las Rocas | 35 |
| 3.2. Resistividad. | 27 |
| 3.3. Conductividad. | 37 |
| 3.4. Polarización. | 38 |
| 3.5. Actividad Electroquímica | 38 |
| 3.6. Método de Resistividad | 39 |
| 3.6.1. Generalidades | 39 |
| 3.7. Resistividad Eléctrica de Rocas y Suelos. | 40 |
| 3.8. Factores que Afectan la Resistividad | 43 |

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 3.9. | <i>Método del Sondeo Eléctrico Vertical</i> | 47 |
| 3.10. | <i>Resistividad Aparente</i> | 52 |
| 3.11. | <i>Dispositivos Electrónicos</i> | 53 |
| 3.12. | <i>Penetración de Corriente</i> | 58 |
| 3.13. | <i>Corrientes Perturbadoras y Polarización de Electrodo.</i> | 59 |
| 3.14. | <i>Conductancia Longitudinal y Resistencia Transversal.</i> | 60 |
| 3.15. | <i>Aplicaciones y Limitaciones del Método</i> | 61 |
| 4. | <i>INTERPRETACIÓN GEOFÍSICA</i> | 63 |
| 4.1. | <i>Desarrollo del Trabajo de Campo</i> | 63 |
| 4.2. | <i>Interpretación Cualitativa</i> | 69 |
| 4.3. | <i>Interpretación Cuantitativa</i> | 70 |
| 4.4. | <i>Unidades Geoeléctricas</i> | 71 |
| 4.4.1. | <i>Primera Etapa.</i> | 71 |
| 4.4.2. | <i>Segunda Etapa.</i> | 76 |
| 4.4.3. | <i>Tercera Etapa.</i> | 78 |
| 5. | <i>INTEGRACIÓN GEOLÓGICO - GEOFÍSICA</i> | 81 |
| 5.1 | <i>Primera Etapa.</i> | 81 |
| 5.1.1. | <i>Pozo 7T.</i> | 84 |
| 5.1.2. | <i>Pozo Petacalco 2</i> | 85 |
| 5.2 | <i>Segunda Etapa.</i> | 87 |
| 5.3. | <i>Tercera Etapa.</i> | 90 |
| 5.3.1. | <i>Pozo 8 Bis.</i> | 91 |
| 5.3.2. | <i>Pozo 10 Bis.</i> | 94 |

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 99

6.1 *Método Utilizado.* 99
6.2 *Primera Etapa.* 101
6.3 *Segunda Etapa.* 102
6.4 *Tercera Etapa.* 104

BIBLIOGRAFÍA 106

A N E X O S

Relación de Figuras.. 109
Relación de Planos. 110

1. INTRODUCCIÓN

De acuerdo a la política de la Comisión Federal de Electricidad que es la de dotar de energía eléctrica a todo el país, se planeó y construyó la central termoeléctrica Petacalco "Presidente Plutarco Elías Calles", localizada a 26 km de la ciudad industrial Lázaro Cárdenas, Mich. en el poblado de Petacalco, estado de Guerrero, a escasos 500 m de la bahía de Petacalco, en el Océano Pacífico (Figura 1).

La Subdirección Técnica mediante la Gerencia de Estudios de Ingeniería Civil, es la encargada de la realización de estudios del área donde se planea construir alguna central termoeléctrica, los cuales tienen como objetivos principales evaluar los acuíferos, localizar sitios de perforación de pozos para extracción de agua y determinar el avance de la intrusión salina al continente en las zonas costeras, donde se ubica gran parte de las centrales termoeléctricas del país. Dentro del conjunto de estudios de exploración indirecta que se efectúan para tales fines se encuentran los sondeos eléctricos verticales (SEV) con el arreglo Schlumberger, técnica geofísica que ha sido muy utilizada durante los últimos años para estudiar el subsuelo y caracterizarlo, atendiendo a las propiedades de conductividad eléctrica de los materiales "in situ", ya sea con fines geotécnicos, geotérmicos o geohidrológicos; en esta última especialidad dicha técnica ha tomado gran relevancia, ya que usándola de manera adecuada y considerando sus limitaciones conduce a resultados muy satisfactorios.

Los SEV son de los primeros trabajos que se desarrollan en una exploración hidrogeológica, ya que permiten conocer "a priori" la distribución en el subsuelo de las unidades geohidrológicas de interés, lo que se traduce en un ahorro económico sustancial al reducir el número de exploraciones directas que, por su elevado costo, vuelven prohibitivo su uso indiscriminado; de esta forma, con apoyo en la exploración indirecta, se seleccionan previamente los sitios de perforación de pozos potenciales para extracción de

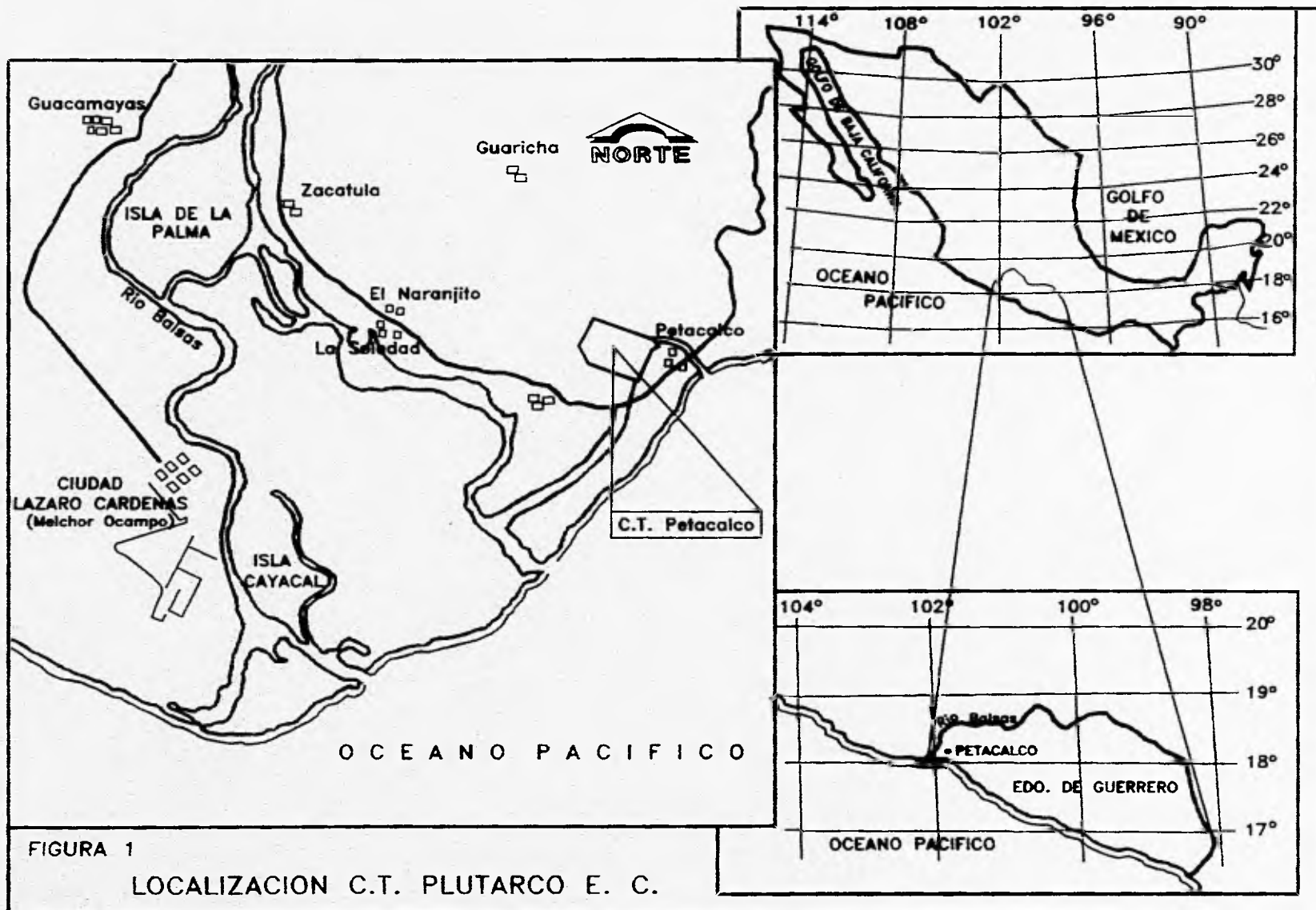


FIGURA 1

LOCALIZACION C.T. PLUTARCO E. C.

agua de calidad y en cantidad suficiente para satisfacer las demandas del proyecto, tanto para servicios y construcción como para operación de una central. Asimismo, los SEV son de gran utilidad para determinar en las zonas costeras la forma de la intrusión salina hacia el continente. Conjuntamente con información de otras disciplinas, los resultados de un estudio de SEV se emplean en la elaboración del programa racional de explotación de los acuíferos que vaya acorde con su balance hidrológico, y de esta manera evitar el abatimiento de los niveles piezométricos y la intrusión de agua salada en acuíferos originalmente de agua dulce

La aplicación del método geofísico de SEV, como parte de los estudios integrales que la Comisión Federal de Electricidad realizó en el desarrollo de este proyecto, se definió con base a las experiencias adquiridas en estudios previos del área, así como en otros sitios explorados con los mismos fines donde se obtuvieron resultados satisfactorios. Tal es el caso que se presenta en el informe de CFE "Estudio Geoeléctrico en el Área de la CT Petacalco" (J.A.A. y D.S.Q., 1984), el cual tenía como finalidad ubicar sitios para perforar pozos que suministraran 20 l/s de agua de buena calidad para satisfacer, de manera emergente, la demanda de los servicios generales de construcción de la termoeléctrica. Con este trabajo se localizaron los pozos 1T, 2T, 3T, 4T y 5T (Figura 2) obteniéndose un total de 32 l/s que cubren el gasto solicitado en esta etapa. Los primeros cuatro pozos se encuentran localizados dentro del predio de la planta y el 5T se ubica fuera de ella, unos 800 m hacia el NE del pozo 2T.

Otra aplicación del método se presenta en el informe "Estudio Geofísico de Resistividad en el Área del Ejido El Naranjito" (G.D.L. "et al", 1985), que tenía como objetivo la localización de sitios para la perforación de pozos y extraer 180 l/s de agua de buena calidad, destinada para los servicios, usos generales y operación de la central. En dicho estudio se dió la localización de los pozos N-1, N-2 y N-3 (Figura 2), que se encuentran a lo largo del derecho de vía de la carretera federal Lázaro Cárdenas - Petacalco. El caudal de extracción aportado por ellos de manera conjunta fue de 180 l/s, lo cual garantizaba el abastecimiento de agua en la cantidad y con la calidad físico-química

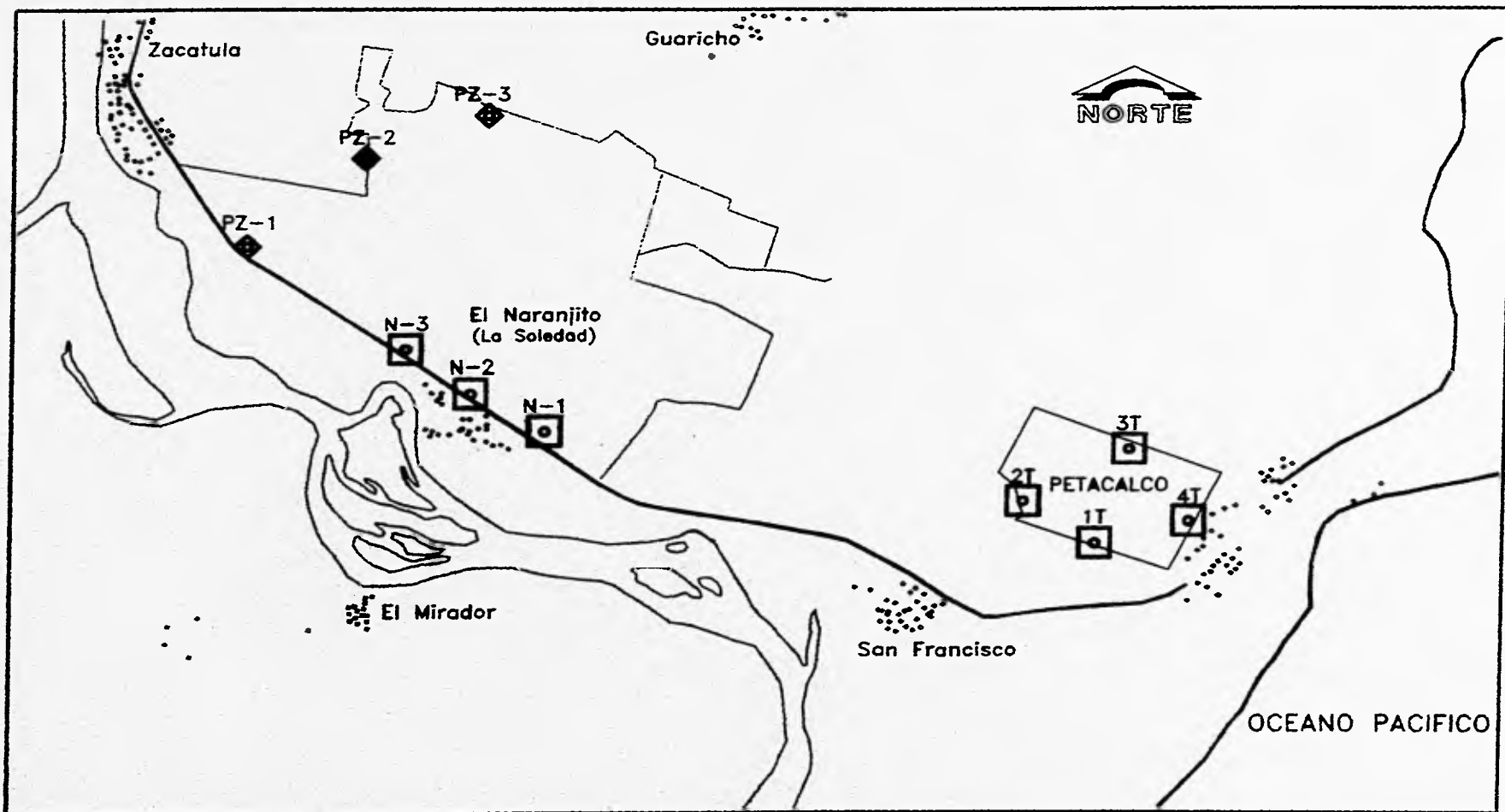


FIGURA 2

LOCALIZACION DE LOS POZOS 1T,2T,3T,4T,N-1,N-2 y N-3

requerida; sin embargo, fueron cancelados en 1991 debido a problemas sociales.

A causa de la cancelación de los pozos de El Naranjito, en el año de 1992, fue necesario recurrir, de manera emergente y temporal, a una alternativa de abastecimiento para extraer 20 l/s y así satisfacer la demanda requerida por la puesta en servicio de las unidades 1 y 2 de la central termoeléctrica, así como por los servicios generales; para ello se tuvo que rehabilitar el pozo 2T y localizar nuevos sitios de perforación en áreas que no presentaran problemas con los ejidatarios. Por otra parte, debido a que también era necesario cubrir el abastecimiento del agua requerida para el total funcionamiento de la central y reponer los 180 l/s que habían sido cancelados en el área del Naranjito, la CFE llevó a cabo en febrero de 1992 la rehabilitación de los pozos 5, 7, 8, 9, 10, 17 y 18 (Figura 3) que en 1982 habían sido perforados por la SARH en la Isla Cayacal, hasta una profundidad de 20, m para abastecer de agua a la ciudad de Lázaro Cárdenas. Los caudales que se obtuvieron en las pruebas de aforo proporcionaron en conjunto un gasto de 183 l/s, aunque se descartaron los pozos 17 y 18. Sin embargo, debido a que el contenido de finos en el agua proporcionada por dichos pozos era alto al llegar a las unidades en operación de la central, la CFE en 1994, realizó exploraciones en el área de la Isla Cayacal enfocadas a determinar la distribución tanto vertical como horizontal del horizonte productor, para así programar nuevas perforaciones que abastecieran el gasto de agua solicitado y permitieran hacer un diseño óptimo para el control del aporte de finos. La exploración geofísica llevada a cabo dentro de estos trabajos constituye el tema de la presente tesis.

En resumen, los objetivos específicos de los estudios geofísicos fueron:

- a) Localizar sitios de perforación en el predio de la planta termoeléctrica Presidente Plutarco Elías Calles.
- b) Detectar el frente de la intrusión salina en el área aledaña a la planta.
- c) Determinar las características de espesor y continuidad del horizonte productor en el área de la Isla Cayacal.

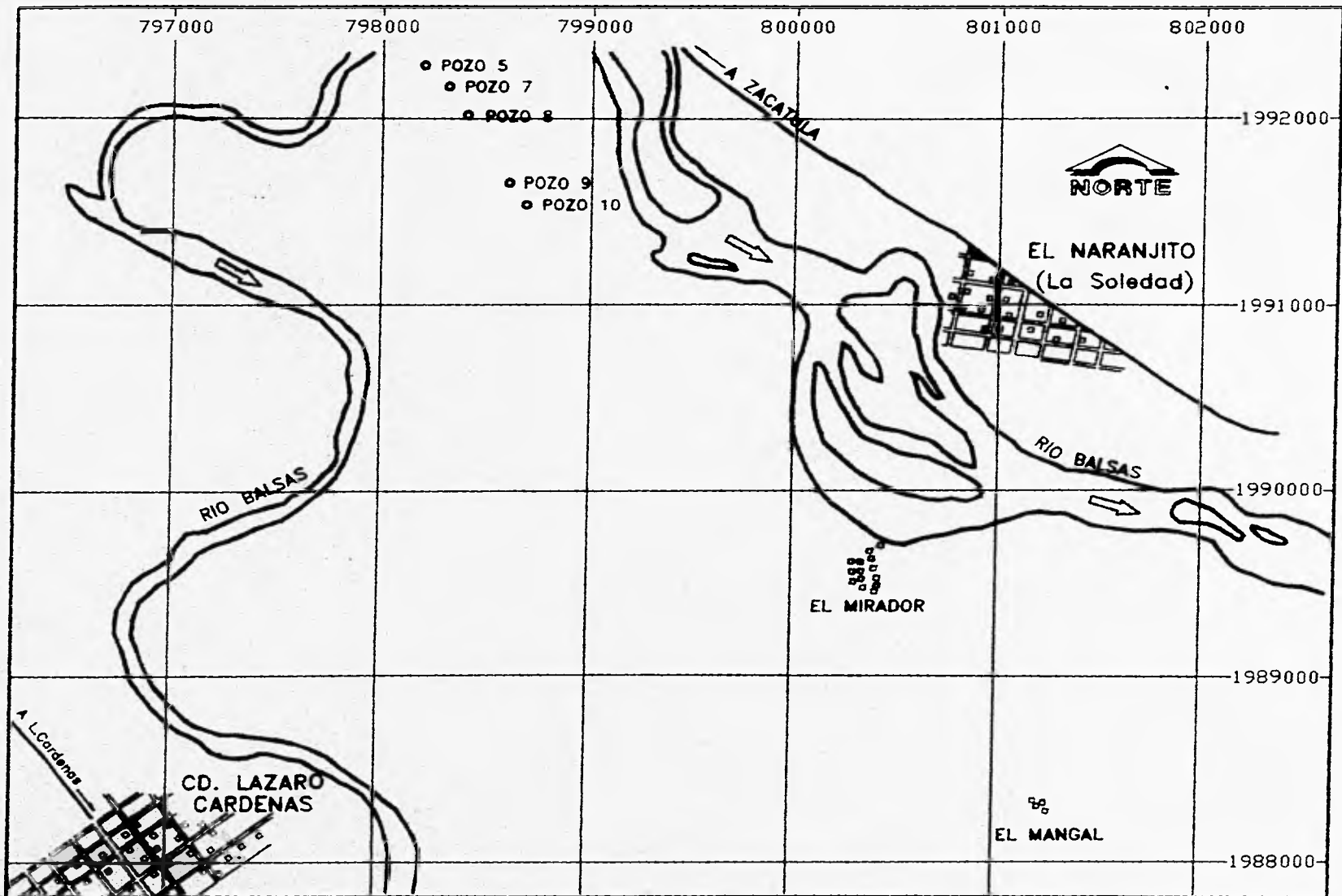


FIGURA 3

LOCALIZACION DE LOS POZOS 5,7,8,9, y 10

Para lograr el primer objetivo se llevaron a cabo 39 SEV distribuidos en el predio de la planta y un área cercana a ella, según se muestra en la Figura 4. Para cubrir el segundo objetivo se realizaron 105 SEV localizados en 10 secciones perpendiculares a la orilla del mar y al área de la planta, como se indica en la Figura 5. Finalmente para alcanzar el tercero de los objetivos se efectuaron 34 SEV sobre cinco líneas (Figura 6).

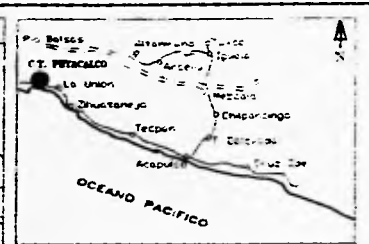
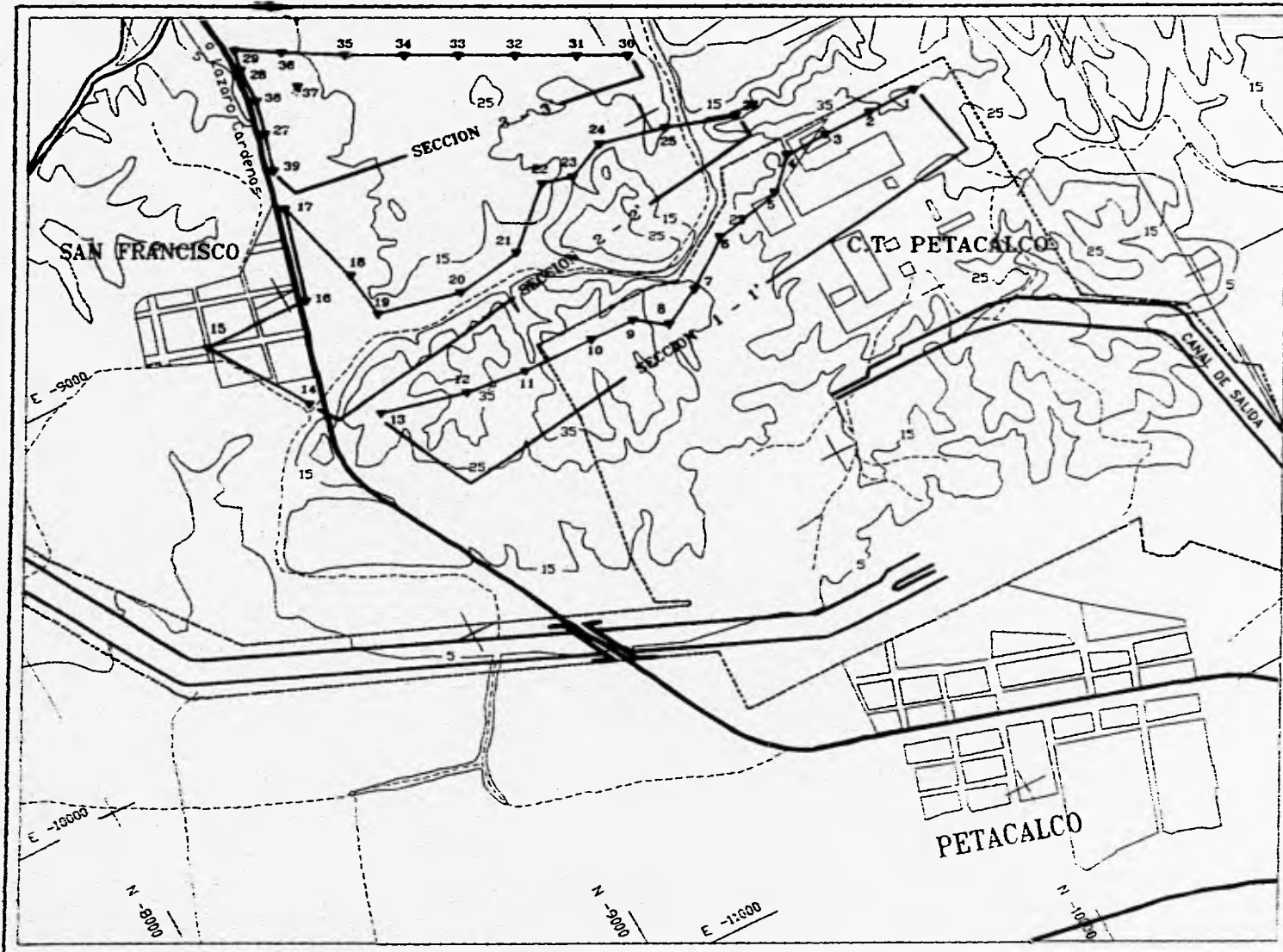
Es así como la Geofísica Aplicada contribuye en la parte que le corresponde al logro de las metas y objetivos de la CFE que en este caso eran llevar a feliz término la construcción y operación de una central termoeléctrica, propósito que finalmente se cumplió, y ahora se cuenta con otra planta más que se integra al sistema eléctrico nacional y por ende contribuye al muy deteriorado desarrollo del país.

La planta de Petacalco, Gro., denominada "Presidente Plutarco Elías Calles" es la única en su tipo en Latinoamérica y la de mayor capacidad de producción que ha instalado la CFE en sus 58 años de existencia. Genera 2100 MW, energía suficiente para abastecer de electricidad a once millones y medio de mexicanos. Sus seis unidades, de 350 kw cada una, permiten satisfacer las necesidades de una población tan grande como la de los estados de Guerrero, Michoacán, Colima, Morelos, México y parte de Jalisco.

Cada unidad tiene como equipos principales un generador de vapor y un turbogenerador, complementándose con una serie de equipos y sistemas auxiliares requeridos para la realización del ciclo termodinámico Rankine regenerativo.

Los generadores de vapor son de tipo dual de intemperie para consumir carbón mineral como combustible base y combustóleo como opción, mientras que los turbogeneradores son de dos tipos: turbina de acción en las unidades 1 y 2, y turbina de reacción en las unidades 3, 4, 5, y 6.

Los generadores eléctricos son trifásicos totalmente cerrados a prueba de explosión, enfriados por hidrógeno y agua desmineralizada.



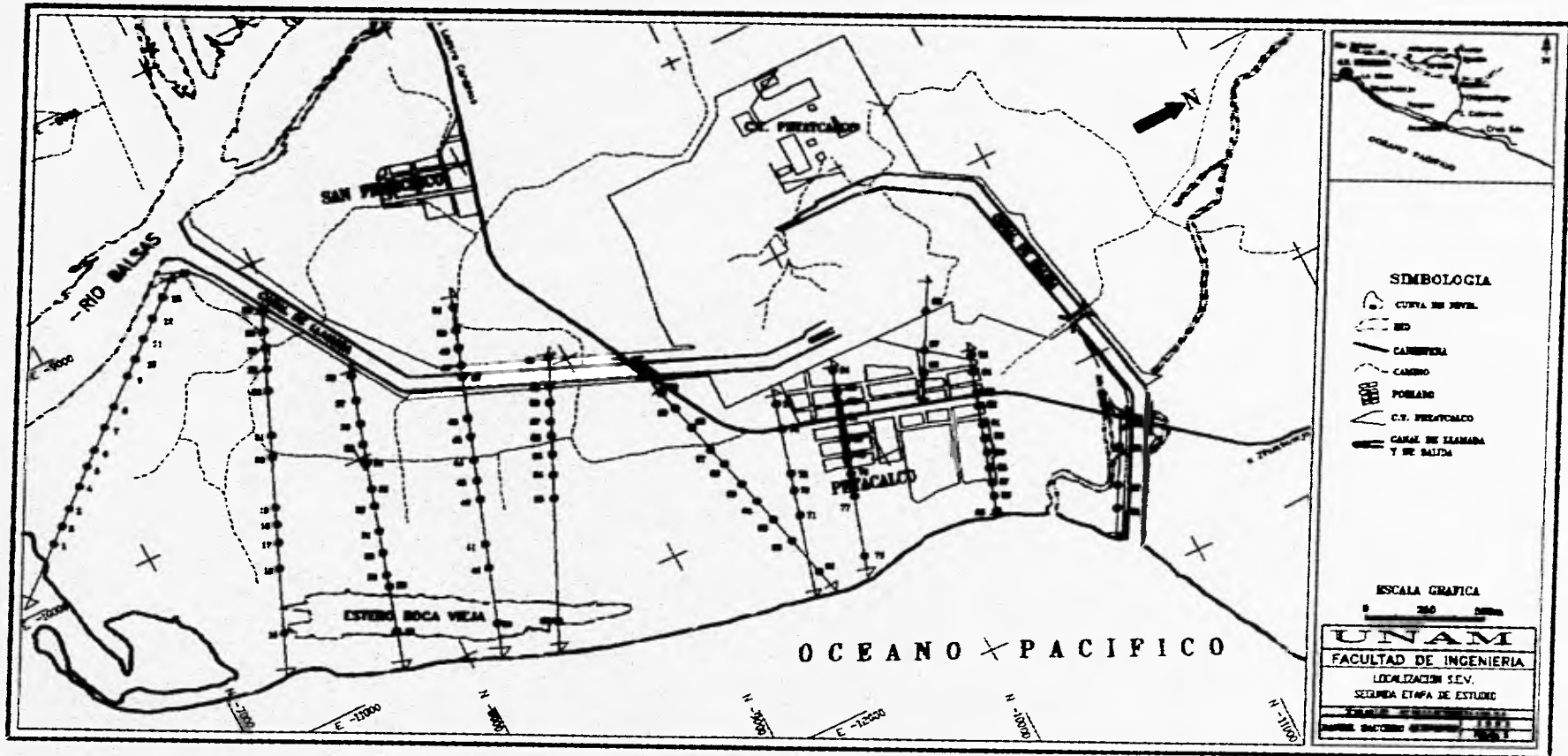
- SIMBOLOGIA**
- CURVA DE NIVEL
 - RIO
 - CARRETERA
 - CAMINO
 - POBLADO
 - C.T. PETACALCO
 - CANAL DE LLAMADA Y DE SALIDA
 - SONDEO ELECTRICO VERTICAL
 - SECCION GEOFISICA

ESCALA GRAFICA
 0 250 500m

UNAM
FACULTAD DE INGENIERIA

LOCALIZACION DE SECCION
 PRIMERA ETAPA DE ESTUDIO

TESIS PROFESIONAL
 DANIEL SAUCEDO QUINONES 1956
 FIGURA 4



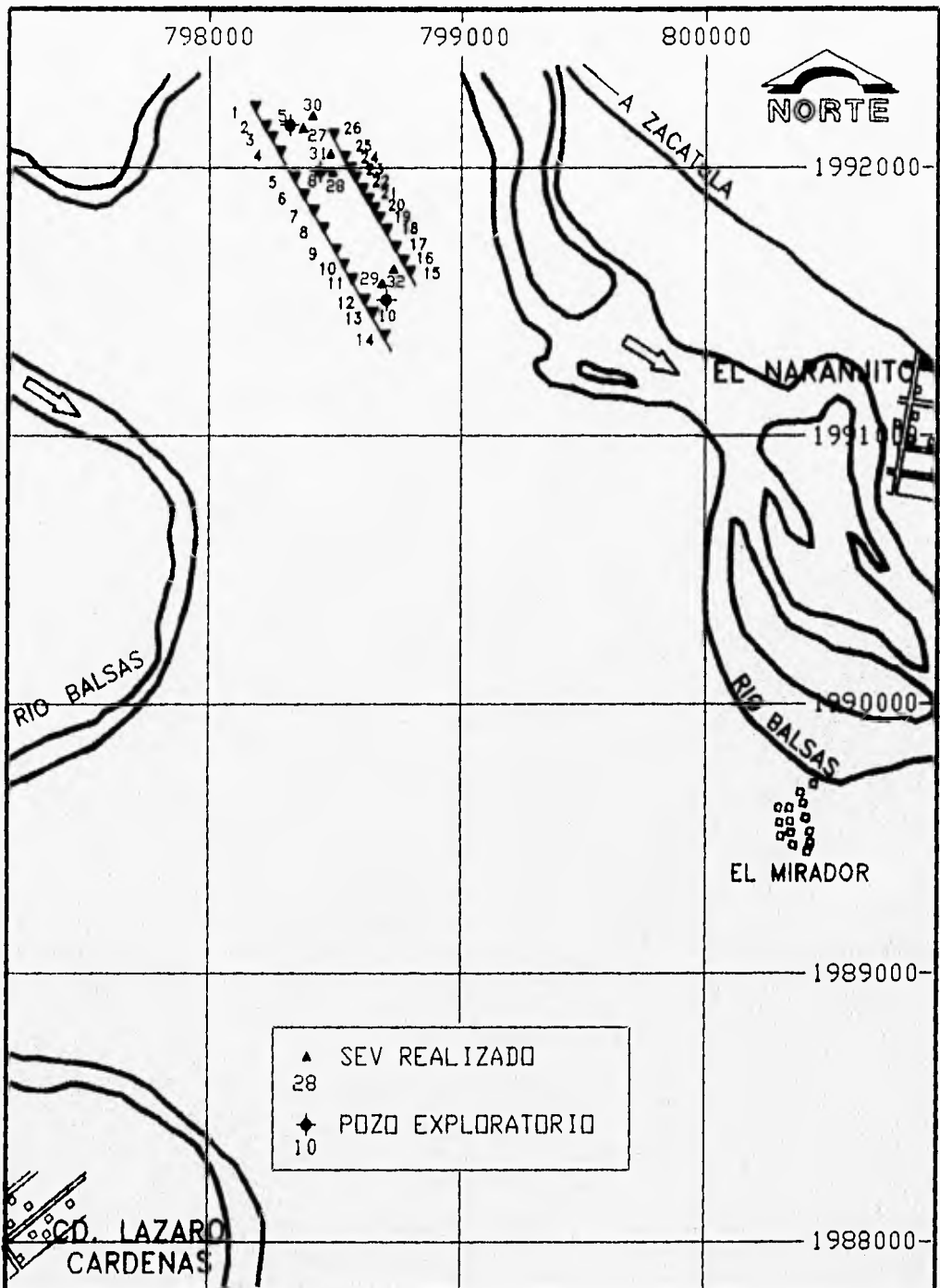


FIG.6
 LOCALIZACION DE SONDEOS ELECTRICOS VERTICALES
 TERCERA ETAPA DE ESTUDIO

Esta es la primera central de tipo dual de la CFE que permite utilizar combustóleo o carbón con bajo contenido de azufre; de esta forma se asegura su operación sin interrupciones por posibles problemas en el abasto de combustible.

La energía generada por la central termoeléctrica Petacalco es entregada al sistema eléctrico nacional mediante la subestación Lázaro Cárdenas, la cual alimenta a la industria de la región y se interconecta principalmente con la subestación de Pitirera a través de dos líneas de transmisión: una de 400 kw, a Carapan y otra de 400 kw a Donato Guerra, contemplándose a futuro otra línea de 400 kw, a Pie de la Cuesta (Acapulco).

La construcción de esta obra aportó grandes beneficios sociales a las poblaciones aledañas: Petacalco, San Francisco, Zacatula, Naranjito y el Guaricho, con la puesta en marcha de un programa de desarrollo intensivo comunitario que impulsará el progreso de la región. También se les dió apoyo con obras de uso cívico, principalmente, y se otorgaron respaldos a los sectores productivos de la microrregión mediante proyectos productivos de inversión, entre los que destaca el proporcionado para la compra de equipos y artes de pesca, fundamental para los pobladores de la costa. Petacalco fue la comunidad que por razón natural resultó ser la más beneficiada con obras como: red de conducción y distribución de agua potable; rehabilitación del pozo "Petacalco 1" para suministro de agua potable a la población; alcantarillado y relleno sanitario; introducción de la red de energía eléctrica y alumbrado público, así como la construcción de escuelas primaria y secundaria.

Antes de construir la central de Petacalco se realizaron diversos estudios sobre ecología y preservación del medio ambiente, vigilando especialmente el cumplimiento de todas las normas y reglamentos en vigencia de la Secretaría de Desarrollo Social y otras entidades gubernamentales, tanto federales como de los estados. Se cuidó todo lo referente a impacto ambiental, que incluye el tratamiento de aguas negras, industriales y aceitosas,

se instalaron separadores electrostáticos de polvos en todas las salidas de emisión de gases. La central cuenta además con una planta tratadora de aguas residuales, fosas neutralizadoras, dos lagunas de sedimentación y fosas separadoras de grasas y aceites.

2. GEOLOGÍA

2.1. Geología Regional

Con el fin de conocer el marco geológico regional, la CFE mediante el Departamento de Geología y éste a su vez por medio de la Superintendencia de Estudios Zona Pacífico Sur, efectuó el reconocimiento de un área de 700 km², aproximadamente, que comprenden 15 km de radio a partir de la CT Presidente Plutarco Elías Calles.

En general, los rasgos morfológicos del área de estudio están controlados por la actividad de la zona de subducción ubicada en la costa del Pacífico. El régimen tectónico compresivo que ha operado en esta margen continental influyó decisivamente en el origen de la secuencia cretácica de rocas volcánicas, volcanoclásticas y sedimentarias carbonatadas, las cuales fueron afectadas por eventos intrusivos y de volcanismo ácido.

El área de estudio se localiza en la Sierra Madre del Sur, dentro de la subprovincia denominada Planicie Costera del Pacífico (Plano 1); se caracteriza por la existencia de varias unidades morfoestructurales que tienen correspondencia tanto con las estructuras originadas por la subducción de la Placa de Cocos en la costa del Pacífico como con las unidades litológicas que han sido afectadas por los procesos exógenos. Destacan los altos topográficos formados por las sierras de la región, así como los valles y las planicies que desarrolla el delta del río Balsas. Estas geoformas las determina fundamentalmente el sistema hidrológico de la cuenca de este río y el régimen tectónico del área.

El sitio de interés se encuentra sobre la planicie costera del Pacífico, comprende desde el nivel del mar hasta la zona de serranías, donde alcanza alturas máximas de 560 msnm. El relieve de tipo endógeno se manifiesta en la mayor parte del

área, por ejemplo mediante lineamientos o fracturas que presentan rumbos N-S, NW-SE y NE-SW, originados por la actividad tectónica de la zona de subducción; sin embargo, el fracturamiento no está muy acentuado dentro del área de estudio. Fuera de ésta, los lineamientos relacionados con el marco tectónico de la región tienen mayor influencia en la morfología. A nivel de macro relieve se observan sierras de rocas carbonatadas arrecifales, alargadas en dirección norte - sur y noroeste - sureste.

Las elevaciones topográficas intermedias (cotas menores de 240 msnm), están constituidas por rocas carbonatadas de tipo arrecifal (al norte de La Noria y Corral Viejo), volcánicas y volcanoclásticas (al noroeste de la Puerta de Benítez y al noreste de El Zapote y El Plátano). En la mayoría de los casos estas morfoestructuras presentan un límite escarpado, el cual por lo general corresponde a un lineamiento que da paso a un peldaño morfológico y se observan moderadamente cortadas por drenaje de tipo subdentríptico a subparalelo. Destaca la pequeña sierra constituida por granodioritas, rocas volcanoclásticas y calizas, que se ubica al este del embalse de la presa La Villita; su carácter alargado, en dirección sensiblemente NNW-SSE, constituye uno de los lineamientos más notorios en la zona.

Al noreste de La Puerta de Benítez y al norte de la loma Los Puercos, se observa otro lineamiento importante de orientación NW-SE.

Del análisis de la conformación de los drenajes que presenta el relieve en el área de estudio y si se consideran los espesores litológicos cortados, puede decirse que desde el punto de vista morfodinámico el resultado del proceso erosivo es la profundización de los valles fluviales, la cual se ha manifestado constantemente debido al levantamiento continental producido por el choque de las placas en la zona de subducción, fenómeno que además origina los lineamientos o fracturas observados en la región, y que también han sido reportados por otros autores (Boillot, 1984).

Con base en lo antes descrito, se observa la existencia de estructuras alargadas principalmente en dirección noroeste - sureste y con menor proporción noreste - suroeste, cortadas oblicuamente por lineamientos orientados noroeste - sureste, que corresponden al sistema de fracturamiento regional (Plano 1).

Desde el punto de vista morfodinámico, también se determina un proceso acumulativo activo que se llevó a cabo en la desembocadura del río Balsas, dando origen a un delta. Sin embargo, debido a la construcción de obras civiles (entre ellas la presa La Villita), el depósito actual de materiales casi ha desaparecido.

En el año de 1967, el entonces Consejo de Recursos Minerales No Renovables (CRMNR) realizó un reconocimiento sismológico, para determinar el basamento del delta del Balsas, mediante tres perfiles sismológicos de refracción localizados a 2 km al norte de la población de Lázaro Cárdenas, Mich., sobre la margen derecha del río y dos perfiles magnetométricos para obtener mayor información en la dirección este - oeste (Cervantes y Monroy, 1987). Los perfiles geofísicos indican que se tiene un basamento rocoso con tendencia a elevarse hacia el oriente y la siguiente secuencia litológica:

- a) Una capa superficial de arcillas limosas, con espesor de 1.5 a 2.5 m.
- b) Una capa de sedimentos saturada, con espesor no determinado.
- c) Una capa de sedimentos no consolidados (posiblemente arenas, limos y arcillas), con velocidad sísmica compresional de 1650 a 1900 m/s y espesor de 62 a 71 m.
- d) Basamento constituido por granito intemperizado o rocas metamórficas fracturadas, con velocidad sísmica compresional del orden de 3000 a 3200 m/s.

Hacia la parte norte, fuera del área de estudio (Plano 1), aflora el basamento de la región constituido por rocas intrusivas y volcánicas.

La cuenca del Balsas es una región con orientación general suroeste a este-sureste, que cubre una zona amplia de aproximadamente 150 km². Según Tamayo (1968), fue originada por el gran geosinclinal que formó el canal del Balsas en el Cretácico y principios del Cenozoico y que levantó la Sierra Madre del Sur, delimitando la depresión del Balsas, por lo cual se ha pensado que al principio el río vertía sus aguas más al norte y finalmente perdió su antigua salida al Océano Pacífico. La posterior emersión de la Sierra Madre de Oaxaca acabó de limitar la depresión para convertirla en una cuenca cerrada y la actividad del Eje Neovolcánico depositó material ígneo en el norte. Se estima que los últimos movimientos orogénicos que afectaron la Sierra Madre del Sur produjeron algunas rupturas o líneas de debilidad por donde drenó nuevamente el río Balsas, labrando cañones escalonados y angostos.

2.2. Estratigrafía

En el área de estudio afloran rocas volcánicas, volcanoclásticas, sedimentarias carbonatadas e intrusivas que en edad se remontan al Cretácico Inferior, aunque al noroeste del área de interés afloran rocas metamórficas del Jurásico hasta el Cretácico Inferior.

Las rocas metamórficas de edad jurásica están constituidas por esquistos, pizarras y filitas, consideradas dentro de los Esquistos Arteaga (Gutiérrez-Hernández, 1975). Estas rocas son el basamento en el cual descansa discordantemente una secuencia volcanosedimentaria del Cretácico Inferior que se correlaciona con la Formación Tecalitlán (Rodríguez, 1980); dicha secuencia está cubierta en forma concordante por una alternancia de calizas, calizas arcillosas, limolitas y lutitas del Cretácico Superior, correlacionables con la Formación Tepalcatepec (Pimentel, 1981). Estas unidades están afectadas por cuerpos

granodiorítico-diorfíticos a los que se les asigna una edad Cretácico Tardío-Terciario Temprano.

Las formaciones Tecalitlán y Tepalcatepec están cubiertas, de manera parcial, por tobas riolíticas que se correlacionan con la Riolita Tizapotla (Fries, 1960). Hacia la línea de costa se presentan conglomerados de edad Terciario Superior que pertenecen al Grupo La Mira (Durham, 1981). Todas estas rocas se encuentran cubiertas por suelos. Por último, se encuentran los depósitos aluviales y deltaicos de edad Plio - Cuaternaria pertenecientes al delta del Balsas, así como los ríos y arroyos tributarios de éstos.

A continuación se describen, de la más antigua a la más reciente, las unidades litológicas que conforman la estratigrafía regional (Figura 7).

ESQUISTOS ARTEAGA

Jurásico - Cretácico Temprano (J-Kiea)

Gutiérrez-Hernández (1975) propuso este nombre para una secuencia de esquistos, pizarras y filitas que afloran en la población Arteaga, Mich., hacia la porción noroccidental de la hoja La Mira; posteriormente fue datada radiométricamente (Mújica, 1978), situándola en el Jurásico-Cretácico Temprano. La base de esta formación la constituyen esquistos de colores, que varían del crema al gris, con abundante sericita y muscovita; presentan foliación bien definida, orientada $60^\circ / 70^\circ$ SW, en ocasiones muestran estructuras crenuladas, microplegamiento y "boudinage" local. Los esquistos están afectados por etapas intrusivas cretácicas y terciarias que produjeron aureolas de metamorfismo. Sobre los esquistos se encuentran pizarras que, por efectos del metamorfismo de contacto, cambian a filitas de color verde claro y grano muy fino. Las pizarras en esta área son rocas consistentes formadas principalmente por sericita, grafito y clorita. Por su asociación mineralógica los Esquistos Arteaga presentan metamorfismo de bajo a mediano grado ("facies" de esquistos verdes).

**COLUMNA ESTRATIGRÁFICA REGIONAL
DE LA CT PRESIDENTE PLUTARCO ELÍAS CALLES**

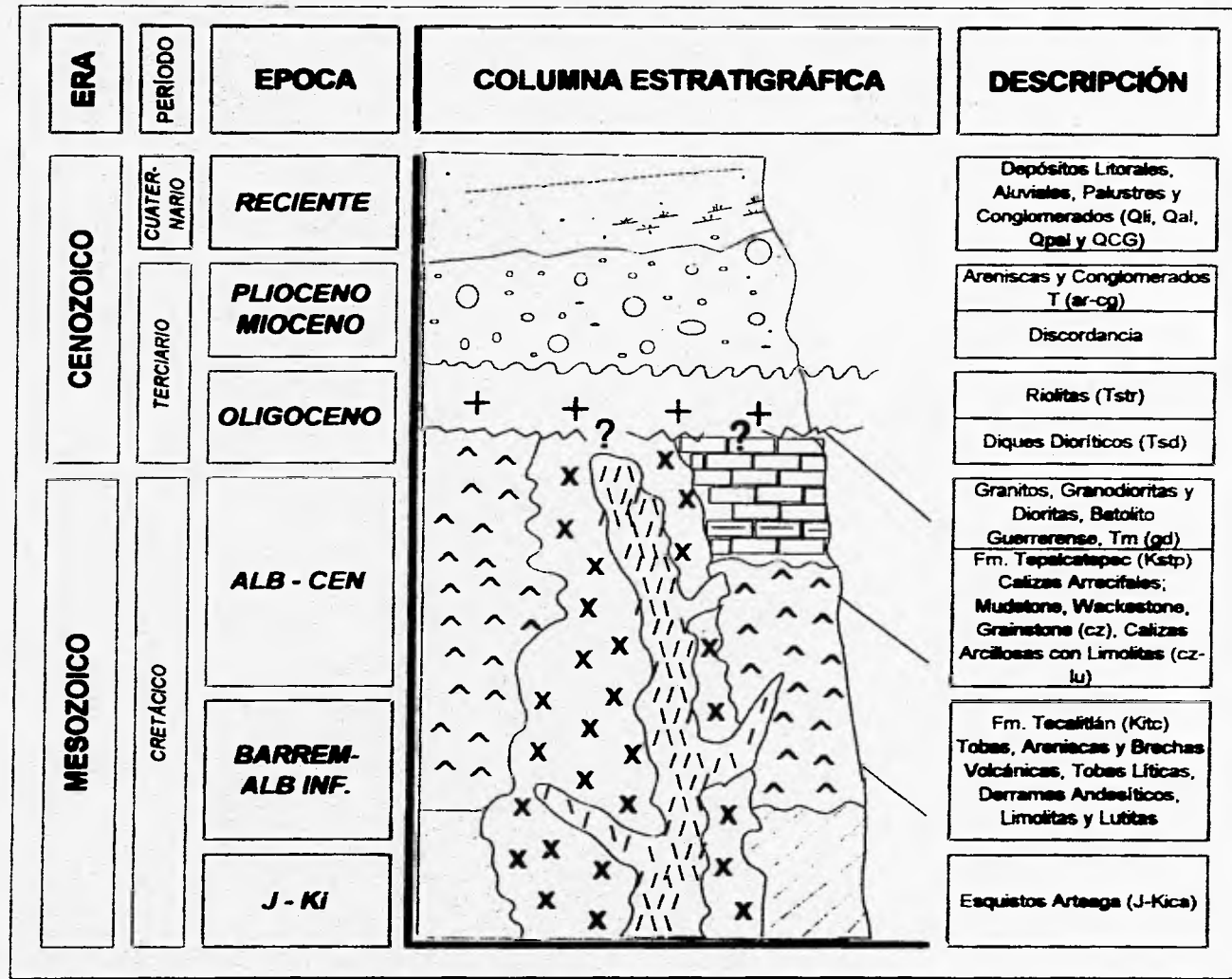


FIGURA 7

FORMACIÓN TECALITLÁN

Cretácico Inferior (Kitc)

Es una secuencia vulcanoclástica constituida por tobas, areniscas volcánicas, conglomerados volcánicos, tobas líticas y derrames andesíticos, con intercalaciones de limolitas, de edad Cretácico Inferior; su localidad tipo se encuentra sobre la carretera federal 110, entre la ciudad de Tecalitlán y la ranchería El Carrizalillo, en el estado de Jalisco (Rodríguez, 1980).

La base de la formación la constituyen conglomerados, areniscas de grano fino, limolitas y lutitas, cementados por clorita. En la parte media de la unidad se observan tobas, andesitas, brechas y pórfidos andesíticos en capas no mayores a 1 m.

Brechas Volcánicas.- Consiste en fragmentos angulosos de composición básica no mayores a 20 cm empacados en una matriz de grano fino constituida principalmente por plagioclasa y clorita; esta unidad es de color "beige"-café claro con tonos morados y se observa masiva y consistente, ocasionalmente intemperizada; se presenta en espesores máximos de 1.5 m.

Tobas Líticas.- Están constituidas por fragmentos de roca volcánica menores de 1 cm de diámetro, empacados en una matriz arenosa. La roca es de color café rojizo, aunque existen algunos fragmentos de color gris y se presentan en capas de 1 a 2 cm de espesor hasta volverse masivas, alcanzando espesores de 50 m, como se observó al noreste del rancho Baden.

Limolitas.- Son de ambiente mixto, muestran color rojo y café oscuro y están constituidas por limos y arcillas de origen volcánico; se presentan finamente laminares y en estratos de aproximadamente 15 cm, pero llegan a alcanzar hasta 80 m de espesor como

los que se encuentran al sur de la mina La Virgen, localizada en el extremo occidental del área estudiada (Plano 1).

Derrames Andesíticos.- Rocas de color gris con tonos morados, masivas, con bastante mineralización de epidota que rellena oquedades de un máximo de 2 cm de diámetro; se encuentran muy fracturadas (microfracturamiento) e intemperizadas superficialmente, son masivas y forman paquetes máximos de 150 m en el área de la CH La Villita, aunque pueden alcanzar espesores de 200 m como en la parte poniente del área (plano geológico regional).

Tobas Andesíticas.- Son depósitos piroclásticos de color gris a morado con tonos verdes; en el área del cerro Las Tamacuas se clasificó petrográficamente como una meta-toba (MAU-2-93) con fragmentos de roca andesítica, arcilla y clorita. Se observan pseudoestratificaciones en capas no mayores de 1 m de espesor, encontrándose paquetes que llegan a medir 150 m de espesor; superficialmente están intemperizadas. En estos depósitos se observa mayor contenido de oquedades rellenas de epidota o vacías.

En la Formación Tecalitlán se encuentran numerosos diques de diferente composición y grandes cuerpos intrusivos que le produjeron zonas de metamorfismo de contacto, a veces tan intenso que originaron "hornfels" en rocas volcanosedimentarias y "skarns" en los horizontes carbonatados.

La secuencia subyace concordantemente a la Formación Tepalcatepec y ambas formaciones se encuentran parcialmente cubiertas por rocas volcánicas ácidas y el conglomerado del Grupo La Mira. La base de esta unidad no está aflorando en el área.

FORMACIÓN TEPALCATEPEC

Cretácico Superior (Kstp)

Está constituida por calizas arrecifales de color gris claro que, de acuerdo con

Dunham (1962), se clasifican como "mudstone", "wackestone" y "grainstone"; contienen fauna fósil del Cretácico Medio - Superior.

La formación presenta también calizas en forma masiva e interestratificadas con horizontes de calizas arcillosas y estratos de limolitas; aflora en la parte norte del área de estudio y, de acuerdo con Cota (1984), es correlacionable con la Formación Tepalcatepec. Cubre concordantemente a la secuencia volcanoclástica de la Formación Tecalitlán, y están afectados por el intrusivo granítico.

ROCAS ÍGNEAS INTRUSIVAS

Cretácico Tardío - Terciario Temprano (Tmgd)

Batolito Guerrerense.- Está constituido por granodioritas, que varían a dioritas, con textura fanerítica y minerales como biotita, hornblenda y plagioclasa. Estas rocas intrusionan a las formaciones Tecalitlán y Tepalcatepec; aunque son de color gris claro - "beige", superficialmente se encuentran muy intemperizadas, presentando color café oscuro a ocre y formando suelos arenosos residuales o material arenoso de tipo Tukuruguay (Plano 1).

Estas rocas afloran en la porción noreste y en la parte centro y noroeste del área de estudio.

Cuerpos Intrusivos (Diques).- Existen cuerpos intrusivos de forma tabular que afectan a todas las rocas, excepto a las riolitas y los depósitos no consolidados; son de composición intermedia, clasificados como pórfidos dioríticos, de color gris claro - "beige", que intemperizan en color ocre; su contacto con la roca encajonante está normalmente sellado; algunos de ellos se encuentran silicificados y otros alterados. Su disposición sigue una orientación preferentemente N - S y NE - SW y su espesor observado varía de 5 cm a 2 m.

ROCAS VOLCÁNICAS EXTRUSIVAS

Terciario Superior (Tstr)

Riolitas.- Son de color "beige" - rosado con textura porfídica, contienen fenocristales de cuarzo, plagioclasas y fragmentos de roca; son consistentes, presentan estructuras de fluidez y una pseudoestratificación no bien definida. Se le observa con espesor aproximado de 60 m, no representativo del espesor total de esta unidad en la región.

ROCAS SEDIMENTARIAS

Terciario Superior (T (ar-cg))

Conglomerados.- Consiste en un conglomerado polimíctico semiconsolidado, que está constituido por fragmentos redondeados de 1 a 30 cm de diámetro, principalmente de rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias, contenidos en una matriz de arenas finas a gruesas, limos y arcillas. Se observan ocasionalmente lentes de lodos y arenas semicompactas, así como lutitas y margas.

DEPÓSITOS NO CONSOLIDADOS

Conglomerados Plio-Cuaternarios (Qcg).- Existe otro paquete de conglomerados polimícticos, constituidos por fragmentos de diámetro menor a 20 cm, de rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias, que se encuentran pobremente cementados (suelos en su mayoría). Este conglomerado se ha formado debido a la evolución del delta del río Balsas y se presenta desde la línea de costa hasta los alrededores de la CT Presidente Plutarco Elías Calles y la CH La Villita. Su espesor total no ha sido determinado, pero en

los pozos exploratorios realizados por la CFE se han cortado espesores mayores a 50 m; de acuerdo con Cervantes y Monroy (1987), su espesor puede ser mayor a 70 m (CRMNR, 1967).

Depósitos Aluviales del Reciente (Qa).- Los forman sedimentos fluviales, sobre todo deltáicos, del río Balsas y los arroyos tributarios; están constituidos principalmente por limos, arenas, gravas y bloques débilmente consolidados de rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas. Su color varía de café claro a gris oscuro; en algunas porciones presentan estratificación cruzada y no permiten correlacionar sus horizontes de arenas, arcillas, limos o gravas, ya que casi siempre muestran forma lenticular. En los depósitos deltaicos predominan los fragmentos redondeados del tamaño de las gravas y las arenas y hacia la parte frontal del mismo, aunque aparecen sedimentos del tamaño de las guijas, abundan arenas finas pero principalmente limos y arcillas.

Depósitos de Litoral del Reciente (Qli).- En la línea de costa se pueden observar depósitos de pantanos, manglares, esteros y lagunas, así como paleomeandros, con algunos sedimentos limosos y arenosos, aunque predominan las arenas gruesas con abundancia de gravas mal clasificadas, de forma subredondeada.

2.3. Geología Estructural

En lo que se refiere a las estructuras geológicas, se realizaron varios análisis que determinaron la existencia de grandes lineamientos regionales y fracturas, algunas de las cuales fueron verificadas en campo (Plano 1).

A nivel regional se realizó el análisis estructural por medio de la fotointerpretación del drenaje, observándose dos orientaciones predominantes: una norte-sur y otra noroeste-sureste, así como lineamientos de menor importancia orientados noreste-suroeste y este-oeste. En el área se observaron pocas estructuras con expresión importante

en la topografía; se marcaron las fracturas y los lineamientos que se observan en el plano topográfico y se verificó su existencia y orientación cuando fue posible, como ocurrió en las zonas correspondientes al cerro de la mina La Virgen y el poblado Tamacuas.

Se considera que las estructuras de rumbo norte-sur son las de mayor importancia por su continuidad y predominio, dada su expresión regional, influyen en la orientación del río Balsas. Los lineamientos norte-sur se continúan al norte de la central termoeléctrica y posiblemente tengan que ver con la deflexión de la zona de la Bahía de Petacalco localizada al SE de la CT Presidente Plutarco Elías Calles.

Los lineamientos de importancia secundaria se manifiestan con orientación noreste-suroeste, están distribuidos en toda el área y, junto con los de dirección noroeste-sureste, forman estructuras de enrejado que originan bloques estructurales de poca expresión topográfica.

Debido a la margen convergente donde se encuentra el área de estudio, se esperaría encontrar una serie de plegamientos; sin embargo, no se localizó evidencia alguna de estas estructuras.

Respecto a las fallas, se encontró una de tipo normal en el costado derecho del vertedor de la CH La Villita, que pone en contacto al intrusivo con las tobas andesíticas de la Formación Tecalitlán. Hacia el costado izquierdo de ese mismo vertedor y en el sitio de estudio se observaron fallas normales de corta dimensión.

La mayor parte del fracturamiento que afecta tanto a las rocas volcanoclásticas como a las ígneas intrusivas tiene superficies planas y lisas, cerradas o selladas por sílice o calcita. Las brechas, las andesitas, las tobas líticas y las limolitas presentan fracturamiento de dirección preferencial con las actitudes N 70° E / 36° SE, N 70° E / 86° SE, N 52° E / 64°

SE y N 81° W / 62° NE. En algunas localidades se observan pequeñas fallas laterales que tienen las actitudes N 28° - 40° E 54° - 85° NW.

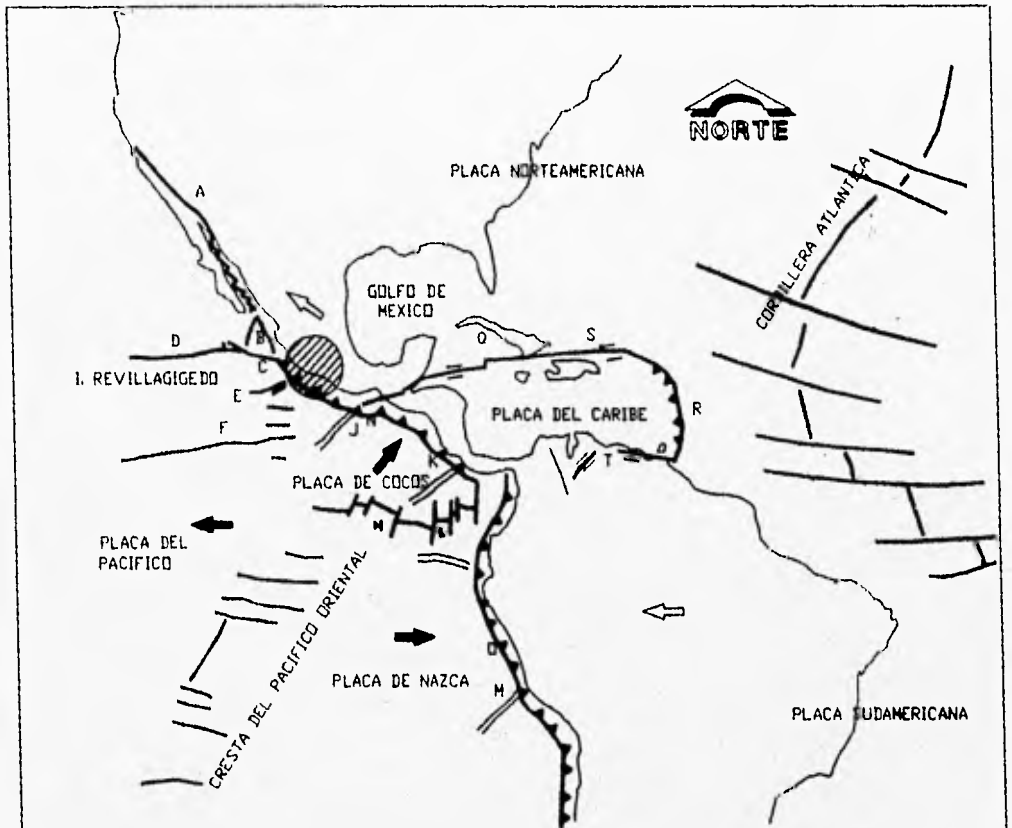
Las rocas intrusivas granodioríticas se encuentran poco fracturadas, con sistemas de fracturamiento orientados N 50° - 84° E / 60° NW; asimismo, existen pequeñas fallas locales de sentido lateral derecho y rumbo N 5° W / 60° NE en sitios como Tamacuas y Barranca Marmolejo.

2.4. Tectónica y Sismicidad

El área de estudio está ubicada en la margen continental de la placa de Norteamérica, cerca de su frontera con la placa de Cocos (Figura 8). La subducción de ésta se manifiesta por medio de rupturas que originan gran actividad sísmica a lo largo de la costa sur-mexicana del Pacífico. La mayoría de los diversos autores que han escrito sobre el comportamiento de la placa de Cocos (Araujo, 1990; Suárez "et al", 1990) coinciden en que ésta cambia el ángulo de su trayectoria a cierta profundidad.

Suárez "et al" (1990) afirman que en el área localizada al sur de la zona de ruptura del sismo de Petatlán (1979) no ha ocurrido ningún temblor de magnitud mayor a 7.5 desde el año de 1908, debido a lo cual se espera que la energía sísmica acumulada desde esa fecha sea liberada en un gran terremoto. Por otro lado, la zona de subducción frente a la ciudad de Lázaro Cárdenas era considerada asísmica hasta 1980, es decir, no se sabía de grandes eventos sísmicos en esa parte de la trinchera Mesoamericana; sin embargo, con el temblor de Playa Azul cambió este concepto porque se comprobó que la energía estuvo almacenada y fue liberada en septiembre de 1985 (Sing "et al", 1981).

Según Araujo (1991), la actividad sísmica en dicha área está concentrada a lo largo de dos franjas paralelas a la costa. La primera, que coincide con el litoral, tiene aproximadamente 35 km de ancho y en ella la profundidad de los hipocentros sísmicos



- | | | | |
|---|--|---|---|
| A | Sistema de Fracturas de San Andres-Golfo de California | K | Cresta de Cocos |
| B | Fractura de Rivera | L | Cresta de Carnegie |
| C | Rivera Triple Junction | M | Cresta de Nazca |
| D | Fractura de Clarion | N | Fosa Meso-Americana |
| E | Fractura de Orozco | O | Fosa Peru - Chile |
| F | Fractura de Siqueiros | P | Fallas Polochic-Motagua |
| G | Fractura de Clipperton | Q | Falla Cayman o Bartlett |
| H | Cresta de los Galapagos | R | Zona de Subduccion de las Pequeñas Antillas |
| I | Fractura de Panama' | S | Fosa de Puerto Rico |
| J | Cresta de Tehuantepec | T | Fallas Oca - El Pilar |
| | | | (Demont, 1978) |



AREA DE ESTUDIO

FIGURA 8 UBICACION DEL AREA DE ESTUDIO EN ZONA DE SUBDUCCION

varía de 10 a 25 km; en la segunda, que está claramente separada entre 15 y 20 km de la primera franja, se generan sismos con profundidad focal de 32 a 50 km. La ausencia de sismicidad entre estas dos bandas es evidente.

La convergencia de la placa del Pacífico con la de Norteamérica originó un arco insular marginal cuya actividad dio lugar al depósito de sedimentos volcanoclásticos pertenecientes al terreno tectonoestratigráfico Zihuatanejo (Vidal, 1986), de edad Jurásico Superior - Cretácico Inferior, así como sedimentos correlacionables con las formaciones Tecalitlán (Rodríguez, 1980) y Zihuatanejo (Vidal, 1986). El proceso persistió hasta el Mesozoico Superior, con un depósito de calizas arcillosas (Formación Tepalcatepec), que evidencia un tectonismo de margen activo convergente representado por el desarrollo de un arco insular mar-marginal, con presencia de rocas carbonatadas. Al continuar la actividad tectónica en el Cretácico Superior - Terciario Temprano (orogenia Laramide), ocurrió el emplazamiento de batolitos granítico - granodioríticos que afectó a las rocas preexistentes a lo largo de las costas de Guerrero, Michoacán y Colima, produciendo intrusiones hipabisales de composición intermedia (dioritas) como resultado de la asimilación de las rocas intrusionadas.

2.5. Geología Histórica

El registro estratigráfico del área se inicia al fines del Paleozoico, con el depósito de areniscas, lutitas, tobas y calizas que sufrieron metamorfismo regional durante el Pérmico (?), el Triásico (Gutiérrez-Hernández, 1975) y posiblemente el Jurásico Inferior (Grajales y López, 1984), dando origen al Esquisto Arteaga. La fase compresiva, causante del metamorfismo, provocó que la zona emergiera y se convirtiera en una zona positiva sujeta a los efectos del intemperismo y la erosión hasta el Jurásico Medio, edad en la que se inicia una transgresión marina y la reactivación de zonas subsidentes, condiciones que se mantienen hasta el Jurásico Superior (?) op.cit. Al iniciarse el Cretácico se tiene el

emplazamiento de un arco magmático, el cual produce el depósito de una secuencia vulcano - sedimentaria con cambios de "facies" (Formación Tecalitlán) que culmina hasta el Aptiano. Para el Cretácico Medio hay un período de estabilidad tectónica que favorece la depositación de carbonatos pertenecientes a la Formación Tepalcatepec (IMP, Proyecto C-4000).

En el Cretácico Superior la orogenia Laramide induce el emplazamiento de grandes masas granodioríticas y hay un proceso de emersión, como resultado de que el margen occidental de la placa de Norteamérica empezó a cabalgar sobre la dorsal del Pacífico Oriental (Aguayo, 1982), con lo cual concluye la sedimentación marina mesozoica.

Los cuerpos intrusivos de dimensiones batolíticas causaron metamorfismo de contacto y mineralización a las rocas de las formaciones Tecalitlán y Tepalcatepec, produciendo depósitos de cobre (Mina La Virgen).

Durante el Terciario Inferior, en el área se manifiestan eventos magmáticos extrusivos de composición ácida a intermedia, cubriendo discordantemente las rocas mesozoicas y el intrusivo.

Al finalizar la orogenia Laramide se producen esfuerzos distensivos que propician la formación de fosas tectónicas, donde se depositan terrígenos continentales representados por conglomerados, areniscas, limos y arcillas que por lo general están muy consolidados.

Los depósitos cuaternarios están representados por aluviones localizados en las inmediaciones de ríos, arroyos y el delta del río Balsas, así como por el desarrollo de suelos.

2.6. Hidrología

2.6.1. Características Geohidrológicas de la Cuenca

En el área de estudio la corriente fluvial más importante es el río Balsas, uno de los principales ríos de México por su enorme cuenca de captación y el gran volumen de agua que por él escurre; dentro de la zona de estudio tiene una dirección predominante hacia el sur sobre la cual se encuentra la presa José María Morelos y Pavón (La Villita), aguas abajo de la cual el río se bifurca al entrar en una zona deltaica, hasta su desembocadura en el Océano Pacífico. En el área de estudio se tienen llanuras de inundación afectadas tanto por los cambios de marea como por las obras hidráulicas construidas aguas arriba, que han modificado los procesos fluviales del estuario.

El área comprende pequeñas porciones de las regiones hidrológicas (Tabla 2.1).

| REGIONES HIDROLÓGICAS DEL ÁREA | | | | | | | | |
|---------------------------------------|--------------------|-----------------------|---------------|-------------------------|-----------------------|------------------|-----------------------|-----------------------|
| REGIONES | | | CUENCA | | | SUBCUENCA | | |
| No. | Nombre | km² | Clave | Nombre | km² | Clave | Nombre | km² |
| 17 | Costa de Michoacán | 9075 | A | R. Neixpa y otros | 4702 | a | Sin Nombre | 118 |
| 18 | Balsas | 5868 | D | R. Balsas - Infiernillo | 1806 | d | R. Balsas - Villita | 471 |
| 19 | Costa Grande | 278 | C | R. Ixtapa y otros | 278 | e | R. Pinila y A. Grande | 278 |

Según INEGI, 1983 TABLA 2.1

Localmente las corrientes perennes principales cerca al sitio de estudio son: El Sorcuca, Petacalco y Tamacuas, que han formado abanicos aluviales de 4 a 5 km de longitud. Todas estas corrientes son de corta longitud y forma un drenaje de tipo radial, arborecente y hasta rectangular, donde los materiales depositados muestran generalmente alta porosidad y permeabilidad.

El río Balsas, es captado aguas arriba de su desembocadura por la presa José María Morelos (La Villita). En el período de 1991 a 1994 es de 19,900 m³/s el caudal máximo registrado fue de (octubre / 92) 987.70 m³/s, caudal mínimo (diciembre / 92) 25.22 m³/s y una caudal medio de 423.83 m³/s (Tabla 2.2).

| VOLUMEN DE DESCARGA DEL VASO DE LA CH LA VILLITA | | | | |
|---|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| Mes | 1991 (m³) | 1992 (m³) | 1993 (m³) | 1994 (m³) |
| ENERO | 1'037,800.000 | 768,200.000 | 762,700.000 | 563,201.856 |
| FEBRERO | 832,700.000 | 1'670,500.000 | 1'178,600.000 | 775,451.770 |
| MARZO | 936,200.000 | 1'481,300.000 | 1'581,200.000 | 1'089,305.690 |
| ABRIL | 930,700.000 | 1'462,600.000 | 1'006,200.000 | 1'466,241.372 |
| MAYO | 925,200.000 | 1'407,200.000 | 1'065,000.000 | 1'442,124.876 |
| JUNIO | 915,700.000 | 1'493,800.000 | 1'078,200.000 | 1'203,411.162 |
| JULIO | 1'620,000.000 | 647,900.000 | 2'096,700.000 | 864,841.044 |
| AGOSTO | 1'044,000.000 | 1'087,400.000 | 2'032,800.000 | 317,500.000 |
| SEPTIEMBRE | 1'062,000.000 | 1'624,800.000 | 2'157,900.000 | 347,500.000 |
| OCTUBRE | 1'056,000.000 | 2'640,100.000 | 1'397,100.000 | 519,200.000 |
| NOVIEMBRE | 777,400.000 | 1'341,100.000 | 690,600.000 | 443,500.000 |
| DICIEMBRE | 550,500.000 | 67,560.000 | 563,500.000 | 262,400.000 |

TABLA 2.2

2.7. Unidades Geohidrológicas

De acuerdo a las características cualitativas de porosidad y permeabilidad de las diferentes unidades litológicas que afloran en el área tanto regional como local, se determinaron tres diferentes unidades geohidrológicas diferenciadas por la facilidad relativa con que almacenan y permiten el flujo del agua subterránea; estas unidades son: permeables, semipermeables e impermeables (Tabla 2.3).

Considerando la distribución estratigráfica de los materiales granulares, se presenta una unidad permeable que actúa como acuífero alimentado por las recargas vertical y lateral del río Balsas, así como localmente por efecto de la filtración de los canales de riego provenientes de la presa La Villita. Para el sitio de estudio la zona no presenta conexión hidráulica (recarga) con las partes topográficas altas. Las unidades semipermeables se presentan como acuíferos de poca captación y producción debido a la variación litológica, los cambios transicionales y diversos rasgos estructurales (Formación Tecalitlán). Las unidades impermeables agrupan a los cuerpos ígneos que afloran en esta zona y los horizontes arcillosos que se localizan en el subsuelo.

UNIDADES PERMEABLES

Las unidades permeables son aquellas que facilitan la circulación, el almacenamiento y la extracción de agua en forma económica.

UNIDADES SEMIPERMEABLES

Están representadas por unidades que permiten el almacenamiento de agua pero dificultan su circulación y por lo tanto su explotación.

CARACTERÍSTICAS DE LAS UNIDADES GEOHIDROLÓGICAS

| Unidades Geohidrológicas | Unidad Geológica | Litología | | Observaciones |
|--------------------------|------------------|---|---------------|---|
| PERMEABLES | Qli | ar | | Presentan porosidad y permeabilidad primaria debido a su origen y granulometría |
| | Qal | ar-gv-ar | | |
| | Qsr | gv-ar | | |
| | Qcg | gv-ar | | |
| | T(ar-cg) | ar-gv-ar | | Poco consolidada constituida por arenas y gravas que presentan permeabilidad primaria |
| | Kstp | cz | | Unidad sedimentaria constituida por calizas arrecifales que tienen permeabilidad secundaria por fracturamiento y disolución |
| SEMIPERMEABLES | R | gv-ar-arc | | Relleno que ha experimentado compactación artificial; presenta arcillas que la hacen semipermeable |
| | Qcg | arc-ar arc-a-gv gr-arc gr-ar-arc gr-ar-lim gr-cr-arc | | Compuesta principalmente por arcillas con materiales granulares que las hacen semipermeables. Contiene arcillas; es semipermeable debido a que se encuentra en forma de lentes o interdigitada con gravas. |
| | Kstp | cz-lu | | Constituida por calizas arcillosas; la arcilla le da un carácter semipermeable |
| | Kitc | bv a ta tb li | | Por su origen, heterogeneidad, composición litológica, interdigitación y cambio transicional se considera semipermeable. Sólo cuando presenta fracturamiento actúa como permeable. Presentan permeabilidad secundaria |
| IMPERMEABLES | Qcg | arc | | Arcilla plástica de color café a negro que contiene materia orgánica; por su contenido arcilloso se considera impermeable |
| | Tm (gd) | Ts | d tr | Se consideran impermeables, debido a su origen y constitución litológica; pueden actuar localmente como semipermeables cuando presentan fracturamiento y alteración |
| | | Tm | d gd dc | |

TABLA 2.3

UNIDADES IMPERMEABLES

Son unidades que en el área de estudio dificultan el paso del agua a través de ellas y además no permiten su almacenamiento, debido a lo cual la extracción no es viable desde el punto de vista económico.

3. TEORÍA DEL SONDEO ELÉCTRICO VERTICAL (SEV)

La prospección geofísica tiene como propósito determinar ciertas propiedades físicas de las rocas y conocer su distribución en el subsuelo. Las técnicas que se emplean son capaces de medir propiedades como la resistividad eléctrica, la densidad, la cargabilidad, la intensidad magnética y la velocidad de ondas elásticas; todas ellas ligadas a la conformación y disposición de los materiales, así como a la presencia de agua dentro de ellos.

La resistividad eléctrica es una de las propiedades que está íntimamente ligada a la cantidad de agua, la forma en que se encuentra distribuida, su temperatura y su contenido de sales.

Los materiales saturados tienen casi siempre resistividades más bajas que los no saturados y secos; a mayor porosidad de las rocas saturadas es por lo general menor la resistividad que presentan. La presencia de arcillas o minerales conductores y, en algunas zonas, el aumento de temperatura en rocas y fluidos tienen como consecuencia una disminución de la resistividad (Arellano, 1980) del medio.

De los métodos geofísicos, los geoeléctricos y en particular el sondeo eléctrico vertical (SEV) tienen como objetivo conocer la distribución vertical de las formaciones en el subsuelo.

En las zonas donde se busca agua generalmente se presentan resistividades características que han ayudado a orientar las exploraciones, aunque no siempre su relación con la existencia del líquido es directa porque también pueden responder a causas muy independientes de éste (Ruíz, 1993).

3.1. Propiedades Electromagnéticas de las Rocas

Las propiedades electromagnéticas de las rocas se expresan fundamentalmente por medio de las siguientes magnitudes físicas: la resistividad eléctrica (ρ) o su inversa la conductividad (σ) la constante dieléctrica (ϵ) y la permeabilidad magnética (μ), así como por la actividad electroquímica. La variación de dichas propiedades en las rocas depende del modo como están distribuidos sus minerales y la forma, volumen y el relleno de sus poros (generalmente agua o aire), además de los efectos que sobre ellas ejercen la salinidad, la temperatura y la presión (Orellana, 1972).

3.2. Resistividad

La base fundamental del comportamiento eléctrico de los materiales se basa en la ley de Ohm, que establece la relación entre el potencial eléctrico V , la corriente eléctrica I y la resistencia eléctrica R en un conductor:

$$V = I R \quad (1)$$

Se sabe además que si una corriente eléctrica uniforme fluye a través de un cuerpo homogéneo en dirección de su eje principal, la resistencia al paso de ella será proporcional a la longitud L e inversamente proporcional al área A de su sección transversal, por lo cual la resistencia de dicho elemento está dada por

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (2)$$

donde ρ es una constante de proporcionalidad, numéricamente igual a la resistencia entre las caras de un cubo unitario de un material homogéneo e isótropo, llamada resistividad o resistencia específica del material. En el Sistema Internacional de Unidades se le mide en

Ωm .

Si se llevan estos conceptos a pequeños volúmenes, pero en vez de la corriente que fluye a través del medio finito se considera la densidad de corriente \vec{J} y en lugar de la diferencia de potencia se emplea el gradiente de potencial eléctrico \vec{E} , entonces para un elemento de dimensiones dx , dy y dz , situado en un punto P y orientado de modo que el eje Z esté en la dirección del vector de densidad de corriente \vec{J} en P (Figura 9) y si no existen discontinuidades de dicho campo en las vecindades de P, la resistencia a través del cuerpo geométrico infinitesimal puede escribirse como (Arellano, 1980):

$$R = \frac{\vec{E} \cdot dz}{\vec{J} \cdot dx \cdot dy} \quad (3)$$

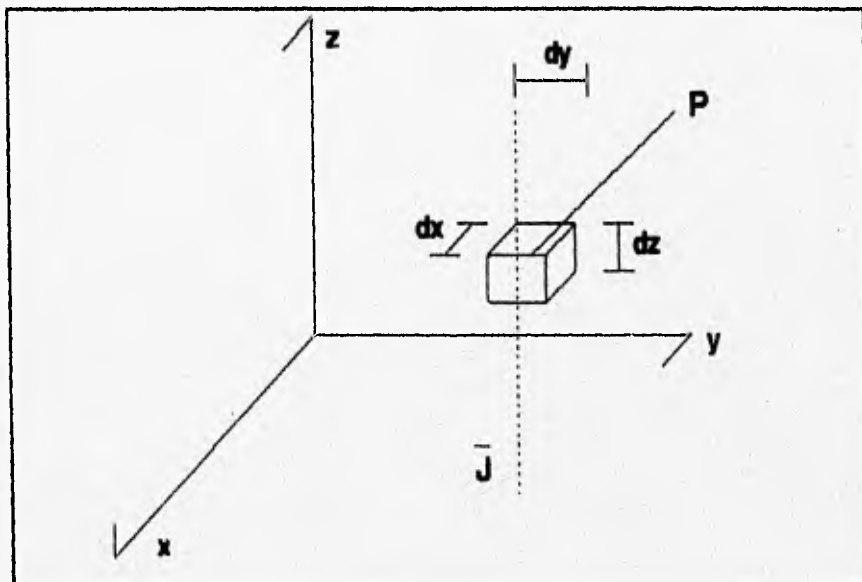


Figura 9 Vector de densidad de corriente J , en un espacio homogéneo, sobre un elemento de dimensiones dx , dy y dz .

Por otro lado, puesto que (2) para un cuerpo infinitesimal es:

$$R = \rho \frac{dz}{dxdy} \quad (4)$$

Sustituyendo (4) en (3) resulta que:

$$\rho = \frac{\vec{E}}{\vec{J}} \quad (5)$$

Esta expresión es conocida como la ley de Ohm en su forma vectorial diferencial.

3.3. Conductividad

La facilidad con que circula la corriente eléctrica en un determinado material se denomina conductividad σ , lo cual resulta ser la inversa de la resistividad ρ , es decir:

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (6)$$

De acuerdo como se presenta en la naturaleza, la conductividad puede ser de dos tipos (Orellana, 1972):

Conductividad electrónica.- Se le denomina también conductividad eléctrica y es debida al movimiento de electrones libres; son escasos los cuerpos que muestran este tipo de conductividad en la corteza terrestre.

Conductividad iónica.- Se presenta cuando el flujo de la corriente se efectúa por el movimiento de iones del fluido contenido en los poros o intersticios de las rocas.

En los estudios geoelectricos la conductividad de las rocas se comporta casi siempre según la segunda forma enunciada, dado que la primera poco interviene; la conducción eléctrica entonces se efectúa predominantemente a través de los electrolitos líquidos.

3.4. Polarización

La polarización es función de la conductividad dieléctrica, que permite las concentraciones de partículas (cargas eléctricas) dependiendo de la intensidad del campo eléctrico aplicado. Existen varios tipos de polarización que se presentan en forma independiente o simultáneamente en la aplicación de un campo eléctrico, ellos son:

Interfacial.- Producida por la acumulación de cargas en las superficies límites o de separación entre diferentes materiales.

Electrónica.- Debida al desplazamiento de los electrones de cada átomo con respecto a su núcleo.

Iónica.- Originada por el desplazamiento de los iones con respecto a su posición de equilibrio en la red cristalina.

Dipolar.- Producida por la orientación de las moléculas cuando éstas poseen momentos eléctricos permanentes y pueden considerarse como dipolos.

3.5 Actividad Electroquímica

La actividad electroquímica está relacionada con la composición química de las rocas, pero principalmente con la composición y concentración de los electrolitos que las impregnan; de ello depende la magnitud y el signo de la diferencia de potencial que se desarrolla cuando la roca se encuentra en desequilibrio con un determinado electrolito. En esto se basa el método de autopotencial o potencial espontáneo.

La actividad electroquímica se presenta principalmente de dos formas (Orellana, 1972):

1. Como potencial de difusión cuando en los poros de las rocas se ponen en contacto electrolitos diferentes o existen diferencias de concentración en un mismo electrolito. Lo anterior se debe a que los iones de diferente signo poseen desigual movilidad y ésta provoca que aquéllos se difundan más rápidamente, llegando a formarse dos zonas, en cada una de las cuales predominan los iones de un signo y se establece una diferencia de potencial ΔV .
2. Potenciales de electrofiltración que consisten fundamentalmente en la producción de un campo eléctrico por el movimiento de electrolitos (aguas subterráneas) a través de un medio poroso en el subsuelo. Cuando un electrolito pasa a través de una membrana porosa se produce entre los dos lados de ésta una diferencia de potencial. Las rocas pueden comportarse como tales membranas cuando poseen, por su porosidad, una red de conductos capilares a través de los cuales puede infiltrarse agua subterránea. Las paredes de los capilares pueden absorber los aniones, los cuales atraen los cationes, para formar una capa eléctrica doble. Los aniones permanecen fijos pero los cationes son arrastrados por la marcha del electrolito a través del capilar, concentrándose junto a la salida para dar lugar a una diferencia de potencial.

3.6. Método de Resistividad

3.6.1. GENERALIDADES

Existen varios métodos de exploración geoelectrica (Tabla 3.1) que se basan en el estudio de la circulación de la corriente eléctrica en el subsuelo. Esta circulación puede ser natural (potencial natural o corrientes telúricas) o artificial debida a la introducción de una corriente determinada.

De los métodos que requieren una fuente artificial se distinguen los inductivos y los conductivos (Ruíz, 1993), de los cuales los primeros requieren el uso de generadores con frecuencia de varios kilohertz y la medición del campo electromagnético creado por la corriente inducida en el terreno; los segundos utilizan una corriente continua o alterna de sólo unas decenas de ciclo por segundo y estudian el campo eléctrico generado.

En la exploración geohidrológica los métodos que más se utilizan son los conductivos, concretamente los de sondeos eléctricos verticales con el propósito de interpretar las características geológicas del subsuelo.

En la ejecución de la prospección geoeléctrica se introduce al terreno una corriente conmutada de baja frecuencia por medio de dos electrodos. La diferencia de potencial generada a causa del campo eléctrico se mide con otros dos electrodos, cuya posición respecto a los primeros puede ser muy variada. Así, con los registros de la corriente y potencial es posible realizar un cálculo de la resistividad aparente del subsuelo para cada posición del dispositivos electródico.

3.7. Resistividad Eléctrica de Rocas y Suelos

La resistividad de rocas y suelos varía dentro de un intervalo muy amplio de valores ya que la mayoría de los minerales que los forman son prácticamente aislantes. La conductividad de éstos y el contenido de fluidos determinan la resistividad de las rocas y suelos.

Las rocas constituidas por una matriz aislante deben su conductividad de conjunto a la red de conductos irregulares y tortuosos, desarrollados por una porosidad primaria o secundaria, llenos de electrólitos por los cuales fluye la corriente eléctrica.

Los límites de variación más usuales para la resistividad de las rocas se presentan en la Figura 10, junto con la de algunos minerales (Orellana, 1972).

Según Orellana (1972) las rocas ígneas y metamórficas suelen presentar resistividades comprendidas entre 10^2 y $10^5 \Omega\text{m}$. En las rocas sedimentarias es mayor la diversidad; los valores más altos corresponden a las evaporitas en especial a las anhidritas y la sal gema cuya resistividad oscila entre 10^4 y $10^6 \Omega\text{m}$; más conductoras suelen ser las calizas que presentan resistividades comprendidas generalmente entre 10^2 y $5 \times 10^3 \Omega\text{m}$; valores semejantes presentan las areniscas y dolomitas; mayor conductividad aún presentan las margas con resistividades que suelen variar entre 1 y $10^2 \Omega\text{m}$.

Las resistividades de las rocas detríticas y clásticas crece con el tamaño del grano: es de 1 a $50 \Omega\text{m}$ para las arcillas, de 10 a $10^2 \Omega\text{m}$ para los limos, 10^2 a $10^3 \Omega\text{m}$ para las arenas y de 10^2 a $10^4 \Omega\text{m}$ para las gravas, siempre y cuando contengan agua dulce. La resistividad de las arenas impregnadas de agua salada es muy inferior a la indicada y puede descender hasta $0.1 \Omega\text{m}$.

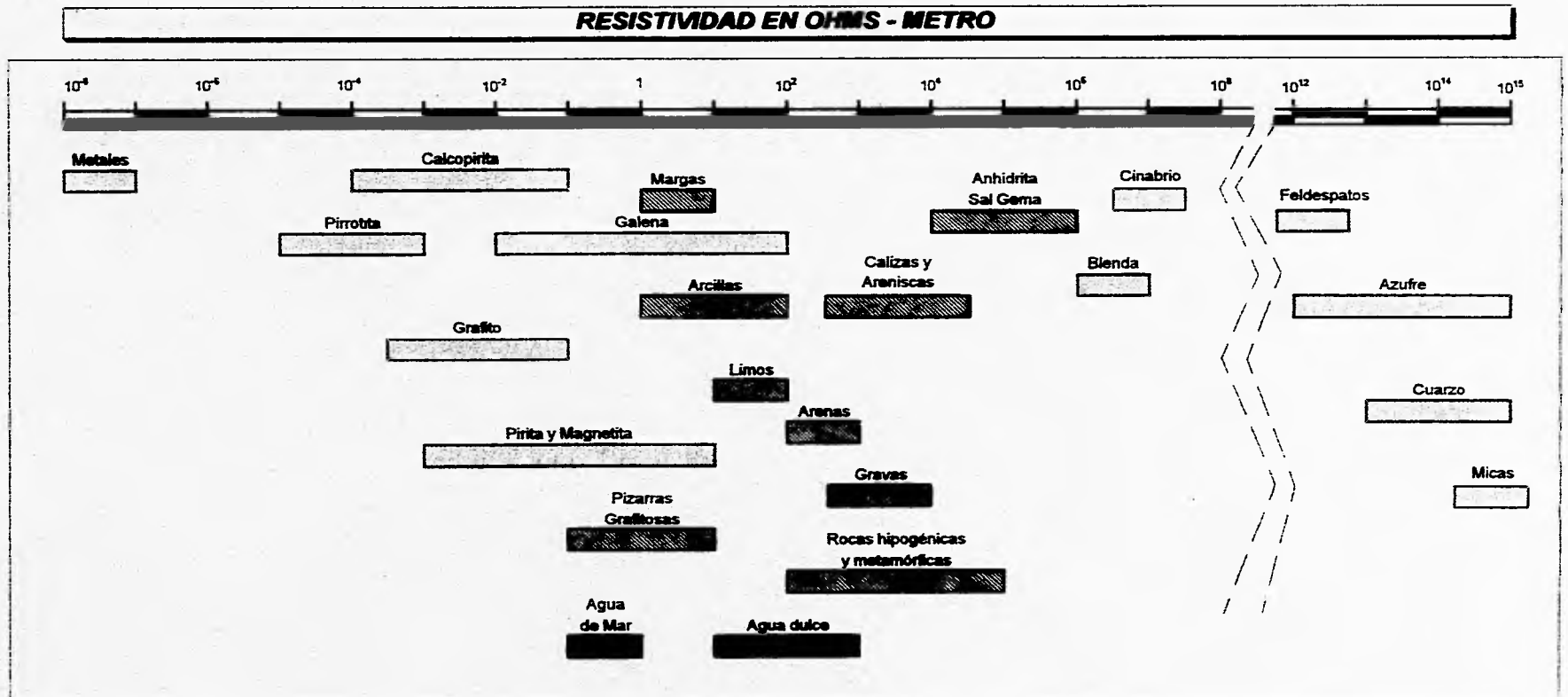


Figura 10. Gráfico de los márgenes de variación más comunes en algunas rocas y minerales. La fisuración, impregnación de agua salada, etc., pueden extender estos límites (Orellana, 1972)

En los afloramientos de diversas formaciones la capa superficial meteorizada suele presentar menor resistividad que la roca sana, por causa de su mayor porosidad.

Esto no ocurre siempre, porque a veces se observa la llamada paradoja de los suelos, según la cual los suelos de regiones de clima seco o desértico pueden tener menor resistividad que los de zonas de clima muy húmedo, en contra de lo que se pudiera esperar, por la disminución de la resistividad con el contenido de agua. La razón de este fenómeno es la siguiente: en zonas de clima muy seco es frecuente la ascensión de agua hacia la superficie a través de poros capilares con ulterior evaporación y consiguiente aumento del contenido iónico de las capas superficiales. En las regiones húmedas por el contrario, la intensa circulación de agua en las capas superficiales disuelve y arrastra los iones; de ahí la menor conductividad del segundo caso respecto al primero (E. Orellana, 1972). Telford "et al" (1976), presenta con mayor detalle los intervalos de resistividad para los diversos materiales y elementos, mineralizaciones, rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias y su variación con el contenido de agua.

Sin embargo, no todo está dicho al respecto, ya que cada área o zona de estudio tiene sus resistividades específicas que algunas veces no coinciden con los intervalos publicados por algunos autores, debido a condiciones muy particulares.

3.8. Factores que Afectan la Resistividad

Los factores que afectan la resistividad de las rocas saturadas son (Orellana, 1972): el grado de saturación de los poros, la salinidad de los fluidos saturantes, el factor geométrico de dichos poros, la conductividad de la matriz, la temperatura y la presión.

Como el agua contenida en los espacios porosos de las formaciones es el agente dominante en la conducción eléctrica, a través de los electrólitos presentes, se han

definido relaciones empíricas entre la resistividad del agua que satura una roca dada, la resistividad total de ésta y su porosidad.

Una de esas relaciones está dada por la ecuación de Archie, que define el factor de formación F, el cual depende del tipo de roca y su porosidad como:

$$F = \frac{\rho_o}{\rho_w} \quad (7)$$

donde:

- ρ_o = resistividad de la roca saturada
- ρ_w = resistividad del electrólito que satura la roca

La ecuación de Archie también ha sido desarrollada para cubrir las variaciones del factor de formación respecto a la porosidad, es decir:

$$F = k \phi^m \quad (8)$$

donde:

- ϕ = porosidad
- m = una constante generalmente cercana a 2
- k = es un número cercano a la unidad (0.7 a 1.2)

De 7 y 8 resulta que:

$$\rho_o = k \phi^m \rho_w \quad (9)$$

La constante m varía de 1.2 a 1.5 en rocas no consolidadas y muestras de canal de los recortes de pozos. Es próxima a 3.5 para rocas antiguas y rocas cristalinas. En algunas ocasiones se considera como el factor de cementación; sin embargo, está más relacionada con la tortuosidad de las formaciones que con la cementación (Meidav, 1979).

En la Figura 11 se presenta un nomograma que relaciona la porosidad y el factor de formación para cualquier valor común de m (Orellana, 1972). Como se puede observar, de la ecuación (8) el factor de formación F varía aproximadamente con el cuadrado inverso de la porosidad, y de la ecuación (9) la resistividad de la roca varía de la misma forma con respecto a la porosidad; por lo tanto, si se mantiene en todos los factores constantes para una roca dada y se aumenta la porosidad se producirá una reducción de la resistividad en ella.

Estas relaciones han sido ampliamente usadas en los cálculos de la porosidad del subsuelo por medio del empleo de registros de pozos.

En la mayoría de los casos el agua que satura los espacios porosos consiste de una solución de diferentes sales dentro de las cuales domina el NaCl. La concentración salina de esas soluciones influye en la resistividad de las formaciones de una manera inversa ya que el aumento de salinidad corresponde un decremento de resistividad, (Arellano, 1980). Si los demás factores permanecen constantes los cambios de resistividad pueden ser empleados para determinar los cambios de salinidad, lo anterior ha sido

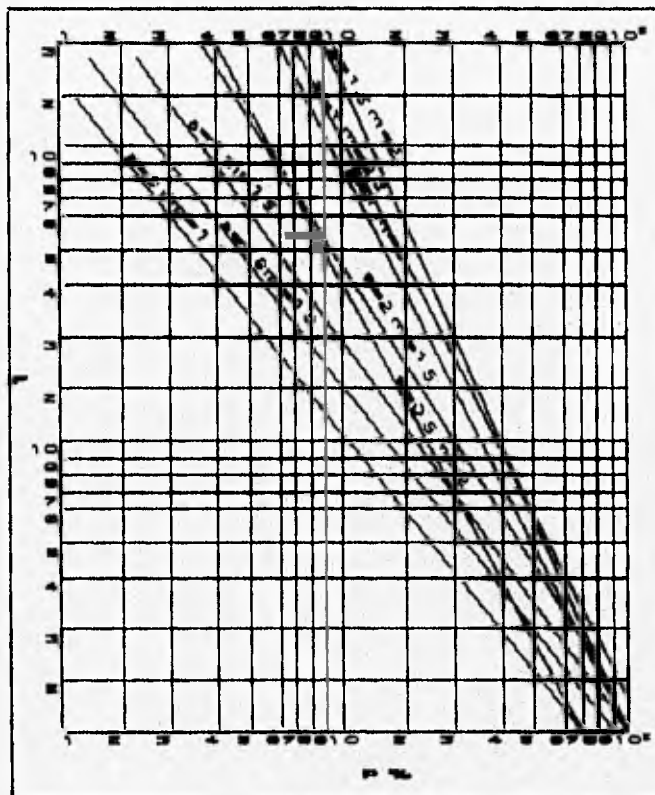


Figura 11 Variación del factor de formación F en función de la porosidad para diferentes valores de a y de m .

utilizado en el estudio de intrusión salina bajo pequeñas islas y en la determinación de salinidad regional.

Como se concluye de párrafos anteriores, la resistividad de las rocas que contienen agua depende básicamente de la cantidad de ésta, de su salinidad y de la forma en la cual está distribuida. Estas tres características no son igualmente importantes, ya que la resistividad de las rocas varía más ampliamente por la diferencia en el contenido de agua, la cual puede variar en una proporción de 1000:1 entre algunos tipos de rocas. Puesto que en la ley de Archie el contenido de agua aparece como una cantidad al cuadrado, el intervalo de variación aumenta la proporción hasta en $10^6:1$ en la resistividad volumétrica, siendo los otros factores los mismos. La salinidad del agua contenida es la segunda en importancia, en parte porque ella entra en la ley de Archie sólo como potencia unitaria, y en parte porque el intervalo de variación de la resistividad del agua está limitado por interacciones con los minerales de la roca en una proporción de 500:1; por lo tanto, si permanecen los demás factores iguales, las variaciones en la salinidad del agua pueden causar cambios en la resistividad volumétrica en proporción de 500:1. La distribución del agua en la estructura de los poros resulta ser el factor de menor importancia, ya que causa una variación en la resistividad volumétrica no mayor que 20:1, si los otros factores no varían.

La resistividad de las rocas que contienen agua también es afectada por los cambios de temperatura y presión, aunque en grado menor que los factores anteriores.

Isotropía y Anisotropía

La anisotropía eléctrica de las rocas se presenta cuando la microestructura de éstas se encuentra dispuesta de tal forma que el paso de la corriente eléctrica no tiene la misma magnitud en todas las direcciones. Si, por el contrario, la misma corriente se comporta igual en todas las direcciones, se dice que la roca es eléctricamente isótropa y su resistividad específica se mantiene constante.

En investigaciones geoelectricas generalmente se consideran tres tipos de anisotropía: microanisotropía, macroanisotropía y pseudoanisotropía (Orellana, 1972). La

microanisotropía es aquella en la cual los granos de la roca son individualmente anisótropos por causa de su estructura; este fenómeno geológico se presenta en capas compuestas de pequeños elementos de diferentes minerales, como es el caso de una capa de arcilla donde el plano de estratificación, horizontalmente alineado, tiene los granos separados por capilaridad laminar de agua.

La macroanisotropía resulta de la alternancia repetitiva de diferentes facies litológicas (cada una de ellas isotropa); este fenómeno es totalmente diferente de la macroanisotropía. De manera general se superponen ambos casos en una roca.

La pseudoanisotropía es esencialmente un término teórico utilizado en la demostración de que un paquete de capas homogéneas e isotropas se comporta, en cierto modo, como un medio anisótropo.

3.9. Método de Sondeo Eléctrico Vertical

Los métodos geoelectricos se pueden dividir en dos grupos (Ruiz R., J., 1993): los que utilizan corriente continua o directa y los que usan corriente alterna; ambos son capaces de emplear corrientes de fuente natural (que existen normalmente en la naturaleza) o artificial. En cada una de estas modalidades existen al menos dos tipos de técnicas: las que miden variaciones verticales de resistividad con respecto a la profundidad y las que registran cambios de resistividad de manera horizontal; a las primeras se les denomina sondeos y a las segundas calicatas*. En la tabla 3.1 se muestran con ejemplos los tipos de métodos geoelectricos existentes.

* Una combinación de ambas es la denominada seudosección, que investiga las variaciones de resistividad tanto vertical como horizontalmente.

| | | | |
|---------------------------|---------------------------|---|--|
| CORRIENTE CONTINUA | fFuente natural | calicatas de potencia natural (SP) | |
| | fFuente artificial | sondeos | eléctricos verticales (SEV) polarización inducida (SPI) |
| | | calicatas eléctricas (CE) | |
| | | seudo-secciones | eléctricas (SCE) polarización inducida (SSPI) (cargabilidad) |
| CORRIENTE ALTERNA | fFuente natural | sondeos | magnetotelúrico (SMT) geomagnéticos (SGM) |
| | | calicatas telúricas (CT) | |
| | fFuente artificial | sondeos | frecuencias (SF) transitorio electromagnético (TEM) seudosondeos electromagnéticos aéreos (PSEA) |
| | | calicatas | electromagnéticas (CEMT) electromagnéticas aéreas (CEMA) |
| | | <p>Figura 3.1 CLASIFICACIÓN DE MÉTODOS GEOELÉCTRICOS (Modificada de Ruíz R.,J., 1993)</p> | |

Los sondeos eléctricos verticales (SEV) como se observa en la tabla (modificada de Ruíz R.,J., 1993), están clasificados dentro de los métodos eléctricos de corriente continua de fuente artificial y su finalidad es la determinación de las profundidades de las capas del subsuelo y las resistividades o conductividades eléctricas de las mismas, a partir de mediciones efectuadas en la superficie mediante separaciones electródicas variables.

Casi todos los métodos eléctricos requieren el uso de 4 electrodos conectados

en el suelo; un par de ellos sirve para introducir en el terreno una corriente eléctrica, mientras que el segundo se utiliza para medir la diferencia de potencial producida como resultado del paso de la corriente eléctrica. Los diversos dispositivos electródicos existentes sólo difieren en la posición relativa entre los electrodos.

Se ha definido (Orellana, 1972) que para un medio infinito, homogéneo e isótropo de resistividad ρ , el potencial eléctrico V causado por un electrodo puntual en A , que emite una corriente eléctrica I en cualquier punto P (Figura 12), está dado por:

$$V = \frac{\rho I}{4\pi r} \quad (10)$$

donde:

$$r = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2} \quad (11)$$

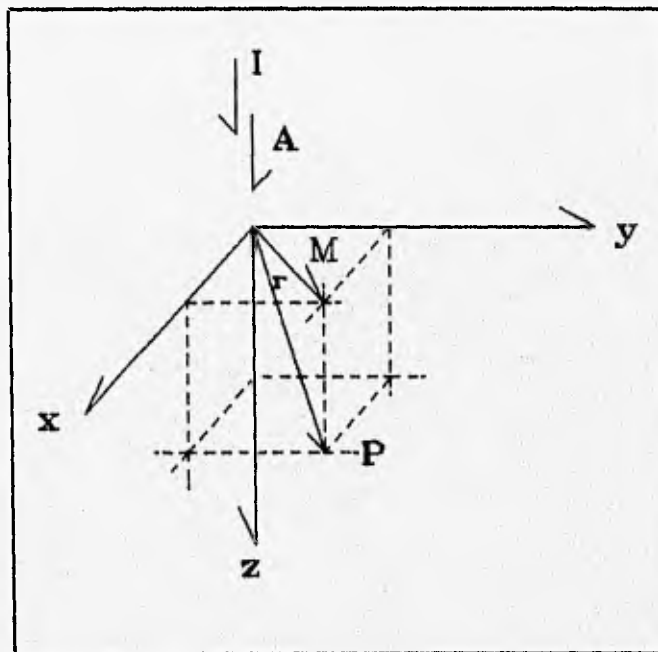


Figura 12 Electrodo puntual en un espacio homogéneo.

Para un semiespacio infinito, situación que se aproxima al caso real, en la superficie terrestre $Z = 0$, se tiene:

$$V = \frac{\rho I}{2\pi(x^2+y^2)^{1/2}} = \frac{\rho I}{2\pi AM} \quad (12)$$

donde AM es la distancia sobre la superficie terrestre entre un electrodo de corriente en A y un electrodo de potencial en M.

Considerando el caso general de un dispositivo tetraelectrónico colocado en la superficie de un semiespacio eléctricamente homogéneo e isótropo (Figura 13), los electrodos de corriente, A y B, sirven uno para inyectar corriente al terreno y el otro para cerrar el circuito. Asimismo, con los electrodos MN se mide la diferencia de potencial ΔV creada entre ellos. Asignando al electrodo A el polo positivo de la fuente y a B el negativo, el potencial V en el punto donde se encuentra el electrodo de medida de potencial M, será:

$$V \frac{A}{M} = \frac{\rho I}{2\pi} \frac{1}{AM} = \text{Potencial en M debido al electrodo positivo A.}$$

$$V \frac{B}{M} = \frac{\rho I}{2\pi} \frac{1}{BM} = \text{Potencial en M debido al electrodo negativo B.}$$

$$V \frac{A}{N} = \frac{\rho I}{2\pi} \frac{1}{AN} = \text{Potencial en N debido al electrodo positivo A.}$$

$$V \frac{B}{N} = \frac{\rho I}{2\pi} \frac{1}{BN} = \text{Potencial en N debido al electrodo negativo B.}$$

$$V \frac{AB}{M} = \frac{\rho I}{2\pi} \left[\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right] = \text{Potencial total en M debido a A y B.}$$

$$V \frac{AB}{N} = \frac{\rho I}{2\pi} \left[\frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right] = \text{Potencial total en N debido a A y B.}$$

y por lo tanto la diferencia neta de potencial es:

$$\Delta V \frac{AB}{MN} = \frac{\rho I}{2\pi} \left[\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right] \quad (13)$$

es decir, la resistividad puede expresarse como:

$$\rho = \frac{2\pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN}} \frac{\Delta V}{I} \quad (14)$$

La ecuación (14) es fundamental en la prospección eléctrica de corriente continua.

donde:

$$\frac{2\pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN}}$$

es llamado factor geométrico, el cual, como su nombre lo indica, depende únicamente de la geometría del dispositivo electródico y sus dimensiones son de longitud. Por lo tanto se tiene la expresión más simple:

$$\rho = K \frac{\Delta V}{I} \quad (15)$$

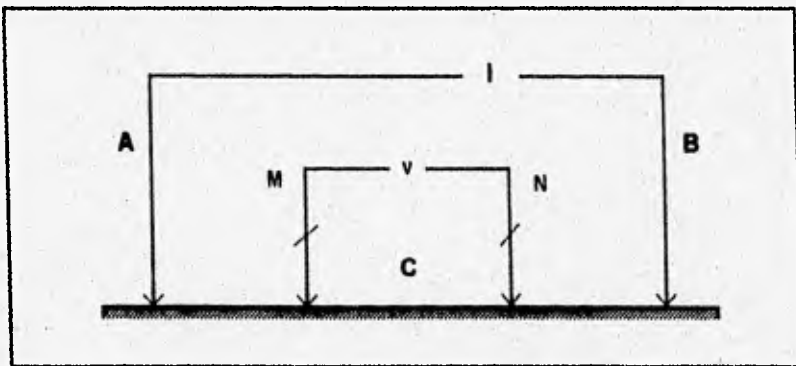


Figura 13 Dispositivo tetraelectródico general.

3.10. Resistividad Aparente

El valor de resistividad que se obtiene por medio de la ecuación (16) para un medio homogéneo, será diferente en un medio heterogéneo, aún utilizando el mismo dispositivo. Sin embargo, aplicando dicha ecuación se obtiene un cierto valor de ρ , denominado "resistividad aparente", que se representa por ρ_a .

La resistividad aparente puede ser definida como resistividad obtenida para un medio no homogéneo y anisótropo mediante un arreglo eléctrico determinado, asumiendo que se trata de la resistividad (real) medida con el mismo arreglo para un medio homogéneo e isotrópico (CFE, 1994). Está dada por:

$$\rho_a = K \frac{\Delta V}{I} \quad (16)$$

donde el factor geométrico del arreglo es función de las distancias entre los electrodos involucrados.

La resistividad aparente expresa los resultados de las observaciones en la mayoría de los métodos geoelectrónicos y se toma como base para la interpretación. Este parámetro no es un concepto tan evidente ya que resulta de medir un medio heterogéneo y anisotrópico empleando un determinado arreglo eléctrico con una separación de electrodos específica. Eso significa que la resistividad aparente en la generalidad de los casos no refleja por sí misma la resistividad real de algunos materiales del subsuelo, ni representa un valor promediado del conjunto de ellos. La resistividad aparente, como la verdadera, tiene las dimensiones de una resistencia multiplicada por una longitud; la unidad más ampliamente usada es el Ω -m. La curva que se obtiene con las resistividades aparentes es interpretada en términos de los parámetros que definen el modelo usado para la interpretación.

3.11. Dispositivos Electrónicos

Existen numerosos dispositivos o arreglos electrónicos (Orellana, 1972). Entre los principales se encuentran el Wenner, el Schlumberger y variantes de éstos, como el medio Schlumberger (de tres electrodos), el Wenner de tres electrodos y los dispositivos dipolares.

Para el dispositivo Wenner, los electrodos A , M , N y B se colocan en la superficie del terreno colinealmente (Figura 14), de tal manera que las distancias interelectrónicas son iguales, es decir $AM = MN = NB = a$. En este arreglo el valor de la resistividad aparente, de acuerdo con la ecuación general (16), se reduce a:

$$\rho_a = 2\pi a \frac{\Delta V}{I} \quad (17)$$

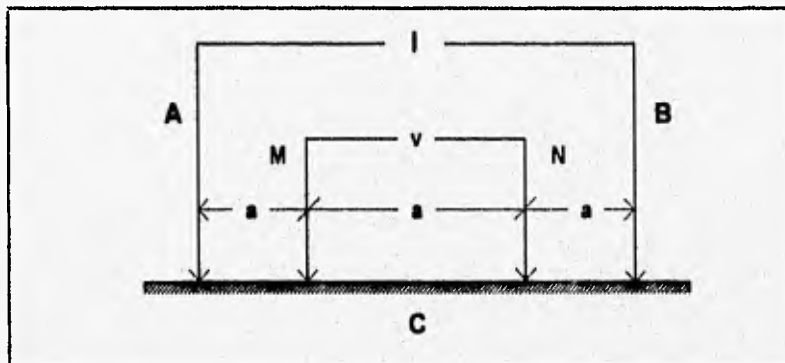


Figura 14 Dispositivo Wenner

El dispositivo Schlumberger de 4 electrodos utiliza, a diferencia del Wenner, la distancia AB igual o mayor a 5 veces la distancia MN (Figura 15).

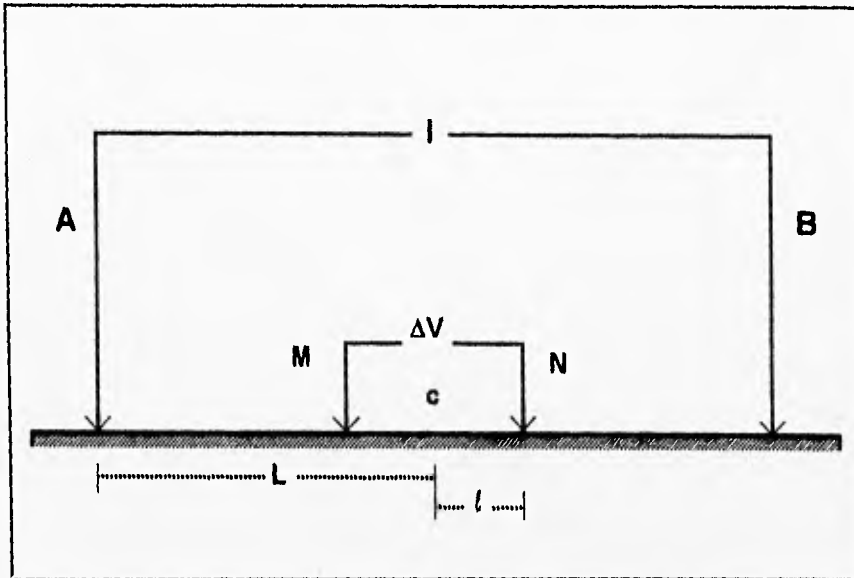


Figura 15 Dispositivo Schlumberger

En la configuración Schlumberger la constante K del dispositivo, de acuerdo a la ecuación (17), tiene un valor de:

$$K = \left[\frac{(L^2 - l^2)}{4l} \right] \quad (18)$$

De donde se obtiene, de acuerdo con la ecuación general, la siguiente relación para calcular la resistividad aparente:

$$\rho_a = \pi \frac{(L^2 - l^2)}{2l} \cdot \frac{\Delta V}{I} \quad (19)$$

El dispositivo Schlumberger es un dispositivo "límite" que presenta grandes ventajas teóricas, las cuales pueden llevarse a la práctica con suficiente aproximación. La idea de este dispositivo es hacer que la distancia l , semidistancia entre M y N , tienda a cero. Reagrupando la ecuación (19) se tiene:

$$\rho_a = \pi (L^2 - l^2) \cdot \frac{\Delta V}{2l I} \quad (20)$$

donde el segundo miembro no tiende a infinito (prácticamente) y, por lo tanto, ΔV decrece al mismo tiempo que ℓ . Entonces se tiene que:

$$\rho_a = \lim_{\ell \rightarrow 0} \pi (L^2 - \ell^2) \frac{\Delta V}{2\ell I} = \frac{\pi L^2}{2\ell} \lim_{\ell \rightarrow 0} \frac{\Delta V}{I} \quad (21)$$

$$\therefore \rho_a = \pi L^2 \cdot \frac{E}{2\ell} \quad (22)$$

ya que el límite de $\Delta V / I$ cuando $\ell \rightarrow 0$ es el gradiente del potencial, o sea el campo eléctrico E .

La idea de Schlumberger consiste en utilizar una distancia $MN = 2\ell$ muy corta, de tal modo que pueda tomarse como válida la ecuación (22). En los desarrollos teóricos se establece que lo que se mide realmente es el campo E , lo cual en la práctica se toma igual a $\Delta V / I$. Es decir, que si bien en la teoría matemática se emplea la ecuación (22), en las observaciones de campo la expresión que se utiliza realmente es:

$$\rho_a = \pi L^2 \cdot \frac{\Delta V}{2\ell I} \quad (23)$$

El error que se comete al emplear esta ecuación es sólo el que proviene de despreciar el término ℓ^2 de la ecuación (20), y este error es muy pequeño. En las mediciones de campo suele tomarse la norma de que $MN \leq AB/5$, como $MN = 2\ell$ y $2L = AB$, el error relativo es de un 4 %.

Los dispositivos dipolares constituyen una familia importante de arreglos electródicos, en la cual la separación entre los electrodos de corriente A y B (dipolo de corriente) es muy pequeña en relación con las distancias a las que se miden sus efectos.

En estos dispositivos se emplean 2 dipolos, uno de emisión (AB) y otro de recepción (MN), cuya posición relativa puede guardar diversas situaciones geométricas. Dependiendo de éstas, el arreglo recibe un determinado nombre, siendo los más usuales: el paralelo, en el cual, como su nombre lo indica, los dipolos son paralelos entre sí;

perpendicular, cuando los dipolos forman un ángulo recto; radial, cuando el dispositivo de recepción se encuentra sobre la recta que une los centros de ambos dipolos; azimutal, en el caso de que el dipolo MN sea perpendicular a la recta que une los centros de ambos dipolos (Figura 16).

Desde el punto de vista práctico existen dos variantes o casos particulares de los anteriores: el dispositivo ecuatorial, que es al mismo tiempo paralelo y azimutal, ya que ambos dipolos son paralelos entre sí y perpendiculares a la recta que une sus centros; el dispositivo Eltrán, también llamado polar o axial, que es simultáneamente paralelo y colineal (Figura 16).

CONFIGURACIONES DEL ARREGLO DIPOLO - DIPOLO

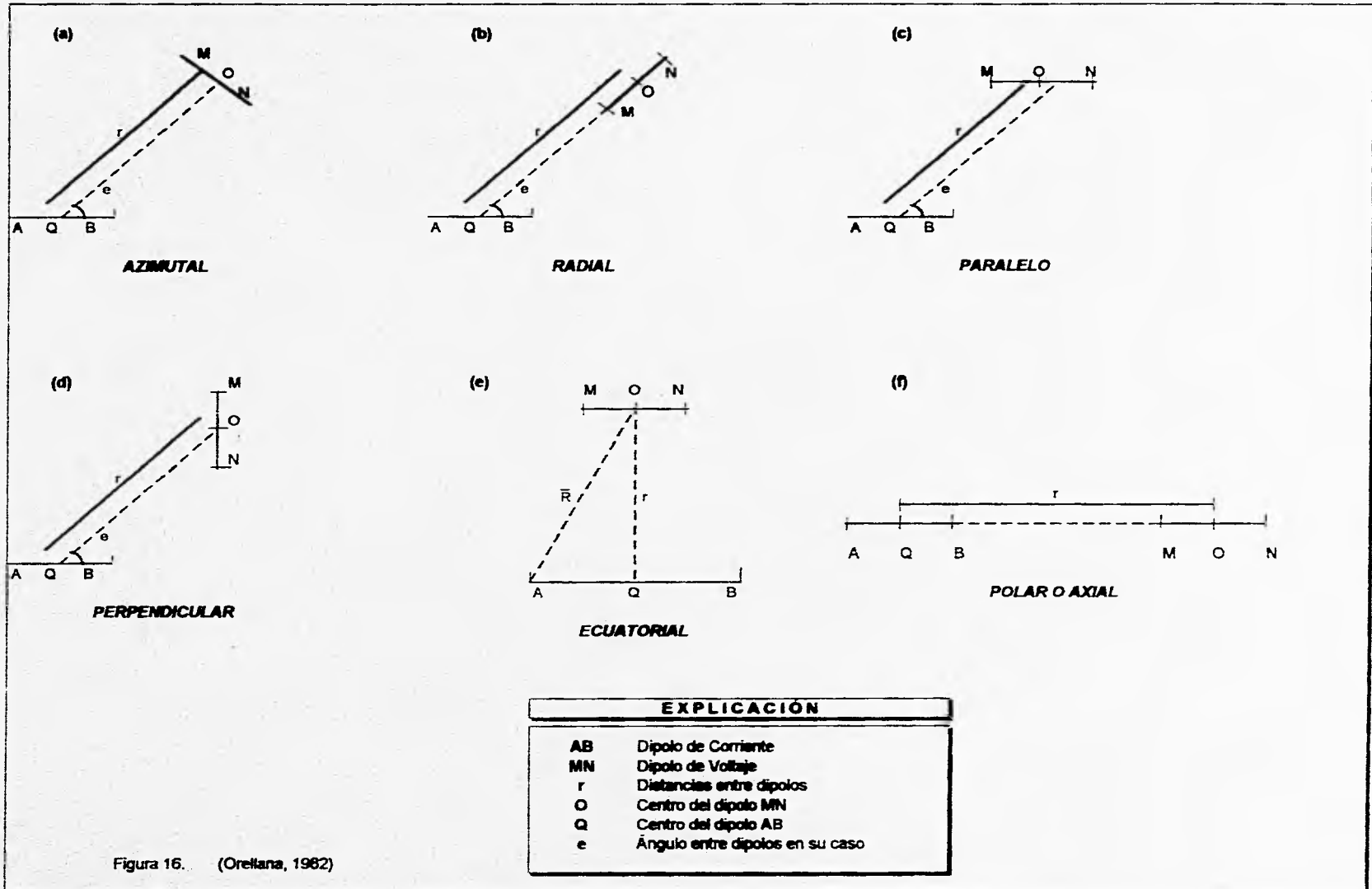


Figura 16. (Orellana, 1982)

Para un estudio eléctrico que utilice dispositivos dipolares, es necesario contar con un generador de gran capacidad para proporcionar una elevada intensidad de corriente, debido a la distancia a la que queda instalado el dipolo de recepción. Generalmente la interpolación de los datos obtenidos con estos dispositivos requiere de un tratamiento especial que involucra un amplio conocimiento de la respuesta del terreno a los dispositivos dipolares; sin embargo, algunos dispositivos como el ecuatorial, pueden ser tratados en forma similar a la usual con el dispositivo Schulmberger, e incluso es factible el uso de las mismas curvas maestras (Orellana, 1972).

3.12. Penetración de Corriente

Se llama profundidad de penetración de corriente de un SEV a la mayor profundidad sobre la que se obtiene información. Se ha demostrado (Orellana, 1972) que, para un terreno homogéneo, la fracción de la corriente total que queda confinada entre la superficie y un plano horizontal, a la profundidad Z , es: $P = (2/\pi) \operatorname{tg}^{-1}(Z/\ell)$ donde ℓ es la mitad de la distancia entre los electrodos de emisión de corriente.

De lo anterior se deduce que el 50 % de la corriente (I) jamás penetra por debajo de la profundidad $Z = \ell$ y el 70.6 % de I pasa por encima de la profundidad $Z = 2\ell = AB$. De esto resulta evidente que la corriente penetrará más cuanto mayor sea la separación entre los electrodos; sin embargo, debe observarse que no existe una relación directa entre la penetración de la corriente y la distancia entre los electrodos.

Ahora bien, para un medio heterogéneo este concepto se torna complejo ya que depende de la distribución de resistividad en el subsuelo, y en algunas áreas se presentan estratos de elevada conductividad o de alta resistividad superficial que impiden el paso de la corriente por debajo de ellos; entonces, por grande que sea la distancia AB , la corriente no podrá superar la profundidad de la base de dichos estratos.

Lo más práctico en cuanto a la determinación de la profundidad de exploración deseada respecto al espaciamiento *AB*, es la ejecución de SEV de prueba en el área por estudiar.

3.13. Corrientes Perturbadoras y Polarización de Electrodo

A través del dipolo *MN* denominado de recepción, no se mide solamente la diferencia de potencial debida al campo creado por la corriente introducida por medio de los electrodos *AB*, que es la señal que se desea medir, sino también otras que pueden ser naturales (efectos de polarización y corrientes telúricas) o artificiales (instalaciones industriales, torres de transmisión, ferrocarriles, etc.). Las artificiales tienen carácter local mientras que las naturales se encuentran en toda la superficie terrestre.

El fenómeno de polarización se presenta en los electrodos de recepción y tiene su origen en la reacción química que se produce entre los electrodos metálicos y los electrolitos del subsuelo; en esta forma, su comportamiento es similar al de una pila eléctrica. Si la concentración y la naturaleza de los electrolitos en el terreno fuesen iguales se anularían, pero a causa de sus inhomogeneidades esto no sucede.

La polarización de los electrodos de cobre es menor que la que presentan los electrodos de acero, motivo por el cual son preferibles los primeros. Pero el tipo más recomendable son los electrodos impolarizables, que constan de un vaso o vasija porosa llena parcialmente con una solución de sulfato de cobre en la cual permanece sumergida una varilla de cobre. Este tipo de electrodos son ampliamente utilizados en exploraciones de Potencial Natural.

3.14. Conductancia Longitudinal y Resistencia Transversal

A menudo, la resistividad de las rocas, independientemente de los factores que afectan esta propiedad física, depende de la dirección en la que se introduce la corriente a través de ella (Arellano, 1980). El efecto de anisotropía de las rocas estratificadas es posible apreciarlo teóricamente si se examina la resistencia eléctrica total de una columna unitaria formada por diferentes capas de espesor h_i y resistividad ρ_i (Figura 17). Si la corriente fluye en dirección perpendicular a la estratificación, la resistencia total es la "resistencia transversal unitaria" y se expresa matemáticamente como:

$$T = \sum_{i=1}^n \rho_i h_i \quad (24)$$

Las dimensiones de T son las de la resistividad por la longitud, y sus unidades son ohms metro cuadrado.

Por otro lado, si la corriente fluye paralela al plano de estratificación entonces la resistividad total es la "resistividad longitudinal unitaria" o su inverso la "conductancia longitudinal", que se expresa como:

$$S = \sum_{i=1}^n \frac{h_i}{\rho_i} \quad (25)$$

Las dimensiones S son las de la conductancia, que se mide en mhos.

Como puede observarse de la ecuaciones (24) y (25), tanto T como S son el resultado de la suma de las propiedades de cada capa y a ellos Maillet les dio el nombre de parámetros de Dar Zarrouk (Orellana, 1972). En sus trabajos, Maillet demostró que cada curva de SEV no refleja en general el efecto independiente de espesores y de resistividades; son los productos y cocientes del espesor y resistividad de cada capa. Los parámetros mencionados representan un papel importante en la teoría de la interpretación de sondeos geoeléctricos.

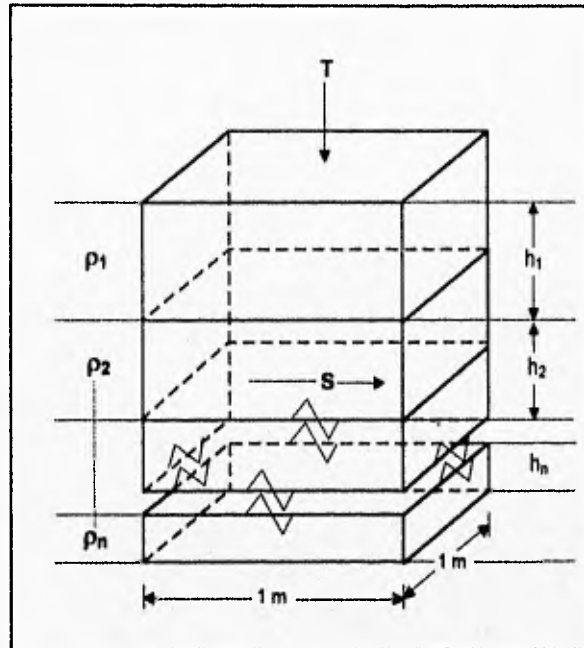


Figura 17 Definición de los parámetros de Dar Zarrouk.

3.15. **Aplicaciones y Limitaciones del Método**

Entre las aplicaciones más comunes del método eléctrico de resistividad (SEV) se tienen las exploraciones de aguas subterráneas, los estudios de ingeniería civil, las investigaciones de profundidad somera para localizar objetos y edificaciones enterradas como guía para la arqueología, los efectos de contaminación en acuíferos, así como la prospección geotérmica. En lo que fuera la Unión Soviética ha sido muy utilizado para estudios estructurales de investigaciones petroleras, lo cual en occidente es poco conocido.

Las principales ventajas del método son su flexibilidad, que lo hace adaptable a problemas y condiciones muy diversas, y su capacidad de alcanzar profundidades grandes y someras.

Para la debida aplicación del método eléctrico de SEV las formaciones o estratos que se deseen estudiar deben presentar un contraste en su resistividad que haga posible su diferenciación eléctrica; además, ésta técnica tiene mejor resolución en superficies donde el terreno es relativamente plano, condición que es menos estricta para los SEV con espaciamentos AB grandes (SEV profundos).

Se debe tener en cuenta que para la correcta aplicación del método los tendidos electródicos deben orientarse en la dirección donde las formaciones geológicas presenten mayor homogeneidad lateral, por lo cual hay que tener especial cuidado en la localización del punto de atribución de cada SEV.

En ocasiones no es posible cumplir algunas de las situaciones consideradas anteriormente y entonces la interpretación se torna difícil; por lo tanto ésta deberá ser ejecutada por personas con experiencia en la aplicación del método para que tomen en cuenta todos los factores de sitio y puedan discriminar los ruidos o efectos indeseables que en ocasiones se presentan en un estudio de SEV.

4. INTERPRETACIÓN GEOFÍSICA

4.1. Desarrollo del Trabajo de Campo

El trabajo de campo es sin lugar a dudas la parte más importante de las etapas del proceso de una exploración geofísica, porque de una adecuada obtención de datos se pueden desprender interpretaciones buenas, regulares o deficientes que dependerían fundamentalmente de los conocimientos y experiencia del intérprete, así como de los programas de cómputo y de los datos geológicos con que cuenta, pero sería prácticamente imposible obtener una interpretación acertada a partir de un conjunto de datos deficientes.

Durante el trabajo de campo de un SEV con el arreglo tetraelectródico Schlumberger, modalidad que fue utilizada en el estudio geoeléctrico del área circundante a la CT Petacalco, Gro., se van efectuando lecturas de la diferencia de potencial ΔV y de la corriente I , para una separación de electrodos AB , sucesivamente creciente, se calcula la resistividad aparente para cada una de ellas, se anotan estos datos en una hoja de campo (Figura 18). A medida que se aumenta la distancia AB , el valor de ΔV disminuye; cuando éste se hace demasiado pequeño debe cambiarse la distancia MN por otra mayor; esta operación se denomina "empalme" (Figura 19) y se realiza de modo que las dos últimas lecturas con la distancia MN menor, se repitan para la nueva distancia MN y las mismas distancias AB .

La configuración Schlumberger presenta algunas ventajas sobre otros dispositivos electródicos, especialmente sobre el arreglo Wenner, que fundamentalmente consisten en la mejor calidad de las curvas de resistividad aparente, así como mayor simplicidad y economía para las operaciones de campo.

COMISION FEDERAL DE ELECTRICIDAD
SONDEO ELECTRICO SCHLUMBERGER

CAMPO PETACHILCO
 LINEA #1
 SONDEO 10

COTA S.N.M. 0+600
 UBICACION _____
 OBSERVACIONES _____

FECHA OCTUBRE/93
 OPERADOR Hugo R.M.

MATERIAL ARCILLOSO MUY HUMEDO
(ESTERO)

| LARGO | CORTO | K CONSTANTE | I | | Δ V | | ρ Resistividad | OBSERVACIONES |
|-------|-------|----------------|-----------|-----------|-----------|--------------|-------------------|---------------|
| | | | Constante | Potencial | Potencial | Resistividad | | |
| 1.28 | 0.25 | 9.5 | 4448 | 2030 | | | 4.38 | |
| 1.96 | 0.25 | 15.2 | 4888 | 930 | | | 3.68 | |
| 2 | 0.25 | 24.7 | 3888 | 469 | | | 2.92 | |
| 2.51 | 0.25 | 38.18 | 5838 | 325 | | | 2.29 | |
| 3.16 | 0.25 | 62.3 | 5830 | 166 | | | 1.75 | |
| 3.96 | 0.25 | 88.18 | 5060 | 86.7 | | | 1.69 | |
| | 1 | 23.31 | 4490 | 353 | | | 1.66 | |
| 5.01 | 0.25 | 157.32 | 3830 | 40.4 | | | 1.66 | |
| | 1 | 37.88 | 3370 | 151 | | | 1.51 | |
| 6.31 | 1 | 60.87 | 4670 | 120 | | | 1.56 | |
| 7.94 | 1 | 97.68 | 3610 | 65 | | | 1.30 | |
| 10 | 1 | 155.51 | 3390 | 45.3 | | | 1.53 | |
| 12.6 | 1 | 247.81 | 5090 | 38.8 | | | 1.80 | |
| | 2.5 | 85.82 | 5140 | 100 | | | 1.86 | |
| 15.8 | 1 | 390.98 | 2460 | 14 | | | 1.84 | |
| | 2.5 | 152.93 | 2950 | 37.3 | | | 1.93 | |
| 20 | 2.5 | 247.4 | 3760 | 28 | | | 1.89 | |
| 25.1 | 2.5 | 381.92 | 4890 | 21 | | | 1.69 | |
| 31.6 | 2.5 | 623.48 | 2590 | 6.48 | | | 1.54 | |
| 39.8 | 2.5 | 991.35 | 2700 | 3.84 | | | 1.40 | |
| 50.1 | 2.5 | 1573.16 | 2700 | 2.31 | | | 1.34 | |
| | 10 | 378.58 | 2810 | 9.9 | | | 1.33 | |
| 63.1 | 2.5 | 2497.79 | 960 | .545 | | | 1.41 | |
| | 10 | 609.72 | 934 | 2.14 | | | 1.32 | |
| 79.4 | 10 | 974.58 | 1436 | 1.98 | | | 1.34 | |
| 100 | 10 | 1555.01 | 994 | .906 | | | 1.41 | |
| 126 | 10 | 2478.09 | 882 | .524 | | | 1.42 | |
| 158 | 10 | 3885.63 | 2340 | .757 | | | 1.40 | |
| 200 | 10 | 6267.48 | 2080 | .533 | | | 1.33 | |
| | 25 | 2474 | 2080 | 1.44 | | | 1.41 | |
| 251 | 10 | 9880.47 | 2320 | .423 | | | 1.80 | |
| | 25 | 3819.2 | 2310 | 1.06 | | | 1.39 | |
| 316 | 25 | 6234.87 | 2510 | .803 | | | 2.00 | |
| 396 | 25 | 9813.55 | 716 | .151 | | | 2.04 | |
| 501 | 25 | 15713.99 | XXXX | XXXXXX | XXXXXX | | | |
| 631 | 25 | 24877.92 | | | | | | |
| | 100 | 6887.22 | | | | | | |
| 794 | 25 | 38872.19 | | | | | | |
| | 100 | 9765.79 | | | | | | |
| 1000 | 100 | 15550.86 | | | | | | |

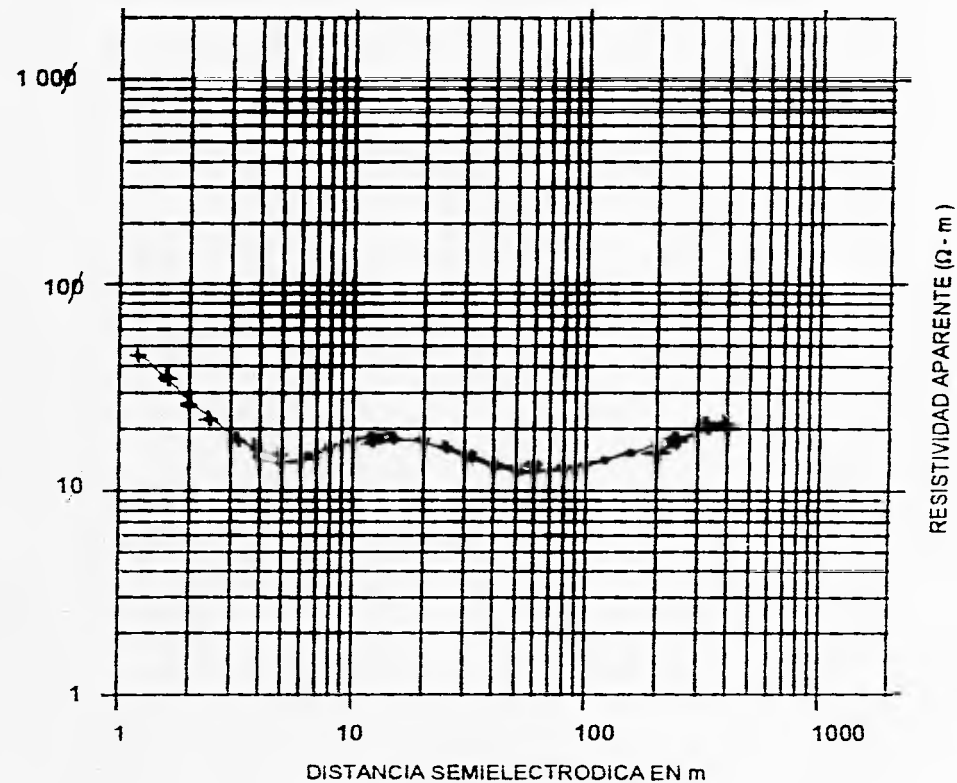


Figura 18

Sondeo eléctrico

C. F. E.

campo PETACALCO, GRO cota s.n.m. 0 +600 fecha OCTUBRE/93
línea 1 ubicación _____ operador H. RODRIGUEZ
número 10 observaciones MATERIAL ARCILLOSO MUY HUMEDO
(ESTERCO)

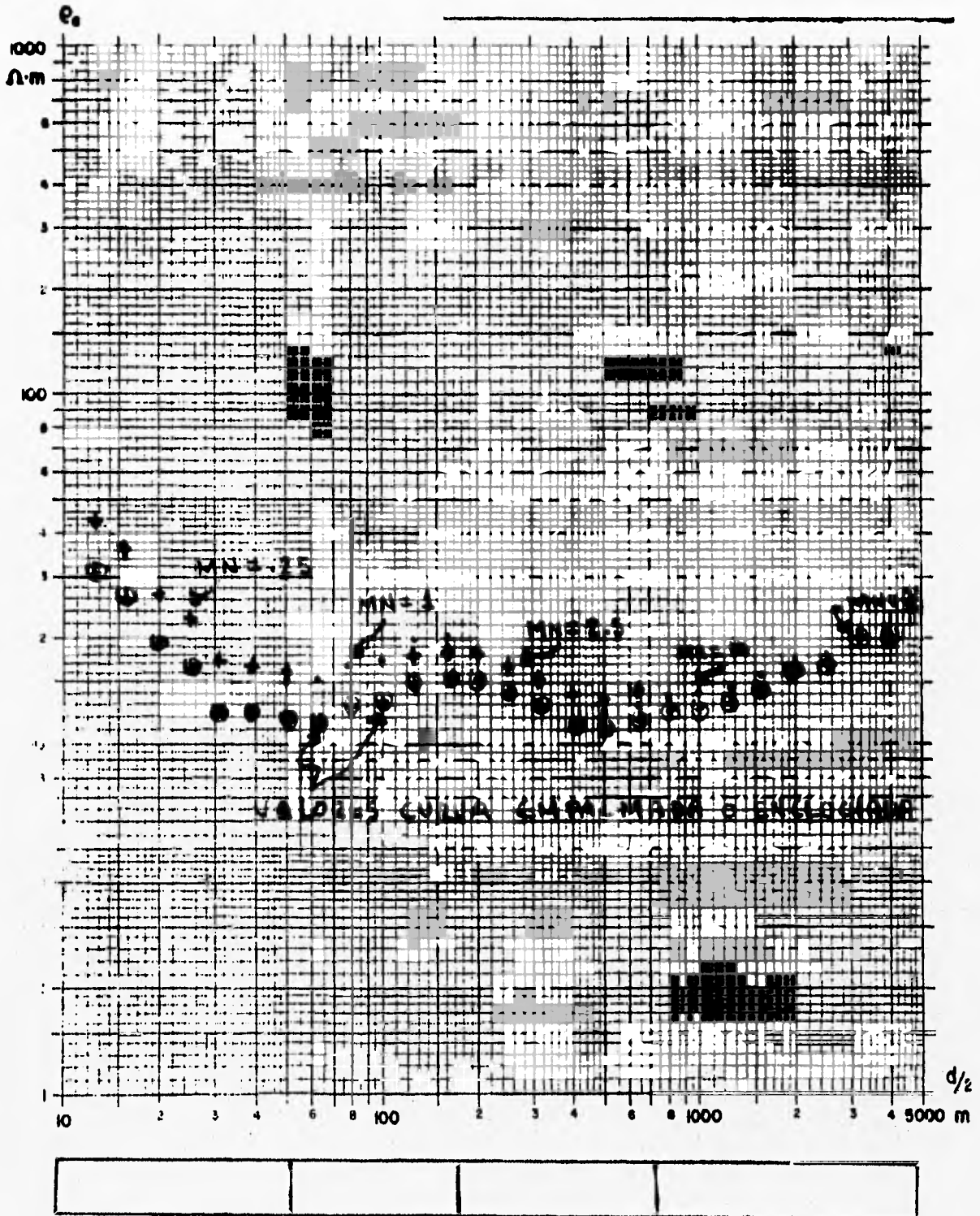


FIGURA 19

El equipo marca Scintrex que se utilizó para efectuar el trabajo de campo consta de una parte emisora y otra receptora. La primera está formada por: fuente de poder de 3.5 KW con motor de gasolina y generador de alta frecuencia, transmisor de corriente modelo TSQ-3, para 3000 W, de onda cuadrada en el dominio del tiempo; dos carretes grandes con 500 m de cable cada uno y 4 electrodos de varilla de acero de 1 y 2 m de longitud. La segunda la constituyen: receptor de potencial modelo IPR-10; dos carretes chicos con 100 m de cable cada uno, 4 electrodos impolarizables y 4 electrodos de varilla de cobre de 2 m de longitud.

Otros implementos que fue necesario emplear fueron: hojas de campo para apuntar datos y graficar la resistividad aparente, radios, calculadora, cinta métrica, sulfato de cobre, marros, enseres de menor importancia y un vehículo para el transporte del personal y del equipo.

El personal que intervino en el trabajo de campo estuvo formado por seis elementos: un ingeniero, un operador y cuatro ayudantes.

La secuencia para la obtención de los datos de campo comenzaba con el traslado del equipo al sitio donde se iba a efectuar cada SEV; el punto de atribución era ubicado mediante las estacas marcadas previamente por topografía, aunque en ocasiones se hacían SEV en lugares donde no existía control topográfico y en esos casos se dejaba una marca para que posteriormente fuera levantada con topografía. Ya localizado el punto, se introducía en el suelo una varilla a la cual se se ataban los cables de emisión de corriente para desenrollarlos de sus carretes a lo largo de una misma línea, desde el punto de atribución hasta la distancia $AB/2$ programada, que estaba marcada sobre el cable con cintas de colores. Mientras tanto el ingeniero, el operador y los otros ayudantes colocaban los electrodos de recepción, también llamados de potencial, a las distancias preestablecidas y efectuaban las conexiones necesarias en los circuitos de emisión y recepción; una vez que finalizaban estas actividades se procedía a la obtención de los datos para cada $AB/2$ programado, que en este caso eran 10 lecturas por ciclo logarítmico, de acuerdo con las

siguientes operaciones:

1. Se comunica por radio con el personal encargado de los carretes para avisarles que se va introducir corriente al terreno y tomen las precauciones necesarias para evitar algún accidente.
2. Se ponen en funcionamiento la fuente de poder, el transmisor y el receptor.
3. Se verifica que los electrodos de corriente estén debidamente conectados, mediante el medidor de resistencia de contacto en el transmisor.
4. Se elimina el potencial espontáneo, mediante el receptor.
5. Se envían al terreno pulsos de corriente continua de 2 segundos, la cual es leída en el "display" digital del transmisor.
6. Simultáneamente se mide la diferencia de potencial producido, el cual es leído en el display digital del receptor.
7. Se interrumpe la transmisión de corriente eléctrica.
8. Se calcula la resistividad aparente; se anota y grafica este dato en la hoja de campo.
9. Si hay empalme o traslape se hace el cambio de la distancia interelectródica MN y se repiten los pasos 4 a 7.
10. Se indica al personal encargado de los carretes el cambio a la siguiente posición electródica (AB/2) del SEV.

Al llegar a la marca del cable se efectuaban nuevamente los diez pasos mencionados, y así sucesivamente hasta terminar el SEV.

Los problemas que con más frecuencia inducen a cometer errores en la toma de datos pueden ser corregidos en su mayoría si el personal que realiza el trabajo de campo tiene suficiente experiencia. De esta forma pueden evitarse errores al realizar el cálculo o la graficación de la resistividad aparente, omisión de alguna marca de $AB/2$, fugas de corriente o tener alta resistencia en el contacto terreno-electrodos. Además, el personal experimentado realiza ciertas anotaciones que deberán de tomarse en cuenta a la hora de interpretar, como podría ser el caso de contactos geológicos laterales, ríos o arroyos, rasgos topográficos, mal tiempo y líneas de alta tensión.

El trabajo de campo se llevó a cabo en tres etapas. La primera se realizó en la parte poniente de la CT Presidente Plutarco Elías Calles y consistió de 39 sondeos eléctricos verticales (SEV) tipo Schlumberger, distribuidos sobre tres líneas (plano 2). La segunda se efectuó en el área delimitada por la central, el canal de descarga y el Océano Pacífico, con 10 líneas perpendiculares a la línea de costa en las cuales se obtuvieron 105 SEV (plano 3). La tercera se llevó a cabo en la Isla Cayacal donde 32 SEV se ubicaron a lo largo de cinco líneas (plano 4). Dichos SEV tuvieron aberturas interelectrónicas $AB/2$ máximas de 200 a 500 m.

La localización definitiva de las líneas geoelectricas en la primera y la segunda etapa fue problemática ya que los ejidatarios del lugar impidieron el acceso en algunas zonas, causando retrasos en el trabajo de campo de incluso varios días; éste es un ejemplo de los problemas de índole social que la actividad geofísica debe enfrentar en ocasiones. En la tercera etapa no se tuvieron contratiempos para ubicar las líneas que se habían programado.

Los SEV se llevaron a cabo sobre una topografía llana con pendiente muy suave y pequeñas ondulaciones, donde afloran depósitos de granulometrías erráticas y

variables que van desde limos a conglomerados, con elásticas máximas de 20 cm de diámetro, comportamiento originado por las variaciones en las condiciones de transporte de los sedimentos del río Balsas ocasionadas por los cambios de marea y por las obras hidráulicas (Presa José María Morelos y Pavón) construidas aguas arriba que han modificado los procesos fluviales del estuario, presentándose en ocasiones zonas pantanosas en las cercanías con el mar. En las islas se observan gravas y arenas en los niveles naturales del río, y arenas finas en las llanuras de inundación.

La interpretación es otra fase importante en un estudio geofísico, lo cual depende fundamentalmente de la calidad de los datos de campo, del "software" empleado y de la experiencia del ingeniero geofísico que interpreta. Resulta lógico que cuando existe una buena combinación de estos factores el estudio geofísico cumplirá sus objetivos y complementará los otros tipos de estudio que son necesarios en la realización de los trabajos de exploración preliminar. Para ello el geofísico responsable del proyecto debe dominar la teoría de los métodos empleados y el uso de los paquetes de computación que se utilizan en la reducción, la configuración y la inversión de los datos, además de estar familiarizada con proyectos similares y manejar información de otras disciplinas para integrar y presentar de manera adecuada los resultados. Hasta hace algunos años, la integración de los datos geofísicos con otras ramas de estudio en la CFE era una fase que no brindaba los resultados que se esperaban; sin embargo a la fecha se ha subsanado en gran parte esta situación, ya que los directivos se preocuparon porque los trabajos de exploración se integraran oportuna y debidamente para obtener una mejor calidad en los resultados finales.

4.2. Interpretación Cualitativa

El objeto de la interpretación cualitativa es visualizar de una manera preliminar las características de las condiciones del subsuelo a partir de la distribución de la resistividad operante y de la información geológica disponible. En esta fase interpretativa

se efectuaron correlaciones sin tomar en cuenta profundidades o resistividades absolutas; sólo se relacionaron las características peculiares de cada SEV con la geología del área e incluyó un análisis comparativo entre las curvas de campo así como la construcción, con los valores de resistividad aparente ya corregidos por empalme de perfiles y/o planos de isoresistividad aparente los cuales proporcionan una idea de la distribución de los materiales en el subsuelo. Los primeros, también llamados seudosecciones, se construyeron a escala lineal, ubicando los datos de resistividad aparente, bajo cada SEV a una profundidad igual a la abertura interelectrónica $AB/2$.

4.3. Interpretación Cuantitativa

Las curvas de los sondeos eléctricos verticales fueron además interpretadas en forma cuantitativa (inversión de los datos) para determinar las profundidades, los espesores y las resistividades (modelos geoelectricos) para cada una de las etapas del estudio:

PRIMERA ETAPA .- 39 SEV en la zona poniente de la CT Presidente Plutarco Elías Calles.

SEGUNDA ETAPA.- 105 SEV en el área comprendida entre la central termoeléctrica, el canal de descarga y el Océano Pacífico.

TERCERA ETAPA.- 32 SEV en el lugar conocido como Isla Cayacal.

El procedimiento utilizado para la interpretación de los datos fue primeramente la superposición de las curvas de campo, ya reducidas o "empalmadas" (Figura 19), con las curvas de la colección de Orellana y Mooney (1966) y en las editadas por la Asociación Europea de Geofísicos de Exploración (1975), a fin de determinar un modelo inicial para cada SEV, siguiendo la técnica del punto auxiliar, que se basa en la substitución sucesiva de las dos capas más someras por una geoelectricamente equivalente, cuando el modelo de resistividad corresponda a un número de capas mayor que el del

modelo de los ábacos utilizados. Posteriormente, se aplicó el programa de cómputo "Resix-Plus" de la compañía Interpex el cual, a partir de un modelo inicial de resistividad y las muestras de la curva de campo corregida de cada SEV, determina por iteraciones un modelo de resistividad cuya curva teórica calculada es una de las que mejor se ajusta a los datos observados en campo (Figura 20).

Por último, se vacían los datos de resistividad real y espesor bajo cada punto de atribución de los SEV en las secciones correspondientes, donde se correlacionan las capas u horizontes según las magnitudes de las resistividades, de las profundidades, de los espesores y de su posición relativa dentro de la secuencia, para delinear y agrupar las capas en unidades geoeléctricas.

4.4. Unidades Geoeléctricas

4.4.1 PRIMERA ETAPA

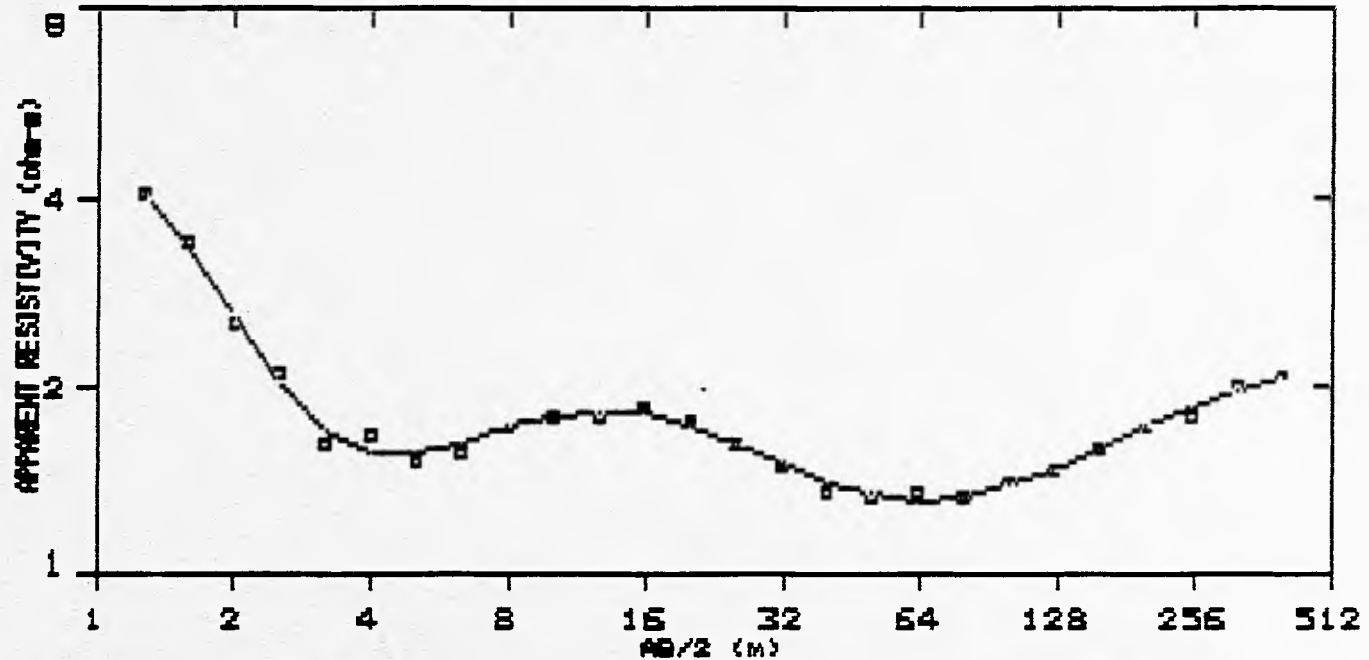
Con los datos de la primera etapa se construyeron tres secciones de resistividad (Plano 2) localizadas hacia el N-NW de la planta como se muestra en la figura 4. En ellas, si se atiende a los valores de la resistividad, se observa que el subsuelo está formado por cinco unidades geoeléctricas, denominadas UA, UB, UC, UD y UE, además de otras dos que fueron nombradas como UB' y UC'.

Las características sintetizadas de resistividad y espesor de cada una estas unidades, interpretadas en las tres secciones, se consignan en la Tabla 4-1.

PETACA10

% ERROR:

2.6695



P > REPLOT F > FORWARD CALC. I > INVERSE ITER Q > EXIT
+ > ADD LAYER - > DELETE LAYER R > EDIT RESIST. D > EDIT DEPTH

| LAYER #: | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|----------|--------|--------|--------|---------|---------|
| RESIST.: | 6.0153 | 1.1974 | 2.8115 | 1.1614 | 2.4163 |
| DEPTH: | 0.7244 | 3.4319 | 8.5483 | 69.0335 | --INF-- |

FIGURA 20

| CARACTERÍSTICAS DE LAS UNIDADES GEOFÍSICAS PRIMERA ETAPA DE ESTUDIO | | | |
|--|----------------|--------------------------------------|-----------------------------|
| UNIDAD GEOELÉCTRICA | SECCIÓN | RESISTIVIDAD (ohms metro) | ESPESOR (metros) |
| UA | 1-2-3 | 12-260 | 1-10 |
| UB | 1-2-3 | 13-200 | 1-46 |
| UB' | 3 | 1-3.3 | 3-8 |
| UC | 1-2-3 | 5-17 | hasta 165 y no definido |
| UC' | 2-3 | 15-26 | hasta 33 y no definido |
| UD | 1-2-3 | 28-55 | 70-85 y no definido |
| UE | 2-3 | 3-5 | 80-130 y no definido |

Tabla 4.1

La distribución de las unidades geoelectricas en cada una de las secciones que se estudiaron se describe a continuación.

a) Sección 1-1'

Esta sección se formó con los SEV 1 a 13; a lo largo de ella se define una capa superficial (UA) con espesor de 1 a 10 m y resistividad de 8 a 111 Ω -m. Por debajo de ésta, en los SEV 1 y 2 y del 6 al 13, se encontraron valores de 38 a 150 Ω -m (UB) con espesor promedio de 15 m que alcanza un máximo de 46 m en el SEV 12.

Desde el SEV 2 hasta el SEV 13 una capa aparece subyaciendo a las unidades

geoelectricas UA y UB, en la cual se tienen valores de resistividad de 6 a 14 Ω -m (UC) y cuyo espesor máximo determinado es de 65 m en el SEV 6; el espesor de UC no quedó definido entre los SEV 7 y 13.

En el SEV 6 se interpreta una resistividad anormalmente alta bajo la unidad UA y a la cual se le llamó unidad UC', con una resistividad de 21 Ω - m y un grosor de 30 m.

Finalmente, bajo las unidades geoelectricas UB y UC (del SEV 1 al 6) se detectó un horizonte denominado UD, con espesor indefinido y resistividad de 28 a 55 Ω -m.

En esta sección se observa que las unidades geoelectricas UB, UC y UD guardan una disposición aproximadamente paralela y se acuñan hacia la parte NW de la misma.

b) Sección 2-2'

Esta sección se construyó con los SEV 13 a 26; a lo largo de ella aparece superficialmente la unidad geoelectrica UA, con espesor de 1 a 5 m y resistividad que varía de 5 a 260 Ω -m

Por debajo de ésta, en los SEV 13 al 23 y en el SEV 26, se interpreta una unidad con espesor de 1 a 20 m y resistividad de 13 a 160 Ω -m (UB).

Subyaciendo a estas unidades, entre los SEV 13 y 14, 16 y 19, y 21 y 26, se determinó la unidad UC con valores de resistividad de 5 a 13 Ω -m y espesor que alcanza 175 m o más en los SEV 21 y 22.

Subyace a los horizontes geoelectricos UC y UB, en los SEV 14 y 15, una

capa con resistividad de $4 \Omega\text{-m}$ y un espesor máximo determinado de 160 m, características que se están asociando a UE.

Con los SEV 17 y 20 se interpretaron zonas con resistividades de 20 y $26 \Omega\text{-m}$ bajo las unidades UC y UB, respectivamente, con espesor no definido en el primero y de 32 m en el segundo, el cual se acuña hacia ambos lados de la sección. A esta zona se le identifica como UC'.

Por último, en los SEV 22, 23 y 26 de esta sección se encuentra una capa con resistividad de 34 a $44 \Omega\text{-m}$ que se asocia a la unidad UD, cuyo espesor en los dos primeros SEV no pudo definirse y en el tercero es de 32 m.

c) **Sección 3-3'**

La sección 3-3' consta del SEV 27, y del SEV 29 al 39. En toda su extensión se interpretó superficialmente la unidad geoelectrica UA con espesor de 1 a 3 m y resistividad de 1 a $180 \Omega\text{-m}$.

Subyaciendo a la unidad anterior, entre los SEV 39 a 35, se detectó una capa con espesor promedio de 10 m que muestra un máximo de 24 m y valores de resistividad de 22 a $200 \Omega\text{-m}$ correspondientes a la unidad geoelectrica UB. En interfase lateral con ésta, del SEV 34 al 30, se determinaron resistividades de 1 a $3 \Omega\text{-m}$ que son propias de la unidad UB'.

Debajo de las unidades anteriores se identificó la unidad UC a lo largo de toda la sección con resistividad de 5 a $16 \Omega\text{-m}$ y espesor máximo determinado de 150 m (SEV 37), excepto en los SEV 39, 38 y 34 donde se interpretaron en interfase lateral valores de 4.5, 34 y $28 \Omega\text{-m}$ respectivamente, de los cuales el primero ha sido asociado a la unidad UE con un espesor indefinido, y los otros dos a la unidad UD con espesor de 75 a 85 m.

Por último, en los SEV 38, 35 y 34 fueron interpretadas zonas de sustrato (grosor indefinido) con resistividad de 2.8 a 3.6 Ω -m que corresponde a UE; ésta se encuentra en interfase lateral (SEV 37 y SEV 33 a 30) con UC', la cual presenta resistividad de 15 a 20 Ω -m.

4.4.2. SEGUNDA ETAPA

Se determinó que en las secciones interpretadas en esta etapa, cuya localización se muestra en la figura 5, existen capas con intervalos bien definidos de resistividad, mismos que se han clasificado como U1, U2, U3, U2a, U2b y U3a. En las secciones 1 a 10 (planos 3 y 4) se señala su distribución y en la Tabla 4 se sintetizan sus características de resistividad y espesor.

| CARACTERÍSTICAS DE LAS UNIDADES GEOFÍSICAS SEGUNDA ETAPA DE ESTUDIO | | | |
|--|------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|
| UNIDAD GEOELÉCTRICA | SECCIONES | RESISTIVIDAD (ohm metro) | ESPESOR (metros) |
| U1 | 1 a 10 | 10 -90 | Hasta 30 |
| U2 | 1 a 8 y 10 | 0.4 - 0.9 | Hasta 65 |
| U2a | 1 a 9 | 1.5 - 3.0 | Hasta 150 |
| U2b | 1 a 4 y 10 | 4 - 5 | Indefinido |
| U3 | 6, 8 y 9 | 13 - 26 | Hasta 100 |
| U3a | 2 a 9 | 6 - 10 | Indefinido (Sec. 4 de 30 a 50) |

Tabla 4.2

A continuación se describen estas unidades geoeléctricas:

a) **Unidad U1**

Se presenta en todas las secciones y forma la capa superficial, con resistividad variable que va de 10 a 90 Ω -m; se le calcula un espesor promedio de 12 m, aunque tiene un máximo de 30 m en las secciones 2-2', 3-3' y 8-8' (planos 3 y 4).

b) Unidad U2

Se manifiesta aflorando o subyaciendo a la unidad U1 en la porción occidental de las secciones 1 a 8 (planos 3 y 4), con las resistividades más bajas (0.4 - 0.9 Ω -m) del área. El espesor más grande que se le determinó fue de 65 m en el SEV 6 de la sección 1-1' (plano 3).

c) Unidad U2a

Muestra valores de resistividad de 1.5 a 3.0 Ω - m, y un espesor máximo de 150 m en el SEV 81 de la sección 8-8' (plano 4), aunque en parte de las líneas 1-1 y 3-3 (plano 3) su grosor quedó indefinido. Por lo regular se encuentra subyaciendo a U1 y U2 y aparece con predominio sobre otras unidades en todas las secciones a excepción de la línea 9-9 donde se detectó sólo una porción de ella, y de la 10-10 donde no se le encontró.

d) Unidad U2b

Se encuentra en algunas partes de las secciones 1-1', 2-2', 3-3', 4-4', 9-9' y 10-10' (planos 3 y 4) y presenta resistividad del orden de 4 a 5 Ω -m. Su espesor en general es indefinido, a excepción del SEV 95 de la sección 9-9' donde se determinaron 50 m, y aparece bajo U1, U2, U2a y U3a o en interfase lateral con ellas.

e) Unidad U3

Aparece en pequeñas zonas de las líneas 5-5, 6-6, 8-8 y 9-9 (planos 3 y 4) con resistividad de 13 a 26 Ω -m que representa los valores más altos obtenidos en el área de

estudio; en la sección 9-9' es donde se determinó el valor máximo de resistividad. La unidad 3 se encuentra subyaciendo a unidades U1, U2a y U3a o está en interfase con ellas. Su espesor sólo fue definido en la sección 5-5', donde llega a los 100 m.

f) Unidad U3a

Aparece en las secciones 2-2' a 9-9' generalmente a profundidad, por abajo de la U2a, excepto en las líneas 4, 5 y 9 donde se encuentra más somera subyaciendo a las unidades U1 y U2a, U2b y U3, respectivamente, o en interfase con ellas. Presenta resistividad de 6 a 10 Ω -m y su espesor (de 30 a 70 m) fue posible calcularlo solamente en las secciones 4-4' y 9-9'.

Con el objeto de tener una visión en planta de la distribución de las unidades geoelectricas clasificadas, se elaboraron dos (planos 5 y 6) en los que se puede apreciar cómo se distribuyen las unidades geofísicas en el área de estudio a las profundidades de 20 y 40 m, tomando como base la información de resistividad (real) en las 10 secciones estudiadas.

4.4.3. TERCERA ETAPA

Con los datos recopilados en este período de estudio se formaron cinco secciones geoelectricas (Planos 7 y 8): dos paralelas a la disposición de los pozos de la CNA, antes SARH (figura 6), y tres perpendiculares a los pozos 5, 8 y 10.

En ellas se interpreta un subsuelo formado por tres capas o unidades geofísicas, paralelas a la superficie, denominadas U1, U2 y U3, cuyas principales características se describen en la tabla 4.3:

| CARACTERÍSTICAS DE LAS UNIDADES GEOFÍSICAS TERCERA ETAPA DE ESTUDIO | | | |
|--|------------------|-------------------------------------|-----------------------------|
| UNIDAD GEOELÉCTRICA | SECCIONES | RESISTIVIDAD (ohm-metro) | ESPESOR (metros) |
| U1 | 1 a 5 | 120-5170 | 1-10 |
| U2 | 1 a 5 | 53- 270 | 37-90 |
| U3 | 1 a 5 | 7- 49 | indeterminado |

Tabla 4.3

A continuación se describe con mayor detalle cada una de la unidades geofísicas interpretadas.

a) Unidad U1

Se le asocia a la capa más somera, se encuentra en todas las secciones, su resistividad es muy variables (120 a 5170 Ω -m) y su grosor promedio es de 6 m, no obstante que varía de 1 m (sección 2-2') a 10 m (secciones 4-4' y 5-5') en la zona de estudio.

b) Unidad U2

La capa que corresponde en todas las secciones a U2 está subyaciendo a la unidad U1, con resistividad de 53 a 270 Ω -m y espesor de 37 a 90 m.

En las secciones de esta etapa (Planos 7 y 8) se observa cómo la potencia de la unidad U2 decrece en general desde los pozos de la CNA (50-90 m) hasta la orilla del brazo del Río Balsas (37-75 m).

c) **Unidad U3**

Es la capa más profunda detectada en la zona de estudio; se encuentra debajo de la unidad geoelectrica U2, con resistividad que va de 7 a 49 Ω -m.

Constituye la unidad geoelectrica más conductora del área en estudio ya que sus valores de resistividad son más bajos que los de las otras dos unidades interpretadas.

5. INTEGRACIÓN GEOLÓGICO - GEOFÍSICA

Para llevar a cabo la integración geológica-geofísica se recopiló y consideró toda la información disponible del área, proporcionada por resultados previos de perforaciones, así como de exploraciones geológicas y geohidrológicas. Además, se efectuó un análisis integral de los datos para cada una de las secciones estudiadas.

Posteriormente, se correlacionó la información, para asignar una probable litología a todas las unidades geoelectricas interpretadas en las tres etapas de estudio.

En las tablas 5.1, 5.2, y 5.3 se indica la correspondencia entre las unidades geofísicas determinadas y la litología que existe en el área para la primera, segunda y tercera etapa; respectivamente.

5.1. Primera Etapa

| INTEGRACIÓN DE RESULTADOS PRIMERA ETAPA DE ESTUDIO | | |
|---|---|--|
| UNIDAD GEOELÉCTRICA | CORRELACIÓN LITOLÓGICA | CARACTERÍSTICAS GEOHIDROLÓGICAS |
| UA | Suelo y/o material de cobertura de tipo arcilloso | Materiales granulares semipermeables a impermeables |
| UB | Intercalaciones de materiales arenosos, arcillosos y gravas | De acuerdo a la predominancia del material, esta unidad se comportará de semipermeable a permeable |
| UB' | Intercalaciones de materiales arenosos y arcillosos y gravas | Las mismas que para la UB, pero con influencia de salinidad en el agua |
| UC | Materiales arcillosos y arenosos y gravas, con predominio de finos | Semipermeable a impermeable, por la predominancia de finos |
| UC' | Materiales arcillosos y arenosos y gravas, con ligero incremento de éstas respecto a la unidad UC | Semipermeable a permeable, por el incremento de material granular grueso |

| | | |
|----|--|---|
| UD | Materiales arcillosos y arenosos y gravas, con predominio de los gruesos | Permeable, por la predominancia del material granular grueso |
| UE | Materiales arcillosos y arenosos y gravas | Semipermeable a permeable según el predominio de materiales finos o gruesos, con influencia notoria de salinidad en el agua |

Tabla 5.1

De acuerdo con el objetivo planteado en esta etapa de estudio, que es localizar sitios para construir pozos en el área de la planta termoeléctrica (figura 4) propiedad de la CFE, y en áreas aledañas a ella donde no se presenten problemas con ejidatarios del lugar para extraer del subsuelo 20 l/s de agua potable que satisfagan la demanda de las unidades 1 y 2 (CT Presidente Plutarco Elías Calles) y cubran las necesidades de los poblados Petacalco y San Francisco, las unidades geofísicas que presentan mayor interés geohidrológico con fines de aprovechamiento de agua de buena calidad son en orden de importancia UD, UC' y UC (Tabla 5.1).

La unidad UC se considera de menor importancia relativa debido a que está formada por materiales arcillosos y arenosos y gravas en los cuales es mayor la proporción de los finos (5-17 Ω m). Esta situación influye directamente en la reducción de su permeabilidad y por lo tanto se le clasifica como semipermeable a impermeable.

La unidad UC' se presenta más atractiva que la anterior porque se le infiere un ligero aumento en el contenido de materiales granulares gruesos (15-26 Ω m), lo que reflejaría un incremento de su permeabilidad.

La unidad UD es la que tiene mayor importancia dado que debe de estar constituida por materiales granulares predominantemente gruesos (28 - 55 Ω m), lo cual haría de ella un horizonte con permeabilidad más alta que las dos unidades mencionadas.

Por otro lado, las unidades geofísicas UA, UB, UB' no presentan interés para los fines geohidrológicos perseguidos, ya que no se encuentran saturadas. Las dos primeras, cuando tienen predominio de arcillas, son impermeables y provocan la formación de manglares en la superficie; donde contienen materiales granulares gruesos, permiten que se filtre el agua. La unidad UB' muestra influencia de salinidad.

Finalmente, la unidad UE, no obstante encontrarse saturada y por abajo del nivel freático, no es considerada atractiva para la explotación debido a que presenta notoria contaminación salina.

Por lo anterior, se recomendó efectuar la exploración directa en lugares donde se cortaran las unidades UC, UC' y UD, para conocer directamente sus características litológicas y de permeabilidad. Es así que se programaron los pozos 6T, 7T, Petacalco 2 y San Francisco, que corresponden a los sitios donde se ubican los sondeos eléctricos verticales marcados como S-9 y S-2 (Sección 1 - 1'), S-20 (Sección 2 - 2') y S-38 (Sección 3 - 3'), respectivamente (Plano 2).

De las cuatro perforaciones programadas sólo se llevaron a efecto dos, que corresponden a las denominadas 7T (S-2) y Petacalco 2 (S-20), ya que con ellas y la rehabilitación del pozo 2T quedaron cubiertas las necesidades de la planta y los requerimientos de agua potable de los poblados Petacalco y San Francisco.

A continuación se describen los resultados de la perforación (CFE, 1992):

5.1.1. POZO 7T

a) *Localización.-*

Está ubicado dentro del predio de la planta con coordenadas X = 804,734.445, Y = 1'990,892.226 y Z (altura de broca) = 33.869 msnm.

b) *Características Constructivas.-*

| | |
|---|--------------|
| Diámetro (\emptyset) de exploración | 12 ¼" |
| Profundidad de exploración | 80 m |
| Profundidad de ampliación | 80 m |
| Tubería lisa de 10" de \emptyset | de 0 a 24 m |
| Tubería ranurada de 10" de \emptyset | de 24 a 90 m |
| Contra - ademe | de 0 a 6 m |
| Filtro de grava de ½ a ¼ de \emptyset | de 0 a 90 m |

c) *Desarrollo y Pruebas de Aforo.-*

Para concluir con los trabajos que la construcción de un pozo implica, se llevó a cabo el desarrollo, el aforo y la prueba de bombeo bajo un estricto control de las variaciones del nivel dinámico, así como de la conductividad en la columna de agua; los datos así obtenidos son los siguientes:

| | |
|--------------------------------|---------|
| Longitud de columna | 43.80 m |
| Profundidad del nivel estático | 30.20 m |

| ETAPAS | DESARROLLO | AFORO | P. DE BOMBEO |
|------------------|------------|-----------|--------------|
| RPM máx. | 1700 | 1700 | 1600 (cte) |
| N. dinámico | 39.80 | 39.50 m | 38.50 m |
| Abatimiento | 9.60 m | 9.30 m | 8.30 m |
| Gasto | 12.70 l/s | 12.90 l/s | 10.49 l/s |
| Tiempo de bombeo | 12 h | 8 h | 48 h |

El caudal de explotación recomendado es de 12 l/s con un nivel dinámico de 39.45 m, un nivel estático de 30.20 y un abatimiento de 9.25 m.

5.1.2. POZO PETACALCO 2

a) Localización.-

Este pozo se ubica aproximadamente a 1 km al NW del poblado Petacalco, con coordenadas X=804,391.463, Y=1'990,041.178 y Z=6.645 msnm.

b) Características Constructivas.-

| | |
|---------------------------------|----------------|
| Diámetro de exploración | 12 ¼" |
| Profundidad | 50 m |
| Diámetro de ampliación | 17 ½" |
| Tubería lisa de 10" de ø | de 0 a 4.30 m |
| Tubería ranurada de 10" de ø | de 4.30 a 50 m |
| Contra - ademe de 20" de ø | de 0 a 6 m |
| Filtro de grava de ½" a ¼" de ø | de 0 a 50 m |

c) **Desarrollo y Pruebas de Aforo.-**

| | |
|--------------------------------|---------|
| Longitud de columna | 44.95 m |
| Profundidad del nivel estático | 3.05 m |

| ETAPAS | DESARROLLO | AFORO | P. DE BOMBEO |
|------------------|-------------------|--------------|---------------------|
| RPM máx. | 1075 | 1075 | 1000 (cte) |
| N. dinámico | 11.75 m | 11.61 m | 10.58 m |
| Abatimiento | 8.70 m | 8.56 m | 7.53 m |
| Gasto | 9.86 l/s | 9.86 l/s | 8.50 l/s |
| Tiempo de bombeo | 10 h | 10 h | 12 h |

El caudal de explotación recomendado es de 8.31 l/s con un nivel dinámico de 10.53 m y un abatimiento de 7.48 m.

5.2. Segunda Etapa

| INTEGRACIÓN DE RESULTADOS SEGUNDA ETAPA DE ESTUDIOS | | |
|--|---|---|
| UNIDAD GEOELÉCTRICA | CORRELACIÓN LITOLÓGICA | CARACTERÍSTICAS DE SALINIDAD |
| U1 | Depósitos de grava, arena y arcilla | No presenta influencia de salinidad |
| U2 | Materiales granulares finos y gruesos, intercalados | Totalmente contaminada por intrusión salina |
| U2a | Materiales granulares finos y gruesos, intercalados | Contaminada por intrusión salina, en menor grado que en U2 |
| U2b | Materiales granulares finos y gruesos, intercalados | Contaminada por la intrusión salina en menor grado que en U2a |
| U3 | Materiales granulares (arenas y gravas) y arcillas | No presenta influencia de intrusión salina |
| U3a | Materiales granulares (arenas y gravas) y arcillas, con predominio (?) de éstas | Posiblemente afectada por intrusión salina |

Tabla 5.2

En la segunda etapa, el objetivo de los estudios fue determinar el avance de la intrusión salina en la zona comprendida entre la central termoeléctrica, el canal de llamada y el Océano Pacífico (figura 5).

Como se indica en la Tabla 5.2, es en la zona que incluye a U2, U2a y U2b donde se encuentra la contaminación del frente de intrusión.

Con base en la resistividad de estas tres unidades, se realizó una diferenciación relativa en cuanto a su grado de contaminación: U2, con 0.4-0.9 Ω m,

presenta el grado máximo; U2a con 1.5 - 3 Ω m, muestra un menor grado que U2; U2b con 4 - 5 Ω m, guarda la menor proporción de influencia salina.

La variación de las resistividades y por ende del grado de intrusión, está regido principalmente por la distribución de los tipos de materiales que hay en el subsuelo del área de estudio.

La unidad geoelectrica U1 (10 - 90 Ω m), constituida por depósitos de grava arena y arcilla, forma la capa superficial y no presenta influencia de salinidad.

La unidad U3 (13 - 26 Ω m), formada por arenas, gravas y arcillas, no contiene contaminación salina.

La unidad U3a (6 - 10 Ω m), compuesta también por arenas, gravas y arcillas, puede estar afectada por la intrusión salina o tener un mayor contenido de materiales finos.

En los planos 3 y 4 se muestra la distribución en secciones de las unidades geofísicas descritas; estos datos se utilizaron para formar los planos 5 y 6 donde se indica en planta la distribución de ellas a las profundidades de 20 y 40 m. Algo de lo más relevante que se observa en estos planos aparece en la sección 6, en la cual la unidad geoelectrica U3 no está contaminada ya sea por la probable existencia de barreras naturales (arcillas) que impiden el avance de la intrusión salina, o debido a que en esa área exista una recarga artificial que pudo haberse formado cuando se abrió el estero del río mediante un canal, el cual provocaría la recarga del acuífero y la formación de una especie de domo de agua dulce. En la sección 5 también se encuentra esta unidad, a causa de la recarga natural lateral que viene de norte a sur, formando un equilibrio hidrodinámico que marca el límite agua dulce - agua salada.

En el Plano 5 de configuración de la intrusión salina, a 20 m de profundidad se observa que en toda la zona de estudio U2 ha penetrado en forma irregular hacia el

continente con un mayor grado de contaminación, a excepción del área donde se ubican las secciones 9 y 10 y se tiene la presencia de las unidades U2a y U2b, contaminadas en menor grado que U2. Asimismo, en el Plano 9 de configuración, a 40 m de profundidad se observa que la unidad contaminada predominante es la U2a salvo unas zonas de U2b (secciones 9 y 10) y de U2 (secciones 1 a 8), en donde su forma sugiere la posible existencia de paleocanales.

La correlación de las unidades geofísicas con datos de conductividad eléctrica, obtenidos en piezómetros y pozos del área de estudio (CFE, 1993), arrojó los resultados que se consignan en la Tabla 5.2.2.

| CORRELACIÓN DE UNIDADES GEOFÍSICAS Y CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA | |
|---|---|
| UNIDAD GEOFÍSICA | CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA (micromhos / centímetro) |
| U1 | < 1000 |
| U2 | 35000-45000 |
| U2a | 15000-30000 |
| U2b | — |
| U3 | < 1000 |
| U3a | < 3000 |

Tabla 5.2.2

5.3. Tercera Etapa

| INTEGRACIÓN DE RESULTADOS TERCERA ETAPA DE ESTUDIOS | | |
|--|--|--|
| UNIDAD GEOELÉCTRICA | CORRELACIÓN LITOLÓGICA | CARACTERÍSTICAS GEOHIDROLÓGICAS |
| U1 | Suelo, gravas, arenas y cantos rodados . | Permeable |
| U2 | Arenas finas, medias y gruesas; gravas finas a gruesas; cantos rodados, limos y arcillas | Permeable (horizonte productor) |
| U3 | Arcillas, limos y arenas | Impermeable-semipermeable; probable influencia salina |

Tabla 5.3

En esta etapa, el objetivo de los estudios fue determinar, en el área de pozos de la Isla Cayacal (figura 6), el espesor y la continuidad del horizonte productor del cual se extrae agua para cubrir las necesidades de operación de la CT Presidente Plutarco Elías Calles, con el fin de programar la construcción de otros pozos de mayor profundidad (los pozos rehabilitados que fueron construidos por la CNA y que abastecen actualmente a la planta tienen una profundidad máxima de 20 m) que aumenten el caudal de abastecimiento y tengan un diseño óptimo para eliminar el arrastre de arena detectado en la planta.

Como se indica en la Tabla 5.3, la unidad geoelectrica de interés geohidrológico en esta fase de estudio es la denominada U2, constituida por materiales granulares clasificados como permeables, que se distribuye en el área (planos 7 y 8) con espesores de 50 a 90 m en la zona de los pozos y de 37 a 75 m en la orilla del brazo del río.

Las unidades geoelectricas U1 y U3 no son de interés para el objetivo buscado, ya que la primera se encuentra sobre el nivel freático y en la segunda no es factible la explotación debido a que está constituida por materiales impermeables a semipermeables y puede estar contaminada por la intrusión salina.

Por lo antes expuesto, se propuso la realización de dos exploraciones directas en las inmediaciones de los pozos 10 (S-12) y 8 (S-28), ubicados en la sección geoelectrica "pozos", ya que en esa parte es donde se observan los espesores máximos de U2 y puede aprovecharse la infraestructura de los pozos que se encuentran en operación.

Los resultados de la perforación en los sitios propuestos (CFE, 1994-95) se describen a continuación:

5.3.1. POZO 8 Bis

a) Localización.-

El pozo 8-bis se localiza en las cercanías del pozo 8 y del pozo de observación, dentro de la Isla Cayacal que se ubica en el litoral del Océano Pacífico al norte de la ciudad de Lázaro Cárdenas, Mich. y oeste del poblado El Naranjito, municipio de La Unión, Gro., con las siguientes coordenadas: $X = 798,402.28$, $Y = 1'991,993.80$ y $Z = 7.9800$ msnm.

b) Corte Litológico.-

Para la clasificación litológica se tomaron muestras de canal a intervalos de profundidad de 2 m durante la perforación, cuyas principales características son las siguientes:

| PROFUNDIDAD (m) | DESCRIPCIÓN | CARACTERÍSTICAS GEOHIDROLÓGICAS |
|--------------------|--|------------------------------------|
| 0.00 - 6.00 | Material de relleno, acarreo, grava y cantos rodados | Permeable |
| 6.00 - 21.00 | Grava gruesa con arena fina a gruesa y cantos rodados | Permeable |
| 21.00 - 42.00 | Grava fina a gruesa con arena media a gruesa | Permeable |
| 42.00 - 44.00 | Grava, arena y cantos rodados | Permeable |
| 44.00 - 46.00 | Grava gruesa a media y horizonte arcilloso con arena | Poco permeable |
| 46.00 - 69.00 | Grava media con arena fina a gruesa y cantos rodados | Permeable |
| 69.00 - 75.00 | Arcilla plástica color café claro | Impermeable |

Tabla 5.3.1

c) *Etapas de Construcción del Pozo.-*

| No. | ACTIVIDAD | PROFUNDIDAD (m) | DIÁMETRO (cm) | OBSERVACIONES |
|-----|----------------------------|----------------------------|------------------|---|
| 1 | Colocación de Casquillo | 0.0 - 2.00 | 81.28 | Contra - ademe de acero de 81.28 cm; se cementó el espacio anular |
| 2 | Perforación | 0.0 - 65.00 | 31.11 | Detenida dos semanas por espera del ademe |
| 3 | Ampliación | 0.0 - 65.00 0.0 - 61.00 | 44.45 60.96 | |
| 4 | Ademado | 0.0 - 2.00 2.00 - 56.00 | 40.64 40.64 | Ademe de acero liso Ademe de acero ranurado (1 mm.) |

| | | | | |
|---|-----------|-------------|-------------|-----------------------------|
| 5 | Engravado | 0.0 - 61.00 | 0.63 - 0.31 | Se utilizó grava redondeada |
| 6 | Lavado | 0.0 - 16.00 | 13.33 | Se utilizó agua limpia |
| 7 | Aforo | 36.00 | 20.32 | |

Tabla 5.3.2

d) Aforo.-

La etapa de aforo tuvo una duración de 12 horas en total; se inició a 750 RPM y se incrementó hasta 1,620 RPM. La prueba comenzó con un nivel estático de 8.14 m y tuvo un nivel dinámico final de 13.64 m. A continuación se muestra un resumen de los datos obtenidos:

| ESCALÓN | 1 | 2 | 3 | 4 |
|---------------------------|-------|-------|-------|-------|
| DURACIÓN (min) | 180 | 180 | 180 | 180 |
| NIVEL DINÁMICO (m) | 9.03 | 9.364 | 11.64 | 13.70 |
| CAUDAL (l/s) | 30 | 40 | 60 | 80 |
| CAUDAL ESPECÍFICO (l/s/m) | 33.70 | 26.60 | 17.14 | 14.44 |
| ABATIMIENTO (m) | 0.89 | 1.50 | 3.50 | 5.56 |
| RPM | 750 | 900 | 1250 | 1620 |
| VELOCIDAD ENTRADA (cm/s) | 0.90 | 1.20 | 1.80 | 2.4 |
| SST (mg/s) | 1.12 | 0.45 | 2.57 | 6.21 |

Tabla 5.3.3

En la tabla anterior puede verse que las velocidades de entrada al pozo, en los cuatro pasos de la prueba de aforo son inferiores al límite permisible de 3 cm/s (Johnson, 1975), con lo cual evita el arrastre de arena al pozo.

Con la información obtenida en el aforo se elaboraron las gráficas de caudal - abatimiento, de caudal específico - abatimiento y de abatimiento - tiempo.

El caudal recomendado para la explotación fue de 65 l/s, de acuerdo con la velocidad de entrada de agua al pozo y a las pérdidas en éste.

5.3.2. POZO 10 Bis

a) Localización.-

El pozo 10 - bis se localiza en las cercanías del pozo 10 y del piezómetro PIC-1, dentro de la Isla Cayacal ubicada en el litoral del Océano Pacífico al norte de la ciudad de Lázaro Cárdenas, Mich. y oeste del poblado El Naranjito, municipio de La Unión, Gro, con las siguientes coordenadas: X = 798,665.973, Y = 1'991,993.12 y Z = -7.796 msnm.

b) *Etapas de Construcción del Pozo*

| No. | ACTIVIDAD | PROFUNDIDAD (m) | DIÁMETRO (pulg) | OBSERVACIONES |
|-----|-------------------------|---|-----------------|---|
| 1 | Colocación de Casquillo | 0.0 - 2.30 | 32 | Contra - ademe de acero de 25"; se cementó el espacio anular |
| 2 | Perforación | 0.0 - 65.30 | 12 ¼ | |
| 3 | Ampliación | 0.0 - 65.00 0.0 - 65.00 0.0 - 61.00 | 20 23 25 | |
| 4 | Ademado | 0.0 - 6.00 6.00 - 48.30 48.30 - 61.00 | 16 16 14 | Ademe de acero liso Ademe de acero ranurado (1 mm) Ademe de acero ranurado (2 mm) |
| 5 | Engravado | 0.0 - 61.00 | ¼ a ⅙ | Se utilizó grava redondeada |
| 6 | Aforo | 35.00 | 8 | Se utilizó una bomba de 12" de diámetro |

Tabla 5.3.4

Corte Geológico.-

Para la clasificación litológica se tomaron muestras de canal, a intervalos de profundidad de 2 m, en la fase exploratoria de la perforación.

| PROFUNDIDAD (m) | DESCRIPCIÓN | CARACTERÍSTICAS GEOHIDROLÓGICAS |
|----------------------------|--|--|
| 0.00 - 1.70 | Material de relleno, gravas y arenas | Permeable |
| 1.70 - 3.00 | Arena fina y arcilla | Semipermeable |
| 3.00 - 11.00 | Gravas finas y gruesas con abundante arena | Permeable |
| 11.00 - 16.00 | Cantos rodados con grava y arena gruesa | Permeable |
| 16.00 - 20.00 | Grava fina y arena con escasos cantos rodados | Poco permeable |
| 20.00 - 22.00 | Arcillas de color claro | Impermeable |
| 20.00 - 29.00 | Grava fina con arena | Permeable |
| 29.00 - 31.50 | Arena fina | Permeable |
| 31.50 - 41.00 | Grava fina con abundante arena de grano medio a fino | Permeable |
| 41.00 - 45.00 | Grava gruesa y cantos rodados | Permeable |
| 45.00 - 51.00 | Grava gruesa y cantos rodados con abundante arena | Permeable |
| 51.00 - 61.00 | Gravas gruesas y delgadas con abundante arena | Permeable |
| 61.00 - 63.00 | Grava fina con arena | Permeable |
| 63.00 - 65.30 | Cantos rodados con grava gruesa y fina | Permeable |

Tabla 5.3.5

d) Aforo.-

La etapa de aforo tuvo una duración de 16 horas, que se inició a 800 RPM y se llegó hasta los 1725 RPM. La prueba comenzó con un nivel estático de 6.20 m.

A continuación se muestra un resumen de los datos obtenidos:

| ESCALÓN | 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|-------|-----------|------------|-----------|
| DURACIÓN (min) | 240 | 240 | 240 | 240 |
| NIVEL DINÁMICO (m) | 6.64 | 6.75 | 70.5 | 8.62 |
| CAUDAL (l/s) | 30 | 40 | 55 | 85 |
| CAUDAL ESPECÍFICO (l/s/m) | 68.18 | 72.72 | 64.70 | 35.12 |
| ABATIMIENTO (m) | 0.44 | 0.55 | 0.85 | 2.42 |
| RPM | 800 | 950 | 1200 | 1725 |
| VELOCIDAD ENTRADA (cm/seg) | 0.63 | 0.84 | 1.17 | 1.86 |
| SST (mg/s) | 0.7 | 1.2 - 0.6 | 1.49 - 0.8 | 1.2 - 2.5 |

Tabla 5.3.6

En la tabla anterior se presentan las velocidades de entrada de agua al pozo, que en los cuatro pasos de la prueba de aforo fueron inferiores al límite permisible de 3 cm/s para evitar el arrastre de arena al pozo.

Con la información obtenida en el aforo, se elaboraron gráficas de caudal - abatimiento, de abatimiento - tiempo, de caudal específico - abatimiento y de abatimiento específico - caudal.

El caudal de explotación recomendable, de acuerdo a su eficiencia y a la velocidad de entrada de agua al pozo fue de 70 l/s.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Método Utilizado

El método geofísico de resistividad conocido como sondeo eléctrico vertical (SEV) en la modalidad Schlumberger, que fue empleado en la exploración del subsuelo del área de la planta termoeléctrica Presidente Plutarco Elías Calles, así como en zonas aledañas a ella, cumplió satisfactoriamente los objetivos para los cuales fue aplicado en cada una de las tres etapas de estudio, objeto de la presente tesis. Esto no fue obra de la casualidad ya que se contaba con experiencia y calibración de estudios previos efectuados en áreas cercanas donde los resultados habían sido favorables: los pozos localizados en los sitios que se habían recomendado cubrieron las necesidades de gasto de agua requeridas por la planta en ese momento.

Dada la naturaleza de los depósitos deltaicos, la distribución de los materiales en el subsuelo del área de estudio es compleja y no es posible preverla o inferirla por geología superficial. Por ello la ubicación de las exploraciones directas se basó principalmente en los estudios geofísicos, que permitieron efectuar una diferenciación entre los materiales granulares y arcillosos con base en el contraste de resistividad.

El empleo del SEV en los estudios de la primera y la tercera etapas, fue de vital importancia ya que, como se mencionó antes con ellos se definió de manera rápida, acorde a las necesidades de la planta, la ubicación de los lugares de construcción de los pozos para dotar de agua a la central en sus fases de construcción y operación. Así mismo con los estudios de la segunda etapa se logró determinar la forma del frente de intrusión salina en el área comprendida entre la playa y la planta, definiéndose diferentes grados de contaminación a partir de la correlación entre la resistividad y la conductividad de las muestras de agua en los pozos.

No obstante los buenos resultados obtenidos, el estudio de SEV pudo optimizarse de dos formas: la primera, la cual debería incluirse dentro de la programación de cualquier trabajo geofísico de un proyecto importante, es realizar algunas pruebas iniciales con diversos métodos geofísicos, seleccionados de antemano de acuerdo con los objetivos propuestos, para que de ello se derive la técnica y el arreglo a emplear, evaluando efectividad y costo o se descarte la aplicación de la geofísica cuando no se determine una respuesta adecuada, situación que se llega a presentar en ciertas áreas; la segunda que se aplicaría cuando ya se tuvieran los resultados de la exploración directa y éstos fueran acordes con lo previsto por los métodos indirectos, es retroalimentar la información para reinterpretarla, aplicar otro método o, con el mismo método, efectuar una mayor densidad de mediciones para definir con mayor precisión los objetivos buscados, evaluando primero la relación costo-beneficio que implicaría el hacerlo.

Con lo anterior los resultados serían finalmente de mayor calidad y no impactarían grandemente en el costo total de la obra. Además se debe tomar en cuenta que en los grandes proyectos de construcción que se realizan en los países del primer mundo el porcentaje que se destina para los estudios de exploración es del 3 al 5 % del costo total de la obra, no así en México y otros países de Latinoamérica donde la carencia de recursos económicos y técnicos impide la aplicación de esta norma, limitando una adecuada aplicación de las diferentes especialidades de la exploración.

Otras veces la programación deficiente no se debe a la escasez de recursos financieros sino a la falta de experiencia o desconocimiento de los dirigentes de las obras sobre lo que se puede hacer y lograr con los métodos geológicos y geofísicos.

Esto último se ha subsanado en gran parte en los años ulteriores, ya que las limitantes económicas han hecho que los directivos investiguen alternativas que conduzcan a un ahorro en el costo de las obras; ello ha provocado que las exploraciones directa e indirecta tome mayor importancia en el desarrollo de las obras civiles, aunado a que los profesionales de la exploración. Especialmente del área de Geofísica están preparados en

la materia y ya no es el personal improvisado cuyos trabajos dejaban mucho que desear, situación que provocó se perdiera la confianza en esta especialidad. Por ello es importante difundir los logros y experiencias conseguidos por los métodos de exploración geofísica en los ámbitos donde sea factible su aplicación.

6.2. Primera Etapa

En esta etapa se propuso la ubicación de cuatro exploraciones directas (6T, 7T, Petacalco 2 y San Francisco), distribuidas en las secciones 1, 2 y 3 para alcanzar las unidades geoeléctricas UC (5-17 Ω m), UC' (15-26 Ω m) y UD (28-55 Ω m) las cuales fueron consideradas más atractivas para contener agua por sus valores de resistividad. Sin embargo sólo se llevaron a efecto dos perforaciones denominadas 7T y Petacalco 2: la primera localizada en el SEV S-2 (sección 1-1'), investigó la unidad geoeléctrica UD y la segunda, junto al SEV S-20 (sección 2-2') investigó la unidad geoeléctrica UC'.

En estos sitios se observó que, efectivamente, la unidad geofísica UD presenta las mejores características con fines de explotación de agua, ya que después de realizar el desarrollo, el aforo y la prueba de bombeo del pozo 7T se recomendó la extracción de 12 l/s. Éste gasto disminuye en la zona correspondiente a la unidad UC', donde, después de las pruebas necesarias en el pozo Petacalco 2, se recomendó una extracción de 8.3 l/s.

El contraste de resistividades, definido por unidades geofísicas en las secciones estudiadas, está regido por la forma de depósito de los distintos materiales, producto del acarreo del río Balsas, el cual ha formado canales o paleocauces donde fluye agua.

Hay una clara relación de resistividades altas (28-55 Ω m) y bajas (15-26 Ω m) con la ocurrencia de materiales granulares y arcillosos, respectivamente, es decir, con el aumento o disminución relativa de la permeabilidad en las unidades geoeléctricas UD y UC'.

La unidad UD aparece en la sección 1-1' con los SEV 1 a 6, en la 2-2' con los SEV 23 y 26 y en la 3-3' con los SEV 34 y 38 (plano 5).

La unidad UC' se encuentra en las secciones 1-1' y 2-2' con los SEV 6 y 20, respectivamente.

Solamente fue necesario llevar a cabo la construcción de los pozos 7T y Petacalco 2, ya que con el caudal (20 l/s) obtenido en ellos y el proporcionado por la rehabilitación del pozo 2T (10 l/s) se cubrieron las necesidades de agua requeridas (20 l/s) en esa fase de operación de la planta y para dotar de agua a los poblados de Petacalco y San Francisco.

6.3. Segunda Etapa

El modelo de capas geoelectricas, denominadas unidades, que se determinó en la zona de estudio es el siguiente:

Unidad U1 (10-90 Ω m).- Compuesta por depósitos de grava, arena y arcilla, constituye la capa superficial y no presenta influencia de la salinidad del agua marina.

Unidades U2 (0.4-0.9 Ω m), U2a (1.5-3 Ω m) y U2b (4-5 Ω m).- Forman los horizontes contaminados en mayor (U2) o menor (U2b) proporción por la intrusión salina.

Unidades U3 (13-26 Ω m) y U3a (6-10 Ω m) capas de interés hidrológico formadas por gravas, arenas y material arcilloso; en la primera predominan las arenas y las gravas, mientras que en la segunda es mayor el contenido de material arcilloso, si bien pudiera contener cierta salinidad.

La amplia distribución de la unidad (U2), que posee el mayor grado de

contaminación en la zona de estudio, indica que la intrusión salina a penetrado en toda el área en forma regular hacia el continente, con excepción de la parte SW (secciones 9 y 10) donde se tiene la presencia de las unidades U2a y U2b, contaminadas relativamente en menor proporción que U2, situación que es congruente con la geología ya que el frente de intrusión ha tenido mayor avance hacia donde se encuentra el río Balsas, cuyos depósitos presentan por naturaleza una mayor permeabilidad. En ésta misma zona (SW) se encuentran la unidad no contaminada U3 y la unidad posiblemente invadida U3a. debidas a la probable existencia de barreras naturales (arcillas) o a la influencia de una recarga artificial provocada por un canal que se formó al abrirse el estero del río. En estas mismas unidades, que también aparecen en la sección 5-5', se forma un equilibrio hidrodinámico a causa de la recarga natural lateral que viene de norte a sur y que marca el límite agua dulce-agua salada.

Al integrar a los datos de resistividad, obtenidos por medio de los SEV, las mediciones de conductividad eléctrica, efectuadas en los pozos y piezómetros, se tuvo una correspondencia directa entre las unidades geoeléctricas y la salinidad del agua contenida; en este proceso se definen intervalos propios para las unidades geoeléctricas U2 y U2a, lo cual indica que el grado de contaminación en ellas es diferente, tal como se había propuesto con base en la información de resistividad.

La unidad U3 contiene agua de buena calidad no contaminada por la intrusión salina dado que su conductividad es menor a 1000 micromhos por centímetro.

La unidad U3a contiene agua salobre dado que, su conductividad es menor a 3000 micromhos por centímetro.

Las unidades U2 y U2a, contaminadas por la intrusión salina en mayor y menor grado, presentan conductividades de 35 000 a 45 000 y 15 000 a 30 000 micromhos por centímetro, respectivamente.

6.4. Tercera Etapa

El subsuelo del área de la Isla Cayacal está formado por un modelo de tres unidades sensiblemente horizontales con diferencias en su resistividad.

Unidad U1 (120-5200 Ω m).- Formada por suelo, gravas, arenas y cantos rodados con permeabilidad alta; se encuentra por encima del nivel freático y no es de interés hidrológico.

Unidad U2 (53-270 Ω m).- Compuesta por arcillas, limos arenas (finas, medias y gruesas), gravas (finas a gruesas) y cantos rodados; presenta alta permeabilidad y constituye el horizonte productor del área; con los dos pozos efectuados por la CFE (8 bis y 10 bis) se logró extraer un caudal total de 135 l/s, el cual está por encima del que se extraía (80 l/s) de los pozos construidos por la CNA (8 y 10).

Unidad U3 (7-49 Ω m).- Constituida por arcillas, limos y arenas; se considera de impermeable a semipermeable con probable influencia salina. El único sitio donde esta unidad pudo ser explorada directamente fue en el pozo 8 bis, el cual cortó una arcilla plástica color café claro, de los 70 a los 76 m de profundidad, situación prevista con el estudio geofísico de SEV.

Los 7 pozos construidos en 1982 por la CNA (antes SARH) a una profundidad de 20 m en el área de la Isla Cayacal indican que esa zona no fue explorada a profundidad en ese tiempo, ya que con el estudio geofísico de SEV efectuado por la CFE en 1994 se determinó que el horizonte productor en ese lugar tiene un espesor de 50 a 90 m. Por lo tanto, si desde el principio hubiese sido definido éste en forma conveniente, debiera haberse programado una profundidad adecuada para cada uno de los pozos y así pudiera haberse reducido el número de ellos, lo que hubiera implicado un ahorro muy importante ya que la construcción de pozos para agua es costosa.

Por lo antes expuesto los estudios geofísicos de resistividad mediante sondeos eléctricos verticales con el arreglo Schlumberger, cubrieron adecuadamente los objetivos propuestos en el tiempo requerido, para cada una de las etapas de estudio discutidas en la presente tesis.

La planeación de los estudios geofísicos en las tres etapas se realizó conjuntamente con personal del Departamento de Geohidrología, el cual fue solicitando la realización de dichos trabajos, como responsable directo de solucionar los diversos problemas planteados por las áreas de construcción y operación de centrales termoeléctricas en la CFE.

En la etapa de trabajo de campo los estudios se desarrollaron con adecuado apoyo logístico por parte de la Superintendencia de Estudios de la Zona Pacífico Sur.

El autor presenta en esta tesis estudios de geofísica que contienen algunas de las experiencias adquiridas en su vida profesional y espera que ayuden o sirvan de guía en la resolución de problemas exploratorios en sitios con las características geológicas y geohidrológicas similares a las del área de Petacalco, Gro.

BIBLIOGRAFÍA

- Arellano G., J. F. y Romero G., J. C., 1980, " **Prospección Geofísica por medio de Sondeos Eléctricos Verticales en la porción Norte del Valle de Mexicali y campo Geotérmico de Cerro Prieto, Baja California Norte** ", Tesis Profesional, IPN.
- Astier, J.L., 1982, " **Geofísica aplicada a la Hidrogeología** ", Segunda edición, Paraninfo, Madrid.
- Bhattacharya, P.K. y Patra, H.P., 1978, " **Direct Current Goelectric Sounding** ", Elseveir, Amsterdam.
- Cervantes M., A., 1992, " **Informe de Actividades Realizadas en Cumplimiento del Acuerdo No. 08/91 en relación al Pozo 2T de la C.T. Lázaro Cárdenas** ", Superintendencia de Estudios Zona Pacífico Sur, CFE, Inédito.
- Depto. de Geohidrología, 1994, " **Informe de Actividades de Perforación, Desarrollo, Aforo y Pruebas de Bombeo del Pozo 10 Bis Y Rehabilitación de los Pozos 2 y 5 C.T. Presidente Plutarco Elías Calles** ", CFE, Inédito.
- Dobrin, M.B., 1976, " **Introducción a la Prospección Geofísica** ", Mc Graw Hill, Tercera Edición, Nueva York.
- Kunetz, G., 1966, " **Principles Of Direct Current Resistivity Prospecting**", Gebruder Borntraeger, Berlin.
- Orellana, E., 1982, " **Prospección Geoeléctrica en Corriente Continua** ", Segunda edición, Paraninfo, Madrid.
- Pérez Angón, R.B., 1980, " **Prospección Geofísica aplicando métodos Geoeléctricos y de Sismología de Refracción en el Vaso Doña Juana** ", Joquizingo de León Guzmán, México, Tesis Profesional, UNAM.

Ruiz Reyes, J.A., 1993, " Prospección Geoeléctrica y Registros Geofísicos de Pozos ", Gerencia de Normas Técnicas, C.N.A.

S.E.Z.P.S., 1992, " Estudio Geoeléctrico en la C.T. Petacalco, Gro. para ubicar Pozos 6T, 7T, Petacalco y San Francisco", CFE, Inédito.

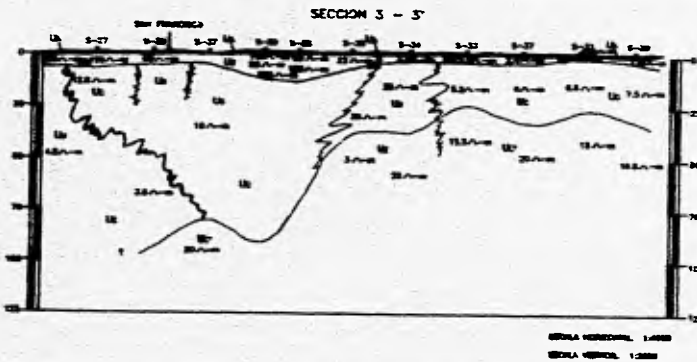
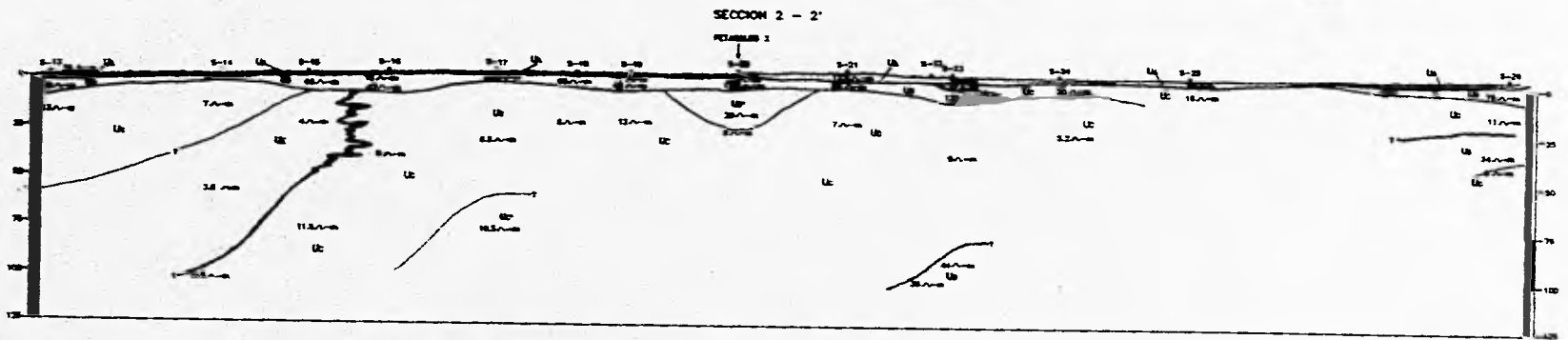
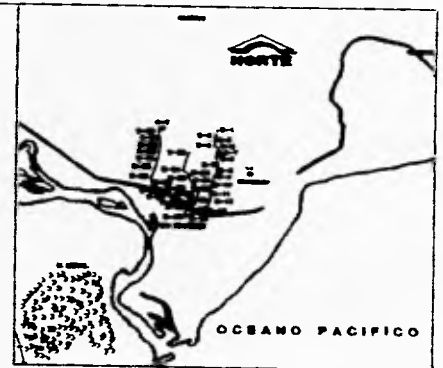
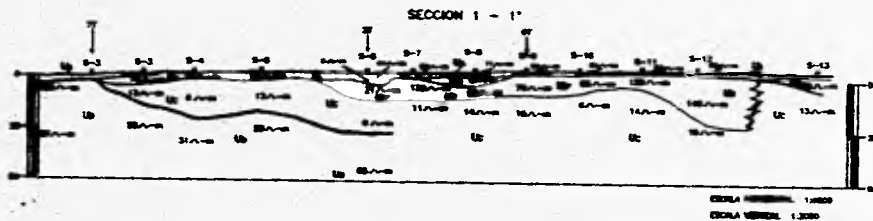
S.E.Z.P.S., 1992, " Informe de Actividades del Área de Geofísica durante el año de 1992 ", CFE, Inédito.

S.E.Z.P.S., 1994, " Informe de Geofísica Acuerdo GIC/023/92 C.T. Petacalco, Gro." CFE, Inédito.

S.E.Z.P.S., 1994, " Reporte de Estudio Geoeléctrico Efectuado en la Isla Cayacal para apoyo a la C.T. Lázaro Cárdenas ". CFE, Inédito.

Van Nostrand, R.G. y Cook, K.L., 1966, " Interpretation Of Resistivity Data ", United States Government, Washington.

A N E X O S

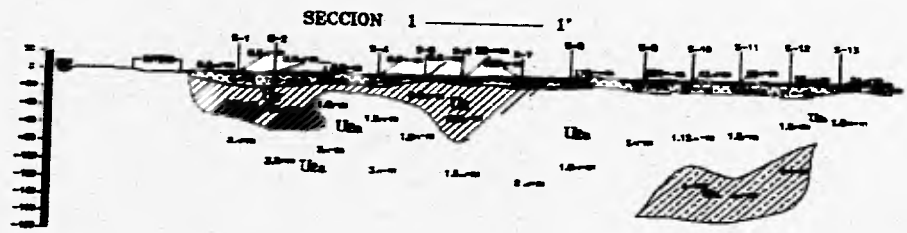


SIMBOLOGIA

| | |
|---------------|------------------------|
| S-26 | SONDO ELECTICO |
| 100 Ω-m | VALOR DE RESISTIVIDAD |
| (Wavy line) | CONTACTO GEOELECTRICO |
| (Zigzag line) | INTERFASE GEOELECTRICA |
| U2 | UNIDAD GEOELECTRICA |

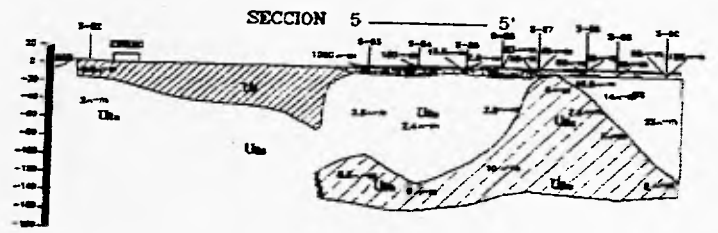
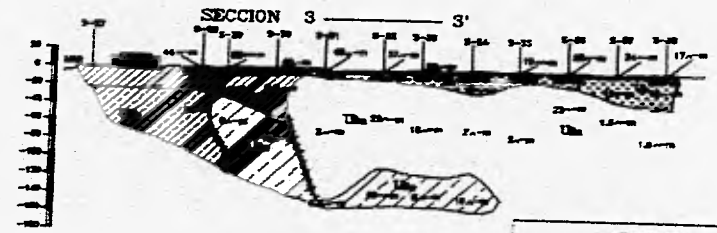
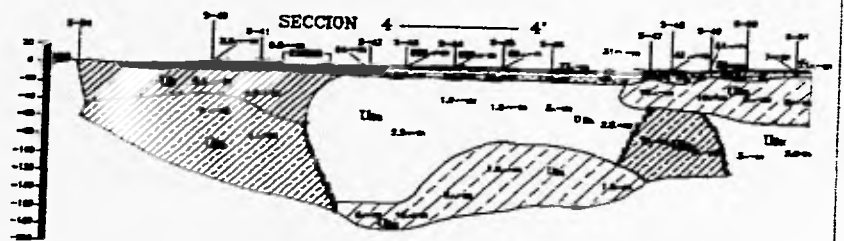
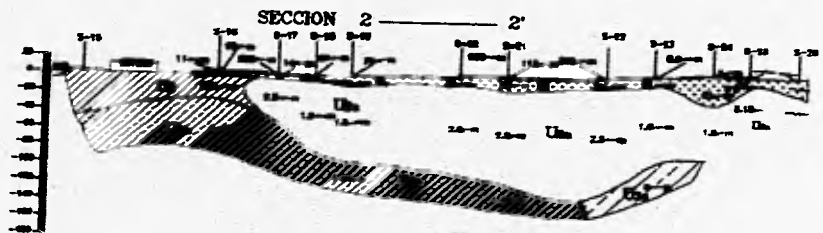
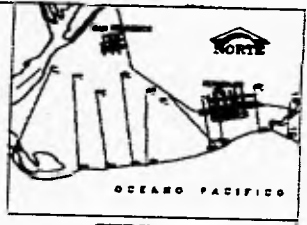


UNAM
 FACULTAD DE INGENIERIA
 SECCIONES GEOELECTRICAS
 1, 2 y 3
 PRIMERA ETAPA
 TESIS PROFESIONAL
 DANIEL SAUCEDO OUBIONES
 1988
 2



RESUMEN DE LOS TIPOS DE SUELOS DE LA CV PRESENTE

| TIPO | DESCRIPCION | COMPOSICION QUIMICA |
|------|-------------------|---------------------|
| U-1 | SUELO DE TIPO U-1 | ... |
| U-2 | SUELO DE TIPO U-2 | ... |
| U-3 | SUELO DE TIPO U-3 | ... |
| U-4 | SUELO DE TIPO U-4 | ... |
| U-5 | SUELO DE TIPO U-5 | ... |
| U-6 | SUELO DE TIPO U-6 | ... |

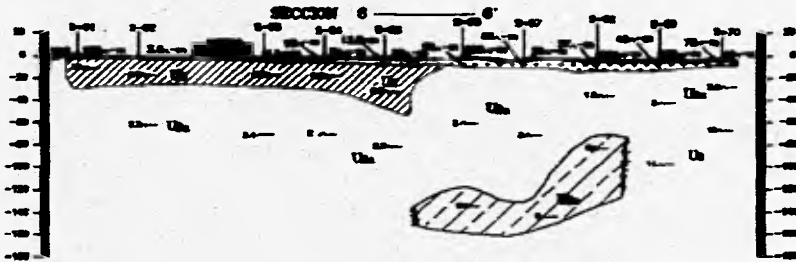


LEENDADO

| | |
|---|--------------------------|
| — | SUELO ELECTRO VERTICAL |
| — | SUELO ELECTRO HORIZONTAL |
| — | SUELO ELECTRO LATERAL |

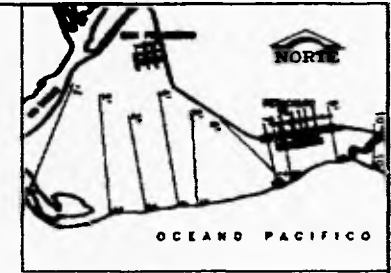


UNAM
 FACULTAD DE INGENIERIA
 SECCIONES SELECTIVAS
 1, 2, 3, 4 Y 5
 TESIS PROFESIONAL
 DANIEL SAUCEDO S.

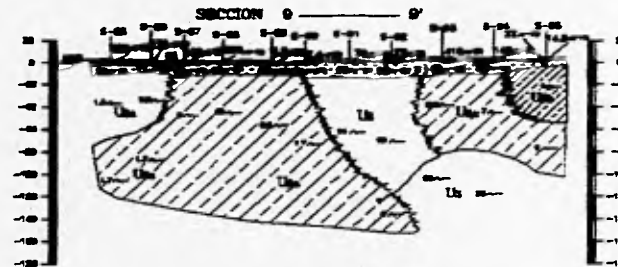
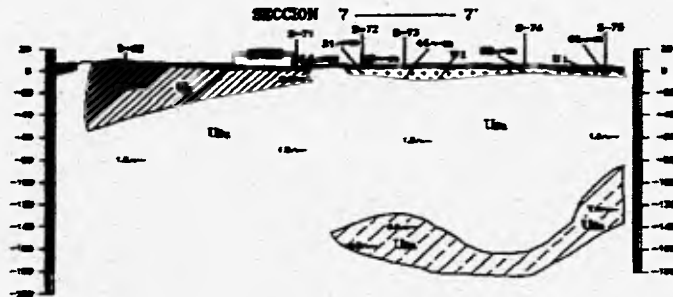


DESCRIPCION DE LAS UNIDADES GEOLÓGICAS DE LA C.C. TOLUCA

| UNIDAD | ESQUEMA | EDAD | DESCRIPCION GENERAL |
|--------|--------------------|-----------|--|
| U1 | [Dotted pattern] | 10 - 15 | ARENAS DE GRASA, ARELLA Y FOLIA DE GRASA. |
| U2 | [Diagonal lines /] | 0.5 - 0.8 | ARENAS COMPACTAS ENTERRADAS POR UN VENTILADO SUAVE. |
| U3 | [Diagonal lines \] | 1.0 - 2.0 | ARENAS COMPACTAS POR LA PRESION DE GRASA. |
| U4 | [Horizontal lines] | 4 - 5 | ARENAS COMPACTAS POR LA PRESION DE GRASA EN UNAS ZONAS DE GRASA. |
| U5 | [Vertical lines] | 10 - 20 | ARENAS COMPACTAS, ARELLA, GRASA Y ARELLA. |
| U6 | [Diagonal lines /] | 1 - 10 | ARENAS DE GRASA FINE GRASA, LIMO Y ARELLA CON UNAS ZONAS DE GRASA Y/O GRASA SUAVE. |

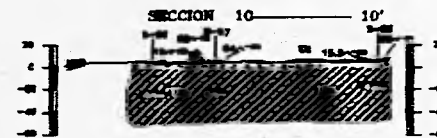
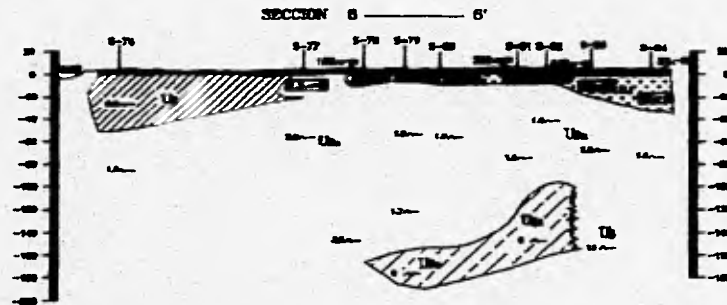


CRONOGRAMA DE LOCALIZACION



SIMBOLOGIA

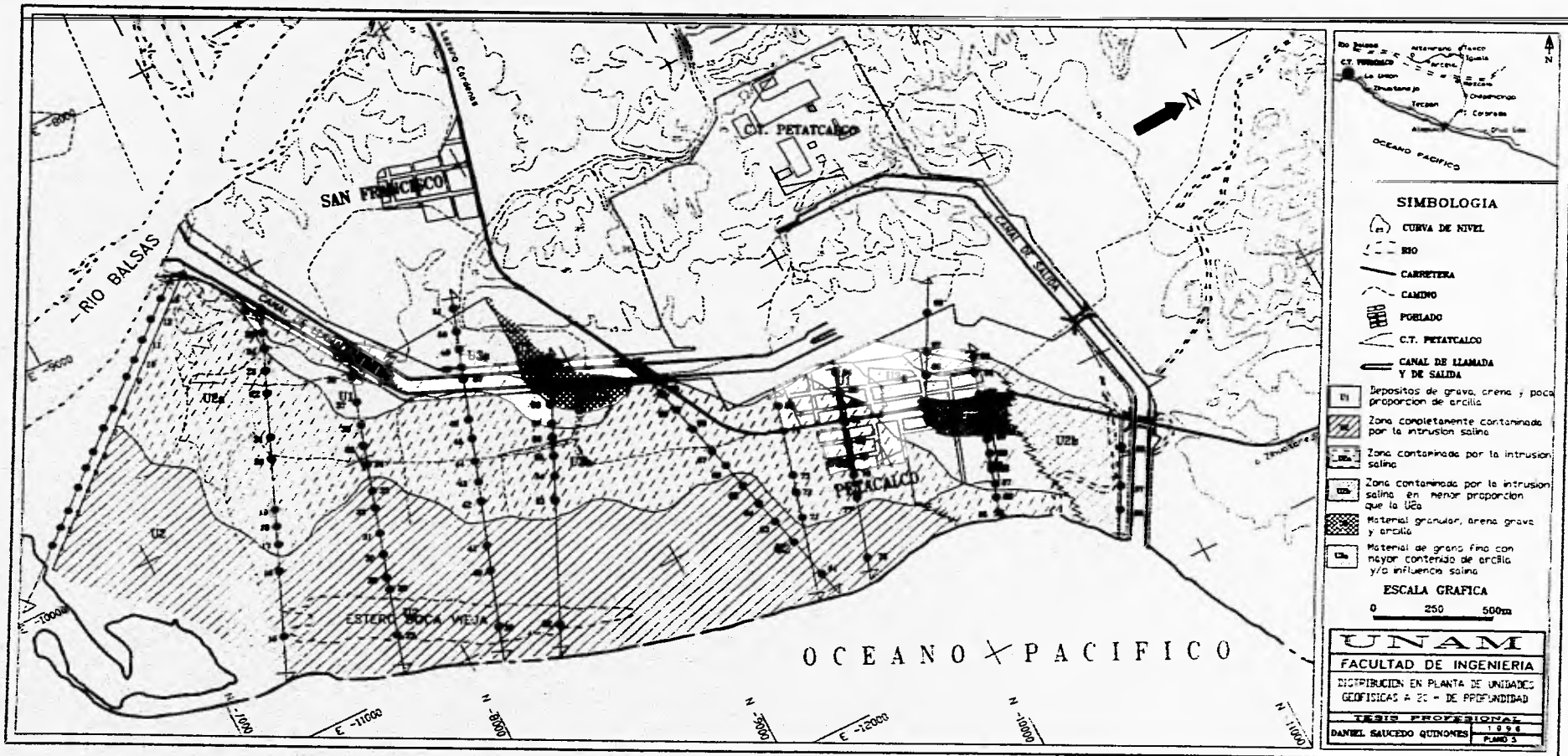
| | |
|-----------------------------|----------------------------------|
| [Symbol: Inverted triangle] | ESTACION ELECTRODICA VERTICAL. |
| [Symbol: Circle with dot] | CONTORNOS DE GRASA-Y. |
| [Symbol: Circle with cross] | ESTACIONES ELECTRICAS LATERALES. |



ESCALA GRUPO 1:500



UNAM
 FACULTAD DE INGENIERIA
 SECCIONES GEOLÓGICAS
 S. T. R. O. Y I. R.
 TERCER PROFESIONAL
 ANEXO: BARRIO QUERÉTARO



SIMBOLOGIA

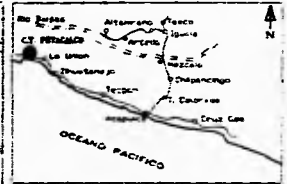
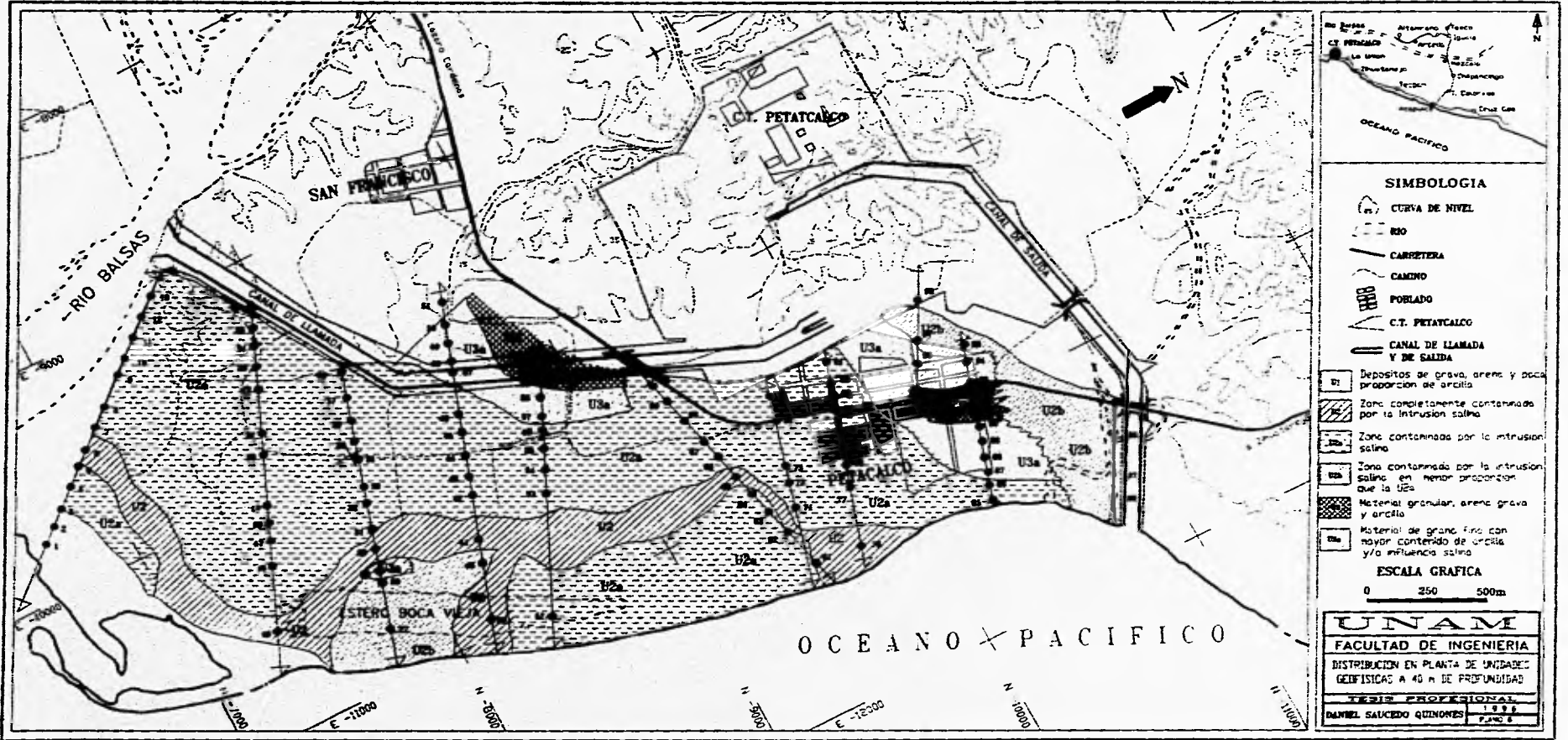
- CURVA DE NIVEL
- RIO
- CARRETERA
- CAMINO
- POBLADO
- C.T. PETATLACO
- CANAL DE LLAMADA Y DE SALIDA

LEGENDA DE TIPOLOGIAS

- Depositos de grava, arena y poca proporción de arcilla
- Zona completamente contaminada por la intrusión salina
- Zona contaminada por la intrusión salina
- Zona contaminada por la intrusión salina en menor proporción que la UEs
- Material granular, arena, grava y arcilla
- Material de grano fino con mayor contenido de arcilla y/o influencia salina

ESCALA GRAFICA
 0 250 500m

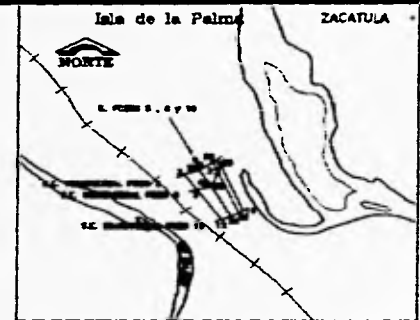
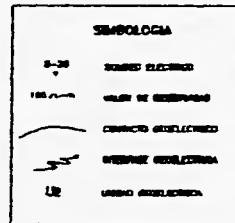
UNAM
 FACULTAD DE INGENIERIA
 DISTRIBUCION EN PLANTA DE UNIDADES GEOLOGICAS A 20 - DE PROFUNDIDAD
 TESIS PROFESIONAL
 DANIEL SAUCEDO QUINONES PLANO 3



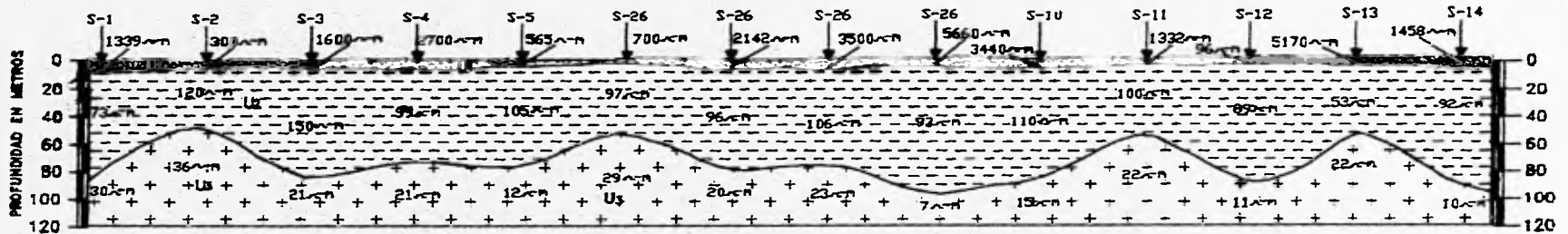
- SIMBOLOGIA**
- CURVA DE NIVEL
 - RIO
 - CARRETERA
 - CAMINO
 - PORLADO
 - C.T. PETATLACO
 - CANAL DE LLAMADO Y DE SALIDA
 - Depositos de grava, arena y poca proporción de arcilla
 - Zona completamente contaminada por la intrusión salina
 - Zona contaminada por la intrusión salina
 - Zona contaminada por la intrusión salina en menor proporción que la U2a
 - Material granular, arena, grava y arcilla
 - Material de grano fino con mayor contenido de arcilla y/o influencia salina
- ESCALA GRAFICA**
 0 350 500m

UNAM
FACULTAD DE INGENIERIA
 DISTRIBUCION EN PLANTA DE UNIDADES
 GEOFISICAS A 40 m DE PROFUNDIDAD
 TESIS PROFESIONAL
 DANIEL SAUCEDO QUINONES 1998
 72428

| UNIDAD GEOGRFICA | RESISTIVIDAD OHMS - M | ESPEZOR (m) | PROBABLE CORRELACION LITOLÓGICA |
|------------------|-----------------------|-------------|---|
| U ₁ | 122 - 5170 | 1 - 10 | SUELO, GRANS Y ARENAS SECAS |
| U ₂ | 70 - 200 | 37 - 86 | ARENAS FINAS, ARENAS GRUESAS Y GRANS CON CONTENIDO DE LARVA, HOJAS DE PASCUALINA |
| U ₃ | 9 - 24 | - | ARENAS FINAS, ARENAS GRUESAS CON MENOR CONTENIDO DE LARVA O POSIBLE INFLUENCIA SALINA |

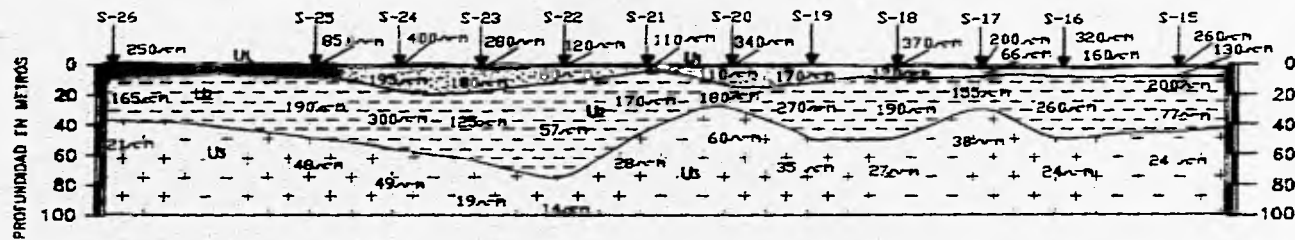


1 - 1'
SECCION GEOLÉCTRICA (POZOS)



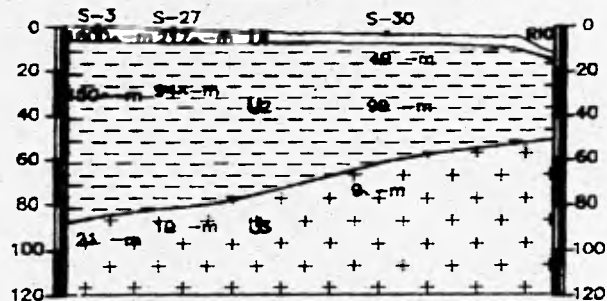
2 - 2'

SECCION GEOLÉCTRICA (GRILLA DEL RIO BALSAS)

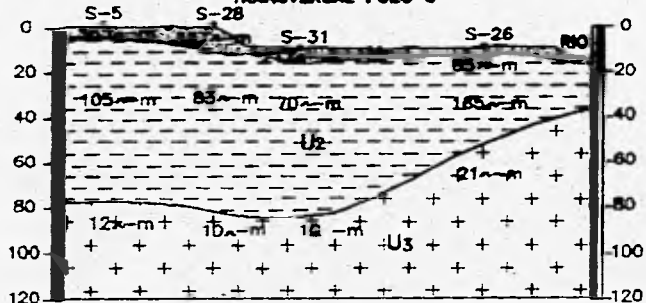


UNAM
 FACULTAD DE INGENIERIA
 SECCIONES GEOLÉCTRICAS
 1 y 2
 TESIS PROFESIONAL
 MARCELO SUAREZ GUERRA

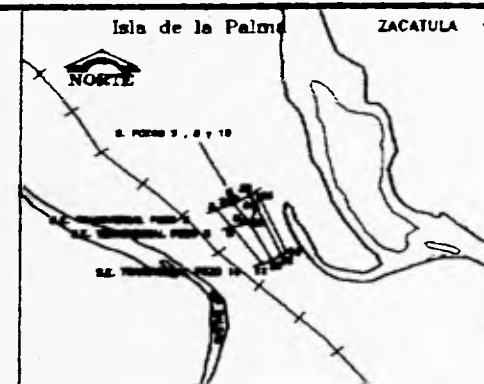
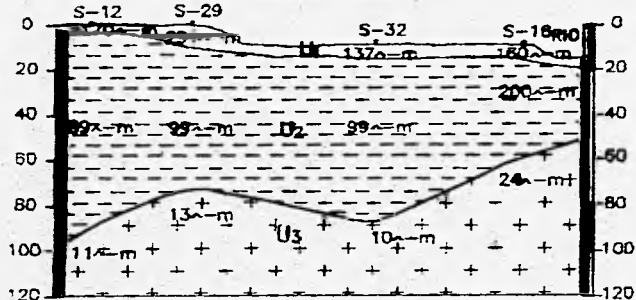
SECCION 3 - 3'
TRANSVERSAL POZO 5



SECCION 4 - 4'
TRANSVERSAL POZO 8



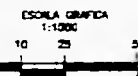
SECCION 5 - 5'
TRANSVERSAL POZO 10



| UNIDAD GEOFISICA | RESISTIVIDAD OHMS - M | ESPESOR (M) | PROBABLE CORRELACION LITOLOGICA |
|------------------|-----------------------|-------------|---|
| U ₁ | 122 - 5170 | 1 - 10 | SUELO, GRANAS Y ARENAS SEDAS |
| U ₂ | 70 - 200 | 37 - 86 | ARENAS FINAS, ARENAS GRUESAS Y GRANAS CON CONTENIDO DE LIMOS, HORIZONTE PRODUCTOR |
| U ₃ | 9 - 24 | - | ARENAS FINAS, ARENAS GRUESAS CON MAYOR CONTENIDO DE LIMOS O POSIBLE INFLUENCIA SALINA |

SIMBOLOGIA

- S-26 SONDED ELECTRICO
- 105 ~ m VALOR DE RESISTIVIDAD
- CONTACTO GEOELECTRICO
- INTERFASE GEOELECTRICA
- U₂ UNIDAD GEOELECTRICA



UNAM

FACULTAD DE INGENIERIA

SECCIONES GEOELECTRICAS
3.4 y 5
TERCERA ETAPA

TESIS PROFESIONAL

DANIEL SAUCEDO QUIONES

RELACIÓN DE FIGURAS

| | Pág. |
|------------------|---|
| Figura 1 | Localización CT Presidente Plutarco Elías Calles 2 |
| Figura 2 | Localización de los pozos 1T, 2T, 3T, 4T, N1, N2 y N3 4 |
| Figura 3 | Localización de los pozos 5, 7, 8, 9, 10, 17 y 18 6 |
| Figura 4 | Localización SEV, primera etapa de estudio 8 |
| Figura 5 | Localización SEV, segunda etapa de estudio 9 |
| Figura 6 | Localización SEV, tercera etapa de estudio 10 |
| Figura 7 | Columna estratigráfica regional 18 |
| Figura 8 | Ubicación del área de estudio en la zona de subducción (Margen Continental, Placa de Norteamérica y Placa de Cocos). 26 |
| Figura 9 | Vector de densidad de corriente J en un espacio homogéneo, sobre un elemento de dimensiones dx , dy y dz 36 |
| Figura 10 | Límites de variación más usuales para la resistividad de las rocas (Orellana, 1982). 42 |
| Figura 11 | Nomograma que relaciona la porosidad y el factor de formación para cualquier valor común de m . (Orellana, 1982) 45 |
| Figura 12 | Electrodo puntual en un espacio homogéneo 49 |
| Figura 13 | Dispositivo tetraelectródico general 51 |
| Figura 14 | Dispositivo Wenner. 53 |
| Figura 15 | Dispositivo Schlumberger. 54 |
| Figura 16 | Configuraciones del arreglo Dipolo - Dipolo (Orellana, 1982) 57 |
| Figura 17 | Definición de los parámetros de Dar Zarrouk (Orellana, 1982) . . . 61 |
| Figura 18 | Hoja de campo de SEV. 64 |
| Figura 19 | Empalme o encloche de SEV. 65 |
| Figura 20 | Curva teórica calculada. 72 |

RELACIÓN DE PLANOS

Después de Pág. 108

| | |
|----------------|---|
| Plano 1 | Geología Regional. |
| Plano 2 | Secciones Geoeléctricas 1, 2 y 3 Primera Etapa de Estudio. |
| Plano 3 | Secciones Geoeléctricas 1, 2, 3, 4 y 5 Segunda Etapa de Estudio. |
| Plano 4 | Secciones Geoeléctricas 6, 7, 8, 9 y 10 Segunda Etapa de Estudio. |
| Plano 5 | Distribución en Planta de Unidades Geofísicas a 20 m de Profundidad. |
| Plano 6 | Distribución en Planta de Unidades Geofísicas a 40 m de Profundidad. |
| Plano 7 | Secciones Geoeléctricas 1, 2 y 3 Tercera Etapa de Estudio. |
| Plano 8 | Secciones Geoeléctricas 4 y 5 Tercera Etapa de Estudio |