

2
2ej.

03090



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

UNIDAD DE LOS CICLOS PROFESIONAL Y DE POSGRADO
COLEGIO DE CIENCIAS Y HUMANIDADES

ESTUDIO HIDROGEOFISICO
DE LA SUBCUENCA DE CHALCO;
EVALUACION DE IMPACTO AMBIENTAL
DEL BASURERO DE SANTA CATARINA.

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
DOCTOR EN GEOFISICA
(Aguas subterráneas)

P R E S E N T A :

TOMAS GONZALEZ MORAN

MEXICO, D. F.

1992

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



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.

RESUMEN

La preocupación actual por estudiar y entender los problemas ambientales se vé reflejada en el enfoque presentado en este estudio. La fusión e interacción de disciplinas permiten conocer el subsuelo, de manera indirecta. La geofísica con la hidrogeología permiten entender un proceso de alteración de la calidad del agua subterránea. Dada la relevancia que presenta el agua para el ser humano, es prioritario prevenir el deterioro de su calidad proporcionando una atención detallada al estudio del medio ambiente y a los procesos de contaminación de acuíferos, especialmente en un país como el nuestro, donde el agua subterránea juega un papel clave para el abastecimiento de agua potable.

La evaluación de actividades antropogénicas y su impacto en el ciclo hidrológico ocasionan complejas alteraciones y modificaciones en la calidad natural del agua. Dentro de estas actividades, se discute el rol que puede jugar la disposición final de residuos sólidos, urbanos, como fuentes contaminantes del agua subterránea, dependiendo de una serie de factores que determinan la composición e hidrodinámica de los lixiviados. Se presenta el papel que pueden desempeñar los métodos geofísicos en estudios hidrogeológicos y de contaminación y el posterior desarrollo, de un programa de monitoreo que permitirá considerar las estrategias de evaluación de impacto ambiental para el establecimiento de un programa de vigilancia ambiental.

Esta investigación se ha realizado en la subcuenca de Chalco, ubicada al SE de la ciudad de México, parte importante de la Cuenca de México con la cual está comunicada hidráulicamente. Fué elegida como zona piloto de estudio, principalmente porque su constitución geológica es similar al resto de la Cuenca y a su vez presenta una serie de fenómenos geológicos, hidrogeológicos y socioeconómicos similares. En ella están ubicados uno de los mayores tiraderos de basura y canales de aguas negras.

El estudio geoquímico de las rocas aflorantes en la zona de estudio, ha permitido establecer su composición calcoalcalina. Los productos volcánicos de Santa Catarina, Milpa Alta y Tezompa se encuentran dentro del campo de las andesitas y los de Tlapacoya y el Pino dentro de la clasificación de dacitas.

El conocimiento de las principales unidades litoestratigráficas de la Cuenca de México establecido mediante la interpretación de sondeos eléctricos verticales, sondeos electromagnéticos e información de columnas litológicas de pozos, ha permitido estudiar el subsuelo a profundidad. Así se ha podido establecer la configuración de la cima del paquete arcilloso de la subcuenca de Chalco, considerando el buen contraste resistivo de esta unidad con la formación acuífera volcánica granular actualmente en explotación. Por otra parte, el relieve de la superficie del contenedor volcánico pudo ser determinado procesando

información gravimétrica, considerando para su modelación, valores de densidad de muestras de pozos profundos perforados por PEMEX.

Así mismo, la realización de análisis químicos y bacteriológicos ha servido para conocer la calidad del agua subterránea y evidenciar la existencia de alteraciones en su calidad. Los pozos de Santa Catarina y circunvecinos, al basurero de Santa Catarina, presentan problemas en relación con diversos parámetros físico-químicos. La presencia de coliformes fecales en muestras de pozos, indican contaminación antropogénica reciente. La fuente más probable son las lixiviaciones del basurero de Santa Catarina.

Por otra parte el análisis e interpretación de una sección geoelectrica de resistividad, basada en sondeos ubicados sobre la carretera México-Puebla, en las vecindades del basurero de Santa Catarina permitió identificar dentro de un ambiente volcánico complejo una zona conductiva de $9 \Omega\text{-m}$ asociada a una pluma contaminante generada por el sitio de disposición final de residuos sólidos de Santa Catarina. La aplicación de métodos electromagnéticos (CSAMT) y el análisis de sondeos eléctricos convencionales, en el ambiente geológico de la región ocupada por el antiguo lago, no aportaron los resultados esperados en la identificación de la pluma contaminante. La presencia de grandes espesores de arcilla, la mineralización del agua saturante y el ruido geoelectrico de la zona (acueducto, línea de alta tensión), ofrecen dificultades técnicas en estos estudios, careciéndose de los contrastes resistivos adecuados entre la nube contaminante (muy diluida en el flujo subterráneo) y los valores resistivos del acuífero volcánico granular actualmente en explotación.

La interrelación de metodologías geofísicas con otras disciplinas pone de manifiesto la relevancia de investigaciones sistemáticas en estudios hidrogeológicos y de procesos de contaminación de sistemas acuíferos.

El estudio pretende contribuir al conocimiento que se tiene en la subcuenca de Chalco, como parte integral de la Cuenca de México, desde el punto de vista de la vinculación existente entre la hidrogeología, la geofísica y el medio ambiente.

ABSTRACT

The current concern to study and understand environmental problems is reflected in the approach of this work. Fusion and interaction of disciplines allow to gain indirect knowledge of the subsoil. Geophysics, together with hydrogeology, provides information leading to the understanding of the alterations in groundwater quality. Being water the most precious resource for human well-being, it is a priority to safeguard its quality by paying special attention to the environment and to the pollution processes affecting the water sources, specially in a country like ours where groundwater is the main source of drinking water. Anthropogenic activities and their impact on the hydrologic cycle cause complex alterations and modifications in the natural quality of water. Among these activities, the role played by the final disposal of urban solid wastes is discussed as a source of pollution of groundwater dependent on a series of factors that determine the composition and hydrodynamics of the leaches. We discuss the role played by the use of geophysical methods in hydrological and pollution studies and propose a monitoring program to define the evaluation strategies to assess the environmental impact to be able to establish a program of environmental surveillance.

This research was performed in the sub-basin of Chalco, located in the SE of Mexico City, which is an important part of the basin of Mexico and to which it is hydraulically connected. This region was chosen mainly as a pilot study because its geological conformation is similar to the rest of the basin and, in turn, presents similar geological, hydrological, and socioeconomic phenomena. One of the greatest landfills is located in this region, which is also rich in sewage water channels.

The geochemical study of the outcropped rocks of this region has allowed to establish its calciferous alkaline composition. The volcanic products of Santa Catarina, Milpa Alta and Tezompa pertain to the andesites and those of Tlapacoya and El Pino belong to the dacites.

Knowledge of the main lithostratigraphic units of the basin of Mexico, obtained through interpretation of vertical electrical probing, electromagnetic probing, and from information provided by lithologic columns of wells, has allowed an in-depth study of the subsoil. From this, the configuration of the summit of the argillaceous package of the sub-basin of Chalco has been established considering the good resistive contrast of this unit in relation to the granular volcanic aquifer currently being exploited. On the other hand, the relief of the volcanic container was determined by processing gravimetric information, which was modelled by using the density values of samples taken from deep wells drilled by PEMEX.

Chemical and bacteriological analyses have provided knowledge on the quality of the groundwater, evidencing its deterioration. The wells in Santa Catarina and those in the vicinity of the landfill of Santa Catarina show alterations in diverse physico-chemical parameters. The presence of fecal coliforms in well samples indicate recent anthropogenic contamination. The most probable cause are the lixiviations from the Santa Catarina's landfill.

On the other hand, analysis and interpretation of a geoelectrical section, obtained from vertical electrical sounding (VES's) on the Mexico-Puebla highway, near the Santa Catarina landfill, allowed to identify, within a complex volcanic environment, a $9 \Omega\text{-m}$ conductive zone associated to a polluting plume generated at the final solid waste disposal at Santa Catarina. Application of electromagnetic methods (CSAMT) and analysis of conventional VES's performed at the geologic environment of the region occupied by the former lake did not yield the expected results to identify the polluting plume. The presence of large clay layers, mineralization of the saturating water, and geoelectric noise of the region (water pipes and high voltage power lines) pose technical difficulties for these studies, lacking adequate resistive contrasts between the polluting plume (very much diluted in the groundwater flow) and the resistive values of the granular volcanic sub-basin currently being exploited.

The interrelation of geophysical methods with other disciplines evidences the importance of systematic research in hydrogeology and of the processes involved in the pollution of the sub-basin systems.

This study is aimed at expanding the existing knowledge on the sub-basin of Chalco, as an integrated part of the basin of Mexico, from the point of view of the existing interrelation among hydrogeology, geophysics, and the environment.

INDICE

	Página
Resumen	vii
Abstract.	lx
CAPITULO I	
INTRODUCCION.	1
I.1 Antecedentes.	4
I.2 Objetivos.	7
I.3 Metas específicas.	8
CAPITULO II	
PROBLEMATICA AMBIENTAL.	10
II.1 Impacto ambiental.	11
II.2 Consideraciones para la realización de una evaluación de impacto ambiental.	12
II.2.1 Aspectos que deben contemplar las evalua- ciones de impacto.	13
II.3 Indicadores de impacto ambiental.	14
II.4 Clasificación de los factores ambientales.	17
II.5 Análisis de alternativas.	18
CAPITULO III	
LA CONTAMINACION DE LAS AGUAS SUBTERRANEAS.	20
III.1 Estimación del riesgo de contaminación.	21
III.2 La calidad del agua subterránea.	23
III.3 Principales actividades generadoras de conta- minantes.	26
III.3.1 Actidades en centros urbanos.	27
III.3.2 Actividades industriales.	28
III.3.3 Actividades agrícolas y ganaderas.	28
III.3.4 Actividades mineras.	29
III.4 Procesos de atenuación de contaminantes; el papel del suelo en ellos.	30
III.4.1 Importancia de la zona no saturada.	32
III.5 Hidrogeoquímica de algunos contaminantes im- portantes.	32

III.5.1 Compuestos nitrogenados.	33
III.5.2 El azufre y sus compuestos.	34
III.6 Criterios de contaminación del agua subterránea.	35
III.7 Papel epidemiológico del nitrógeno y microorganismos.	37

CAPITULO IV

LOS RESIDUOS SOLIDOS COMO FUENTE DE CONTAMINACION DE LAS AGUAS SUBTERRANEAS. 40

IV.1 Procesos de disposición de los residuos sólidos.	41
IV.1.1 Procesos mecánicos.	42
IV.1.2 Procesos térmicos.	42
IV.1.2.1 Pirólisis.	42
IV.1.2.2 Incineración.	43
IV.1.3 Procesos biológicos.	43
IV.1.4 El relleno sanitario.	46
IV.2 La interacción de los desechos sólidos con el suelo y el acuífero.	47
IV.3 Factores importantes en la formación de lixiviados; caracterización del mismo.	48
IV.3.1 Evolución de parámetros de lixiviados en rellenos sanitarios.	51
IV.4 Migración de lixiviados.	51

CAPITULO V

EL PAPEL DE LOS METODOS GEOFISICOS EN ESTUDIOS HIDROGEOLOGICOS Y DE CONTAMINACION. 58

V.1 Utilidad y empleo en México de los métodos geofísicos.	59
V.2 Programa de investigación hidrogeofísico.	60
V.2.1 Caracterización geológica.	61
V.2.2 Caracterización hidrogeológica.	62
V.2.3 Caracterización geofísica.	63
V.2.4 Caracterización hidrogeoquímica.	64
V.3 Metodología para un programa de monitoreo del agua subterránea.	65
V.3.1 Objetivos del programa de monitoreo.	67
V.4 Proyecto integral de monitoreo geofísico.	70
V.4.1 Prospección geoléctrica.	70
V.4.2 Prospección electromagnética.	75
V.4.2.1 Método de polarización inducida.	78

V.4.2.2 Método de campo magnetotelúrico.	79
V.4.2.3 Método audiomagnetotelúrico de fuente controlada (CSAMT).	83
V.4.2.4 Radar	85
V.4.3 Prospección gravimétrica.	86
V.4.4 Prospección magnética.	87
V.4.5 Prospección sísmica.	88
V.4.6 Registros geofísicos en pozos.	89
V.4.6.1 Registros eléctricos.	89
V.4.6.2 Registros radioactivos.	90
V.4.6.3 Registros sónicos.	90

CAPITULO VI

LA CUENCA DE MEXICO; EL ENTORNO DE LA SUBCUENCA DE CHALCO

VI.1 Marco geográfico.	94
VI.2 Marco geológico.	97
VI.2.1 Geología histórica y tectónica.	98
VI.2.2. Sucesión litoestratigráfica.	101
VI.3 Consideraciones acerca de la evolución del paisaje de la Cuenca.	103
VI.3.1 Obras hidráulicas.	107
VI.4 El sistema acuífero de la cuenca.	109
VI.4.1 Comportamiento hidrodinámico de las formaciones acuíferas.	109
VI.5 Caracterización geoelectrica de las principales unidades litoestratigráficas acuíferas.	111
VI.5.1 Línea APAN	114
VI.5.2 Línea IROLO	116
VI.5.3 Línea PACHO2	117
VI.5.4 Línea OTUMBA	117

CAPITULO VII

LA SUBCUENCA DE CHALCO

VII.1 Marco geográfico.	122
VII.2 Marco geológico y geomorfológico.	126
VII.2.1 Tectónica y sucesión litoestratigráfica.	127
VII.2.2 Aspectos petrográficos y geoquímicos.	128
VII.3 Esquema hidroestratigráfico de las formaciones acuíferas.	131
VII.4 Comportamiento hidrogeológico de las formaciones acuíferas.	133

VII.4.1 Acuitardo.	137
VII.4.2 Acuífero en explotación.	138
VII.5 Consideraciones sobre el agua disponible para infiltración..	139
VII.6 Vulnerabilidad del sistema acuífero.	145
VII.6.1 Riesgos geológicos e hidrogeológicos locales.	146
VII.6.2 Actividades antropogénicas.	147
VII.6.2.1 Subsistencia local.	148
VII.6.2.2 Crecimiento urbano.	149
VII.7 Identificación de fuentes potenciales de contaminación del agua subterránea en la región.	151
VII.7.1 El canal de la Compañía y la carencia de drenaje.	152
VII.7.2 El basurero de Santa Catarina; principal fuente de contaminación del agua subterránea en la subcuenca de Chalco.	153
VII.8 Indicadores de contaminación.	157
VII.8.1 Estudios bacteriológicos.	160
VII.8.2 Estudios hidrogeoquímicos.	161
VII.9 Prospección geofísica para estudiar el subsuelo y la contaminación del acuífero.	170
VII.9.1 Levantamiento geoelectrico.- Configuración de la unidad hidroestratigráfica arcillosa.	170
VII.9.1.1 Sección geoelectrica A-A'.- Modelo del proceso de lixiviación.	174
VII.9.2 Información gravimétrica.- Configuración de la superficie de la unidad litoestratigráfica volcánica.	178
VII.9.3 Información electromagnética.- Sondeos audiomagnetotelúricos; caracterización del medio.	182

CAPITULO VIII

DISCUSION	190
-----------	-----

CAPITULO IX

CONCLUSIONES	196
--------------	-----

CAPITULO X

REFERENCIAS	205
-------------	-----

ANEXOS GRAFICOS

Anexo I. Sondeos de la sección A-A' y sus modelos.	219
Anexo II. Sondeos electromagnéticos de CSAMT y sus modelos	225

APENDICES

Apéndice A. Otros indicadores de contaminación.	237
Apéndice B. Actividad microbiana - Factores que afectan la sobrevivencia y movimiento de microorganismos en suelo.	245
Apéndice C. Breve historia de la basura y de los lugares de disposición final en la ciudad de México.	253
Apéndice D. Estudios experimentales sobre lixiviados	259
Apéndice E. Principales Formaciones de la Cuenca de México y áreas adyacentes.	265

Lista de figuras

- Figura 2.1 - Acciones a desarrollar dentro de un proyecto de evaluación ambiental.
- Figura 3.1 - Esquema que permite relacionar el riesgo de contaminación del acuífero respecto a la carga de contaminante aplicada.
- Figura 3.2 - Principales procesos que atenúan y eliminan contaminantes en el subsuelo.
- Figura 5.1 - Esquema del dispositivo eléctrico para medir resistividad.
- Figura 5.2 - Dispositivo electromagnético CSAMT.
- Figura 5.3 - Gráfica de resistividad contra frecuencia y la profundidad de penetración (δ).
- Figura 6.1 - Mapa de ubicación de la cuenca de México y la subcuenca de Chalco.
- Figura 6.2 - Sección Geológica representativa de la Cuenca de México.
- Figura 6.3 - Evolución de la zona lacustre en el valle de México.
- Figura 6.4 - Régimen de flujo subterráneo de la parte sur de la Cuenca de México.
- Figura 6.5 - Ubicación de perfiles geoelectricos y su correlación litológica.
- Figura 7.1 - Mapa de la subcuenca de Chalco y su localización dentro de la cuenca de México.
- Figura 7.2 - Esquema geológico simplificado de la subcuenca de Chalco.
- Figura 7.3 - Resultados geoquímicos de las muestras obtenidas en diversos tipos de diagramas.
- Figura 7.4 - Corte geológico N-S realizado mediante la integración de registros geofísicos de pozos de la batería de Santa Catarina y la geología de los mismos.
- Figura 7.5 - Balance hídrico en la subcuenca de Chalco para los años de 1987 y 1988.

- Figura 7.6 - Acumulaciones someras de agua y crecimiento urbano en la zona.
- Figura 7.7 - Interior del basurero de Santa Catarina, observandose lixiviación en la parte inferior.
- Figura 7.8 - Mapa de ubicación de los SEV's, la sección geológica A-A', la batería de pozos y la ubicación de los sondeos electromagnéticos.
- Figura 7.9 - Configuración tridimensional de la sima de la unidad arcillo-arenosa y de la topografía de la región.
- Figura 7.10 - Sección geológica A-A'.
- Figura 7.11 - Mapa de anomalía de Bouguer de la subcuenca de Chalco.
- Figura 7.12- Configuración tridimensional del contenedor volcánico y de la topografía de la región.
- Figura 7.13- Pseudosecciones de resistividad aparente vs frecuencia.
- Figura 7.14- Secciones de resistividad aparente vs profundidad modeladas utilizando el algoritmo de Fisher.
- Figura D.1 - Resultados de estudios experimentales sobre lixiviados:
a) pH
b) Población bacteriana
c) DBO
- Figura D.2 - Resultados de estudios experimentales sobre lixiviados; concentración de materiales extraídos:
a) Hierro total
b) Cloruros
c) Calcio

Lista de Tablas

- Tabla 3.1 - Parámetros y constituyentes que deben ser incluidos en análisis de calidad del agua subterránea.
- Tabla 3.2 - Actividades generadoras de cargas contaminantes.
- Tabla 3.3 - Normas de calidad de agua potable en diferentes países.
- Tabla 4.1 - Porcentajes de los principales subproductos de la basura.
- Tabla 4.2 - Caracterización de lixiviados en más de 20 lugares de depositación de residuos sólidos en los Estados Unidos.
- Tabla 4.3 - Evolución temporal de parámetros de lixiviados en Brasil.
- Tabla 4.4 - Evolución temporal de parámetros fisicoquímicos de lixiviados en Brasil.
- Tabla 4.5 - Evolución temporal de microorganismos en basura urbana en Brasil.
- Tabla 6.1 - Correlación estratigráfica de la cuenca de México y áreas adyacentes.
- Tabla 6.2 - Niveles relativos de los antiguos lagos.
- Tabla 6.3 - Identificación geoelectrica de algunos tipos de rocas en la Cuenca de México.
- Tabla 7.1 - Resultados geoquímicos de muestras de rocas de la zona de estudio.
- Tabla 7.2 - Características de sitio de disposición final de Santa Catarina, D.F.
- Tabla 7.3 - Análisis del lixiviado del basurero de Santa Catarina recolectado en la parte central del mismo.
- Tabla 7.4 - Análisis de lixiviados en el sitio de disposición final de Santa Catarina.
- Tabla 7.5 - Análisis bacteriológicos efectuados en muestras de pozos cercanos al sitio de disposición final de Santa Catarina.
- Tabla 7.6 - Valores máximos, mínimos y promedios a lo largo de 18 muestreos químicos en pozos de la batería de Santa Catarina.

CAPITULO I

INTRODUCCION

Actualmente, el problema de la contaminación del medio ambiente se ha agravado, particularmente en lo referente al agua subterránea, tanto por su intensificación, como por su extensión geográfica.

Ya en los siglos XVIII y XIX se hablaba del problema de la contaminación, a nivel mundial, debido a grandes aglomeraciones humanas. En este período los volúmenes de residuos generados a nivel urbano son mínimos comparados con los actuales así como su nivel de toxicidad, ya que el contenido de desechos industriales era escaso y de carácter no tan contaminante (principalmente residuos sólidos inorgánicos, no sintéticos). En la década de los setenta la basura se depositaba durante años, sin tratamiento alguno en lugares cercanos a las concentraciones urbanas, se quemaba a cielo abierto o se arrojaba, a mares y ríos, generando focos de infección y contaminación.

La gravedad de la contaminación provocada por depósitos de basura, reside en la afectación que ésta puede llegar a tener en la calidad del agua subterránea. La biósfera como sistema autorregulador tiende a la estabilidad, es decir, a conservar sus rasgos esenciales ante posibles alteraciones del medio ambiente. De ahí, la necesidad de evaluar el impacto que sobre el medio ambiente pueden tener los lugares de disposición final de residuos sólidos. Algunos de los efectos producidos por este tipo de fuente son irreversibles. Su estudio permite proponer medidas preventivas.

El aumento de la contaminación parece mas bien relacionarse con los modelos actuales de desarrollo económico y con el proceso de urbanización que conduce a la formación de megalópolis. Desde este punto de vista, la tendencia en México no es diferente a la de

los otros países en vías de desarrollo: su población tiende a concentrarse en unas pocas ciudades, con densidades poblacionales altas y marcadas desigualdades sociales. En estas nuevas sociedades urbanas, dentro de las naciones del Tercer Mundo, el consumo de los recursos naturales se da de manera irracional, lo que redonda en una consecuente degradación del medio ambiente.

Las expectativas de crecimiento de la Ciudad de México, para el año 2000, son alarmantes. Cerca de 30 millones de personas vivirán en la cuenca de México, que ocupa unicamente el 0.03 % de la superficie del país y no se vislumbra que exista un cambio fundamental en el crecimiento industrial. Se requerirán cada vez más de insumos provenientes de otros lugares del país. Las fuentes de abastecimiento de agua para esta población no están bien definidas. Es fundamental una readecuación en las prioridades de uso del agua, reforzando la implementación de sistemas de tratamiento de aguas residuales para utilizarlas en procesos industriales, riego de áreas verdes y agricultura. Además, deben de ponerse en práctica, de manera estricta, controles en la generación, almacenamiento y disposición final de residuos sólidos y aguas residuales contaminantes.

En general, las actividades industriales y los procesos del desarrollo urbano son los que más inciden en problemas de contaminación ambiental, degradando paulatinamente la calidad del medio ambiente. Esta región no ha recibido la atención necesaria para proteger su entorno ecológico y actualmente estamos sufriendo los errores del pasado. Es hasta 1971, que el Gobierno Mexicano establece, dentro de la Secretaría de Salubridad, la Subsecretaría del Mejoramiento del Ambiente (SMA) (despues, Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología (SEDUE) y actualmente, en la Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL)), creándose las bases jurídicas y operativas para normar, coordinar y ejecutar programas específicos para prevenir y controlar la contaminación ambiental. Sin embargo, las situaciones producidas, ahora de difícil solución, por falta de planeación y control en el desarrollo urbano e industrial han generado problemas de difícil solución.

Una parte compleja de la problemática relacionada con el deterioro de los ecosistemas, la constituye la opinión pública, que en general ha sido heterogénea. La Ciencia, tal vez nunca sea el medio adecuado para poder concientizar a la gente sobre cambios en el medio ambiente, principalmente porque pocas veces un desastre ecológico produce efectos contundentes sobre la salud humana antes de que se hayan reconocido los efectos de la contaminación.

Por ejemplo, actualmente estamos convencidos que los niveles de contaminación, principalmente del aire, en la Cuenca de México, pueden ser medidos y que han llegado a niveles muy elevados y al mismo tiempo irreversibles, que implican necesariamente la legislación de medidas enérgicas, que deberán estar basadas en estudios serios y bien fundamentados, pero casi no nos preocupamos de la disposición final de residuos sólidos que constituye hoy día, un problema agobiante no solo en los países industrializados. El aumento de la población, aunado al desarrollo del proceso de urbanización, la creciente demanda de bienes de consumo y el incremento en los procesos industriales, determinan un aumento incesante en peso, volumen y contenido de los desechos producidos. Sus características, varían tanto para los distintos tipos de desechos sólidos, como también según la esfera y nivel de producción y consumo existente .

Los lugares de disposición final de residuos sólidos y la basura misma, constituyen entes de estudio de varias disciplinas científicas. Su papel como fuente potencial de contaminación de sistemas acuíferos, constituyen un ejemplo de los sujetos de estudio e investigación de la *Hidrogeofísica*.

El presente estudio pretende contribuir en la sistematización de técnicas y metodologías geofísicas e hidrogeológicas que permitan evaluar el impacto ambiental provocado por la contaminación del agua subterránea por la presencia de basureros.

Si la ciencia y la tecnología han de servir, con toda su capacidad, y como es debido, a la protección del medio físico, es necesario su participación en todo nuevo proyecto por emprender o los que ya se encuentren en desarrollo que produzcan problemas

ambientales. Esto implica la preparación de profesionistas, con una nueva visión, presupuesto necesario para los estudios de evaluación y acceso libre a todo tipo de información ya existente, que pueda ser relevante.

I.1 Antecedentes.

La Cuenca de México ha sido sujeto de estudio de diversas disciplinas y enfoques científicos. Desde 1925 se inicia una tradición en estudios de mecánica de suelos que ha perdurado hasta nuestros días y cuyo origen ha sido la hidrogeología de la Cuenca, a través de una de sus mas notables manifestaciones, los fenómenos de subsidencia. Con todo y que el planteamiento de estos estudios están íntimamente vinculados al sistema acuífero, éste no ha sido suficientemente estudiado.

Contrariamente a lo que parece, se conoce poco de la Cuenca de México. Se han efectuado muchos estudios pero no se han difundido adecuadamente, ni existe una sistematización de la información, que se encuentra dispersa, difusa y muchas veces contradictoria que requiere ser validada y corroborada.

Son numerosas las razones que explican o justifican este notable vacío de conocimientos, destacando la ausencia de grupos consolidados de investigación hidrogeológica, como consecuencia de una inadecuada planificación en la Educación Superior Nacional.

La investigación de los recursos hidráulicos subterráneos de la Cuenca, que alberga una de las mas grandes ciudades del mundo, conlleva no solo objetivos de tipo académicos, sino también sociales. Son muchas las incógnitas que aún faltan por despejar, aunque cada día son más las herramientas científicas y tecnológicas capaces de incrementar el conocimiento sobre la estructura subterránea y fenomenología asociada al agua subterránea de la Cuenca de México. Uno de los pioneros en estudios hidrogeológicos, con componente hidrogeoquímica es Molina Berbeyer, en ese entonces

investigador del Instituto de Geofísica, quien en 1956, presenta un estudio de la Subcuenca de Chalco.

Esta inquietud por el estudio del agua subterránea se ve reflejada cuando a partir de 1987, el Departamento de Recursos Naturales (DRN), del Instituto de Geofísica, de la UNAM, (IGF), inicia una serie de proyectos de investigación interdisciplinaria, englobados bajo el rubro de Aquifer Development (AD), con un importante financiamiento del International Development Research Council (IDRC), del gobierno canadiense, paralelamente a un par de estudios geofísicos, que la entonces Comisión de Aguas del Valle de México (CAVM) encomienda al DRN con la finalidad de incrementar el conocimiento de la geología del subsuelo de las subcuencas de Chalco y Apan (Rodríguez *et al.*, 1987, 1988). El Proyecto AD, en su primera fase, tuvo como objetivo el definir el marco geológico del sistema acuífero, su hidrodinámica y algunos parámetros que permitieran conocer el grado de contaminación del flujo subterráneo. Los resultados de esta fase se integraron en 1989, en un número especial (v.28, n.2) de la Revista Geofísica Internacional.

Los enfoques técnico-científicos de este macroproyecto, van de la presentación de un esquema actualizado de la geología (Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera, 1989), a un modelo de simulación del acuífero de la Cuenca de México (Herrera *et al.*, 1989), pasando por un esquema general del comportamiento hidrogeoquímico de las arcillas y la parametrización geoelectrica de las principales unidades hidroestratigráficas. Anteriormente, Durazo (1988), inicia una recopilación de la información hidroquímica existente en diversas dependencias e instituciones. El panorama reportado por él, no es contundente en cuanto a procesos contaminantes, ni tampoco en la identificación de fuentes contaminantes.

No obstante, los estudios realizados permiten tener noticias sobre la alteración de la calidad del agua de algunos pozos de la porción sur de la Subcuenca (batería de Tecomilt) y la asociación de acciones antropogénicas y fuentes bien definidas, como el

basurero de Santa Catarina, a procesos generadores de contaminación.

Posteriormente, a uno de los subproyectos derivados del multiproyecto, se integra una compleja investigación geofísica cuyo objetivo inicial es complementar y enriquecer el conocimiento del subsuelo, permitiendo cubrir la falta de información estratigráfica por la ausencia de pozos profundos. Surgen así, una serie de estudios geofísicos con variadas metas específicas (Aguas, 1989; Gutierrez, 1989; González Morán y Rodríguez, 1989; Ochoa, 1988; Rodríguez y Lara, 1988). A lo largo de estos estudios, se detectó la necesidad de estructurar un programa de investigación que pretende englobar y establecer la fusión e interacción de disciplinas, como son los métodos geofísicos que permiten conocer de manera indirecta el subsuelo, con otras, que son relevantes en estudios tradicionales del agua subterránea, impartiendo un carácter fundamentalmente ecologista, para identificar, clasificar y evaluar efectos negativos en el medio ambiente, así como la proposición de alternativas en la resolución de problemas del desarrollo, que generan contaminación y que en la práctica son inevitables, pero que deben tratar de evitarse, evaluando de antemano sus posibles efectos, tanto positivos como negativos.

Así, se estableció que los basureros activos de la Cuenca son las más importantes fuentes potenciales fijas de polución, así como una notable ausencia de estudios y programas indirectos sobre mecanismos de lixiviación y de monitoreo de plumas contaminantes.

Es en este contexto que se inicia una investigación tendiente a contribuir al estudio geofísico de plumas contaminantes en medios de transición geológica. Aunque en otros países se han realizado investigaciones de este tipo, no se han efectuado en ambientes geológicos como los de la Cuenca, que llegan a limitar y restringir el poder resolutivo de los métodos geoelectrónicos, los más usados en estos estudios. Cabe mencionar que los *History cases* reportados en la literatura especializada, se refieren a problemas en escala local, comparado con las dimensiones del área de estudio y ambientes geológicos bien conocidos, además de que la mayoría de

los casos, al contar con suficiente apoyo financiero, se ha podido generar información complementaria a través de la instalación de nidos piezométricos, sofisticados sistemas de análisis químicos y monitoreo químico vertical, solo por citar algunos de los aspectos más relevantes. Las dimensiones de las plumas contaminantes reportadas son de una docena de metros, en acuíferos someros suficientemente conocidos, mientras que en Chalco las dimensiones son de kilómetros y las profundidades del orden de la centena de metros.

El acceso a la información, para integrar este trabajo, ha sido difícil y muchas veces imposible, sobre todo aquella relacionada con problemas de contaminación y sus efectos. Sin embargo, algunas instituciones nos permitieron hacer uso de sus instalaciones y laboratorios, para la realización de análisis bacteriológicos, químicos y procesamiento de información geofísica. Su colaboración ha sido inapreciable.

I.2 Objetivos.

El estudio de mecanismos de contaminación de acuíferos generalmente, se realiza desde puntos de vista hidrogeológicos o geológicos mientras, que son relativamente recientes los enfoques geofísicos y de impacto ambiental. La investigación presentada pretende:

- a) Analizar el poder resolutivo de los métodos geoléctricos y electromagnéticos, en medios conductivos y
- b) definir el papel contaminante de una fuente bien definida - *el basurero de Santa Catarina* - como agente alterante de la calidad natural del agua subterránea de un multiacuífero, estableciendo la comunicación hidráulica de los lixiviados generados en el basurero y el agua subterránea del acuífero volcánico granular.

Los objetivos son entonces, de índole académica con una importante componente aplicada, ya que se propone un esquema metodológico de estudio del impacto ambiental de una fuente activa bien definida sobre un recurso renovable en explotación, cuya alteración en composición química puede afectar el abastecimiento de agua potable. Así, surge una gama de posibilidades y nuevas ideas, para el estudio e integración de información multidisciplinaria con metodologías geofísicas en la problemática ambiental. Esto implica la necesidad de desarrollar investigaciones confiables y el uso de nuevas tecnologías, que permitan el mejoramiento y manejo del medio que nos rodea, integrando resultados no solo geofísicos sino también geológicos, hidrológicos, climáticos e hidrogeoquímicos que deben ser manejados con criterios propios de las disciplinas de ciencias de la Tierra, Ingeniería Sanitaria y de Evaluación de Impacto Ambiental.

El propósito de seleccionar y/o definir como cuenca piloto la subcuenca de Chalco, es el de facilitar la implementación de los resultados presentados en otras cuencas intermontañas con características similares.

1.3 Metas específicas

Desde el punto de vista hidrogeofísico se plantean una serie de metas específicas de esta investigación, las cuales tienen una marcada connotación ambientalista.

Es necesario puntualizar el hecho de que éste estudio se desarrolla dentro del marco de un Posgrado en Geofísica, con una orientación hacia la problemática del agua subterránea, lo que implica que el enfoque metodológico sea preferencialmente geofísico. La multidisciplinariedad de este tipo de investigaciones implica la integración de una compleja y amplia gama de resultados que establecen la orientación y enfoque *hidrogeofísico*.

Como metas específicas se han planteado y propuesto las siguientes:

- a) Estudiar el poder resolutivo de los métodos geofísicos, principalmente los eléctricos y electromagnéticos en la detección y extensión de contaminantes en formaciones acuíferas, en medios conductivos.
- b) Proponer un modelo funcional para explicar la migración de lixiviados, desde una fuente contaminante, bien identificada, ubicada en un medio volcánico fracturado, comunicado hidráulicamente con un medio acuífero, volcánico granular.
- c) Proponer un esquema metodológico y de correlación geofísico-geológico e hidrogeoquímico que permita integrar información de estas disciplinas en la evaluación de impacto ambiental, en la calidad del agua subterránea, producida por una fuente potencial contaminante, bien caracterizada.

CAPITULO II

PROBLEMATICA AMBIENTAL

A partir de la década de los setenta surgió una preocupación generalizada por los problemas del deterioro ambiental, que aunque no eran nuevos ya presentaban otra dimensión no solo física sino también social.

La temática ambiental y ecológica, en países industrializados, trata principalmente la problemática relacionada con aspectos de contaminación derivada del desarrollo y expansión tecnológica y, en gran medida, a la asociada a las grandes concentraciones urbanas y centros y/o corredores industriales. Mientras que en países del Tercer Mundo o en vías de desarrollo, donde esta temática tiene un carácter mucho más amplio y donde intervienen todo tipo de factores socioeconómicos y políticos, amén de otros tecnológicos, derivados del subdesarrollo, se incorporan a los anteriores, el elevado crecimiento demográfico aunado a problemas sanitarios y falta de servicios, asentamientos humanos irregulares, creciente urbanización, destrucción de áreas verdes, etc. Estos problemas, son producto del desarrollo donde nunca se han considerado ni tomado en cuenta la componente ambiental, evitando el enfrentamiento entre crecimiento económico y protección del medio ambiente.

A la par de la problemática ambiental se han venido manejando una serie de conceptos como el de "calidad de vida" a medida que se proporcionan mejoras en la "calidad ambiental". El creciente interés por la preservación del medio ambiente ha dado lugar a una disciplina ambiental que contempla una serie de metodologías como la meteorología, geofísica, ecología, química, biología, física, matemáticas, hidrogeología, etc., y cuya finalidad es conocer y entender las interacciones físico-biológicas que conforman la biósfera.

Es fundamental, la necesidad de obtener conocimientos e información lo más completa y adecuada posible sobre el medio físico (natural) y contemplar las implicaciones, riesgos y efectos, que tendrían, sobre el medio ambiente, el desarrollo de centros urbanos, industriales u obras de servicio que realicen organismos públicos o privados. Los beneficios y costos para la comunidad deben de ser cuidadosamente evaluadas introduciendo, en cada proyecto de desarrollo, la componente ambiental.

II.1 Impacto ambiental.

Las actividades del ser humano ocasionan perturbaciones, en mayor o menor grado, en el medio ambiente que lo rodea. Se produce un impacto ambiental cuando nuestras acciones alteran o deterioran el ecosistema. La cuantificación de esta variable es fundamental en estudios ambientales, donde se trata de evaluar las consecuencias de una acción, estimando la calidad del medio ambiente que habría con o sin los efectos de esta acción. Su objetivo es proporcionar los medios necesarios para otorgar la atención necesaria a los aspectos ambientales dentro del marco de los procesos de planeación y toma de decisiones.

La evaluación de impacto ambiental implica estudios complejos encaminados a identificar, caracterizar y prevenir las consecuencias que ocasionaría la ejecución de acciones, sobre el ser humano y el entorno que lo rodea.

Los estudios de impacto ambiental se pueden dividir en dos ramas fundamentales:

La ecológica, que contempla los aspectos físicos, geológicos y biológicos y la parte, socioambiental que agrupa los aspectos socioeconómicos, políticos y culturales.

Es claro que estas evaluaciones deberían de realizarse antes de emprender cualquier proyecto, con la finalidad de planificar adecuadamente, de acuerdo a las normas ecológicas, las acciones a

realizar, aunque muchas veces priven factores de tipo social o económico que lo impidan. Estos criterios pueden aplicarse a las distintas fases del proyecto o inclusive en su etapa operativa. Sin embargo, lo mas usado, es la evaluación de impacto físico (aire, suelo, agua, etc) estudiando la incidencia de cierta emisión sobre la zona de influencia, dejando de lado la afectación a mediano y largo plazo sobre cadenas ecológicas.

Los estudios de impacto ambiental son una herramienta muy útil para apoyar resoluciones concretas en la toma de decisiones, a diferentes valoraciones de alternativas. Fundamentalmente, las evaluaciones de impacto deberían tener una función de tipo preventivo; sin embargo es muy difícil establecer una evaluación completa, integral, y la mayoría de las veces solo se establecen evaluaciones parciales o "estudios de impacto" sobre proyectos o acciones llevadas a cabo y/o en desarrollo.

II.2 Consideraciones para la realización de una evaluación de impacto ambiental.

Puesto que es difícil, por su complejidad y número ocuparse de todos los factores ambientales, la mayoría de los estudios ambientales toman en cuenta consideraciones de impacto físico, referentes a cambios o modificaciones en la calidad del aire, agua y suelo. Los factores físicos y biológicos son los mas importantes por su escala y producción de efectos.

La parte social, que contempla aspectos socioeconómicos y políticos es difícil de cuantificar y muchas veces su influencia debe considerarse, secundaria.

Por otra parte, los procesos tecnológicos afectan el medio ambiente natural en los aspectos físicos y biológicos y de manera fundamental en los aspectos socioeconómicos. Es por ello necesario la realización de estudios de impacto ambiental, ya que nos permiten contar con un diagnóstico global y una visión general de

la problemática a tratar. Deben examinarse cuáles acciones o proyectos pueden alterar o afectar "la calidad del medio ambiente" y por consiguiente, "la calidad de vida" del ser humano y que requieren una evaluación de impacto ambiental. Esta evaluación depende, muchas veces, de la problemática, conflictos que genere el proyecto con la comunidad y del grado de alteración en su sistema de vida y de los impactos físico, socioeconómico y político del proyecto.

Existen una serie de proyectos que antes de ser emprendidos deberían realizarse sus evaluaciones de impacto. Entre ellos podríamos citar: desarrollos industriales, agrícolas, ganaderos, químicos, alimentarios, mineros y otros asociados al crecimiento urbano.

II.2.1 Aspectos que deben contemplar las evaluaciones de impacto

Este tipo de proyectos deben contemplar desde su inicio una descripción y justificación de las acciones de los mismos, considerando:

- a) Caracterización del entorno y condiciones ambientales.
- b) Determinación de elementos impactantes.
- c) Identificación de factores y problemas geo - bio - físicos, socio-económicos, políticos y culturales.
- d) Definición de alteraciones significativas en el medio ambiente. Capacidad de absorción del medio al impacto generado.
- e) Consideración de indicadores de impacto, escalas de medición del impacto total.
- f) Descripción de la naturaleza de los posibles efectos ambientales, positivos y negativos.

- g) Alternativas a corto, mediano y largo plazo; análisis de la relación costo-beneficio de los mismos.
- h) Aceptación del proyecto o de una serie de recomendaciones sobre acciones correctivas.
- g) Repercusión socioeconómica y política del proyecto.

Todos estos aspectos, que deberían ser observados en la evaluación de impacto ambiental de cualquier problema, se pueden observar en el diagrama de flujo que se presenta en la figura 2.1.

Los impactos ambientales varían en intensidad y duración, dependiendo de la naturaleza de la acción. Por ello, para definir la naturaleza y dimensiones del impacto físico así como, para intentar prevenir o reducir, mediante algunas alternativas sus efectos es necesario conocer bien los factores contaminantes y el medio físico. Para ello, es necesario contar con información de calidad, interpretarla y analizar toda la serie de factores involucrados en el proceso.

II.3 Indicadores de impacto ambiental.

Consideraremos como indicadores de impacto ambiental algunos parámetros que proporcionen cierta medida de la magnitud del mismo, no solo en su aspecto cualitativo sino también en el cuantitativo.

Es fundamental, cada vez que se haga una evaluación de impacto que se realicen una serie de estudios que comprenderían la identificación de la causa y efecto del problema y la consideración de indicadores de impacto con el fin de estimar o calcular el efecto de éste, la interpretación de los mismos y cual sería la forma de prevenir los efectos ambientales.

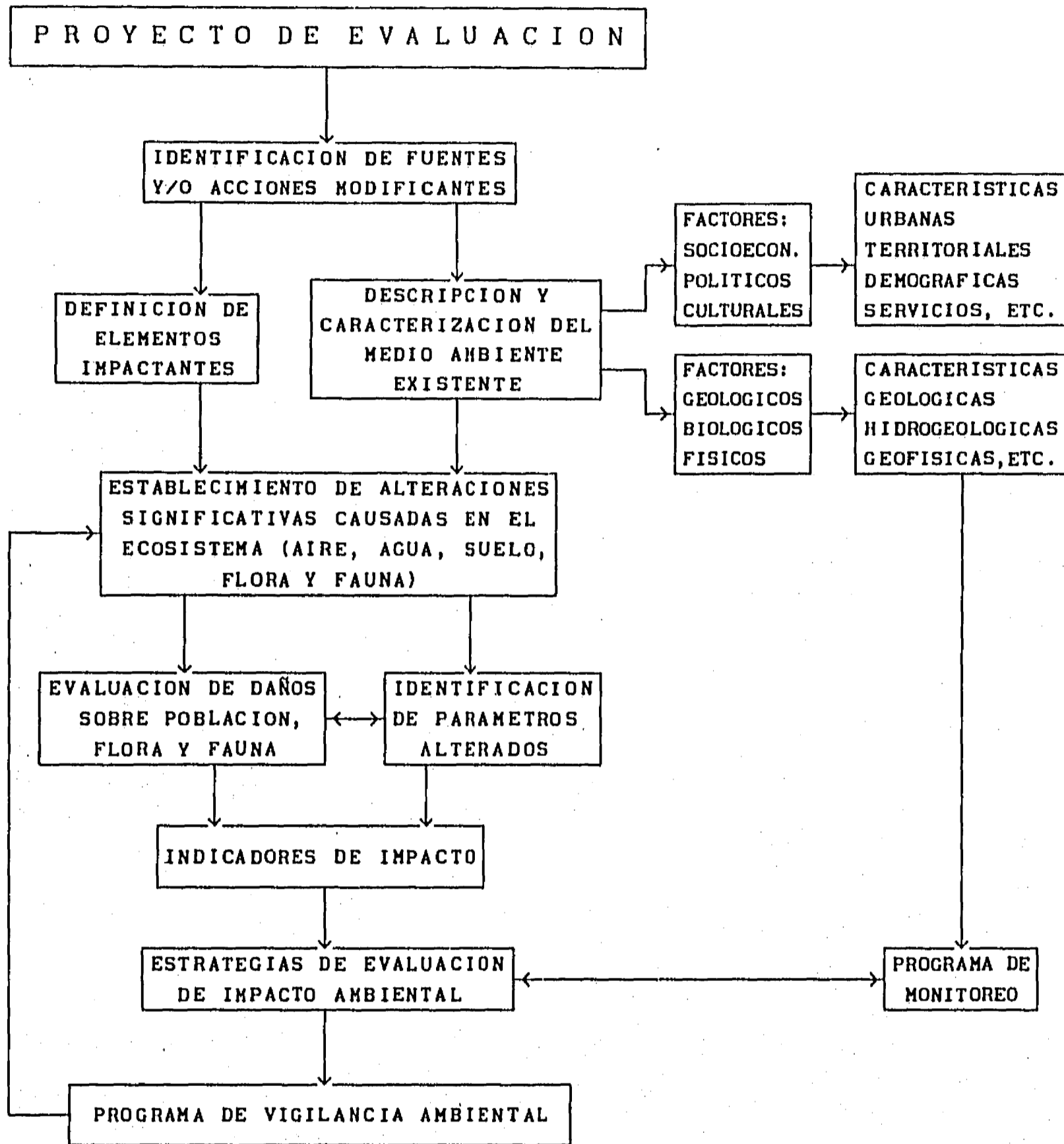


Figura 2.1.- Acciones a desarrollar en un proyecto de evaluación ambiental.

Los indicadores de impacto mas fáciles de utilizar son las normas o estándares de organismos internacionales, sobre la calidad de algunos elementos como el aire, el agua, el ruido, etc, y que hayan sido aprobados mediante una legislación. Así por ejemplo, las aguas residuales de alguna industria pueden ser evaluadas mediante indicadores de la calidad del agua, respecto a la emisión de ciertos contaminantes, residuos, uso del recurso, etc.; aunque muchas veces, no es fácil asignar un peso relativo a los indicadores de impacto.

Una evaluación, requiere identificar los impactos producidos por un proyecto concreto determinando sus causas y efectos. Además, es necesario examinar las alternativas tecnológicas mediante programas concretos y establecer metas específicas para estimar los impactos que pudieran generar las distintas alternativas.

Muchas veces, la falta de información requiere realizar investigaciones adicionales con el fin de evaluar adecuadamente un proyecto. Debe recalcarse, que estas evaluaciones son costosas y en ocasiones de larga duración, requiriendo gran información con el fin de correlacionar la interacción humana con el medio.

Aunque muchas de las evaluaciones de impacto ambiental se realizan en países industrializados, deben tener la misma aplicación en países en vías de desarrollo e incluso más, en estos últimos. Estas evaluaciones, no solo pretenden determinar las características físicas y biológicas de una región y sus condiciones socioeconómicas y culturales, sino también elegir la mejor alternativa para un proyecto o acción determinada, estableciendo un balance de las posibles consecuencias o deterioros de impacto biofísico, que ocurrirían mediante una u otra alternativa planteada. Una de las consecuencias de una evaluación de este tipo podría corregir impactos físicos, como sería la contaminación generada por un proyecto, a un precio relativamente barato si las medidas correctivas se aplican como parte inicial del mismo.

En conjunto, una evaluación de impacto físico intenta analizar un sistema complejo, constituido por el medio ecológico natural y

los efectos ocasionados por las acciones producidas por el hombre. Por ello es necesario encontrar un modelo, lo mas representativo posible, del comportamiento del sistema, intentando reproducir las características, condiciones y restricciones, del ecosistema.

Por ello, es necesario determinar la magnitud del impacto físico, estimando el alcance y profundidad de la evaluación, realizando un estudio preliminar que permita cuantificar, si el impacto es grande o pequeño. La mayor o menor intensidad del impacto físico, dependerá:

- a) Del carácter de la acción misma.
- b) De la vulnerabilidad ecológica del sitio donde se realiza la acción.
- c) De la calidad ecológica que tenga el lugar donde se realiza el proyecto.

II.4 Clasificación de los factores ambientales.

Los factores ambientales se pueden clasificar en dos grandes categorías: fijos y variables (Ran *et al.*, 1980).

Los primeros no pueden ser modificados por las acciones del hombre, como podrían ser las condiciones y características físicas del lugar (condiciones climáticas, geológicas, hidrogeológicas, etc).

Entre los segundos factores, asociados directamente con acciones del hombre, podrían mencionarse: el tipo de infraestructura existente o por generarse, tamaño, volúmenes de residuos sólidos o líquidos asociados y elementos contaminantes asociados a ellos, calidad y características del medio ambiente receptor, número de habitantes en los alrededores y las características socio-económicas de la población, vulnerabilidad del medio, impacto físico que el medio pueda absorber, etc.

Para resolver un problema hay que conocerlo y estimar las

consecuencias ambientales que ocasionaría un proyecto en un lugar específico, logrando que el desarrollo se planifique considerando las variables ambientales.

Las evaluaciones de impacto ambiental deben realizarse por equipos multidisciplinarios (ingenieros, economistas, físicos, médicos, etc). Deben contar con información real, rigurosa y objetiva del impacto ambiental de determinados programas de desarrollo y/o generados por el desarrollo del crecimiento demográfico.

Estos estudios deben de ser sometidos a las autoridades competentes y a la opinión pública.

Es necesario frenar una serie de deterioros irreversibles en el medio ambiente. La erosión, los cambios climáticos, la destrucción inmoderada de bosques y selvas, el mal manejo de nuestros recursos hídricos, etc., son algunos ejemplos. Toda esta problemática debe fomentar, por una parte, estudios del medio natural y por otra, del medio social, que pese a su complejidad debe estudiarse en un marco integral y en forma sistemática a través de evaluaciones de impacto ambiental.

II.5 Análisis de alternativas

Los modelos de planeación permiten seleccionar alternativas viables que pueden ser implementadas para controlar la movilidad de una pluma contaminante. La solución obvia es la clausura de pozos degradados o reubicar los que estén próximos a la fuente. Cuando el abastecimiento de agua depende fuertemente de los pozos involucrados, hay que considerar otras alternativas que permitan la explotación racional del sistema. El diseño de políticas de extracción controlando los regímenes de extracción, optimizando la relocalización de obras, proponiendo estrategias de recarga artificial o técnicas de rehabilitación química de acuíferos pueden ser analizadas a través de modelos. Las soluciones que pueden ser

propuestas, vía programas preventivos o correctivos, a las autoridades encargadas del manejo y administración del recurso, tendrán entonces un respaldo técnico-académico que justifique su implementación. Un análisis de costo-beneficio tiene que ser considerado, pensando en el agua como generador de riqueza que puede, a mediano plazo, proporcionar recursos que permitan hacerle frente a los problemas que conlleva el abastecimiento de agua.

CAPITULO III

LA CONTAMINACION DE LAS AGUAS SUBTERRANEAS

Los procesos de alteración de la calidad natural del agua han existido siempre, aún antes de la aparición del ser humano en nuestro Planeta. Sin embargo, el hombre no sólo contaminó el ambiente, sino que propició la modificación y deterioro de los sistemas ecológicos originales, alterando el equilibrio existente.

Dada la relevancia que presenta el agua para la sobrevivencia de la especie humana, se podría pensar en la importancia que tiene prevenir el deterioro de la calidad del agua subterránea, protegiendo los acuíferos de microorganismos patógenos y sustancias tóxicas. Sin embargo, esta preocupación no es tangible aún en países como México, donde grandes centros urbanos son abastecidos, primordialmente por agua subterránea, principalmente porque la migración de contaminantes, a partir de fuentes poluentes bien definidas, puede resultar un proceso lento, incluso de muchos años, antes que el impacto total del efecto de algún contaminante sea significativo. Otro factor, que contribuye a este problema está presente en la adquisición e interpretación de información disponible, sobre todo de análisis químicos confiables sobre la calidad, actual y pasada, del agua subterránea, principalmente por falta de capacidad de los laboratorios y el costo de los análisis, evitándose el monitoreo de microorganismos patógenos, metales pesados, compuestos orgánicos, etc.

A pesar del rol clave, que juega el agua subterránea en el abastecimiento de agua potable, no se ha proporcionado una atención detallada al deterioro del medio ambiente y a los procesos de transporte de contaminantes, existiendo una despreocupación general acerca del riesgo de contaminación de los acuíferos y su impacto, no solo físico sino también social y económico, por el excesivo

costo que ello representa o la imposibilidad de rehabilitar el acuífero.

Dada la complejidad de factores, que afectan el transporte de contaminantes en el agua subterránea, es fundamental la realización de investigaciones hidrogeológicas e hidrogeoquímicas, relativamente caras, para evaluar el riesgo de contaminación de las formaciones acuíferas. Normalmente, estos estudios son llevados a cabo con recursos humanos limitados y la mayoría de las veces con información escasa, difusa y mal organizada.

La magnitud real del problema de contaminación del agua subterránea, relacionado con actividades humanas, es prácticamente desconocida para la sociedad debido a la falta de información.

III.1 Estimación del riesgo de contaminación

La estimación del riesgo de contaminación puede servir para determinar la distribución de fuentes o actividades contaminantes, estableciendo líneas de investigación, muestreo y análisis de agua y en algunos casos, la perforación de piezómetros y el monitoreo de campo adecuado para clasificar la vulnerabilidad a la contaminación del acuífero.

Foster (1987), define el riesgo de contaminación del agua subterránea como la interacción entre (figura 3.1):

- a) La carga contaminante que es o será aplicada al subsuelo por actividades antropogénicas.
- b) La vulnerabilidad del acuífero, a la contaminación, por las características naturales del medio.

Este parámetro, representa la probabilidad de que las aguas subterráneas se contaminen con concentraciones por encima de las normas establecidas por la Organización Mundial de la Salud (OMS) para agua potable.

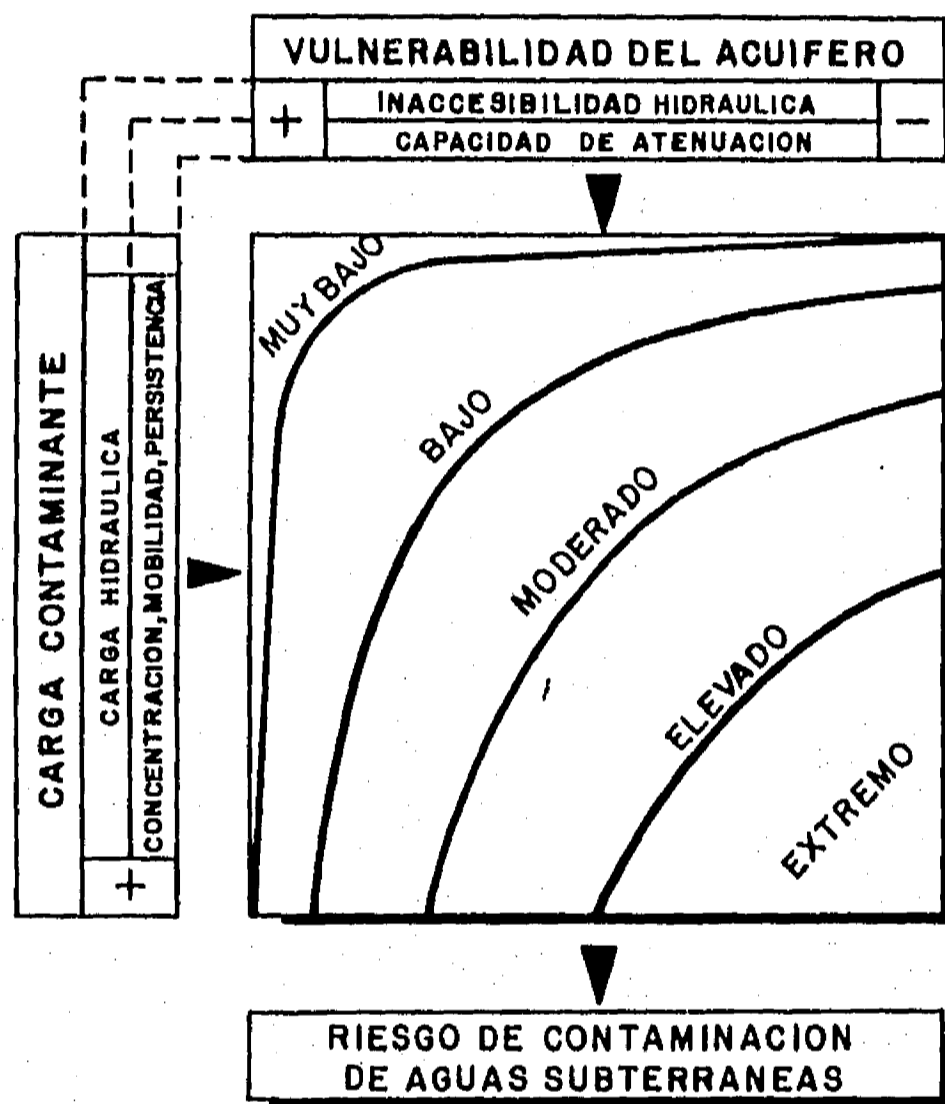


Figura 3.1 Esquema que permite relacionar el riesgo de contaminación del acuífero respecto a la carga de contaminante aplicada.

(Tomado de Foster, 1987.)

El esquema anterior, muestra que aunque la carga contaminante sea poco significativa se puede obtener una alta vulnerabilidad, sin riesgo de contaminación y viceversa. El concepto vulnerabilidad a la contaminación del acuífero, es utilizado para representar una serie de características intrínsecas que determinan su sensibilidad para ser adversamente afectado por una carga contaminante impuesta (Foster, *op. cit.*). Cualquier acuífero es vulnerable a la acción de fuentes contaminantes, persistentes, durante largos periodos de tiempo.

III.2 La calidad del agua subterránea.

La mayoría de las políticas y legislación, existentes en cada país, sobre la contaminación del agua subterránea están basadas en criterios, sobre calidad de agua potable, establecidos por la OMS y la EPA (Environmental Protection Agency). Estos criterios están basados, en primer lugar, en el riesgo que puede representar para la salud (efectos tóxicos, cancerígenos y/o mutagénicos) y en forma secundaria, en aspectos organolépticos (color, sabor, olor) que influyen en la aceptación del agua por el consumidor.

Entre los constituyentes inorgánicos presentes en el agua que se consideran nocivos para la salud, están los nitratos por su alta movilidad y estabilidad en los sistemas aeróbicos del agua subterránea. Otros constituyentes presentes, muchas veces por causas naturales, son los fluoruros y en ocasiones en menor grado, el arsénico; otras veces, se presentan procesos de contaminación por cloruros, sodio o sulfatos. Metales pesados, peligrosos, como cadmio, plomo, mercurio, cromo, etc, pueden migrar significativamente, cuando las condiciones hidrogeológicas lo permiten, en sistemas subterráneos con bajo pH. En cuanto a los compuestos orgánicos, parecen ser ya una seria amenaza para el agua subterránea y la salud, aunque muchas veces no se tienen suficientes evidencias médicas de sus efectos. Actualmente, los que presentan mayor potencial contaminante, son algunos compuestos de

gran uso industrial como son los alcanos, alquenos y bencenos clorados, relativamente solubles en agua y que no presentan una rápida degradación en el suelo (Foster, *op. cit.*).

En relación con microorganismos patógenos en el agua, los criterios establecidos por la OMS establece que el agua no es satisfactoria si se encuentran bacterias indicadoras, como son las coliformes fecales en muestras de 100 ml de agua.

Así, la evaluación de la calidad del agua dependerá básicamente, de dos aspectos: las concentraciones de sus componentes, para no causar efectos dañinos sobre la salud, y el uso que se dé a este recurso. Dada la gran variedad de contaminantes existentes, la calidad del agua puede evaluarse en términos de una amplia gama de parámetros y constituyentes que pueden ser agrupados en cuatro grandes categorías: química, biológica, física y radiométrica. Everett (1984), propone una serie de parámetros, dentro de estas categorías que permiten evaluar la calidad del agua subterránea (tabla 3.1).

En general, las aguas subterráneas provienen de la precipitación y de escurrimientos superficiales, adquiriendo a su paso por el suelo, sustancias químicas cuyas concentraciones pueden ser alteradas por reacciones fisicoquímicas o biológicas.

La calidad del agua subterránea es modificada directa, o indirectamente también por procesos biológicos. Organismos de una o más células que viven en el agua subterránea, están muy bien adaptados para que su metabolismo utilice los sólidos disueltos y material suspendido liberando productos de su metabolismo. Algunos cambios en las sales solubles del suelo, se realizan indirectamente a través de procesos microbianos y sustancias insolubles, así como por el retiro temporal de nutrientes, por plantas superiores, y el incremento de CO_2 contenido en el aire del suelo a través de la respiración de las raíces y la actividad microbiana. Finalmente, los desechos humanos y animales contribuyen también, al abastecimiento de sales solubles. Prácticamente, no existe lugar en la superficie terrestre donde no exista actividad orgánica.

<u>QUIMICOS - ORGANICOS</u>	<u>QUIMICOS - INORGANICOS</u>
(DBO)	Acetres y grasas
(DQO)	(O ₂)
Fenoles clorados	pH
Herbicidas	(PO ₄)
Detergentes	(K)
Carbon orgánico total	(Se)
Organofosforados	(Ag)
Pesticidas	(SiO ₂)
Fenoles	(Na)
Taninos y ligninas	Sólidos disueltos
	Sólidos suspendidos
<u>QUIMICOS - INORGANICOS</u>	(Sr)
Acidez	(SO ₄)
Alcalinidad	(S)
(Al)	(SO ₃)
(NH ₄)	(Sn)
(Sb)	(Tl)
(As)	(V)
(Ba)	(Zn)
(Be)	<u>BIOLOGICOS (Bacteriológicos)</u>
(HCO ₃)	Coliformes
(B)	Coliformes fecales/100 ml
(Br)	Estreptococos fecales/100 ml
(Cd)	
(Ca)	<u>FISICOS</u>
(CO ₃)	Color
(Cl)	Olor
(Cr)	Temperatura
(Co)	Turbiedad
Conductividad	<u>RADIOLOGICOS</u>
(OH)	(¹⁴⁰ Ba)
(I)	(¹⁴¹ Co, ¹⁴⁴ Co)
(Fe)	(¹³⁴ Cs, ¹³⁷ Cw)
(Pb)	Espectrometría gama
(Li)	(¹³¹ I)
(Mg)	(²³⁹ Np)
(Mn)	(Ra)
(Hg)	(Th)
(Mo)	(³ H)
(Ni)	(U)
(NO ₂)	
(NO ₃)	
(N)	

Tabla 3.1 Parámetros y constituyentes que deben ser incluidos en análisis de calidad del agua subterránea.
(Modificado de Everett, 1984).

La calidad del agua puede estar sujeta a cambios con o sin la intervención del hombre. El impacto de las actividades humanas, en el ciclo hidrológico ocasionan una serie de complejas e interrelacionadas modificaciones en la calidad natural del agua. Sin embargo, es poco práctico medir las características primordiales relacionadas con la calidad del agua, puesto que existen gran número de parámetros para realizar esta evaluación y que los posibles contaminantes potenciales pueden ser limitados. Por esta razón es preferible realizar la estimación de unos pocos parámetros y constituyentes que son suficientes para servir de indicadores de procesos de contaminación (Everett *op. cit.*, Lamb, 1985). La selección de los parámetros a considerar, tomando en cuenta las concentraciones naturales, la conservación de las muestras y la elección de los métodos analíticos a emplear involucran un arduo trabajo.

III.3 Principales actividades generadoras de contaminantes.

Existen una amplia gama de actividades humanas que generan cargas contaminantes, pero puede decirse que sólo unas cuantas, de una extensa lista, son responsables de riesgo máximo de contaminación en un lugar específico. Estas actividades, pueden englobarse en cuatro rubros principales (tabla 3.2).

PRINCIPALES ACTIVIDADES QUE GENERAN CARGAS CONTAMINANTES
a) Provenientes de actividades en centros urbanos.
b) Provenientes del desarrollo industrial.
c) Provenientes de actividades agrícolas y ganaderas.
d) Provenientes de procesos mineros.

Tabla 3.2 - Actividades generadoras de cargas contaminantes.

III.3.1 Actividades en centros urbanos

El complejo panorama de actividades domésticas que se presentan en los centros urbanos, representan fuentes potenciales de contaminación de las aguas subterráneas, principalmente por la alta concentración de materia orgánica que contienen sus descargas.

Generalmente asociada a problemas en la red de alcantarillado, drenaje y desagüe, a afluentes que reintegran los desechos líquidos municipales al medio ambiente, la mayoría de las veces sin tratamiento previo. Una vez que las aguas residuales se incorporan en los cuerpos receptores o se infiltran directamente en el suelo, la multiplicación de microorganismos en el agua ayuda a estabilizar la materia orgánica presente, dependiendo del tiempo y condiciones aerobias o aneaeobias de la corriente.

En este tipo de aguas, los compuestos nitrogenados se encuentran en altas concentraciones y en esas condiciones, los virus y bacterias encuentran condiciones adecuadas habiéndose detectado hasta profundidades mayores de 250 metros (Freeze and Cherry, 1979).

Otras fuentes potenciales, del desarrollo urbano están presentes en los lugares de depositación de residuos sólidos, donde se encuentran toda clase de compuestos químicos y materia orgánica que pueden ser arrastrados hacia el subsuelo por la infiltración del agua de lluvia. Las aguas en lugares donde han existido o existieron lugares de depositación de residuos sólidos, presentan contaminación por nitratos (Freeze and Cherry, *op. cit.*).

La industria de servicio, en pequeña escala, relacionada con gasolineras, talleres mecánicos, lavanderías, etc, también representan fuentes de polución bien definidas.

III.3.2 Actividades industriales

Practicamente, no hay industria que no haga uso de agua en alguna parte de sus procesos, ya sea como solvente, como medio para reacciones químicas, lavado, etc. Mucha del agua descargada, presenta una composición de acuerdo al uso y naturaleza del proceso involucrado. La actividad de tipo industrial genera altas concentraciones de contaminantes, aunado al problema de disposición de líquidos y residuos sólidos derivados de diferentes procesos que son almacenados en lagunas o colocados en la cercanía de la empresa. Muchas veces, las aguas residuales producidas son descargadas a afluentes de ríos o arroyos.

III.3.3 Actividades agrícolas y ganaderas

En lo concerniente a las actividades agrícolas y ganaderas, estas pueden causar gran influencia sobre la calidad del agua, principalmente las referentes al riego, uso de nutrientes y/o pesticidas y a la disposición de desechos animales (Freeze and Cherry, *op. cit.*).

En actividades de riego donde se utilizan aguas residuales, con altos contenidos de materia orgánica, provenientes de actividades domésticas, se encuentran gran cantidad de microorganismos (bacterias, hongos, virus, etc.) que pueden encontrar condiciones favorables para su desarrollo y reproducción existiendo la posibilidad, si las condiciones del subsuelo lo permiten, de poder alcanzar la zona saturada incorporándose al flujo del acuífero. En particular, la irrigación degrada la calidad del agua debido a la evapotranspiración que concentra las sales.

El nitrógeno, en sus diferentes formas, es el elemento que causa más efectos sobre los mantos acuíferos. En países poco industrializados los desechos animales son utilizados como

fertilizante orgánico. Reportes acerca de la producción de desechos, en granjas ganaderas, en los Estados Unidos, indican para 1965, 1138 millones de toneladas de desechos sólidos y 435 millones, para desechos líquidos (Millar et al., 1981). También las actividades de riego con aguas residuales pueden incorporar elementos tóxicos al suelo y grandes concentraciones de compuestos nitrogenados.

El nitrógeno en forma de NO_3^- (nitratos) se encuentra entre los constituyentes inorgánicos, considerados por la OMS como adversos para la salud. Se encuentra ampliamente distribuido, y por su gran movilidad y estabilidad en sistemas aerobios causa problemas de contaminación en lugares de tierras de cultivo (Foster e Hirata, 1988). En aguas poco profundas, la presencia de nitratos se debe principalmente a lixiviación de fertilizantes, abonos animales y filtraciones de fosas sépticas. En cambio, las cantidades de amonio y nitrógeno orgánico se presentan en concentraciones bajas. En otros casos, la oxidación y lixiviación del nitrógeno orgánico del suelo para convertirse en nitratos se realiza mediante procesos bioquímicos (Mosey, 1980).

III.3.4 Actividades mineras

Los problemas de polución, asociados con actividades mineras dependen preferentemente del tipo de material extraído y del proceso industrial empleado. Las minas de carbón, son contribuyentes principales, aunque también en menor grado son importantes las de minerales metálicos para producción de hierro, cobre, zinc, y plomo.

En depósitos minerales asociados con sulfuros, principalmente pirita (FeS_2), los procesos de oxidación por contacto con agua producen sulfato ferroso y ácido sulfúrico en solución. Con el tiempo, el resultado de éste proceso es la incorporación de esta solución en el agua subterránea causando variaciones en el pH e

incrementos en sulfatos y contenidos de fierro (Millar *et al.*, *op. cit.*).

Por otra parte, durante la molienda se añaden cal, arsénico, cianuro, y otros materiales orgánicos que al abandonarse los jales pueden incorporarse al flujo subterráneo por lixiviación.

III.4 Procesos de atenuación de contaminación; el papel del suelo en ellos.

El suelo juega un papel importante en la atenuación de gran número de contaminantes del agua. Los procesos involucrados en la atenuación de los contaminantes como la retardación, por absorción, continúan a profundidad aunque a menor escala. La dispersión hidrodinámica asociada con el flujo subterráneo ocasiona la dilución de contaminantes móviles, principalmente en la zona saturada.

La mayoría de los procesos que atenúan y eliminan contaminantes en el terreno (subsuelo), son mucho más efectivos en la capa del suelo biológicamente activa (figura 3.2), especialmente por la cantidad de bacterias presentes y el contenido de arcilla y material orgánico. El grado de atenuación de contaminantes, dependerá de las características del suelo y las condiciones hidrogeológicas del área de estudio y variará de acuerdo, al tipo de contaminante y el proceso involucrado (Freeze and Cherry, *op. cit.*).

Por otra parte, dependiendo de las condiciones climatológicas, el transporte de contaminantes de la superficie del suelo al nivel freático, tiende a ser un proceso lento en muchos acuíferos. Los efectos de deterioro, en la calidad del agua, pueden tardar muchos años. El riesgo de contaminación, significativo, puede presentarse en acuíferos no confinados, especialmente cuando el nivel freático se encuentra muy superficial.

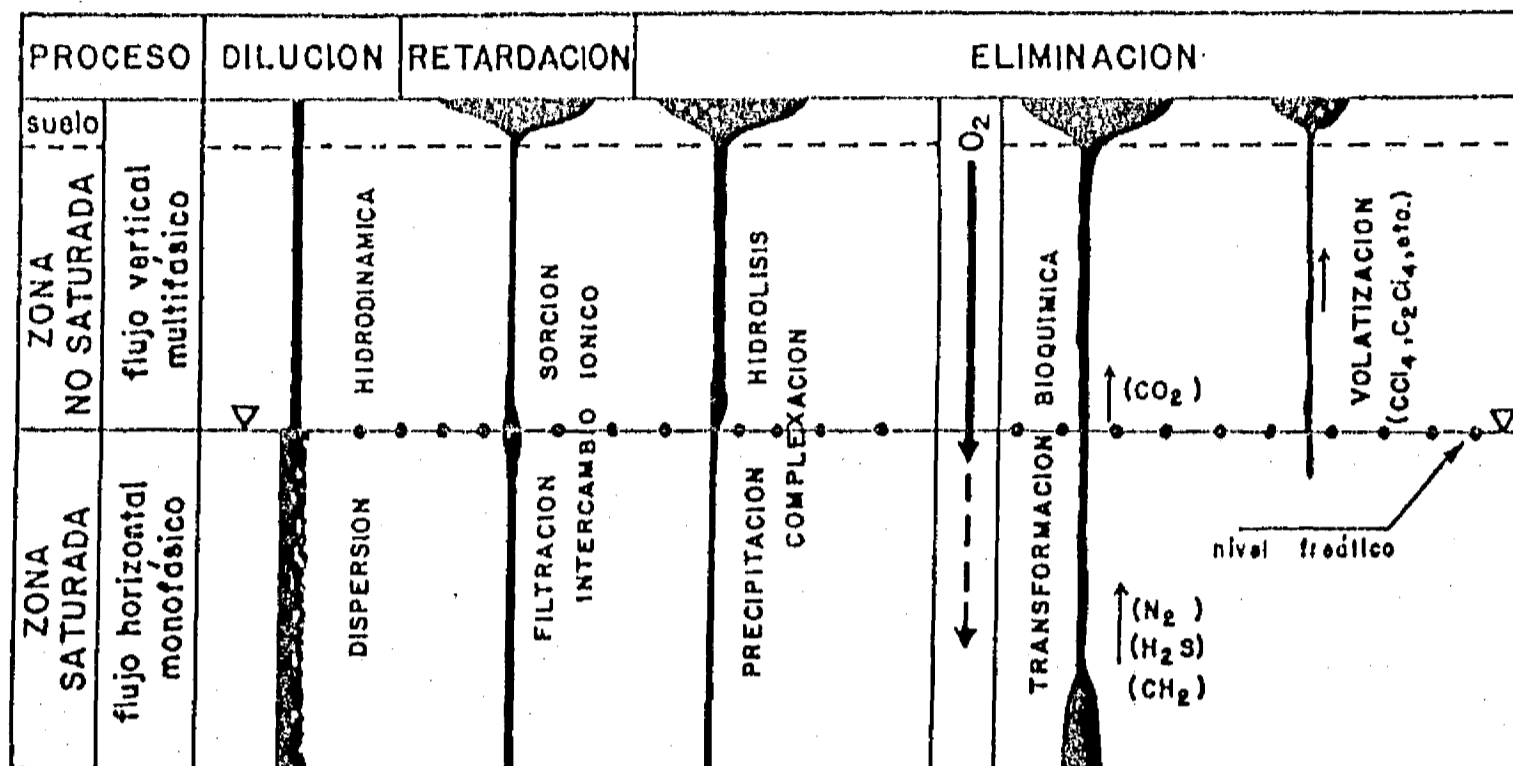


Figura 3.2-Principales procesos que atenúan y eliminan contaminantes en el subsuelo.
(Modificado de Foster, 1987.)

El grosor de la línea correspondiente indica la importancia relativa del proceso.

No se debe, tampoco olvidar la posibilidad de eliminación de contaminantes durante su transporte por el suelo mediante procesos de degradación bioquímica y/o reacción química. Otro fenómeno importante es la sorción, que permite incrementar el período de eliminación de contaminantes afectando las variaciones temporales de concentración del contaminante.

III.4.1 Importancia de la zona no saturada

Esta región, merece especial atención porque su ambiente favorece la atenuación y eliminación de los contaminantes, actuando como un importante filtro natural que debe ser tomado en consideración para evaluar la vulnerabilidad del acuífero. El flujo en la zona no saturada es normalmente lento. En los poros más pequeños, con mayor superficie específica, tienen lugar procesos aerobicos en condiciones alcalinas. Aquí se detienen, y eliminan, la mayor parte de microorganismos y se atenúan cantidades importantes de metales pesados y otros compuestos inorgánicos mediante procesos de precipitación, sorción, intercambio catiónico y biodegradación de hidrocarburos y compuestos orgánicos.

En el caso de contaminantes persistentes y móviles, la zona no saturada no ofrece ninguna atenuación beneficiosa, sólo ocasiona la retardación de la carga contaminante al nivel freático. El grado de atenuación, de muchos de los contaminantes, dependerá del tiempo de recorrido o permanencia en la zona no saturada, en función de la tasa de infiltración anual por precipitación y del promedio de humedad en la zona (Foster, 1985a).

En general, todos estos procesos continúan, en la zona saturada del acuífero, sea este libre o confinado, pero a niveles mucho menores. Aquí, la reducción de contaminantes depende, fundamentalmente de la dilución resultante de la dispersión hidrodinámica.

III.5 Hidrogeoquímica de algunos contaminantes importantes

Ciertos grupos químicos, con diferentes propiedades hidrodinámicas, entre los que destacan los compuestos nitrogenados y del azúfre, representan contaminantes potenciales del agua subterránea.

Dependiendo de las condiciones del medio, se producen una serie de reacciones y procesos, generalmente con ayuda de microorganismos y presencia de materia orgánica que establecen el comportamiento de los diferentes contaminantes.

III.5.1 Compuestos nitrogenados

La más común y principal forma contaminante del nitrógeno, que se encuentra en el agua subterránea, son los nitratos (NO_3^-). El nitrógeno disuelto también se presenta, principalmente, en forma de amonio (NH_4^+), amoníaco (NH_3) y nitritos (NO_2^-).

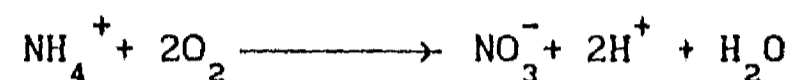
En el ciclo del nitrógeno, además de bacterias especializadas como las nitrificantes y desnitrificantes, están involucrados otros tipos de bacterias, estreptomicetos y hongos. La reducción del nitrato, se inicia con la presencia de sustancias orgánicas con contenidos de oxígeno de 0.5 mg/l a través de la acción de microorganismos nitrato - reductivos y desnitrificantes. Los nitratos, se forman como el primer producto de la reducción siendo parcialmente degradado por organismos desnitrificantes a nitrógeno elemental que escapa en el aire.

Las concentraciones de nitratos no están influenciadas por la solubilidad, ya que la forma aniónica de los nitratos es muy móvil en el agua subterránea. En aguas muy oxidantes los nitratos se mueven con poca retardación, el oxígeno disuelto en el agua les permite recorrer grandes distancias.

Otras bacterias, forman amoníaco de nitritos que también puede ser formado por degradación microbiana de compuestos orgánicos que contengan nitrógeno. Bajo condiciones aerobias, el amoníaco es oxidado a nitrito y nitrato por bacterias nitrificantes como *Nitrosomona* y *Nitrococcus* (Schoeller, 1962), produciéndose las siguientes reacciones:



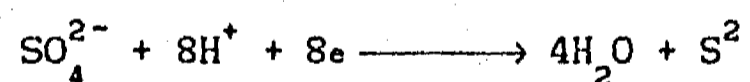
El amoníaco, como contaminante, presenta el problema de ejercer una demanda muy alta de oxígeno (mas de 4.5 veces su propio peso para la oxidación) de acuerdo con la siguiente reacción.



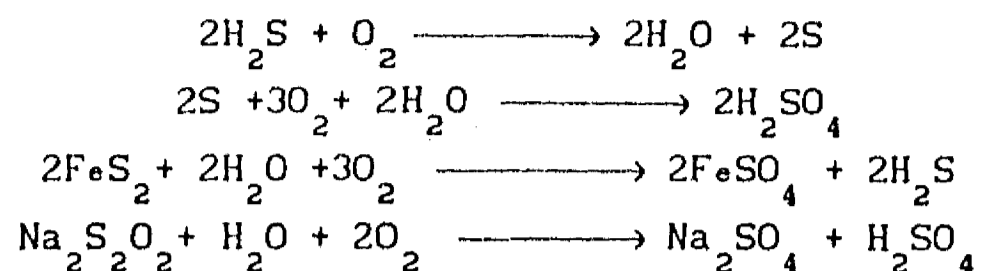
Este proceso, llamado nitrificación es la base de un proceso biológico de oxidación.

III.5.2 El azufre y sus compuestos

Una reacción característica, en la zona saturada es la catálisis microbiana de la reducción de sulfatos por miembros de los organismos anaerobios del grupo Desulfovibrio, que extraen de sustancias orgánicas la energía necesaria para vivir e hidrógeno para realizar la reacción.



Los microorganismos hacen posible a temperaturas normales la reducción de sulfatos que de otra manera requeriría de temperaturas altas (700 - 1000 °C). Sulfuros hidrogenados y otros sulfuros, pueden originarse en agua subterránea por el rompimiento de sustancias orgánicas que contengan azufre. Muchos tipos bacterianos, unicamente oxidan el sulfuro hidrogenado a azufre que es oxidado por otras especies (Millar et al., op. cit.). Las reacciones de reducción, de sustancias inorgánicas, que contienen azufre son las siguientes:



III.6 Criterios de contaminación del agua subterránea.

La alteración de la calidad del agua subterránea se puede producir de muchas maneras: directa e indirectamente. Los efectos directos son causados por sustancias naturales o sintéticas que entran en el agua subterránea como resultado de actividades humanas. Los efectos indirectos que conducen a cambios en la calidad del agua subterránea son causados por interferencia con procesos hidrológicos, físicos, químicos o biológicos sin la intervención de sustancias.

Todos estos cambios, conducen a contaminar el agua subterránea definida por algunos autores (Buchan and Key, 1956) como la pérdida parcial o total del uso de agua para consumo humano u otras actividades. Esta definición, no incluye los numerosos cambios causados por el hombre ni trata de la calidad higiénica del agua. Posteriormente se han dado otras definiciones que incluyen limitaciones sobre valores de calidad del agua: la contaminación antropogénica del agua subterránea es aquella en que los sólidos totales disueltos y suspendidos causados directa e indirectamente por el hombre es mayor que el máximo permitible de las concentraciones relativas a los valores límites dados en aguas internacionales para agua potable (tabla 3.3) o de uso industrial.

Para identificar la contaminación, se requieren los más estrictos criterios. El contenido de potasio como indicador de contaminación de rellenos sanitarios propuesto, en 1969, por Maclean y Davison, no es tan confiable ya que el potasio rápidamente es absorbido bajo la superficie y no migra con el agua

Parámetro	Unidades	U.S. EPA (1980)		WHO, Internacional (1971)		WHO, European (1970)	European Community		Netherlands (1981)	URSS (1975)	Norway	México (1988)
		Nivel Recomendado	Máximo Nivel Contaminante	Nivel Recomendado	Máximo Nivel Permisible		Niveles gufa	Máximo Admisible				Máximo Permisible
Aluminio	mg/l	-	-	-	-		0.05	0.2	-	0.5	< 0.1	0.2
Arsénico	mg/l	-	0.05	-	0.05	0.05	-	0.05	0.2	0.05	< 0.01	0.05
Cloruros	mg/l	250	-	200	600	200	25	> 200	-	-	-	-
Cobre	mg/l	1	-	0.05	1.5	0.05	0.1	-	3.0	-	< 0.05	1.5
Fluoruros	mg/l	-	1.4-2.4	-	0.6-1.7	0.7-1.7	-	0.7-1.5	1.2	0.7-1.5	< 1.5	1.5
Hierro	mg/l	0.3	-	0.1	1.0	0.1	0.05	0.2	1	0.3	< 0.1	0.3
Plomo	mg/l	-	0.05	-	0.1	0.1	-	0.05	0.3	0.1	< 0.05	-
Magnesio	mg/l	-	-	-	150	125	30	50	-	-	< 10	125
Manganeso	mg/l	0.05	-	0.05	0.5	0.05	0.02	0.05	0.05	0.1	< 0.1	-
Mercurio	mg/l	-	0.001	-	0.001	-	-	0.001	-	-	< 0.0005	0.001
Nitratos	mg/l-N	-	10	-	-	23	6	11	23	10	2.5	5.0
Fósforo	mg/l	-	-	-	-	-	0.15	2	-	0.0035	-	-
Sodio	mg/l	20	-	-	-	-	20	175	-	-	-	-
Sulfato	mg/l	250	-	200	400	250	25	250	-	-	-	250
Zinc	mg/l	5	-	5	15	5	0.1	5	1.5	-	< 0.3	5.0
STD	mg/l	500	-	500	1500	-	-	1500	-	-	-	-
Dureza Total	mg/l-CaCO3	-	-	100	500	100-500	-	-	-	-	-	300
Selenio	mg/l	-	0.01	-	0.01	0.01	-	0.01	0.05	0.001	< 0.01	0.05
Color	mgPt/l	15	-	5	50	-	1	20	20	-	< 5	20
Turbiedad	TU	-	1	5	25	-	0.4	4	0.5	-	< 0.5	10
pH		6.5-8.5	-	7.0-8.5	6.5-9.2	-	6.5-8.5	9.5	-	-	8.0-8.5	6.9-8.5
Coliformes	org/100ml	-	1	-	1	1	-	< 1	0-2	-	< 1	2

WHO, - World Health Organization.

Tabla 3.3 - Normas de calidad de agua potable en diferentes países.

subterránea contaminada. Incrementos sobre los valores de fondo - *condiciones naturales regionales* - en contenidos de HCO_3^- , Cl^- , NH y NO_2^- y un alto valor en permanganato pueden servir de indicadores de contaminación antropogénica, aunque debe probarse que no sean atribuibles a orígenes geológicos. La cantidad de oxígeno necesaria para la descomposición anaeróbica de un material nutriente es factor clave para expresar su fuerza contaminante y para ello se ha establecido algunas pruebas para evaluarla. La demanda de oxígeno ejercida por una sustancia es una medida de su poder para causar contaminación (APENDICE A).

Las enfermedades relacionadas con el uso y consumo de agua contaminada pueden dividirse en dos grandes grupos: las provocadas por agentes biológicos patógenos y las causadas por sustancias químicas.

La identificación de bacterias intestinales es indicio de contaminación reciente pero, su ausencia no es argumento contra la presencia de contaminación ya que los microorganismos (huevos de helmintos, protozoarios, bacterias, virus) tienden a ser absorbidos o filtrados durante el flujo a través de un medio poroso y mueren después de un tiempo (APENDICE B).

Estos pueden ser excretados en números variados dependiendo de la edad y estado de salud del individuo. La materia fecal contiene en promedio 10^9 bacterias/gr (no necesariamente patógenas), y en individuos infectados arriba de 10^6 virus/gr (Lewis, 1980).

III.7 Papel epidemiológico del nitrógeno y microorganismos .

Teniendo en cuenta el papel epidemiológico que originan algunos contaminantes y microorganismos patógenos es fundamental el conocimiento de las características hidrogenoquímicas de las sustancias contaminantes y de la resistencia de los microorganismos respecto a las condiciones ambientales, para prevenir la propagación de algunas enfermedades infecciosas y en ocasiones

mortales del hombre y animales. Los compuestos de nitrógeno, tienen efectos contaminantes especiales. Compuestos orgánicos e inorgánicos están presentes en desechos domésticos y agrícolas así como también compuestos inorgánicos del nitrógeno se encuentran en ciertos desechos industriales y fertilizantes agrícolas. El amoníaco es un producto característico de la materia orgánica cuando ésta es oxidada microbiológicamente.

Los nitratos originan un problema poco común de contaminación. Dos enfermedades han sido asociadas al consumo de agua que contiene altas concentraciones de nitratos: la cianosis infantil y el cáncer gástrico. En la práctica sanitaria antiepidémica, se llevan a cabo una serie de medidas destinadas a proteger el terreno de la contaminación e infección por especies patógenas de microorganismos.

Un índice valioso del estado sanitario es la presencia, en el mismo, de *E. coli* y de bacterias próximas a ella (Genero *Eschia*), como también las de estreptococos fecales y *clostridium perfringens*, ya que esto muestra la contaminación con heces humanas o animales.

En aguas de pozos y embalses abiertos, la cifra de microorganismos no debe sobrepasar 1000 por mililitro. Aparte de esto, la calidad del agua puede ser estimada por la presencia de *E. coli* y sus variedades (Piatkin, 1968).

El grado de contaminación del agua con materias fecales se establece por el título *E. coli* o índice coli. Se denomina título coli a la mínima cantidad de agua, en ml, en que se descubre aunque sólo sea una bacteria coli. El agua potable con estas condiciones se considera buena, si presenta un título coli entre 300 y 500 o un índice coli entre 2 y 3 (Piatkin, *op. cit.*). La *E. coli* es un habitante del intestino grueso del hombre y mamíferos aunque también se encuentra en el intestino de aves, peces, reptiles e insectos. Se elimina abundantemente con las deposiciones (varios miles de millones al día), por lo que se le encuentra, constantemente también en el medio exterior (agua, terreno, alimentos). Se incluyen en el grupo de bacterias coliformes todos

los bacilos aerobios y anaerobios facultativos, gram-positivos, no esporuladores que producen ácido y gas en la fermentación de la lactosa.

En la *E. coli* existen numerosos grupos que son agentes etiológicos dando lugar desde altas fiebres, enteritis en niños, hasta peritonitis, meningitis, cistitis, apendicitis, etc.

Haber padecido otras enfermedades infecciosas contribuye al desarrollo de diferentes enfermedades infecciosas provocadas por la *E. coli*. En muchos casos, este microorganismo es la causa de intoxicaciones alimenticias.

En relación con virus (hepatitis A, polivirus, rotavirus, echovirus, coxavirus) las enfermedades que mediante fecalismo pueden contaminar el agua subterránea, pueden ser desde una simple diarrea hasta una hepatitis infecciosa o poliomeilitis.

CAPITULO IV

LOS RESIDUOS SOLIDOS COMO FUENTE DE CONTAMINACION DE LAS AGUAS SUBTERRANEAS

El problema de la contaminación del suelo que pueden plantear todos los productos integrantes de desechos urbanos, es distinto al de la contaminación atmosférica o de ríos y mares. Puesto que los residuos sólidos permanecen en el lugar donde se depositaron, durante períodos relativamente largos, originan graves problemas sanitarios y pueden llegar a ser un foco de contaminación de aguas superficiales y subterráneas por la generación de lixiviados, cuya composición química y bacteriológica les confiere un carácter contaminante.

La acumulación de residuos sólidos domésticos e industriales constituye, hoy día, un problema agobiante en los países industrializados. El aumento de la población, aunado al proceso de urbanización y la creciente demanda de bienes de consumo, determina un aumento incesante en peso y volumen de los desechos producidos. Sus características varían considerablemente, tanto para los distintos tipos de desechos sólidos, como también, la esfera y nivel de producción y consumo existente.

El hombre siempre ha generado, dependiendo de su actividad socioeconómica, diferentes productos. La mayoría de los insumos producen, de alguna manera, residuos que conocemos como basura. Esta generación de desechos sólidos se incrementa cada vez más, principalmente en las grandes urbes, produciendo muchos problemas para su recolección, manipulación, disposición final y/o eliminación. Aparentemente, parece haber una relación entre el nivel económico de la sociedad de una urbe y la cantidad de residuos que se generan diariamente (0.80 kg/día/habitante para la Ciudad de México, y alrededor de 2.5 kg/día para grandes ciudades

de Estados Unidos). En nuestro país, la entrada a los tiraderos de basura representa una empresa difícil de realizar. Por otra parte, el acceso a fuentes de información es complicado, complejo y restringido obligando a conseguir información similar de otros países o generarla, como en el presente caso, realizando muestreos en casas habitación con diferentes condiciones socioeconómicas, que sólo será representativo para países en vías de desarrollo y variará de ciudad en ciudad.

Químicamente, la basura se compone de sustancias orgánicas naturales y otras, que son transformadas durante los procesos que ahí se producen. Las industrias químicas también, cooperan con sustancias y subproductos de sus procesos industriales, que aunada a desechos de centros hospitalarios incorporan compuestos orgánicos y minerales peligrosos.

IV.1 Procesos de disposición de los residuos sólidos.

La eliminación de residuos domésticos plantea problemas en la mayoría de los países, ya que el reciclaje, producción de composta o la incineración de basura resulta antieconómica y exige subvenciones sustanciales, sobre todo en países como el nuestro. Generalmente, la forma de disposición más común de los residuos sólidos, es su amontonamiento al aire libre (tiradero a cielo abierto), lo que contribuye a contaminar los mantos freáticos. En particular, si se hallan localizados en terrenos permeables se facilita que los lixiviados arriben al flujo subterráneo más rápidamente.

En México y otros países del Tercer Mundo, la forma tradicional de disposición final de residuos sólidos la constituyen los tiraderos a cielo abierto, donde algunas veces, después de la pepena¹, la basura se compacta y cubre con arcilla. Aún así, en

¹Proceso manual y rudimentario de selección de componentes de la basura.

nuestro país más del 70 % de los residuos sólidos quedan sin ser utilizados. Estos lugares, donde viven familias enteras en y de los desperdicios, contaminan el ambiente y generan, cada día, mas pobreza y marginación. El APENDICE C, presenta una breve historia de la basura y los principales sitios de disposición final en la ciudad de México.

Aunque el esquema anterior se conserva en muchos países, entre ellos México, en la actualidad se puede decir que existen tres métodos de disposición de basura, que pueden ser clasificados a grandes rasgos en: mecánicos, térmicos y biológicos.

IV.1.1 Procesos Mecánicos

Estos procesos incluyen la trituración de la basura donde la dividen, mezclan y homogenizan, favoreciendo la descomposición bacteriana y el control de la acción térmica. Aunado a este proceso, generalmente se presenta el proceso de compactación para reducir volúmenes y una selección de materiales que puedan presentar algún beneficio económico (reciclaje) como papel, vidrio, plástico, etc. La preselección facilita el manejo de volúmenes más homogéneos en composición.

IV.1.2 Procesos térmicos

Estos procesos se pueden dividir en los siguientes métodos de tratamiento:

IV.1.2.1 Pirólisis .- Representa la descomposición físico-química del material orgánico por medio de calor, en una atmósfera pobre en oxígeno. Los subproductos de este método consisten principalmente de cenizas y carbón, un líquido compuesto de mezclas orgánicas y

agua (alcohol metílico, metilacetona, alquitrán) y una mezcla de gases de poco poder calorífico compuesta de CO_2 , CO , N_2 y CH_4 . El propósito de este método, es aplicar calor a los residuos con el fin de destilar compuestos volátiles, llevando a cabo una reacción de tipo endotérmica. Este proceso, requiere altos costos de inversión pero casi no contamina la atmósfera reduciendo el volumen de los materiales involucrados.

IV.1.2.2 Incineración - Este proceso representa una buena solución desde el punto de vista sanitario, ya que destruye todas las bacterias e insectos rápidamente eliminando materiales combustibles. Presenta como inconveniente la producción de cenizas (10% del volumen inicial), elevada inversión inicial y altos costos de operación y por otra parte, la operación de los hornos no es satisfactoria en presencia del alto contenido de materias vegetales y gran porcentaje de humedad en los residuos.

En ambos casos, las cenizas pueden estabilizarse y posteriormente depositarse en rellenos sanitarios.

IV.1.3 Procesos biológicos

La naturaleza de los residuos sólidos es diversa, sin embargo se puede establecer que están constituidos por un alto porcentaje de agua (40% - 50%) y materia orgánica (Finstein *et al*, 1980). Otros subproductos importantes son papel, plástico, vidrio y metal. Como subproductos predominantes, en los sitios de disposición final en la Ciudad de México (tabla 4.1) se tienen:

La transformación de la materia orgánica, hasta su estabilización se realiza mediante procesos que según las condiciones del medio, se llevan a cabo por vía aerobia o anaerobia.

subproducto	%
residuos alimenticios	45
papel	11
material de jardín	7
plastico	4
carton	4
otros	29

Tabla 4.1 - Porcentajes de los principales subproductos de la basura.

En los sitios de depositación, se producen una serie de procesos biológicos (fermentación aerobia) que forman una mezcla de gases (bióxido de carbono, amoníaco y agua) que dura unas cuantas semanas, debido a la limitación de circulación de aire, entre los residuos, por efecto de compactación y cobertura de los mismos.

Posteriormente, en ausencia de oxígeno, mediante una combinación de reacciones de óxido-reducción se realiza la fermentación anaerobia, proceso predominante en los sitios de disposición (Mosey, *op. cit.*).

Estos procesos pueden ser reproducidos, en forma controlada, obteniendo de la basura, una serie de productos, dependiendo si se realizan o no en presencia de oxígeno y que pueden ser utilizados como fertilizante agrícola (composta) y/o fuente energética (biogas).

En la producción de composta, se tratan los residuos sólidos por medio de digestión bacteriana, descomponiendo biológicamente la materia orgánica hasta obtener un material, tipo "humus", bioquímicamente estable constituido por materia orgánica y mineral, pH casi neutro y alrededor, del 40 al 60 % de agua.

La parte orgánica de los desechos, se somete a la acción bioquímica controlada de microorganismos con el objeto de facilitar su degradación. Este proceso, se puede realizar en condiciones aeróbicas o anaeróbicas. Sin embargo, las condiciones aeróbicas son

las mas aconsejables, ya que el tiempo de realización del proceso se reduce considerablemente evitando los malos olores y gases. En general, el proceso se realiza a temperaturas relativamente altas (60 a 80 °C) con lo que se garantiza que el producto final esté libre de gérmenes patógenos. La composta o producto resultante, es parecido a la tierra húmeda y puede considerarse un mejorador orgánico de suelos cuyos nutrientes, varían de la siguiente manera:

Nitrógeno	0.5 - 1.5%
Fósforo	0.2 - 0.8%
Potasio	0.4 - 1.2%
Calcio	2.0 - 8.0%

En nuestro país se instalaron varias plantas de composteo, sin embargo el proyecto ha sido un fracaso y solo la planta de Guadalajara y la de San Juan de Aragón, en esta Ciudad, siguen funcionando. Sus instalaciones son obsoletas, la planta de Aragón funciona a menos del 10 % de su capacidad, generando una composta de baja calidad, por el alto contenido de plásticos, producto de una mala preselección del material.

Durante los procesos anaerobios, mas lentos en comparación que los que utilizan oxígeno molecular, se disipa poco calor descomponiendo la materia orgánica en compuestos más simples. El producto mas importante generado, además de una masa de alto contenido de agua (composta) es la producción de gas metano (CH_4). Sin embargo, los problemas que presentan los procesos anaerobios derivan de la lentitud del proceso y la producción de malos olores.

Aunque la producción de biogas, depende de la calidad de la basura esta se estima del orden de $0.25 \text{ m}^3/\text{Kg}$ (COMLURB, 1978). En Brasil, se están explotando regularmente $20,000 \text{ m}^3/\text{día}$ de gas, en pozos distribuidos en un área de un kilómetro cuadrado (Uribe, 1986). El biogas obtenido presenta 66 % de metano, 33 % de CO_2 y el resto de nitrógeno y oxígeno.

IV.1.4 El relleno sanitario

Generalmente, la eliminación de los desechos sólidos urbanos plantea una serie de problemas, debido a que éstos se acumulan, durante largos períodos, en el sitio de depositación, sin protección alguna para evitar, a futuro, problemas de contaminación del suelo y agua. Uno de los métodos mas recomendable, para su disposición en el suelo es el relleno sanitario (rs) (SEDUE, 1984).

La expresión rs engloba obras, instalaciones, operación y terreno del depósito. Es una técnica de disposición de basura en el suelo, sin perjuicios para el medio ambiente y/o molestias y peligro para la seguridad y la salud pública. Construida de acuerdo con especificaciones de ingeniería civil y sanitaria, deberá confinar la basura con capas de materiales poco porosos y una compactación específica, con una frecuencia planificada de acuerdo con los volúmenes depositados y proporcionar un sello impermeable al subsuelo, aplicando capas de bentonita hidratada de suficiente espesor en toda la supercie del relleno, incrementando las propiedades impermeables del subsuelo. Además, se deberá construir un sistema de captación de aguas fluviales superficiales y la lixiviación generada, por medio de colectores. También, se deberán construir espigones, hasta la ultima capa del relleno, para propiciar la salida de gases producto de procesos de descomposición en el relleno para garantizar condiciones idóneas que garanticen la protección del medio ambiente.

Aunque los rellenos sanitarios presentan muchas ventajas, si no están bien diseñados, el filtrado de líquidos del material depositado puede causar grave daño, dependiendo de la composición del lixiviado, contaminando los acuíferos. En los Estados Unidos de mas de 100,000 depósitos de desechos sólidos, probablemente no mas del 10 % pueden ser clasificados como rellenos sanitarios (Everett, *op. cit.*). En nuestro país, hasta ahora, ninguno de estos lugares cumple con todas las especificaciones requeridas.

La selección del sitio idóneo de ubicación de residuos sólidos

deberá ser cuidadosamente realizada tomando como base las características generales del terreno natural, usando como criterio, que tenga una baja permeabilidad, una alta capacidad de absorción y filtración y un elevado potencial de intercambio iónico. Es necesario también, la realización de estudios geotécnicos e hidrogeológicos del sitio de depositación, que consideren las condiciones climáticas de la región (precipitación, evapotranspiración, escurrimiento, infiltración). El método de relleno empleado, dependerá de las características naturales del suelo y de la cantidad y características de los residuos dispuestos.

Otras consideraciones importantes son:

- a) Accesibilidad a los camiones recolectores.
- b) Vida útil mayor de 10 años.
- c) Proporcionar los medios y condiciones naturales para proteger la vida animal y vegetal.
- d) Ubicación estratégica para eliminar problemas de tipo social con la comunidad.
- e) Autosuficiencia en material de relleno para cubrir la basura.

IV.2 La interacción de los desechos sólidos con el suelo y el acuífero

Como se ha mencionado, la disposición final de desechos sólidos puede ser un foco de contaminación del suelo y del agua superficial y subterránea. Al ponerse en contacto el agua con los residuos sólidos se inician los procesos de lixiviación. Dada la solubilidad, que presentan muchos de los materiales de los residuos y la degradación natural de otros, genera fluidos mineralizados. El

agua, al fluir a través de los residuos arrastra altas concentraciones de compuestos químicos y microorganismos.

El sitio de disposición, es un medio en constante evolución donde se realizan una serie de complejas reacciones fisicoquímicas, químicas y biológicas (Chian and Dewalle, 1975), responsables de la solubilización, precipitación, óxido-reducción, intercambio iónico y degradación biológica de materiales disueltos y/o suspendidos, efecto de interacciones entre los residuos, el agua que se infiltra y los constituyentes del medio geológico del sitio de depositación, teniendo lugar fenómenos de adsorción-desadsorción principalmente con materiales de grano fino (arcillas, limos). Al excederse la capacidad de retención de la cubierta vegetal, el agua se percola entre los residuos sólidos hasta que llega a saturarlos y conjuntamente con el líquido que se encuentra entre los residuos, se percola en el terreno, formando el lixiviado.

Algunos reportes de tiraderos de residuos domésticos, a cielo abierto, han evidenciado contaminación del agua subterránea, principalmente por nitratos (Freeze and Cherry, *op. cit.*).

IV.3 Factores importantes en la formación de lixiviados; caracterización del mismo.

Existen gran cantidad de factores (características de los residuos, etapa de descomposición, concentración de materia orgánica, hidrogeología del area de depositación, suelo, material de cubierta, clima, cantidad de agua para infiltración, etc.) que pueden determinar la composición e hidrodinámica del lixiviado. En los depósitos, se pueden encontrar toda clase de desechos químicos y materia orgánica, que por medio de la lluvia pueden ser arrastrados hacia el subsuelo.

Johansen y Carlson (1976), consideran que los principales factores que afectan la formación de lixiviados son :

- a) La composición de los residuos (humedad, temperatura, pH y edad).
- b) La hidrogeología de la zona.
- c) El diseño y operación del relleno.
- d) El clima y cantidad de lluvia infiltrada.
- e) Las reacciones fisicoquímicas y biológicas de degradación de los residuos.

Otros autores (Chian y DeWalle, *op. cit.*) consideran importante, entre otros factores :

- a) El tamaño de los residuos.
- b) El grado de compactación de los mismos.

La extraordinaria variabilidad de los constituyentes del lixiviado, hace difícil estimar su composición exacta ya que sus características no solo están determinadas por los constituyentes depositados, sino también por su etapa de descomposición y las características físicas y climáticas del entorno del lugar, entre otros factores.

La combinación de los factores, antes mencionados, que determinan la composición e hidrodinámica de los lixiviados contribuyen a que se tengan un amplio intervalo de valores en las características de los lixiviados. La tabla 4.2, muestra características de lixiviados en mas de 20 lugares de Estados Unidos.

CARACTERISTICAS	RANGO DE VALORES
Demanda química de oxígeno (DQO)	40 - 89,520
Demanda biológica de oxígeno (DBO)	81 - 33,360
pH	3.7 - 8.5
Conductividad específica ($\mu\text{mhos} / \text{cm}$)	2,810 - 16,800
Residuos sólidos - total	0 - 59,200
Alcalinidad (Ca CO_3)	0 - 20,850
Dureza (Ca CO_3)	0 - 22,800
Fósforo - total (P)	0 - 130
Nitrógeno amoniacal ($\text{NH}_4 - \text{N}$)	0 - 1,106
Nitratos y nitritos ($\text{NO}_3 + \text{NO}_2 - \text{N}$)	0.2 - 10.29
Sulfatos (SO_4)	1.0 - 1,558
Calcio (Ca)	50 - 7,200
Cloruros (Cl)	4.7 - 2,467
Sodio (Na)	0 - 7,700
Potasio (K)	28 - 3,770
Magnesio (Mg)	17 - 15,600
Hierro (Fe)	0 - 2,820
Zinc (Zn)	3 - 370
Cobre (Cu)	0 - 9.90
Cadmio (Cd)	< 0.03 - 17
Plomo (Pb)	< 0.1 - 2

FUENTE :EPA Summary report :municipal solid waste generate gas and lechate . E.U.A.,EPA,1974.

* Todas los parámetros están representados en mg/l excepto el pH y los que se especifican.

Tabla 4.2 - Caracterización de lixiviados en más de 20 lugares de depositación de residuos sólidos en los Estados Unidos.

IV.3.1 Evolución de parámetros de lixiviados en rellenos sanitarios

La falta de estudios sobre lixiviados en rellenos sanitarios en nuestro país, hace necesario el acceso a información de otros países. Brasil, es uno de los pocos países latinoamericanos que ha realizado estudios sobre lixiviados en rellenos sanitarios y sobre el aprovechamiento del biogas.

Los resultados de la evolución de este caldo de gran capacidad contaminante, resultante de la descomposición bioquímica de los residuos, durante un período de 35 meses, se observa en las tablas 4.3 y 4.4 .

El pH del líquido percolado fluctua entre 6.4 y 8.4. Valores mucho más altos que los obtenidos en rellenos sanitarios simulados (ver APENDICE C).

La demanda de química de oxígeno, que crece mucho a partir del primer mes, del primer año, decrece casi a su décima parte manteniendo con ligeras fluctuaciones esta tendencia.

La cantidad de microorganismos presentes en el lixiviado crece enormemente en el primer mes y según se comporta su pH, se observan fluctuaciones en sus poblaciones (tabla 4.5).

IV.4 Migración de lixiviados

La alteración de la calidad del agua subterránea depende del volumen de lixiviación generado por los depósitos de residuos sólidos. Por esto, es necesario la implementación de métodos de control de lixiviados, tales como cubiertas de arcilla, recolección y tratamiento de los mismos, cubiertas plásticas impermeables, etc.

La extensión de la contaminación del agua subterránea debido a la lixiviación, depende fundamentalmente del volumen de agua recargada. En áreas húmedas, de alta precipitación y baja

PARAMETRO	BASURA INICIAL (1ra.SEMANA)	58 DIAS DESPUES (9na.SEMANA)	330 DIAS DESPUES (48va.SEMANA)	555 DIAS DESPUES (80va.SEMANA)	BASURA FINAL 1,084 DIAS (155ta.SEMANA)
Humedad (%)	49.50	36.40	46.50	60.10	65.40
Poder calorífico superior (cal/g)	-	1,118.00	2,460.00	2,467.00	2,696.00
Residuo mineral (%)	37.60	74.80	44.60	44.40	39.30
pH (en KCl)	-	6.90	8.10	8.30	8.50
Sílica (%)	20.20	59.00	32.50	31.80	25.30
Calcio (%)	3.10	2.60	4.30	2.60	2.20
Fósforo total (% P ₂ O ₅)	1.06	0.83	-	0.86	1.09
Fósforo (% P)	0.44	0.36	-	0.37	0.47
Potasio (% K)	-	0.41	-	0.07	0.47
Carbono total (%)	-	11.80	26.00	26.10	28.50
Nitrógeno total (%)	1.37	0.52	1.53	0.59	0.39
Relación C/N	-	22.70	17.00	44.20	73.20
Proteínas (%)	-	3.20	9.60	3.70	2.40
Materia orgánica (%)	-	19.30	42.60	42.70	46.60

Fuente: COMLURB. Aterro experimental de lixo - documento final.

Río de Janeiro, COMLURB, 1978.

Tabla 4.3 - Evolución temporal de parámetros de lixiviados en Brasil.

Unidad: mg/l

PARAMETROS	MESES	1	2	3	12	18	24	35
pH		6.7	6.4	7.1	8.0	8.4	7.8	7.7
QBO		-	-	5.600	303	453	366	390
DOO		2,806	15,925	17,184	1,416	1,994	1,820	1,505
Residuo	total	8,303	14,240	16,248	8,653	8,897	6,497	6,213
	fijo	-	7,914	9,275	6,525	6,058	4,830	4,717
	volátil	-	6,326	6,973	2,125	2,839	1,667	1,496
Dureza total		2,670	4,863	4,500	1,280	512	900	900
Alcalinidad		-	4,000	-	6,017	7,483	5,500	3,015
Calcio		484	979	1,225	145	101	109	170
Magnesio		357	597	345	98	121	32	116
Sulfato		294	565	.114	131	29	65	-
Nitrógeno total		124.7	-	-	10.5	16.1	16.9	4.5
Fósforo		1.7	6.4	8.2	15.2	18.3	13.1	4.5
Clorato		2,269	2,469	2,588	2,359	2,186	1,588	2,300
Hierro		28.6	56.4	63.5	9.1	9.2	9.3	1.2
Manganeso		-	-	-	0.38	0.87	0.40	0.03
Zinc		-	-	-	0.72	1.49	1.29	0.35
Cromo		-	-	-	0.00	0.07	0.05	0.00
Níquel		-	-	-	0.64	0.23	-	-
Cadmio		-	-	-	0.20	0.24	0.21	0.00
Cobre		-	-	-	0.23	0.28	0.10	0.00

Fuente: COMLURB. Aterro experimental de lixo - documento final. Río de Janeiro
COMLURB, 1978.

Tabla 4.4 - Evolución temporal de parámetros fisicoquímicos de lixiviados en Brasil.

MES	COLIFORMES TOTALES/100 ML	COLIFORMES FECALES/100 ML
01	3'500,000	2'400,000
02	220,000	70,000
04	33,000	33,000
05	7,000	330
07	50,075	492
08	9,530	1,118
09	29,500	83
10	5,150	270
11	128,000	420
12	24,000	9,200
14	11,400	984
15	13,000	2,615
16	5,030	1,440
17	1,165	127
18	28,750	510
19	112,825	47,282
20	40,665	646
21	10,932	143
22	8,877	8,043
23	6,350	64
24	8,650	410
25	2,300	49
35	24,000	230

Fuente: COMLURB. Aterro experimental de lixo - documento final.
Río de Janeiro, COMLURB, 1978.

Tabla 4.5 - Evolución temporal de microorganismos en basura urbana en Brasil.

evapotranspiración, la generación de lixiviados representa un grave problema potencial que se reduce, en intensidad, en zonas áridas o semiáridas donde el volumen de lixiviación es menor y llega a ser afectado por la evaporación, perdiendo humedad. Los mayores volúmenes de lixiviación se producen durante los períodos de infiltración significativa. Cuando el agua, excede la capacidad de retención de las primeras capas de residuos, se infiltra hacia el interior de los mismos saturándolos, iniciándose la percolación del lixiviado hacia formaciones más profundas.

La migración de lixiviados depende, también, de las características hidrogeológicas del sitio de disposición y de la capacidad de retención de la zona no-saturada, respecto a la cantidad global del flujo contaminado liberado, así como de la capacidad de dilución y dispersión de la zona saturada (Perrier y Gibson, 1980).

La infiltración en la zona no saturada, es esencialmente vertical y el agua y los productos disueltos (solutos) se desplazan con diferentes velocidades debido a la acción de fuerzas de tensión superficial y a gradientes de densidad. En esta zona amortiguadora, el escurrimiento es mucho más lento que en la zona saturada y la mayor parte de los contaminantes, acarreados por el lixiviado, pueden ser detenidos, en la matriz porosa, por diferentes procesos físicos (filtración, retención capilar), químicos (precipitación, coprecipitación, intercambio de iones, adsorción) y bioquímicos (degradación de la materia orgánica mediante la intervención de microorganismos) (Griffen *et al.*, 1975). La eficiencia de estos procesos, dependerá esencialmente del espesor y naturaleza de los materiales geológicos presentes en la zona no saturada (porosidad efectiva, fracturamiento, etc). Aunado a estos procesos de atenuación de contaminantes se desarrollan otros importantes fenómenos (reacciones ácido-base, reacciones oxido-reducción) que actúan sobre los compuestos inorgánicos, que además pueden solubilizar a otros compuestos (Chian y Daniels, 1977). Si la zona amortiguadora presenta, un considerable espesor y baja permeabilidad, los diferentes procesos de atenuación, tienen el

tiempo suficiente para actuar durante el lento movimiento vertical del lixiviado.

Muchos de los procesos de atenuación que ocurren en la zona no saturada, también pueden ocurrir bajo el nivel piezométrico pero de una forma modificada (Everett, *op. cit.*). Por ejemplo, el bajo contenido de oxígeno bajo el nivel piezométrico, reduce la posibilidad de oxidación de la materia orgánica. Algunos contaminantes como el hierro, pueden presentar mayor movilidad en medios reductores, condiciones favorables para la remoción de contaminantes del agua, particularmente sulfatos y nitratos.

Una vez que el lixiviado ha transpasado esta barrera, se incorpora y dispersa en el flujo subterráneo, generalmente, horizontal del acuífero. La migración y atenuación de la pluma contaminante² puede verse afectada por diversos procesos (Griffen *et al.*, *op. cit.*). Entre ellos, los de difusión que dependerán de la dilución del lixiviado, al mezclarse en el agua del acuífero y también de la dispersión de las sustancias en solución, predominando los procesos dispersivos a los advectivos por las bajas velocidades del flujo subterráneo en medios porosos "regulares". Cuando este proceso ocurre en medios de doble porosidad o fracturados, llega a predominar el término advectivo al dispersivo. También, se presentan intercambios físicos entre las sustancias en solución y la matriz porosa, bajo los efectos de diferencias temporales de concentración (adsorción y desorción).

En la mayoría de los casos, la atenuación de contaminantes está determinada por los siguientes factores (Everett, *op. cit.*).

- a) Concentración de contaminantes que alcanzan el nivel piezométrico.
- b) Elevación del nivel freático.
- c) La transmisibilidad de las formaciones acuíferas.

²Zona de polución del agua subterránea caracterizada por un gradiente de concentraciones definido por la dirección de flujo.

- d) La recarga que alcanza el nivel piezométrico.
- e) La calidad del agua subterránea y
- f) los volúmenes de extracción.

CAPITULO V

EL PAPEL DE LOS METODOS GEOFISICOS EN ESTUDIOS HIDROGEOLOGICOS Y DE CONTAMINACION.

El papel que pueden desempeñar los métodos geofísicos en estudios de tipo hidrogeológico y de contaminación, es tan amplio como la capacidad técnica y humana de que disponga la institución ejecutante, así como del conocimiento que se posea sobre su versatilidad.

La Geofísica, ha sido una herramienta importante en la exploración del agua subterránea. Los métodos geofísicos rinden excelentes resultados en la determinación y distribución de parámetros físicos e hidrogeológicos y recientemente, en la detección indirecta y monitoreo de agentes contaminantes en el agua subterránea. La información proporcionada por métodos geofísicos superficiales deberá interpretarse en términos de los problemas geológicos e hidrológicos, a resolver. La relación de varios parámetros físicos con problemas prácticos de hidrología vendría a ser el factor que determine la aplicación y elección de un método geofísico. Sin embargo, la detección de sustancias contaminantes está limitada por las diferencias existentes entre las propiedades físicas del contaminante y el medio contaminado. Es por ello, que la respuesta geofísica causada por la sustancia contaminante deberá ser más pronunciada que las anomalías geofísicas asociadas con la heterogeneidad natural del medio geológico. Por consiguiente, las posibilidades de detección indirecta geofísica dependerán de los aspectos citados anteriormente, siendo reducidos en ambientes conductivos (Cahyna et al., 1990). Sin embargo, la detección directa ofrece buenos resultados cuando se realizan monitoreos en el tiempo y se correlacionan con cambios en parámetros geofísicos, que dependan de cambios en la concentración del contaminante.

En el caso de obtención de parámetros geométricos (espesor de capas, morfología del basamento) de cuencas subterráneas, la resistividad, es un parámetro con la sensibilidad adecuada para caracterizar adecuadamente formaciones acuíferas.

Actualmente existe una amplia gama de métodos geofísicos que pueden ser aplicados en estudios hidrogeológicos. Se han usado, por ejemplo métodos geofísicos para diferenciar agua salada, de agua dulce en regiones costeras con problemas de intrusión salina (Golstein *et al.*, 1990, González-Morán y Rodríguez, 1989). Los métodos eléctricos de resistividad siguen siendo los más usados, tanto para trabajos regionales como de detalle, principalmente por su bajo costo y múltiples aplicaciones. El método de polarización inducida ha sido aplicado a la hidrogeología para obtener propiedades como la permeabilidad, grado de saturación, etc (Vacquier *et al.*, 1957).

Los métodos electromagnéticos han empezado a ser utilizados recientemente, y especialmente para definir interfases entre agua dulce y salada. Los métodos sísmicos de refracción en combinación con los métodos eléctricos de resistividad nos permiten estudiar la estructura profunda del subsuelo. Asimismo, algunas técnicas sísmicas de reflexión permiten establecer a detalle la estratificación del terreno.

Los métodos potenciales han sido tradicionalmente utilizados (Rodríguez *et al.*, 1984, 1985, 1986)) para estimar la profundidad del contenedor impermeable en cuencas sedimentarias.

V.1 Utilidad y empleo en México de los métodos geofísicos.

Tradicionalmente en nuestro país, la implementación y utilización de métodos geofísicos en estudios hidrogeofísicos y de contaminación se ha visto limitada por una gran serie de factores, entre los cuales destacan los culturales, educativos y económicos. México cuenta con pocos profesionales, no más de 40 especialistas

competentes, con estudios de posgrado en diversas disciplinas relacionadas con el agua subterránea. De este grupo, muy pocos tienen la capacidad de planear e implementar investigaciones en problemas de contaminación y/o de evaluación de impacto ambiental del agua subterránea y hacer uso de la información generada. De ahí, la necesidad de formar nuevos profesionales con una visión real de la problemática que actualmente vivimos y que con una nueva mentalidad contemplen, como primera prioridad la defensa y conocimiento de las variables ambientales en la evaluación de cada proyecto. Por otra parte, el panorama de la investigación en nuestro país es aún más desolador, considerando que buena parte de los especialistas en estos campos son rápidamente contratados por dependencias gubernamentales y compañías privadas donde realizan principalmente, labores administrativas. Nuevos problemas, se producen debido a que los estudios ambientales requieren de una serie de acciones coordinadas de carácter eminentemente interdisciplinario e interinstitucional, muchas veces difíciles de lograr, aunado al costo de estos programas que condiciona que estos estudios se realicen generalmente en forma aislada y sin continuidad.

V.2 Programa de investigación hidrogeofísico.

Para la realización de estudios hidrogeofísicos es fundamental, la obtención de información confiable y de buena calidad sobre el medio físico para poder contemplar las implicaciones, riesgos y alteraciones que sufrirán los ecosistemas al identificarse fuentes de polución, potenciales o activas.

El conocimiento del medio físico de una región se puede realizar a través de la integración de resultados de disciplinas como la geología, hidrogeología, hidrogeoquímica, con información geofísica lo que permitirá conocer propiedades del subsuelo y sus características a profundidad.

Un programa de investigación hidrogeofísico para evaluar el impacto ambiental, de un proceso contaminante del agua subterránea debe contemplar la descripción del medio físico "natural", sin alterar, por medio de su caracterización geológica, hidrogeológica, etc., como se ha discutido previamente, en el CAPITULO II.

V.2.1 Caracterización geológica

Los estudios geológicos permiten conocer el medio físico en el cual están sucediendo fenómenos de alteración de los parámetros naturales del agua subterránea. El conocimiento de la constitución geológica del medio permite calibrar los resultados de una campaña de prospección geofísica y el establecimiento de un modelo conceptual, acorde a la realidad, que permita establecer un modelo funcional, que permitirá pasar a un modelo de simulación de flujo y transporte de solutos.

Algunas veces se pueden obtener conclusiones preliminares de la presencia de agua subterránea con ayuda de fotos aéreas, procesamiento de imágenes de satélite, mapas geológicos regionales y reconocimiento geológico en el campo. El mapeo de diferentes tipos de rocas y estructuras, en conjunto con estudios estratigráficos pueden permitir estimar la continuidad y espesor de formaciones acuíferas. Estos estudios regionales permiten delimitar áreas de interés. Reconocer relaciones vegetación-roca, drenaje, erosión, fracturamiento, etc., estableciéndose asociaciones entre ellos.

A nivel de detalle, se pueden realizar estudios granulométricos y sedimentológicos con el fin de cuantificar la permeabilidad de formaciones granulares. Por medio de análisis mineralógicos y petrográficos es factible clasificar las rocas en términos de sus componentes, permitiendo establecer la factibilidad de interacciones químicas entre el flujo subterráneo y las rocas del subsuelo. Con otros estudios, como la difracción de rayos X en

arcillas, se llega a conocer su composición química y por tanto su posible interacción con elementos del flujo subterráneo.

Las características geológicas del medio físico, facilitan el conocimiento del tipo de litología superficial, la estratigrafía local y regional, identificar unidades litoestratigráficas acuíferas y su extensión lateral y vertical y una serie de parámetros como son la porosidad, la porosidad efectiva, el grado de tortuosidad y en medios granulares el diámetro medio de los mismos.

V.2.2 Caracterización hidrogeológica

La recarga del agua subterránea está directamente influenciada, por condiciones geológicas y climatológicas. En regiones húmedas más de la tercera parte de la precipitación puede incorporarse al flujo subterráneo, mientras que en regiones semiáridas la recarga puede ser un pequeño porcentaje de la precipitación y en aquellas áridas prácticamente nula.

Las condiciones del medio geológico son importantes; superficies impermeables favorecen el escurrimiento, impidiendo la infiltración. Los manantiales o arroyos perennes pueden indicar niveles freáticos someros. Otro indicador de la profundidad del agua, la constituyen la presencia de freatofitas, cuyas raíces profundas llegan a alcanzar el nivel freático. Estas plantas son también indicadores de agua potable, ya que tienen baja tolerancia a las sales. También, es necesario conocer la historia piezométrica de la región y su evolución y estimar o medir las descargas naturales.

Los sistemas acuíferos definen su conducta por sus propiedades hidrodinámicas las cuales controlan la movilidad del flujo subterráneo. Su conocimiento se da entre otros medios por las *pruebas de bombeo*, las cuales nos proporcionan información sobre la capacidad del medio de transmitir y almacenar el agua, mediante la

transmisividad (T), el coeficiente de almacenamiento (S) y el de almacenamiento específico (S_e). Dado que los fenómenos de polución son relativamente someros es necesario realizar pruebas de infiltración y permeabilidad (k). Si la zona no saturada juega un papel importante, se requerirán otro tipo de investigaciones que cuantifiquen parámetros como la capacidad de humedad específica, la difusión molecular y la permeabilidad asociada a la capilaridad.

Hidrogeológicamente el medio puede ser caracterizado por la dirección y campo de velocidades del flujo subterráneo, el gradiente piezométrico, las componentes principales del balance hidrológico (recarga, extracción, infiltración, escurrimiento, etc.) y algunos otros parámetros específicos (T, S, S_e , k).

V.2.3 Caracterización geofísica

Los métodos geofísicos de prospección se utilizan para determinar, de manera indirecta, estructuras geológicas bajo la superficie del terreno por medio de contrastes entre propiedades físicas del medio. Las anomalías medidas deben ser interpretadas en términos de la geología de la región.

Dependiendo del conocimiento de las características del medio, el primer paso consistirá en determinar la forma del contenedor impermeable, si se trata de un *estudio regional* o de la distribución de unidades permeables e impermeables en un *problema regional*. En el primer caso se recurrirá a los métodos potenciales, la exploración sísmica o alguna variante electromagnética. La prospección magnética, es un método de reconocimiento general en prospección petrolera y de detalle en trabajos mineros que se ha utilizado poco en hidrogeología, aunque es de gran utilidad proporcionando información acerca de estructuras ígneas y estratigrafía en el subsuelo. Los estudios gravimétricos por su parte, son empleados como método de reconocimiento general en la búsqueda de petróleo y como método complementario en minería. En

trabajos hidrogeológicos permite definir estructuras de interés geológico como podría ser establecer la morfología y profundidad del basamento de una cuenca.

Las técnicas electromagnéticas han sido ampliamente usadas para identificar zonas conductoras con la disponibilidad de poder obtener, en forma inmediata a través de la conductividad del terreno, la salinidad del suelo.

Un levantamiento geoelectrico tipo "survey" que indicará la presencia de un cuerpo conductor en el subsuelo. Esto puede ser, la realización de una serie de sondeos eléctricos verticales (SEV's) que detecten la presencia de capas de baja resistividad. La profundidad inferida permitirá planificar una serie de *calicatas* (levantamiento resistivo con la distancia electródica AB fija) que facilitará un rápido reconocimiento en superficie de anomalías conductoras que pueden asociarse a la presencia de contaminantes.

Las técnicas electromagnéticas han sido ampliamente usadas para identificar zonas conductoras con la disponibilidad de poder obtener, en forma inmediata a través de la conductividad del terreno, la salinidad del suelo.

V.2.4 Caracterización hidrogeoquímica

El objetivo de un programa de monitoreo hidrogeoquímico debe de consistir en la recolección, manejo y análisis de datos sobre la calidad del agua subterránea y su correlación con fuentes potenciales de polución del flujo subterráneo. Asimismo se debe tener acceso a todo tipo de información complementaria (geológica, hidrogeológica, geofísica, etc).

Los estudios de calidad del agua subterránea están basados en el conocimiento de la geoquímica de los materiales acuíferos y la química del agua recargada. Estos estudios no son sencillos, la calidad del agua subterránea puede cambiar con el flujo subterráneo debido a mezclas de aguas, reacciones químicas y biológicas o a la

movilidad que pueden presentar algunas especies químicas; otras veces es necesario correlacionar la calidad del agua con la geología superficial.

Una forma conveniente, de realización de un programa hidrogeoquímico se puede llevar a cabo mediante muestreos en pozos de explotación, ya perforados o mediante la instalación, en lugares estratégicos de sistemas de piezómetros (un conjunto de pozos de observación de diámetro reducido que permite observar variaciones en el nivel piezométrico las cuales van a controlar la dirección del flujo subterráneo y de contaminantes desplazándose con él). Estos sistemas permiten además, el muestreo hidroquímico puntual permitiendo tomar muestras a diferentes profundidades. Pueden colocarse en un mismo pozos de diámetro mayor con porciones aisladas o en batería con separaciones del orden de un par de metros. Como además, se busca establecer a detalle dentro de una distribución espacial, variaciones hidrogeoquímicas, el piezómetro debe ser de diámetro reducido lo que trae consigo el diseño de sistemas de extracción adecuados a éstos.

Estos sistemas ya han sido usados en nuestro país, en la Ciudad de León, Gto., en donde se instaló con buen éxito un sistema de piezómetros que permitió el muestreo vertical, pudiéndose observar el comportamiento y evolución de un contaminante específico (cromo VI) (Rodríguez et al., 1991).

V.3 Metodología para un programa de monitoreo del agua subterránea.

Como se ha visto, la calidad natural del agua subterránea tiende a ser degradada por las actividades humanas. El aumento de la polución, producto del crecimiento poblacional, industrial y de actividades agrícolas hace necesario la instrumentación y desarrollo de programas de monitoreo de la calidad del agua subterránea.

Aunque los mecanismos físicos, químicos y biológicos que gobiernan los procesos contaminantes están razonablemente

entendidos, es difícil la aplicación de resultados obtenidos, para estudios de diferentes clases de fuentes contaminantes, debido a la diversidad existente de factores y condiciones hidrogeológicas.

El monitoreo representa un programa de vigilancia a través de observaciones y medidas continuas, que incluyan también medidas de evaluación que de acuerdo con las normas establecidas por la legislación, prevenga, reduzca y elimine la contaminación del agua subterránea, manteniendo las características químicas, físicas y biológicas del agua que conservan su calidad natural.

Los principales constituyentes del agua, respecto a la contaminación del agua subterránea pueden ser agrupados, clasificados y analizados de la siguiente manera: físicos, químicos inorgánicos, químicos orgánicos, bacteriológicos y radiológicos. En la tabla 3.1 (CAPITULO III), se presentan la mayor parte de estos constituyentes.

Los análisis físicos generalmente refieren determinaciones como temperatura, olor, color, turbiedad y densidad. Respecto a los análisis químicos inorgánicos, pueden ser clasificados de la siguiente forma:

- 1) Constituyentes mayores (Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ , K^+ , CO_3^- , HCO_3^- , SO_4^{--} , Cl^- , NO_3^- , STD, pH, conductividad) y otros constituyentes comunes de importancia para el uso de agua y aguas residuales (SiO_2 , B, F, formas nitrogenadas y fosforadas, dureza).
- 2) Elementos traza de importancia en la calidad del agua potable (Fe, Mn, As, Ba, Cd, Cr, Cu, Pb, Ag, Zn) y algunos otros elementos de menor importancia (Ni, Co, Li, Be, S, Al, I).
- 3) Gases que se pueden encontrar en el agua subterránea o generados por la transformación de residuos (metano, bióxido de carbono, oxígeno disuelto).

Los contaminantes químicos orgánicos generalmente están relacionados con residuos de gran cantidad de fuentes principalmente de origen industrial. Es recomendable, antes de

iniciar un programa de muestreo de compuestos orgánicos considerar la naturaleza de los mismos y la fuente potencial. La materia orgánica en un cuerpo de agua puede estar distribuida en su superficie, en suspensión, adsorbida en sedimentos suspendidos y en solución. A causa de la amplia e impredecible distribución de los materiales orgánicos, la recolección de muestras significativas requiere técnicas especiales de muestreo y equipo. La mayoría de las muestras de orgánicos deberán ser protegidas y preparadas debidamente, previo a su análisis, en especial si se trata de compuestos clóridos, herbicidas o insecticidas (Everett, *op. cit*).

En relación a los criterios biológicos, los microorganismos del grupo Coli han sido utilizados desde hace mucho tiempo como indicadores de polución por efluentes de fosas sépticas, desechos animales o fuentes municipales. Si una muestra de agua tiene un apreciable conteo de coliformes, el origen de esa muestra deberá considerarse una fuente potencial de enfermedades. Los coliformes y estreptococos fecales, fracción del grupo Coli, son indicadores de contaminación del agua subterránea por aguas residuales de origen municipal ya que son habitantes del intestino de hombres y animales.

Finalmente, los parámetros radiactivos solo conciernen a algunos tipos específicos de industrias y residuos de actividades mineras.

V.3.1 Objetivos del programa de monitoreo

Los objetivos principales del programa de monitoreo, son reunir, administrar y analizar información acerca de la calidad del agua subterránea y las fuentes y causas de polución. Esta información deberá incluir una amplia variedad de datos dependiendo del uso, calidad del agua y problemática presente.

En general, un programa de monitoreo debe constar de un conjunto de selectos subprogramas de monitoreo. Por ejemplo,

consideremos un gran basurero que no es monitoreado, pero que puede representar y ser clasificado como fuente potencial de contaminación. Si se decide que la implementación de un programa de monitoreo es importante, las acciones que deben realizarse son:

La búsqueda de pozos cercanos al basurero e indicios físicos y químicos de contaminación. En caso de no existir pozos, una alternativa más cara será la perforación de algunos pozos de monitoreo, preferencialmente nidos de piezómetros diseñados para muestreo vertical, estratégicamente localizados mediante resultados de estudios geofísicos o por análisis de tendencias potenciométricas. Posteriormente, se deben implementar actividades de monitoreo sistematizado a profundidades seleccionadas.

Un programa específico de monitoreo debería ser desarrollado e implementado, en cada cuenca hidrogeológica manteniendo una periodicidad regular. La información recabada puede ser utilizada para diferentes propósitos, entre los que se encuentran:

- i) El estudio de la evolución temporal de la calidad del agua y el establecimiento de tendencias.
- ii) Clasificación e identificación de fuentes contaminantes y sus causas.
- iii) Utilización de modelos de planeación y optimización del aprovechamiento del recurso.
- iv) Establecimiento de medidas de control para proteger la calidad del agua subterránea.
- v) Planeación y seguimiento de las alternativas a seguir.

Un programa efectivo de monitoreo debe de ser continuo y considerar la naturaleza dinámica del sistema y como éste es afectado tanto por fenómenos naturales como por acciones inducidas por el hombre (antropogénicas). Esta información permitirá tener la capacidad de poder predecir el comportamiento del sistema y poder

realizar los planes necesarios para prevenir los procesos de contaminación del acuífero.

La realización de un monitoreo de contaminantes del agua subterránea debe atenerse a los siguientes consideraciones:

- 1) Selección del área o cuenca más representativa para el monitoreo, considerando factores como población, cantidad de agua empleada, tipo de uso, existencia de fuentes alternativas, tipo de industria, etc.
- 2) Identificación de fuentes potenciales de contaminación cercanas a la región. Caracterización de sitios de disposición y lixiviados de cada fuente mediante análisis físicos, inorgánicos, orgánicos y bacteriológicos.
- 3) Definición de prioridades en el manejo del agua para una correcta evaluación del impacto ecológico y conocimiento de la calidad natural del agua subterránea.
- 4) Conocimiento de como y donde ocurren los procesos de contaminación y entendimiento del medio hidrogeológico.
- 5) Evaluación del potencial de infiltración de sitios de disposición final, evaluando la movilidad de los contaminantes y los mecanismos de atenuación.
- 6) Establecimiento de alternativas en el monitoreo y la selección de un contaminante específico que permitiera realizar estudios de evolución.
- 7) Revisión e interpretación de los resultados del monitoreo.
- 8) Analisis de alternativas para proteger la calidad del agua subterránea.

V.4 Proyecto integral de monitoreo geofísico.

Un programa de monitoreo geofísico tratará de determinar distribuciones de parámetros físicos, hidrogeológicos y de importancia para el monitoreo de contaminantes estableciendo una serie de campañas geofísicas. A menudo, parte de este programa debe intentar localizar y definir la extensión de la contaminación del agua subterránea.

Las principales propiedades de las rocas que pueden ser importantes y aprovechadas para este tipo de estudios, son las siguientes:

- a) La conductividad o habilidad para conducir la corriente eléctrica directa a bajas frecuencias (el inverso de la resistividad).
- b) La polarización inducida que ocurre cuando circula una corriente eléctrica a través del medio y es interrumpida bruscamente y,
- c) la habilidad de los materiales del subsuelo para conducir corrientes eléctricas en altas frecuencias como en estudios de radar.

A continuación se mencionan y discuten los métodos geofísicos que presentan alguna utilidad, ya sea para conocer de manera indirecta el medio físico o que proporcionan información útil para investigaciones del agua subterránea y en problemas de contaminación.

V.4.1 Prospección geoeléctrica

Los métodos eléctricos de resistividad han probado ser muy útiles en estudios estratigráficos, así como en la prospección de

agua subterránea. El agua, el mejor electrolito natural conocido, por lo que su presencia determina el carácter resistivo de las rocas saturadas permitiendo establecer diferencias entre formaciones saturadas y no saturadas. El contenido de sales define la conductividad eléctrica o su inverso la resistividad. Si el flujo subterráneo está altamente mineralizado su resistividad será baja con respecto al entorno, por lo que ofrecerá un buen contraste resistivo y permitirá su detección en superficie. En efecto, la resistividad eléctrica es un buen parámetro para establecer el grado de saturación de formaciones geológicas. Estos métodos, se basan en principio en el contraste existente en las resistividades de las rocas más que en los valores absolutos de resistividad, ya que localmente existe un amplio intervalo de variaciones, dependiendo del material, porosidad, tamaño de grano, contenido de agua y conductividad. La mayoría de rocas ígneas y metamórficas se encuentran en el intervalo $10 - 10^7 \Omega\text{-m}$, mientras que para formaciones no consolidadas varían entre 1 y $10^3 \Omega\text{-m}$. Es entonces, cuando la realización de una campaña de prospección eléctrica regional puede dar buenos resultados, principalmente si se presentan algunas de las siguientes situaciones.

- a) Hay pocos pozos en la zona estudiada.
- b) El agua contaminada presenta una salinidad relativamente alta, respecto al agua nativa.
- c) La geología de la zona está suficientemente estudiada y entendida.

La principal ventaja que presentan los estudios eléctricos es proporcionar información, acerca de la extensión de posibles zonas contaminadas (si los contrastes entre la nube contaminante y el medio lo permiten) en forma rápida y con costos relativamente bajos.

El modelo de la tierra considerado esta compuesto de una serie de capas homogéneas e isotropas con resistividades ρ_i y espesores h_i , separados por planos horizontales de extensión lateral infinita. Este esquema, concuerda con la geometría que presentan las grandes cuencas sedimentarias.

Los métodos eléctricos de resistividad en corriente directa o corriente alterna (a muy baja frecuencia, menos de cuatro Hz) funcionan mediante un principio sencillo, que consiste en inyectar una corriente eléctrica en el subsuelo mediante un par de electrodos y medir, en superficie, las diferencias de potencial producidas entre otros electrodos, calculando mediante un algoritmo la distribución de resistividades del subsuelo. La distribución de potencial, en un medio homogéneo e isotrópico se muestra en la figura 5.1.

El campo eléctrico puede ser descrito usando la ley de Ohm válida para un semiespacio infinito en el cual consideraremos un modelo simplista de la litosfera y donde hemos colocado los electrodos de corriente y potencial. La prospección geoelectrica nos permitirá encontrar un parámetro llamado la resistividad específica y que es característica del material que tenemos en el medio. Si nuestras medidas de ρ , fueron realizadas en un semiespacio infinito homogéneo e isotrópico entonces el valor de la ρ calculada será la verdadera resistividad del material. En el caso que el medio no sea homogéneo y/o anisotrópico entonces la resistividad específica calculada se denomina resistividad aparente. El valor de la resistividad aparente es función de algunas variables: Las resistividades verdaderas y otras características de los materiales del subsuelo (espesores, buzamiento de las capas y la geometría del arreglo geométrico usado).

Los sondeos eléctricos verticales son el proceso geoelectrico mediante el cual se pueden hacer investigaciones a profundidad. La profundidad de investigación depende de la distancia entre los electrodos de corriente. Los sondeos eléctricos verticales (SEV's) utilizan los arreglos Schlumberger o de gradiente. Si se utiliza

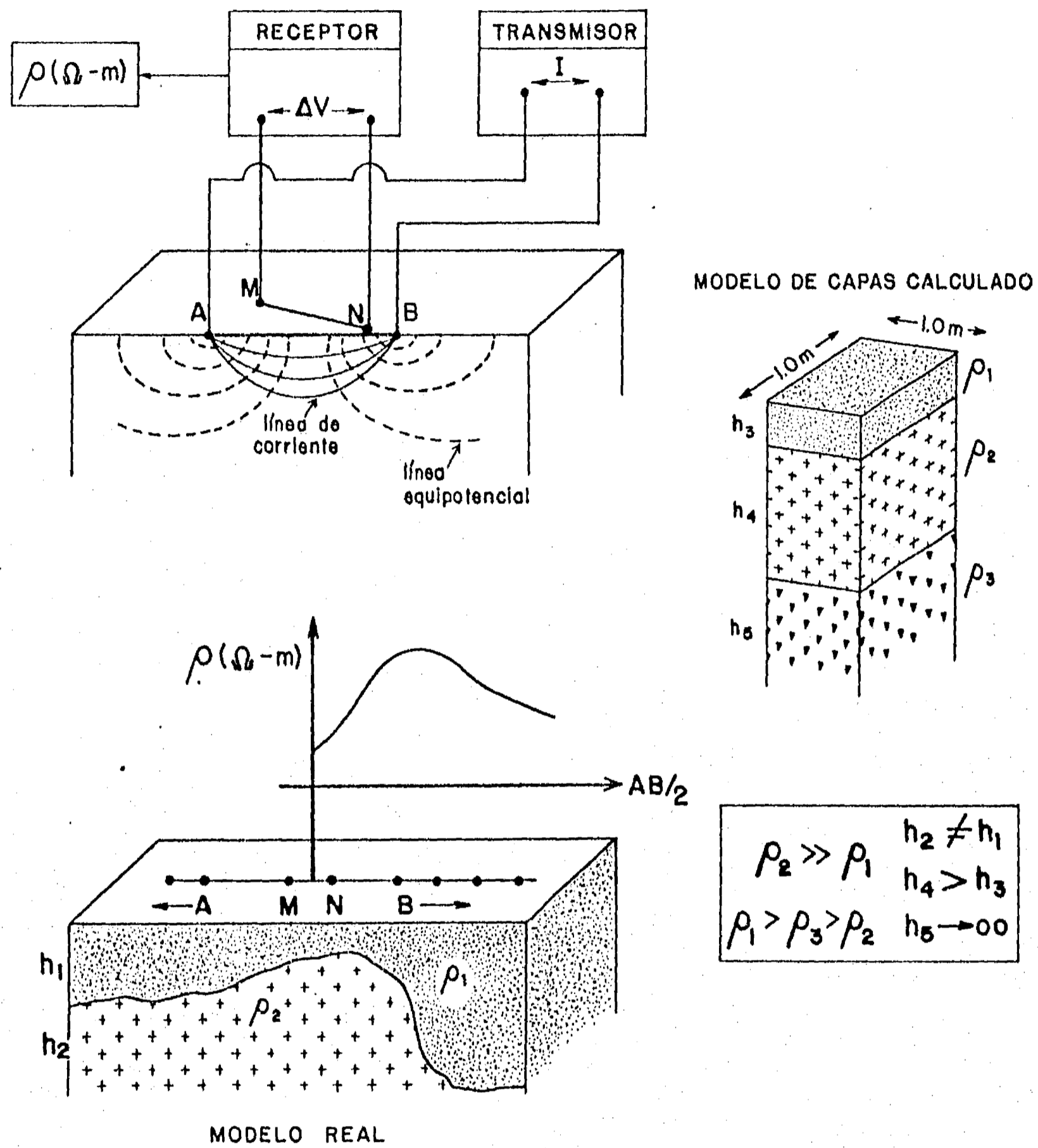


Figura 5.1- Esquema del dispositivo eléctrico para medir resistividad.

esta configuración lineal simétrica, donde la distancia entre los electrodos de potencial (MN) deberá ser menor a la quinta parte de la distancia entre los electrodos de corriente (AB) que se incrementan en intervalos sucesivos (logarítmicos) calculando el valor de la resistividad aparente para ese espaciamiento. Al principio los valores de (MN) permanecen inalterables; sin embargo cuando la diferencia de potencial se hace muy pequeña se debe incrementar la distancia entre los electrodos de potencial.

Los valores de resistividad aparente están compuestos de las resistividades verdaderas de las diferentes capas a diferentes profundidades, la relación entre la apertura de los electrodos de corriente y la profundidad de penetración de la corriente es por lo contrario indeterminada.

Utilizando algoritmos y métodos de procesamiento de datos, las gráficas de resistividad aparente pueden ser convertidas en verdaderas columnas que registran las resistividades específicas de capas contra profundidad (figura 5.1).

Una sección geológica difiere de una sección geoléctrica cuando las condiciones de frontera de las capas geológicas no coinciden con las restricciones entre las capas caracterizadas por diferentes resistividades. En este respecto, la correlación entre los parámetros litológicos y los geoelectrónicos debe estudiarse.

La resistividad específica es un parámetro muy sensible de las rocas, que varía en un amplio intervalo y en general no existe una correlación entre los tipos de rocas y sus resistividades. En la mayoría de las rocas la electricidad es conducida electrolíticamente por el fluido intersticial y la resistividad de las capas es controlada más por la porosidad, contenido y calidad del agua que por la resistividad de la matriz sólida. Las formaciones arcillosas son capaces de conducir la electricidad electrónicamente y el flujo de corriente en una capa arcillosa presenta los dos aspectos (electrónico y electrolítico).

Sin embargo la resistividad específica, no es un parámetro litológico definitivo para la identificación de rocas. No es

posible identificar sólo una roca por medio de un valor general de la resistividad. Sin embargo existen una serie de reglas generales:

- 1) Las rocas ígneas son más resistivas que los sedimentos.
- 2) Las rocas básicas son más conductoras que las ácidas.
- 3) Las formaciones arcillosas poseen más baja resistividad que las arenosas.
- 4) La estratigrafía y esquistosidad de las rocas ocasiona anisotropía eléctrica.

V.4.2 Prospección electromagnética

La conductividad eléctrica de los materiales del subsuelo, puede ser obtenida mediante el uso de métodos resistivos de corriente directa. Sin embargo esta propiedad de las rocas también puede obtenerse detectando el campo electromagnético producido al inyectar una corriente alterna en el subsuelo.

Los métodos electromagnéticos emplean variaciones en el tiempo de campos eléctricos y magnéticos calculando, a partir de ellos la resistividad eléctrica de los materiales del subsuelo.

El desarrollo de estos métodos ha sido impulsado particularmente por la industria de exploración minera, donde se hicieron las primeras aplicaciones, principalmente en la prospección de sulfuros masivos. Posteriormente, se extendió su uso para establecer el frente de la intrusión salina en valles costeros, estimar espesores de formaciones volcánicas sobre sedimentos conductivos y también en exploración geotérmica y detección de anomalías conductivas en el manto (Swift Jr, 1989).

Dado que los campos electromagnéticos son fuertemente atenuados en medios conductivos, es necesario considerar una cierta

profundidad efectiva de penetración (skin depth). Esta variable representa la profundidad de exploración de una fuente, para una tierra homogénea, para un método electromagnético de resistividad que depende fundamentalmente de la frecuencia del campo electromagnético usado y de la resistividad del subsuelo. Variando la frecuencia, se puede conseguir un sondeo a profundidad equivalente a un sondeo eléctrico vertical de resistividad, pero sin cambiar la distancia eléctrica.

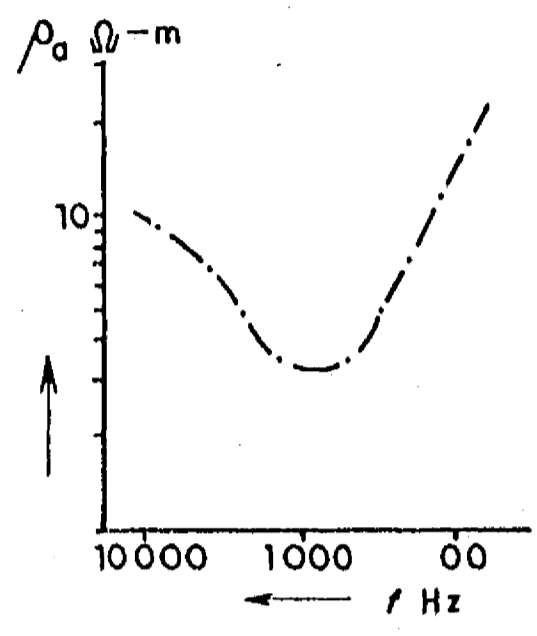
Las gráficas de sondeos de frecuencia pueden ser distorsionadas por interferencias cuando el espaciamento entre transmisor y receptor es pequeño. Esta es la razón, por la cual en las prospecciones electromagnéticas el espaciamento entre el transmisor y receptor es escogido entre 3 y 6 veces la profundidad de exploración (figura 5.2). En general, los estudios electromagnéticos presentan una resolución similar a la de las prospecciones de resistividad pero tienen la ventaja de que son rápidos y con la tendencia a ser cada vez más baratos, aunque no exista un método electromagnético que pueda ser utilizado en cualquier clase de aplicaciones. La elección del método, para la resolución de un problema específico, dependerá de la resistividad estimada de las estructuras en el subsuelo, el ruido ambiental, la familiaridad de los geofísicos con algún sistema en particular y todo tipo de restricciones que puedan limitar su utilización en el terreno.

Los métodos electromagnéticos deben preferirse a los de corriente directa, en las siguientes condiciones :

- a) Cuando existen capas muy resistivas cerca de la superficie.
- b) Porque presenta mayor sensibilidad a cuerpos conductores y no son afectados por altas resistencias de contacto del suelo.
- c) Cuando el paquete sedimentario obstruye la inyección de corriente en el subsuelo o su circulación en él.

GRAFICA DE RESISTIVIDAD APARENTE CONTRA FRECUENCIA

MODELO TEORICO



(Ω-m)	
7.3	0
1.8	14 m
50	28 m

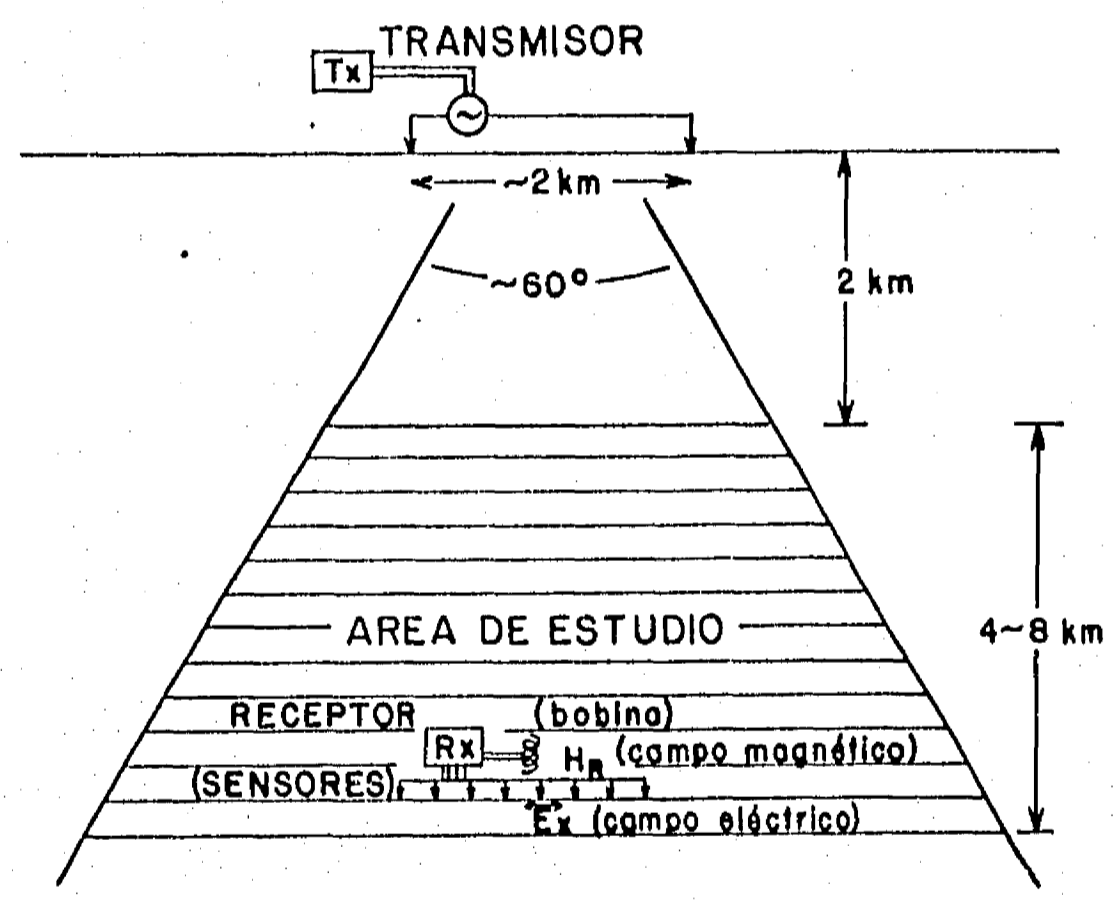


Figura 5.2- Dispositivo electromagnético CSAMT.

- d) Si la ubicación y movimiento de los electrodos en los arreglos utilizados en los trabajos de prospección de resistividad son difíciles.
- e) Presenta mejor resolución lateral a igual profundidad de penetración.

V.4.2.1 Método de polarización Inducida

Este método esta basado en la observación sobre el terreno de la polarización inducida, bajo cuya denominación están incluidos los procesos electroquímicos que se originan en las rocas bajo la influencia de una corriente continua que circula por ellos y que se manifiesta por la aparición de fuerzas electromagnéticas secundarias.

Los efectos de la polarización inducida ocurren en una determinada region del terreno, sobre la cual efectuamos mediciones, siempre y cuando existan conductores metálicos e iónicos a la vez. La conducción de electricidad por medio de iones que ocupan los espacios impregnados de agua, en arcillas, permite la constitución de conductores electrolíticos. Los conductores metálicos conducen la electricidad por medio de electrones. La mayoría de los sulfuros de metales base, algunos óxidos y el grafito pertenecen a este grupo.

El método de polarización inducida esta basado en las propiedades eléctricas mostradas por los conductores electrónicos embebidos en una matriz conductora electrolítica. Cuando esto sucede, el fenómeno de polarización inducida, resulta de la acción del bloqueo o polarización de estos conductores electrónicos en el medio de conducción ionica, ocurriendo precisamente en las inteáreas, donde el modo de conducción cambia de iónica (en las disoluciones que llenan los espacios de los poros de las rocas) a electrónica, en minerales metálicos.

**ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA**

Es utilizada en prospección de minerales con fuerte polarización inducida (pirita, calcopirita, grafito, galena, magnetita).

V.4.2.2 Método de campo magnetotelúrico

La componente variable del campo electromagnético natural de la Tierra, conocido como campo magnetotelúrico, representa la suma de campos electromagnéticos variables de distinta procedencia, relacionados con la influencia en la ionosfera de la Tierra del flujo de partículas cargadas procedentes del Sol. El complejo sistema de corrientes que surgen por ello, sirve como fuente de un campo electromagnético secundario. Estas corrientes al incidir y penetrar verticalmente en el subsuelo, se difunden en él (Lakubosvsky y Liajov, 1980).

El método magnetotelúrico consiste en medir pequeñas variaciones del campo magnético terrestre (0.015 -10 Hz) y relacionarlas con las corrientes telúricas generadas por dichas variaciones a su paso del aire hacia el subsuelo. Empezó a utilizarse alrededor de los años 50, principalmente para el reconocimiento de estructuras conductivas. Desde entonces, la mayoría de las investigaciones magnetotelúricas realizadas han utilizando bajas frecuencias para estudiar rasgos del subsuelo, tales como la profundidad de cuencas sedimentarias o propiedades de la corteza y manto terrestre. Sin embargo, en esa misma época, Cagniard (1953) establece explícitamente la extensión de ésta técnica a exploraciones superficiales mediante la utilización de altas frecuencias.

Esta herramienta ha probado ser muy útil para el mapeo de resistividades con muy alta resolución. En la década de los sesenta, las investigaciones se encaminan a establecer la factibilidad de obtener resistividades del terreno mediante mediciones magnetotelúricas en el rango de frecuencias audibles

(10-10k Hz). Strangway y otros, en 1973, publican el primer reporte sobre el método audiomagnetoteléurico (AMT). Posteriormente se han desarrollado otros sistemas que trabajan en diferentes rangos de frecuencias.

El método magnetoteléurico ha ido aumentando su aceptación a causa de su simplicidad y la posibilidad de llevar a cabo trabajos de campo relativamente rápidos y que la profundidad de penetración potencial hace que la fuente se encuentre a gran distancia. El método tiene gran resolución lateral. Asimismo debido a que la fuente esta efectivamente al infinito tiene gran capacidad de penetración con respecto a otros métodos electromagnéticos que se encuentran limitados por la distancia entre transmisor y receptor. En el campo se colocan dos electrodos, no polarizados, alineados en ángulo recto con un magnetómetro, midiendo dos componentes del campo eléctrico (E_x, E_y) y las tres componentes del campo magnético sobre la superficie terrestre y a una misma frecuencia. Posteriormente, los datos son procesados y filtrados obteniéndose las curvas de resistividad aparente y fase que serán utilizadas para la interpretación ya sea, comparándolas con curvas maestras de modelos teóricos o utilizando algún esquema de inversión por computadora.

El método magnetoteléurico ha sido descrito, entre otros, por Cagniard, *op. cit*, Wait (1962), Vozoff (1972), Orellana (1982) y algunos otros. Basicamente, este método consiste en medir la impedancia electromagnética (la relación del campo eléctrico horizontal (E) en el terreno, ortogonal con el campo magnético horizontal (H)), a diferentes frecuencias para conocer la variación de la resistividad del subsuelo en función de la frecuencia, como un sondeo a profundidad.

Los campos magnetoteléuricos naturales pueden ser descritos en términos de la propagación de ondas electromagnéticas que interaccionan con la superficie terrestre o como un fenómeno inductivo, en el cual corrientes telúricas son inducidas por el campo geomagnético fluctuante. El campo eléctrico depende directamente de la estructura resistiva terrestre.

La profundidad del sondeo puede ser burdamente relacionada con la frecuencia usando la profundidad de penetración (skin depth), definida como :

$$\delta = \sqrt{2\rho/\mu\omega}$$

donde δ es la profundidad de penetración en metros, f es la frecuencia en hertz ($\omega = 2\pi f$), ρ es la resistividad en ohms-metro y μ la permeabilidad magnética en henrys/metro. En la figura 5.3, se observa que el intervalo de frecuencias audibles (10 - 10k Hz) cubre variaciones en profundidad de pocos metros a pocos kilómetros dependiendo de la resistividad. Este método, puede representar una buena alternativa para estudios resistivos superficiales.

La resistividad aparente (ρ_a) puede ser determinada facilmente a partir de los valores de impedancia (E/H) medidos.

$$\rho_a = \frac{1.26 \times 10^5 \times (E/H)}{f}$$

donde E esta en volt/metro y H en amp.turn/metro. Las medidas obtenidas son dibujadas graficando el logaritmo de la resistividad contra el logaritmo de la frecuencia para obtener, en cada estación, el sondeo magnetotelúrico.

Las fuentes de campo naturales, en el intervalo de audiofrecuencias, han sido bastante estudiadas, principalmente por que pueden interferir con sistemas de comunicación. El uso de fuentes naturales hace que la calidad de los datos sea limitada. La principal fuente natural, de ruido en el intervalo de 10 a 10k Hz son los relampagos en tormentas eléctricas.

La forma más simple de interpretación de datos magnetotelúricos es la comparación de las curvas obtenidas con curvas teóricas. Sin embargo debido a la ley de la similitud electromagnética pueden obtenerse diferentes combinaciones respecto al espesor y resistividad de las capas. En esta técnica no es posible detectar el efecto de capas conductoras que se encuentren

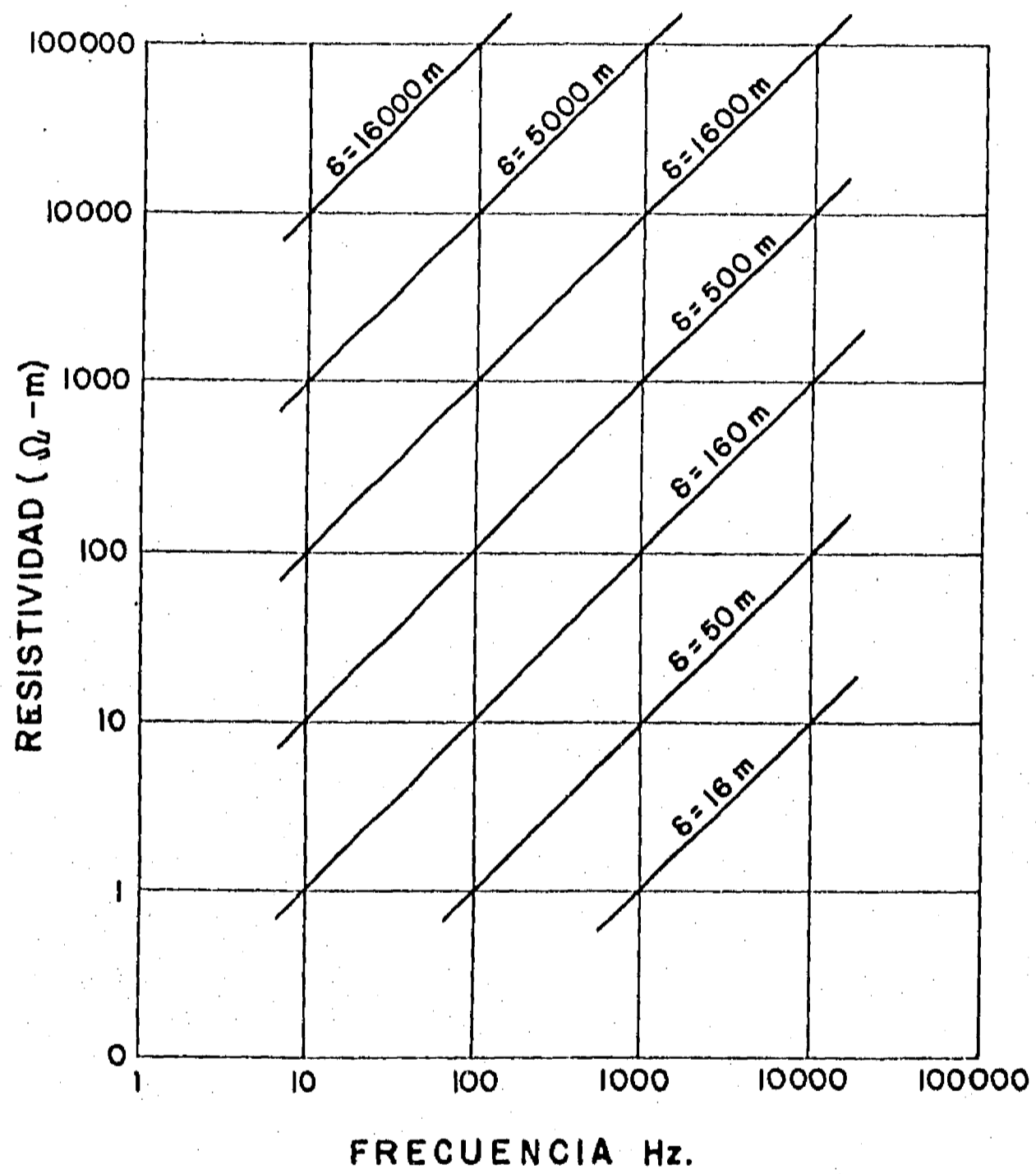


Figura 5.3- Gráfica de resistividad contra frecuencia y la profundidad de penetración (δ).

atrapadas, entre un espacio superior y una capa inferior, que tengan $1/100$ del espesor de la capa superior. Si el espesor de la capa intermedia es pequeño ($1/30$ de la capa superior) y es buen conductor su presencia puede ser detectada. Las capas de alta resistividad son difíciles de detectar. Esto no ocurre mientras que el espesor de la capa central no sea dos o tres veces el de la capa superior y pueda ser detectada como una capa separada. Las limitaciones en la medición conducen al hecho de que la verdadera y precisa profundidad del sondeo es difícil de estimar (Strangway et al., op. cit.). Este método y otras técnicas inductivas son particularmente idóneas para la búsqueda de zonas de baja resistividad. Es poco usado en hidrogeología.

V.4.2.3 Método audiomagnetoteléurico de fuente controlada (CSAMT).

Una excepción del método AMT respecto al origen de la fuente es el CSAMT (Controlled-source Audio-frequency Magnetotellurics). Actualmente este método magnetoteléurico, en el intervalo de frecuencias audibles, está siendo empleado utilizando fuentes artificiales. Los sistemas de detección usados para campos magnéticos y eléctricos naturales en audiofrecuencias son extremadamente sensibles; ello hace posible usar estos mismos sistemas a considerable distancia de la fuente. Es claro, que si el sistema de detección está alejado de la fuente, ésta puede considerarse que se comporta como una onda plana y todas las técnicas utilizadas para el análisis de AMT y su interpretación se pueden usar. Presentan ventajas respecto a la calidad de los datos y eficiencia en terrenos con vegetación que representa un alto costo operacional, aunque la logística de campo es mucho más complicada, costosa y lenta.

Golstein y Strangway (1975), reportan un amplio estudio sobre modelos teóricos y trabajos de campo, usando como fuente de poder un dipolo eléctrico aterrizado. Este estudio demostró, que si la

fuentes se colocaba a 3 o 4 profundidades de penetración del sitio de medición, la aproximación a una onda plana se presentaba con alto grado de precisión. Es efectivo para estudios de alta resolución y también bastante resolutivo en términos del mapeo cubierto comparado con métodos resistivos convencionales. Usando fuentes de ondas planas y frecuencias abajo de 10 Hz, el método proporciona mejor capacidad de penetración que otros métodos electromagnéticos convencionales.

Frecuentemente, la estructura conductiva del terreno no puede ser aproximada por un modelo de capas, con buena precisión; este es el caso de trabajos de prospección minera donde el objeto primordial consiste en delinear la extensión lateral de una zona anómala conductiva delimitada por un contacto vertical. Fundamentalmente, la corriente tiende a fluir en un medio de alta conductividad. Es por ello, que la corriente inducida por el campo geomagnético puede fluir en cierta dirección controlada por la geología local, antes que en la dirección perpendicular a la componente del campo magnético, como se esperaría cuando no existieran contrastes laterales de resistividad. Las complicaciones de campo surgidas causan que la medida de la impedancia, en la superficie terrestre, no sea grande, independiente de cualquier orientación de los campos ortogonales medidos o de la polarización del campo que llega a la fuente. Como resultado de esto, la medida de la resistividad aparente en las vecindades de los contrastes de resistividad puede tener poca repetibilidad en el tiempo, especialmente en períodos de horas cuando las fuentes provienen de tormentas que han cambiado de posición.

Similarmente, dos mediciones usando campos que registran orientaciones rotadas 90° pueden mostrar drásticas diferencias en las curvas de resistividad aparente observadas. Dado que la impedancia es un tensor, en una tierra con estructura bidimensional en resistividad, fase simultánea sensible, las mediciones de ambas componentes ortogonales del campo eléctrico y magnético son importantes para una descripción completa del sistema.

Estas técnicas han sido aplicadas a diferentes tipos de

problemas geológicos. (exploración de sulfuros, localización de sitios de disposición final de residuos sólidos, estudios geotécnicos, sondeos en corteza precámbrica, sedimentos conductivos, etc). En el caso de rasgos geológicos que presenten capas horizontales es posible considerar adecuada una interpretación unidimensional.

Dado que la profundidad de penetración en materiales de baja resistividad es menor, es claro que los cambios que se encuentran en casos unidimensionales están considerablemente aumentadas en medios de baja resistividad, mientras que en medios resistivos el sondeo involucra volúmenes mucho mayores de roca. Fuera de ellos hay mayores oportunidades de encontrar variaciones laterales. Es útil en la localización de fallas y mapeo de contaminantes de baja resistividad. No es conveniente su utilización en estudios de reconocimiento.

V.4.2.4 Radar

La técnica de Radar está basada en la generación y transmisión, mediante una antena, de impulsos electromagnéticos de muy corta duración en el intervalo de 100MHz - GHz. Estos viajarán a través del subsuelo y serán reflejados, en interfaces donde existan cambios en la constante dieléctrica de las rocas del subsuelo. La profundidad del reflector de la superficie, es determinada por el tiempo de viaje de ida y vuelta de la onda electromagnética, estimando la velocidad de propagación de la onda electromagnética a través del medio geológico, si se conoce la constante dieléctrica del mismo. Este proceso es el equivalente electromagnético de perfiles sísmicos marinos de un canal y las salidas producidas son muy similares.

El sistema de Radar representa una metodología para el mapeo a profundidad de discontinuidades en las constantes dieléctricas. Sus aplicaciones, actualmente son limitadas a la prospección de

fracturas, cavernas y contaminación por hidrocarburos, presentando las siguientes limitaciones:

- a) Objetos aislados de diámetro medio menor que la longitud de onda media, no pueden ser detectados.
- b) Poca penetración, no más de 30 metros.
- c) El elevado costo del equipo.

V.4.3 Prospección gravimétrica

Los estudios de prospección gravimétrica han sido utilizados desde principio de este siglo en aplicaciones para hidrogeología y búsqueda de petróleo.

Estos estudios, están basados en la ley Universal de la gravitación. Aunque la atracción gravitacional de cualquier cuerpo geológico, es función de su masa o de su forma y densidad la atracción gravimétrica total medida sobre la superficie de la tierra representa la suma de las atracciones del cuerpo y del resto de la tierra como un todo. En los estudios de prospección gravimétrica el interés fundamental es conocer exclusivamente el efecto del cuerpo en estudio por lo que se deben eliminar los otros efectos. Las medidas de la aceleración de la gravedad deberán ser corregidas por una serie de efectos causados por la elevación la latitud, las irregularidades topográficas y el estrato que se encuentra entre la superficie del mar y la ubicación de la estación. Los datos son reducidos hasta obtener la llamada anomalía de Bouguer que representa la aceleración de la gravedad en una tierra estática y que muestra los efectos debidos únicamente a variaciones de masas que se encuentran bajo el punto de observación. En los mapas de anomalía de Bouguer los valores relativos son de interés. Los excesos o deficiencias de masa que se

presentan deben ser considerados describiendo los cuerpos cuantitativamente en términos de contrastes de densidad con el medio que lo rodea.

Los estudios de prospección gravimétrica, generalmente regionales, reflejan los contrastes de densidad existentes en el subsuelo y pueden ser utilizados para:

- 1) Identificación de profundidades y relieve de las rocas de basamento lo que permite delimitar la geometría de una cuenca subterránea.
- 2) Canales cubiertos, cortados en rocas densas.
- 3) Identificación de fallas y cavidades.

En general los trabajos de prospección gravimétrica son muy útiles cuando se estudian cuencas sedimentarias (Rodríguez *et al.*, *op. cit.*). Recientemente, la microgravimetría ha sido usada con buen éxito para el estudio de zonas cársticas principalmente para la identificación de túneles y cavernas

V.4.4 Prospección magnética

Los estudios de prospección magnética están relacionados con la medición e interpretación de variaciones del campo magnético en el área de estudio. Estas distorsiones en el campo magnético son producidas por materiales con propiedades magnéticas que se encuentran en la corteza terrestre. Las anomalías de interés hidrogeológico están generalmente asociadas a magnetización inducida por el campo magnético. Estas anomalías dependen de la geometría, orientación e intensidad del campo terrestre y de una propiedad de las rocas, la susceptibilidad magnética.

La interpretación cuantitativa de anomalías magnéticas se puede realizar utilizando expresiones geométricas o algoritmos

computacionales, estableciendo la profundidad, geometría y susceptibilidad de estructuras de interés.

El uso de las prospecciones magnéticas está limitado, prácticamente a estudios con rocas ígneas o metamórficas; las rocas sedimentarias presentan muy bajas susceptibilidades a diferencia de las rocas volcánicas que presentan un amplio intervalo de variación. Las aplicaciones hidrogeológicas de la prospección magnética, se reducen a:

- 1) Reconocimiento de la topografía del basamento ígneo en cuencas sedimentarias.
- 2) Localización de flujos de basaltos.

V.4.5 Prospección sísmica

Las técnicas más utilizadas en la prospección sísmica son las de refracción y reflexión. En ambos métodos se mide el tiempo de viaje de las ondas sísmicas desplegadas de una fuente a una serie de puntos de observación seleccionados.

La distribución de velocidades sísmicas en las rocas, es importante en la prospección hidrogeológica. Estas velocidades pueden variar desde 250-2000 m/s para arenas secas y saturadas, pasando por arcillas (1000 a 2500 m/s) a velocidades de 4000 a 6000 m/s para granitos y basaltos. Esta superposición de intervalos de velocidades para diferentes tipos de rocas nos lleva a problemas de ambigüedad en la correlación geológica que debe ser reducida mediante una buena información geológica y/o el empleo de otro método geofísico.

Los estudios de refracción sísmica, pueden ser usados para determinar la topografía del basamento siendo un método de prospección estratigráfica en cuencas sedimentarias. Puede ser usada para localizar formaciones de grano grueso que presentan agua y también en la identificación de lentes de sedimentos arcillosos.

V.4.6 Registros geofísicos en pozos

Estos métodos se han desarrollado desde 1920, con iguales principios que los de prospección geofísica superficial. La idea fundamental es reconocer el terreno a partir de una perforación dada. Podrían concebirse como la introducción de un pequeño laboratorio físico en el pozo estudiando la litología del subsuelo in situ. Inicialmente se utilizaron en la exploración petrolera, empleándose posteriormente en hidrogeología y en trabajos de ingeniería civil. Los sondeos geofísicos en pozos permiten averiguar características del terreno difíciles de obtener con muestras. Sin embargo, los equipos son caros y se requiere personal especializado para la interpretación y análisis de resultados.

V.4.6.1 Registros eléctricos.

Se basan en fenómenos y características eléctricas de la rocas, con su equivalente en los métodos en superficie. Estos fenómenos naturales, que dan lugar a potenciales espontáneos, adquieren mayor importancia en los sondeos al no existir realimentaciones.

Los potenciales que existen a lo largo del sondeo están relacionados con los terrenos atravesados, la resistencia del agua en ellos contenida, la temperatura, la resistencia del lodo de perforación y de la capa de arcilla depositada en las paredes del pozo por filtrado del lodo.

V.4.6.2 Registros radiactivos

Existen dos tipos fundamentales en estos registros. El primero y mas sencillo que mide la radiación gama ligada al propio subsuelo y el otro, que mide las radiaciones gama inducidas por la influencia de una fuente radiactiva de neutrones o los neutrones absorbidos por el terreno.

En los registros radiactivos no es necesario que el pozo esté lleno de agua, dificultad que impide el uso de la mayor parte de los registros eléctricos. tampoco es conveniente la presencia de entubaciones.

La interpretación es cuantitativa con buena definición en estratos sedimentarios, por la presencia de potasio 40, en arcillas, y se pierden los buenos resultados con intrusivos o rocas metamórficas donde la diseminación de minerales potásicos no permite correlaciones tan fáciles.

V.4.6.3 Registros sínicos.

Se basan en los mismos principios y fórmulas que los métodos de prospección sísmica por refracción. Observa y mide la velocidad de ondas longitudinales o de compresión. Los sondeos se realizan introduciendo una sonda provista de un emisor de ondas elásticas y un receptor de los mismos.

El registro sínico permite definir diferentes niveles litológicos y en el caso de la misma formación de zonas de fracturamiento.

CAPITULO VI

LA CUENCA DE MEXICO; EL ENTORNO DE LA SUBCUENCA DE CHALCO

...solo se tuvo a las aguas del Valle como enemigo, nunca se intento utilizarlas.

Humbolt, 1811.

Cuando se habla de la Cuenca de México, el famoso Valle de Anáhuac, irremediablemente se piensa en sus antiguos orígenes y culturas y del esplendor de sus sorprendentes metrópolis prehispánicas rodeadas de agua. Los antiguos pobladores habitaban una gran zona lacustre formada por lagos someros comunicados entre sí. En sus orillas nació y creció la nación mexicana; sin embargo, poco a poco al convertirse esta región en el área política, económica y cultural más importante de nuestro país se fué deteriorando el equilibrio ecológico, de la hasta hace poco conocida como *la región más transparente del aire*.

La presencia del agua propicia el desarrollo de diversas comunidades. Restos humanos en la antigua isla de Tlapacoya evidencian la ocupación de la Cuenca de México desde hace más de 22,000 años (Lorenzo y Mirambel, 1986). Surgen nuevas técnicas agrícolas basadas en el riego por inundación del subsuelo y la construcción de canales transforman zonas pantanosas del sur de la Cuenca, en áreas cultivables, separadas por canales navegables. La escasez de terreno firme da lugar a las chinampas (sistema de agrícola altamente productivo formada por una sucesión de campos elevados dentro de una red de canales dragados sobre el lecho de los antiguos lagos). Los sedimentos extraídos de los canales permitió un incremento en la agricultura y mejor control de las inundaciones. En Xochimico y al poniente de Chalco aún se observan vestigios de esta técnica.

En 1519, a la llegada de Cortés a la capital mexicana, ya había sido modificado el sistema lacustre. Se habían construido diques, calzadas (Tlacopan, hoy Tacuba, Ixtapalapa, Tepeyac, etc), calles de agua o acequias y acueductos, como el de Chalpultepec, propiciando el auge de esta nación construida sobre dos islotes en la parte occidental del Lago de Texcoco, que después se denominaría la Laguna de México. Con la conquista de la metrópoli azteca se produce una profunda transformación. Muchos canales son rellenados para construir calzadas que obstruyeron el drenaje superficial de la Cuenca, propiciando inundaciones (1449, 1555, 1580, 1604, 1629 y otras) (Gurria, 1978). La fisonomía de la Cuenca empieza a cambiar, densos bosques son talados para abrir áreas de pastoreo. Devastadoras epidemias hicieron que la población de la Cuenca, un siglo después de la Conquista hubiera disminuido a menos de 100,000 personas (Ezcurra, 1990).

El manejo hidráulico ha representado una inquietud constante que se observa tanto en la época de la Colonia como en la actualidad. La separación de agua dulce de la gran urbe mexicana, del cuerpo salobre del lago de Texcoco, por medio de un bordo, convierte la isla de Tenochtitlán en el eje cosmológico de la región. Este albarradón construido por Netzahualcoyolt constituye la primera obra hidráulica importante de la Cuenca (Rojas *et al.*, 1974), (Gurria, *op. cit.*).

Tenochtitlán y Tlaltelolco se unen a islas menores elevadas, formando un gran conglomerado urbano rodeado por las aguas del lago. Se estima que la Cuenca de México, hacia fines del siglo 15, ya era el área urbana más densamente poblada del planeta (millón y medio de habitantes distribuidos en 100 poblados) (Ezcurra, *op. cit.*). El alarmante y desordenado crecimiento de su población (actualmente más de 19 millones), aunado a un rápido crecimiento industrial y la urbanización incontrolable han provocado la desaparición de sus áreas verdes y lagos, la deforestación de sus zonas montañosas, la sobreexplotación de los acuíferos afectando el equilibrio hidrológico de la Cuenca y la contaminación cada vez mayor del aire y las aguas subterráneas. La sobreexplotación de

agua en los antiguos lagos ha provocado la compactación de los sedimentos lacustres con el consiguiente hundimiento del terreno afectando la infraestructura urbana. Por otra parte, el manejo del drenaje de la Ciudad de México se dificulta, cada vez más, requiriendo de una tecnología más cara y sofisticada, lo que no evita que a la fecha continúen las inundaciones.

Esta concentración demográfica, consume diariamente del orden de 60 metros cúbicos por segundo de agua. Para poder abastecer a esta población y a la industria es necesario importar el recurso de otras cuencas (16% del río Lerma y 14% del río Cutzamala) con altos costos de infraestructura para su conducción y bombeo; el resto proviene de la explotación de agua subterránea (alrededor de 500 millones de m³ anuales de más de 100 pozos (Lesser *et al.*, 1990).

Para la Cuenca de México, y en especial para la Ciudad de México, el problema del recurso es prioritario. La cantidad de desperdicios domésticos e industriales y aguas negras generada es cada vez mayor. Los residuos sólidos son depositados, muchas de las veces clandestinamente, en el área urbana y sus alrededores. El uso excesivo de fertilizantes y pesticidas, el tratamiento inadecuado de aguas negras y la falta de impermeabilización del suelo en los lugares de disposición final, con ayuda del agua de riego y la lluvia, contribuyen al desplazamiento de tóxicos, en suspensión, hacia los acuíferos.

La realización de estudios para conocer, de manera integral, el subsuelo de la Cuenca, sus formaciones acuíferas, la vulnerabilidad de sus acuíferos y la distribución de fuentes contaminantes coadyuba a evitar el deterioro de los ecosistemas. Es fundamental, el conocimiento adecuado del medio ambiente con la finalidad de protegerlo mediante una serie de acciones planificadas, a través de programas permanentes de investigación y monitoreo.

VI.1 Marco geográfico

La Cuenca de México está situada en el límite meridional de la altiplanicie mexicana, dentro del Eje Volcánico Mexicano (EVM) entre los meridianos $98^{\circ}12'$ - $99^{\circ}30'$ de longitud Oeste y los paralelos $19^{\circ}00'$ - $20^{\circ}15'$ de latitud Norte limitada al sur y este por las cabeceras del río Balsas, en los estados de Puebla y Morelos y al oeste y norte por las cuencas de Toluca y Tula en los estados de México e Hidalgo (figura 6.1).

La Cuenca de México se caracteriza por ser una cuenca endorréica, de carácter lacustre, donde la corteza terrestre ha estado sometida a grandes esfuerzos, produciéndose un intenso fracturamiento. Las fases volcánicas cuaternarias que modificaron su relieve con la formación de una barrera montañosa (la sierra de Chichinautzin) culminaron con el cierre de la cuenca desarrollándose un sistema de grandes lagos que propició el relleno de la Cuenca con materiales aluviales. Esta Cuenca se encuentra ubicada a una altitud promedio de 2000 m s n m Definida desde el punto de vista hidrológico, el parteaguas de la Cuenca de México establece una vasta extensión, distribuida en cinco estados (estado de México, Hidalgo, Distrito Federal, Tlaxcala y Puebla), de alrededor de 9560 km^2 (SARH, Comisión Hidrológica de Aguas del Valle de México, 1963), de los cuales más de 2400, corresponden al área urbana (figura 6.1).

Fisiográficamente, la Cuenca de México está dividida en muchas regiones naturales, con características propias, por una serie de macizos interiores entre las que podemos mencionar :

- 1) La cuenca secundaria de Apan y Tecomulco.
- 2) Las planicies de Pachuca.
- 3) La región situada al norte de la sierra de Guadalupe y los montes de Chiconautla y Pitlachique donde se asienta la depresión lacustre Zumpango-Xaltocan.

- 4) La región central, que comprende la zona lacustre de Texcoco, y
- 5) la zona meridional, que comprende el antiguo lago de Chalco-Xochimilco, encerrado entre la península de Ixtapalapa y las vertientes basálticas, que forman el límite sur de la Cuenca.

La Cuenca se encuentra limitada al sur y este por las cabeceras del río Balsas y al norte y oeste por las cuencas de Toluca y Tula. Las estribaciones más grandes de la Cuenca de México las constituyen al oriente, los volcanes Popocatepetl e Iztaccihuatl (5747 y 5286 m, respectivamente), al sur la sierra de Chichinautzin y la cordillera del Ajusco (3900 m) y al norte, las sierras de Tezontlalpan, Tepozotlan y Pachuca, que se caracterizan por ser menos elevadas (3000 m). A partir de ellas, se encuentran al poniente otras formaciones montañosas, la sierra de las Cruces, Monte Alto y Monte Bajo que alcanzan los 3600 metros, que le confieren la característica de un enorme "cazo" con sus partes bajas hacia el norte. Las elevaciones topográficas están constituidas, en su mayor parte por rocas volcánicas de comportamiento permeable y que funcionan como zonas de recarga natural para el acuífero.

La precipitación pluvial en la Cuenca es diferente en cada una de sus zonas hidrológicas. En general, goza de clima templado con lluvias en verano excepto dos pequeñas porciones de clima seco estepario (el antiguo lago de Texcoco y la parte correspondiente a los llanos de Apan, en el estado de Hidalgo). La precipitación en la Cuenca de México va de 600 mm, en sus partes bajas, a 1200 mm, en las altas. La evaporación potencial anual (900-2100 mm) sobrepasa el valor de la precipitación pluvial media anual.

Antes del crecimiento desorbitado de nuestra gran metrópoli la precipitación pluvial se infiltraba en las zonas de recarga o escurría hacia los grandes lagos donde se evaporaba manteniendo un ciclo en equilibrio. En su origen natural fue una cuenca cerrada

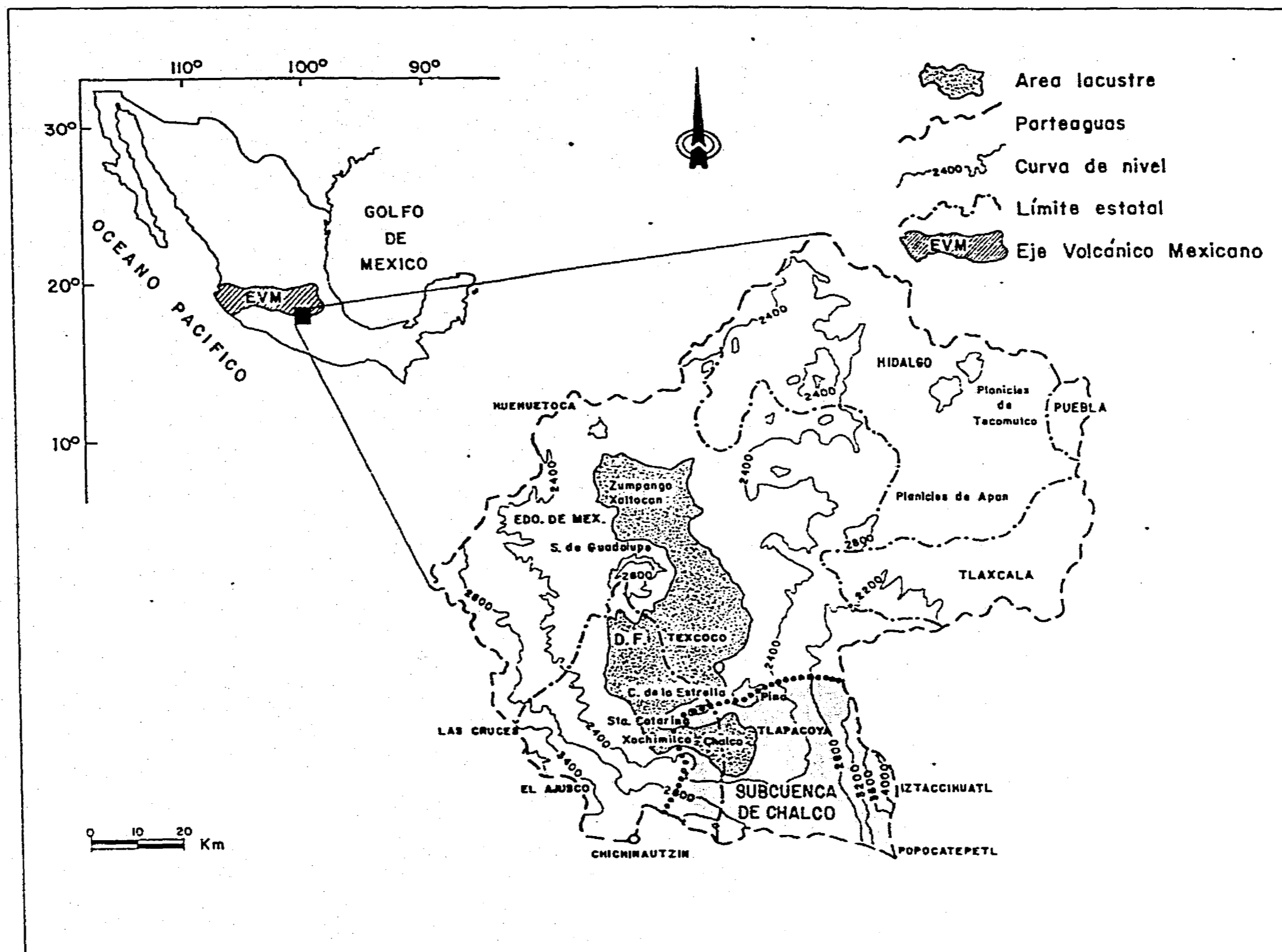


Figura 6.1-Mapa de ubicación de la Cuenca de México y la Subcuenca de Chalco.

alterada artificialmente por medio del túnel de Tequizquiac, el tajo de Nochistongo, el Canal del Desagüe y el emisor profundo, cuyas descargas son aprovechadas para riego en los estados de México e Hidalgo. El ciclo, roto con la desecación de los lagos, la excesiva explotación de los acuíferos, la tala inmoderada y el crecimiento de la mancha urbana han afectado, particularmente la recarga. Los volúmenes involucrados son difíciles de estimar, pero sí observables por la desaparición de manantiales, en la parte sur de la Cuenca.

VI.2 Marco geológico

Hasta hace poco la geología de la Cuenca de México y por lo tanto, la parte central del EVM, sólo era conocida con base a estudios de geología superficial y pozos someros. La perforación del primer pozo profundo en la Cuenca (Pozo Texcoco) permite tener conocimiento de lugares cubiertos de grandes depósitos lacustres cuaternarios. Posteriormente, la construcción del drenaje profundo establece otra visión general, de la estructura de la Cuenca que se complementa con la información de las columnas estratigráficas de los pozos profundos realizados por Petróleos Mexicanos (PEMEX), después de los sismos de 1985.

El conocimiento del marco geológico, con la ayuda de otras disciplinas, es fundamental para establecer y entender la naturaleza, distribución espacial y comportamiento del medio físico a profundidad. En la Cuenca de México, se han realizado estudios de carácter geológico y de mecánica de suelos. Dentro de los trabajos, sobre la geología del subsuelo de la Cuenca destacan, entre otros, los estudios de Arellano (1953), Fries (1960), Schaeffer (1968), Mooser, (1975), (1978), y recientemente el de Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera, *op. cit.*.

VI.2.1 Geología histórica y tectónica.

El aspecto y relieve que hoy conocemos en la Cuenca de México debe su formación a procesos volcánicos y tectónicos, principalmente en los últimos 50 millones de años a partir del Eoceno Superior, donde estos procesos afectaron las diferentes formaciones existentes. Previamente al Eoceno la Cuenca se encontraba ocupada por mares someros. Al principio del Terciario éstos se van retirando debido al plegamiento de sedimentos y calizas y al levantamiento paulatino del continente (Mooser, *op. cit.*).

La geología de la cuenca de México está íntimamente ligada a la tectónica del EVM. Mooser, *Op. cit.*, establece varias fases de vulcanismo, indicando que las rocas más antiguas de la Cuenca afloran en el noroeste donde las series volcánicas están compuestas por lavas intermedias y ácidas con abundantes ignimbritas, tobas y depósitos fluviales que constituyen la segunda fase del vulcanismo. Representan complejos intensamente fracturados, distribuidos en fosas y pilares dirigidos al noreste que afloran al norte de Tepoztlan al noroeste de la Cuenca. Aún así, estudios realizados en el EVM (Nixon *et al*, 1987) reportan fechamientos, mas recientes, con K-Ar para el vulcanismo del Cenozoico Tardío en la parte central de México.

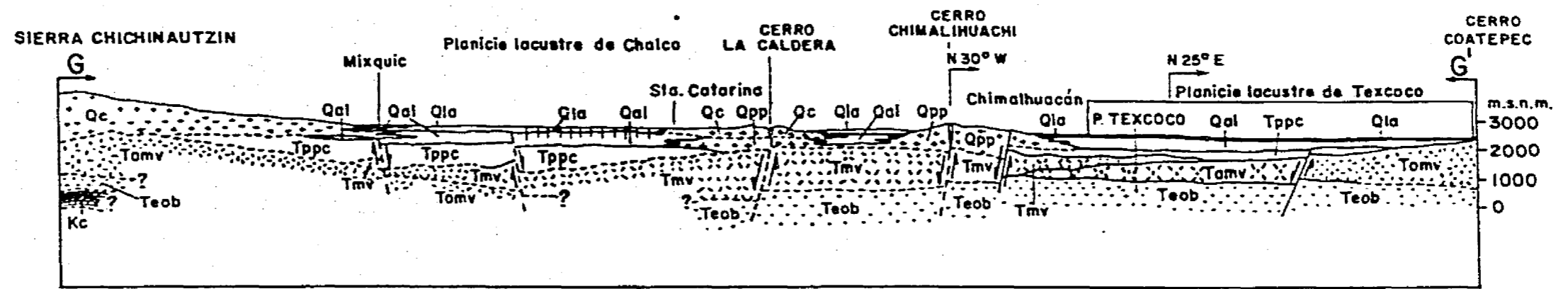
La tercera y cuarta fase de vulcanismo, se desarrolla en el Oligoceno Superior y en el Mioceno. Las rocas más antiguas, que afloran en la parte meridional de la Cuenca son dacitas, encontrándose las rocas de la tercera fase ubicadas en las bases de las principales sierras ubicadas al este y oeste de la Cuenca. Las caracterizan su avanzado estado de erosión y fuerte fracturamiento. En la cuarta etapa se forma la sierra de Guadalupe caracterizada por lavas intermedias y ácidas y las sierras de Tepoztlan. Estas estructuras presentan menos tectonismo y sus formas son cónicas, aunque erosionadas (Mooser, *op. cit.*).

La quinta fase volcánica, que perdura del Terciario Medio al Cuaternario, se inicia a fines del Mioceno y marca la formación de sierras, producto de efusiones andesíticas y dacíticas a través de estratovolcanes, que en el curso de su intensa actividad crearon extensos aparatos volcánicos y que fijaron los límites poniente y oriente de la Cuenca de México. (sierra de las Cruces, Río Frio y sierra Nevada).

Las últimas fases, la constituye el vulcanismo Cuaternario. Representan una continuación del vulcanismo del Terciario. Atribuyéndose a la sexta fase las andesitas basálticas y la formación de los cerros de Chimalhuacan, la Estrella, el Pino y el Peñón del Marquez, en el sur de la Cuenca y los cerros de Chiconautla y otras erupciones fenobasálticas y andesíticas, entre Tizayuca y Apan y a la última fase la formación de la sierra de Chichinautzin, en el Cuaternario, que obstruyó el drenaje al sur, creando una cuenca cerrada.

La geología superficial de la Cuenca consiste, básicamente de rocas volcánicas y sedimentos de origen lacustre y aluvial. Las primeras, fueron originadas por la actividad volcánica existente en la Cuenca, a partir del Oligoceno Superior, que ha dado lugar a gran número de aparatos volcánicos (volcanes monogénicos, poligenéticos, estratovolcanes, anillos y conos tobaceos, domos, etc) y a una notable cantidad de productos derivados de esta actividad (coladas lávicas, depósitos freatomagmáticos y plineanos, lahares, etc). Se encuentran andesitas, dacitas y riolitas, del Mioceno-Pleistoceno, en las sierras de las Cruces y Nevada y en el cerro Ajusco; basaltos y andesitas Plioceno-Pleistoceno en la sierra de Santa Catarina y formaciones volcánicas recientes (basaltos y andesitas) en la sierra de Chichinautzin (figura 6.2).

Los depósitos aluviales, que se encuentran en el área, provienen de las laderas de las sierras y han sido transportados por corrientes fluviales hacia el centro de la Cuenca. Los depósitos lacustres subyacen los aluviones interdigitándose con ellos a profundidad. En la parte sur, los materiales volcánicos, principalmente lavas y piroclastos de tipo basáltico están



CUATERNARIO		TERCIARIO		CRETACICO	
Qia	Depósito lacustre	Tppc	Depósitos piroclásticos y clásticos no diferenciados	Kc	Formación Cuautla
Qal	Aluviones	Tmv	Rocas volcánicas — Mioceno Medio Tardío	Km	Formación Morelos
Qc	Formación Chichinautzin	Tomv	no diferenciadas. — Oligoceno Tardío—Mioceno Temprano		
Qpp	Formación El Pino	Teob	Grupo Balsas		

Figura 6.2—Sección geológica representativa de la Cuenca de México.
(Modificada de Vázquez-Sánchez y Jaimes Palomera, 1989).

interdigitados, hacia sus estribaciones, con materiales aluviales y lacustres.

La historia geológica de la Cuenca está ligada a un largo proceso volcánico de cincuenta millones de años y que abarca dos etapas tectónicas principales (Mosser, *op. cit.*):

La primera, que duró 45 millones de años, alcanzando su máxima actividad en el Mioceno Inferior, formando estructuras dirigidas de suroeste a noreste, formando un antiguo sistema de bloques y fosas. Al final del Mioceno, la gran depositación de productos volcánicos produce una depresión en el sur de la Cuenca y en valle de Toluca (fenómeno que puede observarse en el flanco sur de la sierra de Chichinautzin) y

la última, (cinco millones de años), con estructuras dirigidas de oeste a este que desarrollaron un moderno sistema de bloques como consecuencia de un hundimiento cortical alargado que hacia su parte central se desintegró en escalones.

VI.2.2 Sucesión litoestratigráfica.

Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera, *op. cit.*, han realizado una revisión y análisis de las características líticas, tipo de vulcanismo y datos geocronológicos y paleomagnéticos que permiten entender la litoestratigrafía de la región. La tabla 6.1 presenta la correlación estratigráfica para la Cuenca de México y áreas adyacentes realizada, en su mayor parte, por Fries *op. cit.* En el APENDICE E se presentan las formaciones más importantes donde las marcadas con asterisco (*), representan litotipos que afloran, en el área de estudio, donde el alineamiento de numerosos aparatos volcánicos y la dirección de los flujos lávicos y piroclásticos evidencian un control tectónico.

ERA	PERIODO	EPOCA	CUENCA DE MEXICO Y AREAS ADYACENTES				
CENOZOICO	TERCIARIO	CUATERNARIO	HOLOCENO	LACUS F.M. CHICHITRE* NAUTZIN* F.M. POPOCATEPETL*			
			PLEISTOCENO	ALUVION	FORMACION IZTACCIHUATL*		
				FORMACION TLALOC*			
		FORMACION EL PINO*					
		FORMACION LLANO GRANDE*					
		NEOGENO	PLIOCENO	PIROCLASTOS Y CLASTOS NO DIFERENCIADOS*	ROCAS VOLCANICAS MAFICAS	RIOLITA NAVAJAS	FM LAS CRUCES
	DEPOSITOS VOLCANICOS			FM OTOMI			
	PALEOGENO	MIOCENO	ROCAS * EXTRUSIVAS	FORMACION TEPOZTLAN	GRUPO PACHUCA		
			ROCAS * VOLCANICAS	RIOLITA TILZAPOTLA			
		OLIGOCENO					
	EOCENO		GRUPO BALSAS				
		PALEOCENO	GRANITO COLOTEPEC				
MESOZOICO		CRETACICO	TARDIO	FORMACION MEXCALA			
	FORMACION CUAUTLA*						
	TEMPRANO		FM MORELOS*	FM EL DOCTOR			
			FORMACION XOCHICALCO				
			NEOCOMIANO				

* FORMACIONES QUE AFLORAN EN EL AREA DE ESTUDIO
 [] FALTA DE DEPOSITO O EROSION

Figura 6.1- Correlación estratigráfica de la Cuenca de México y áreas adyacentes.
 (Modificada de Vázquez-Sánchez y Jalme Palomera, 1989).

VI.3. Consideraciones acerca de la evolución del paisaje de la Cuenca

La evolución, en épocas recientes, del paisaje de la Cuenca de México, permiten entender la vinculación de la hidrogeología superficial con la subterránea y evaluar el impacto que sobre el medio ambiente ha tenido el manejo del recurso subterráneo. Fuentes históricas, anteriores a 1900, permiten entender el paleopaisaje de la Cuenca y conocer su antigua hidrología. A diferencia de otros autores, que postulaban la existencia de una sola extensión lacustre, Niederberger (1987) establece que la Cuenca se encontraba ocupada por vastas extensiones de lagos y pantanos que formaban tres ensambles naturales o cuencas secundarias, situadas a niveles ligeramente distintos. Estos tres subsistemas lacustres son:

- a) La cuenca septentrional (Zumpango-Xaltocan)
- b) La cuenca central (México-Texcoco), y
- c) la cuenca meridional (Chalco-Xochimilco).

El sistema hidrológico que existía en la Cuenca antes de la llegada de los españoles, estaba formado por una serie de lagos y lagunas de gran extensión, dentro de las cuales las más importantes eran Texcoco, México, Chalco, Xochimilco, Zumpango, Xaltocan, San Cristobal, Apan y otras, de menor importancia (figura 6.3). Con un marcado contraste de salinidad entre el lago central (Texcoco) y los lagos meridionales, de agua dulce, y el de Zumpango, al norte.

La subcuenca central, situada en medio de las otras dos, actuaba como reservorio recibiendo excedentes de agua de las otras. En la época de la Conquista, estaba protegida por un complejo sistema de diques y represas. Estos diques prehispánicos permitían dominar los niveles de las aguas y proteger ciertas porciones de la subcuenca central de las aguas, especialmente salinas, del lago de Texcoco.

Los diferentes elementos de la subcuenca septentrional, especialmente el lago de Zumpango, el más alto en ubicación, formaban entidades independientes, cuyo eventual excedente de agua,

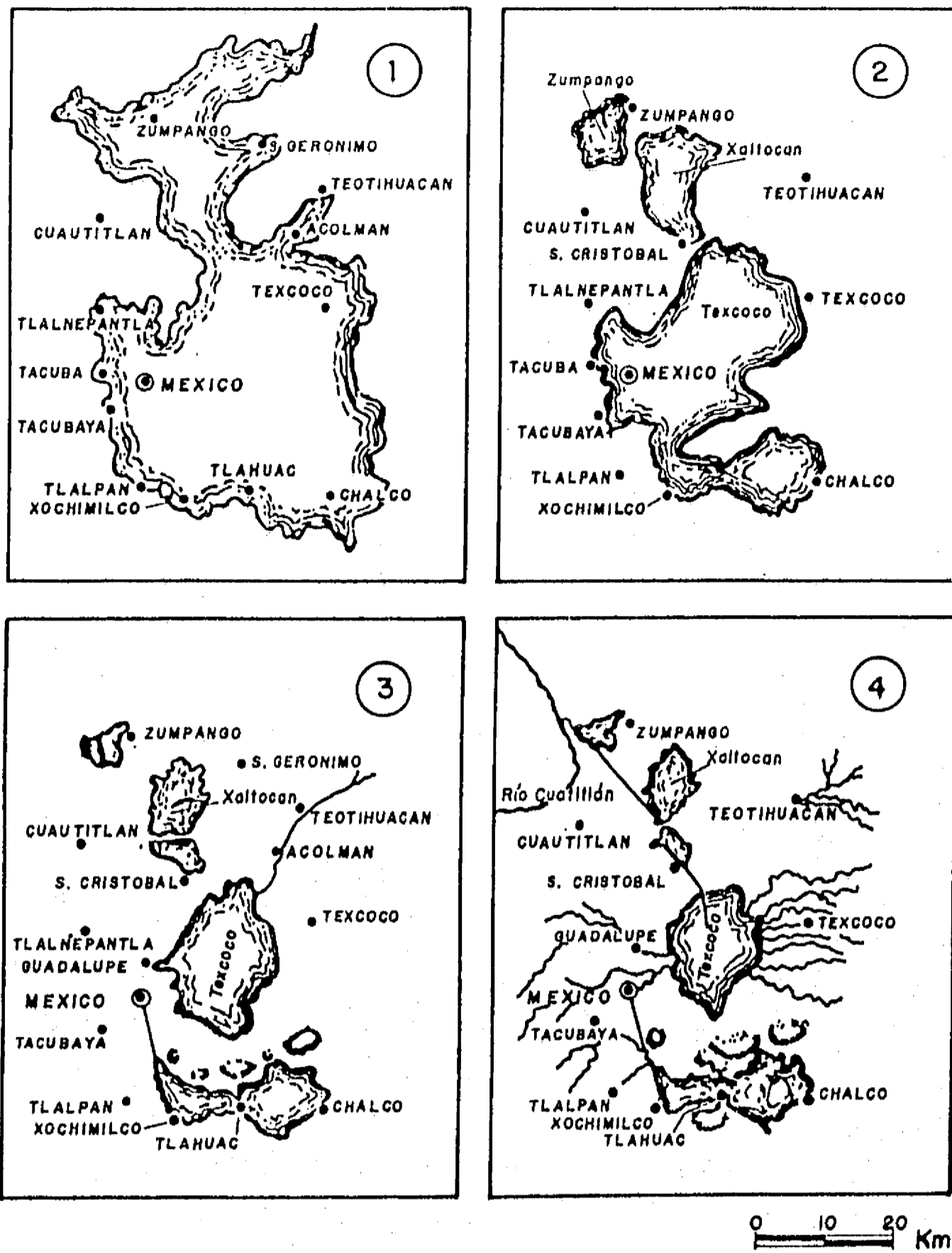


FIGURA 6.3—EVOLUCION DE LA ZONA LACUSTRE EN EL VALLE DE MEXICO

- 1) Los límites aproximados durante la época diluvial.
- 2) a comienzos del siglo XVI.
- 3) a comienzos del siglo XIX.
- 4) en el año 1889.

(Según Elisabeth Schilling "Die schwinmenden Gärten von Xochimilco". Kiel, 1938).

se vertía en dirección sur, hacia la subcuenca central.

La meridional, contrariamente a la central, se caracterizaba por orillas relativamente estables, ya que contaba con un flujo constante de agua procedente de varios ríos perennes y múltiples manantiales, con la posibilidad de verter sus excedentes de agua en la cuenca central, situada a un nivel más bajo. Posteriormente, la cuenca meridional fue dividida artificialmente, en dos partes, por un dique (norte-sur), de agua dulce y niveles relativamente poco profundos que promovieron principalmente, por la existencia de fuentes de agua dulce, producto de la condición de equilibrio del sistema lacustre, el establecimiento de pueblos rivereños (Chalco, Ayotzingo, Mixquic, Tlapacoya, Xico, Xochimilco, etc) y el desarrollo de un tipo específico de agricultura en la región (las chinampas), así como de una compleja organización económica entre diferentes pueblos. La intensa ocupación de las riveras del lago meridional, propició una larga simbiosis hombre/sistema acuático.

En 1862, Orozco y Berra establece las alturas relativas de estas tres cuencas secundarias, respecto al lago de Texcoco, en la parte central, que es el más bajo (tabla 6.2). En esa época, las extensiones lacustres ya se encontraban considerablemente disminuidas y no ocupaban más de 500 Km².

Subcuenca		Profundidad (m)
Central	Lago de Texcoco	0.0
Meridional	Lago de Chalco	3.082
	Lago de Xochimilco	3.139
Septentrional	Lago de San Cristobal	3.597
	Lago de Xaltocan	3.474
	Lago de Zumpango	6.062

Tabla 6.2. Niveles relativos de los antiguos lagos
(tomado de Orozco y Berra, 1862)

En la actualidad, el área lacustre activa de la Cuenca no rebasa los 50 km² y comprende remanentes de los lagos de Texcoco, Zumpango y Xochimilco y Chalco. Se han iniciado una serie de obras de rescate en los remanentes actuales de los antiguos Lagos, especialmente en Texcoco que durante 15 años ha tratado de restablecer el equilibrio ecológico perdido producto del desecamiento y la contaminación por aguas residuales y recientemente, los trabajos ya iniciados del Rescate Ecológico de Xochimilco.

El programa del Proyecto Lago de Texcoco tiene entre uno de sus objetivos la recuperación de suelos salino-sódicos (14500 Has) para aprovechamiento agropecuario y la plantación de varios millones de arboles. Esta transformación de tierras, salitrosas, en áreas verdes mediante siembra de zacate salado y la construcción de cinco lagos para almacenamiento y regulación de agua y dos plantas de tratamiento de aguas residuales. Contribuye a regenerar el habitat perdido propiciando el arribo de aves migratorias y evitando tolvaneras que provocaban enfermedades y contaminación. En esta zona, la evaporación, tres veces mayor que la precipitación, y las obras de desagüe (para evitar inundaciones) contribuyeron a una paulatina desecación del antiguo Lago. Estos efectos están siendo corregidos mediante las acciones de este Plan, con la intención de controlar el proceso de deshidratación y desertificación de este lugar.

Las características de los suelos del ex-lago de Texcoco son únicas en el mundo. Sus arcillas volcánicas, impermeables, presentan gran plasticidad y baja resistencia a la compresión.

El lago de Texcoco juega un papel muy importante, dentro de los cuerpos receptores de aguas residuales. Recibe aportaciones de agua pluvial de los ríos del Oriente y desechos líquidos de los ríos de la Compañía y Churubusco permitiendo la reutilización de agua.

De la misma manera se trata de recuperar parte de la zona lacustre de Xochimilco (lago y región chinampera) mediante aguas tratadas en la planta del cerro de la Estrella. El Programa de

Recuperación Ecológica emprendido por el DDF, pretende de esta forma controlar las inundaciones de áreas periféricas, de Tlahuac y Xochimilco, aprovechando aguas residuales y creando zonas recreativas.

La zona de reserva ecológica de Chalco comprende los remanentes del antiguo Lago. La planicie inundada, incrementa su extensión durante la época de lluvias. Aún así, el tirante de agua no rebasa el nivel reportado por Orozco y Berra, *op. cit.*. Una serie de mediciones realizadas en los años 88, 89 y 90, mostraron profundidades de 50 a 70 cm, en las márgenes, y de 120 a 150 cm, en el centro de la zona inundada en periodos posteriores a la época de lluvias. Aunque no se tiene un registro histórico confiable de la evolución del nivel relativo del agua, esta zona lacustre muestra un carácter perenne.

VI.3.1 Obras hidráulicas

Durante la época prehispánica, se relizaron obras hidráulicas como el albarradon de Netzahualcoyotl que separaba la Ciudad de Tenochtitlán de las aguas salinas del lago de Texcoco cuyas aguas eran mas bajas. En el Sur, se encontraba el dique de Cuitláhuac construido para separar los lagos de Chalco y Xochimilco. También se construyeron calzadas, como las de Tacuba, Chapultepec, San Antonio y Coyoacán y otras, que cruzaban la Ciudad y eran navegables (Tepeyac, hacia el norte, Tlacopan, hacia el occidente e Ixtapalapa, hacia el sur) (Gurria, *op. cit.*).

Despues de la conquista de la capital mexicana por los españoles y la inundación de 1555 es que se construye el dique de San Lazaro y se plantea la idea de desviar algunos ríos que descargaban en los lagos. A principios del siglo XVI, se propone la construcción del Tajo de Nochistongo que consistía en llevar las aguas del lago de Zumpango y del río Cuautitlán por medio de un canal y un túnel hacia el río Tula; proyecto no terminado hasta 1822. Otro proyecto,

propuesto en el siglo XVII, fue la apertura del canal de Tequixquic, que partiría del lago de Texcoco y por medio de un túnel comunicar la cuenca con el exterior. Estos trabajos finalizaron bajo el régimen del presidente Benito Juárez.

Durante el porfiriato, con el objeto de prevenir inundaciones, se construye el Gran Canal del Desagüe, conduciendo aguas negras y residuos fuera de la Cuenca. Aún así, las inundaciones continuaron y en 1947 empieza a funcionar el nuevo túnel de Tequixquiac, para dar salida a aguas negras que rebasaban la capacidad del gran Canal. Sin embargo, el problema de la extracción de agua en el subsuelo provocó problemas de hundimiento, quedando algunos lugares más bajos que el lago de Texcoco provocando más inundaciones.

En 1960, se construye el Emisor Poniente, que transporta aguas negras, desde el vaso de Cristo hasta el Tajo de Nochistongo y el gran Canal, a través del lago de Zumpango. Esta gigantesca obra de ingeniería, entra en servicio en 1964, con una longitud de 34 kilómetros. En 1975, se inicia la construcción del sistema de Drenaje Profundo del Distrito Federal, con una extensión de 80 kilómetros, para acabar con las inundaciones y conducir aguas negras y pluviales de la ciudad, hacia el valle del Mezquital, para ser aprovechadas para riego. En la actualidad y como acciones futuras se planea la extensión del drenaje profundo y conductos semiprofundos para cubrir la mayor parte del área urbanizada.

Las tres salidas que se tienen para las aguas de la Cuenca de México son: el Emisor Poniente, el Gran Canal del Desagüe y el Emisor Central. Diferentes porciones del Gran Canal han sido rehabilitadas debido a problemas de azolve lo que provocaba su desbordamiento y afectación de áreas urbanas vecinas. Para 1991, se concluyó la rehabilitación de 20 Km del río de la Compañía. Las zonas con servicios ubicadas al sur-oriente de la Cuenca descargan al río de la Compañía, las colonias al oriente y poniente del Gran Canal y las del poniente, al Emisor del Poniente.

VI.4 El sistema acuífero de la Cuenca

A grandes rasgos, desde el punto de vista hidrogeológico, la Cuenca de México representa una gran presa "azolvada", cuyas paredes están constituidas por lavas y tobas recientes. En su interior, en la parte superior, se encuentra una unidad hidroestratigráfica arcillosa, de alta porosidad, de espesor variable, que llega a tener, en algunas zonas, de 200-400 metros (subcuenca de Chalco, lago de Texcoco), que origina el acuitardo, formado principalmente por materiales sedimentarios del Cuaternario tales como: depósitos lacustres, cenizas volcánicas, arcillas, arenas, etc. Bajo esta unidad, se encuentra el acuífero, actualmente en explotación, formado por material granular, más grueso, que el del acuitardo y constituido principalmente por piroclásticos, conglomerados, y otro tipo de material volcánico; su espesor es también variable (generalmente mayor de 200 metros), al igual que sus propiedades hidráulicas. Le subyacen rocas volcánicas fracturadas, cuya base llega a estar del orden de 2,000 metros en el centro de la Cuenca, disminuyendo hacia las márgenes. El contenedor impermeable, lo constituyen rocas volcánicas y calizas cretácicas.

VI.4.1 Comportamiento hidrodinámico de las formaciones acuíferas

Las unidades hidroestratigráficas antes mencionadas, presentan un amplio intervalo de variación en sus parámetros hidrodinámicos (permeabilidad, coeficiente de almacenamiento), siendo valores de medios a altos para los dos últimos y bajos, para la primera. Estas unidades, se encuentran comunicadas hidráulicamente. La interrelación de la primera, con la segunda ha quedado demostrada por los fenómenos de hundimiento, que han afectado a la Ciudad de México. Esta, ha sido provocada por la excesiva extracción en el

acuitardo y en la parte superior, de la segunda unidad, induciéndose así un flujo del acuitardo hacia este acuífero (Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera, *op. cit.*).

Este multiacuífero es recargado, básicamente, por infiltraciones de agua de lluvia que se precipitan en los flancos de las sierras del poniente, sur y oriente de donde fluye hacia la parte central de la Cuenca. En los flancos de Santa Catarina, también existe una recarga hacia el Valle.

Lesser *et al*, *op. cit.*, establecen de acuerdo con las características del subsuelo y su funcionamiento hidrogeológico tres subsistemas acuíferos principales:

- a) El de la zona metropolitana constituido principalmente por material granular de permeabilidad media a baja, recargado principalmente por las sierras del poniente y alrededores de la Delegación de Tlalpan.
- b) El correspondiente a la zona sur de la Cuenca, entre Xochimilco, Tlahuac y Chalco, recargado por infiltraciones de lluvia de las estribaciones de las sierras de Santa Catarina y Chichinautzin que la limitan al norte y sur. El flujo subterráneo se establece hacia el centro de los valles de Xochimilco y Chalco, que presentan niveles freáticos someros (10-40 m), cambiando su curso hacia el poniente y,
- c) el del lago de Texcoco, que presenta recarga proveniente de la sierra del Oriente. Este subsistema presenta materiales de baja permeabilidad. No existen extracciones importantes en esta zona y el gradiente es casi nulo. El nivel estático se encuentra cercano a la superficie (5-20 m).

En el oriente, a la altura del Aeropuerto capitalino existe un flujo subterráneo con dirección preferencial este-oeste hacia el centro de la zona metropolitana. En la parte central de la Ciudad existe un domo y un cono de abatimiento piezométrico, el primero generado por la suspensión de la extracción de pozos de esa zona y

los volúmenes adicionales generados por las fugas de agua potable. En la zona sur de la Cuenca de México, entre Xochimilco-Tlahuac-Chalco el flujo subterráneo se establece, primeramente, hacia el centro del Valle y después circula hacia el poniente. En la porción occidental, que corresponde al área de Texcoco, se observa el flujo en dirección este-oeste, incrementándose el gradiente a partir de este punto, donde colinda con el subsistema acuífero metropolitano (figura 6.4) (Lesser et al., *op. cit.*).

El régimen de flujo es controlado por la extracción ($43 \text{ m}^3/\text{s}$), predominando pozos con profundidades menores o iguales a 100 m. El suministro de agua subterránea, en la Cuenca, representa cerca del 70-80% de su abastecimiento total, aunque no se cuenta con cifras precisas al respecto.

Respecto a la química del agua subterránea, las concentraciones de sólidos totales oscilan entre 200 y 400 mg/l, con algunas anomalías que van de 1000 mg/l, en la Agrícola Oriental, a más de 20,000 mg/l en Sosa Texcoco (Rudolph et al, 1989). El carácter anómalo de esta alta mineralización se asocia a aguas almacenadas en estratos de evaporitas de pequeños espesores y poca extensión lateral. Sólo se han detectado en esa área.

VI.5 Caracterización geoelectrica de las principales unidades litoestratigráficas acuíferas.

Puesto que esta investigación está basada en la interpretación, correlación y transcripción geológica de estudios eléctricos, es fundamental el contar con información confiable que nos permita calibrar los modelos geoelectricos propuestos. Por esto, se reinterpretaran los sondeos eléctricos verticales de un macroperfil localizado en la parte centro-norte para la obtención y selección de intervalos resistivos y su asociación con entidades litológicas. El proceso de interpretación se basó en un programa

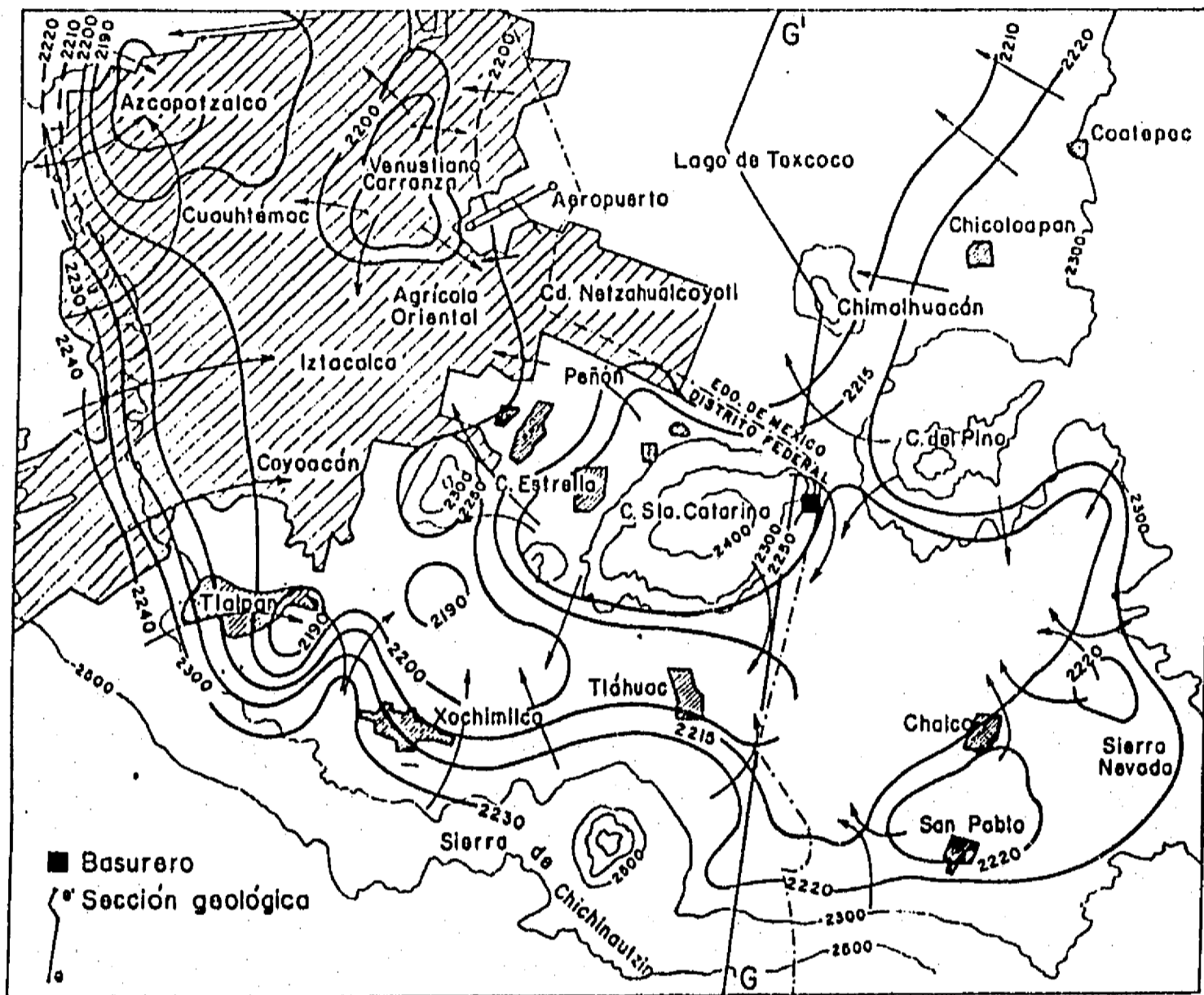


Figura 6.4-Régimen de flujo subterráneo de la parte sur de la Cuenca de México
(Modificado de Lesser et al., 1990)

que emplea el algoritmo propuesto por O'Neill cuya estructuración fue modificada para adecuarlo al espaciamiento electródico utilizado.

Los resultados de los procesos, de interpretación geoelectrica, requieren para su asociación geológica de la existencia de tablas de correlación, entre rangos resistivos y unidades litológicas, elaboradas para cada entorno geológico. En medios sedimentarios, la identificación geoelectrica de las diferentes unidades litoestratigráficas, es complicada por el grado de saturación de las mismas y la mineralización del agua saturante. Para diferenciar el efecto de estas dos últimas características que le confieren al medio la misma respuesta geoelectrica es menester analizar además de columnas litológicas, registros eléctricos de pozos que permitan una correcta asociación entre valores resistivos y unidades litoestratigráficas saturadas con agua de diferente mineralización.

Hay que tomar en cuenta, que casi todas las formaciones sedimentarias, de interés geohidrológico, caen en el intervalo resistivo de 5 - 50 ohm-m. De no contar, con este tipo de información no es posible pasar de perfiles geoelectricos a secciones geológicas. La versatilidad de estos métodos, de prospección geofísica, está condicionada por la cantidad y calidad de la información geológica.

La correlación geológica, de los perfiles geoelectricos, se logró mediante la asociación, de intervalos resistivos a estratos geológicos de pozos, considerando la mineralización del agua saturante. Dada la complejidad geológica, que presenta la Cuenca de México, y su gran extensión se tomó, como punto de referencia un macropperfil geoelectrico localizado en la parte central-norte de la Cuenca, con una longitud de 105 km integrado por 8 líneas geoelectricas (Rodríguez y Ochoa, 1989). Este perfil, compromete 6 pozos, de más de 200 metros, con información geológica confiable que se utilizaron para la asociación de intervalos resistivos, con las formaciones geológicas detectadas. No se efectuó, una descripción estratigráfica de detalle, ya que la mayoría de los

pozos presentan profundidades no mayores a 100 metros. Las líneas geoelectricas presentan continuidad en grandes paquetes geológicos y no en algunos pequeños.

Se presentan a continuación cuatro de las líneas geoelectricas que cubren el oriente de la Cuenca y donde se detectaron formaciones geológicas, que se encuentran tambien en la subcuenca de Chalco (figura 6.5).

VI.5.1 Línea APAN

En esta línea, se identificaron 8 unidades geológicas, las cuales se evidenciaron de la siguiente manera: la primera se observa a lo largo de toda la sección, caracterizándose por un rango resistivo de 12 a 32 Ω -m y profundidad de 5 a 25 metros, se asocia a aluviones. Le subyacen otras tres unidades; hacia los SEV's 58 y 59 se visualiza un cuerpo cuyo rango resistivo oscila entre los 130 Ω -m y espesor de 55 metros aproximadamente, se asocia a basaltos fracturados del Cuaternario de la Formación El Pino, siendo su fuente de emisión el cerro San Pedro. Entre los SEV's 58 al 84 se presenta una unidad con rango resistivo entre 30 a 40 Ω -m y espesor variable de 150 a 100 metros, se asocia a arenas, gravas y arcillas, esta unidad se observa entre los SEV's 65 al 69 a una profundidad de 180 metros aproximadamente. Del SEV 64 al 70 se identificó una unidad con espesor de 110 metros y rango resistivo de 22 a 32 Ω -m, se correlaciona con arcillas que le dan un carácter de confinado al acuífero subyacente constituido por material granular y piroclastos.

A una profundidad mayor de 200 metros, entre los SEV's 64 y 70, se evidencia una unidad con espesor variable y rango resistivo de 17 a 35 Ω -m asociándosele a piroclásticos del Plioceno representados por material de grano fino a medio. Entre los SEV's 58 al 64 esta unidad aumenta su resistividad entre 44 y 55 Ω -m esta variación se podría explicar por cambios en la granulometría. Entre

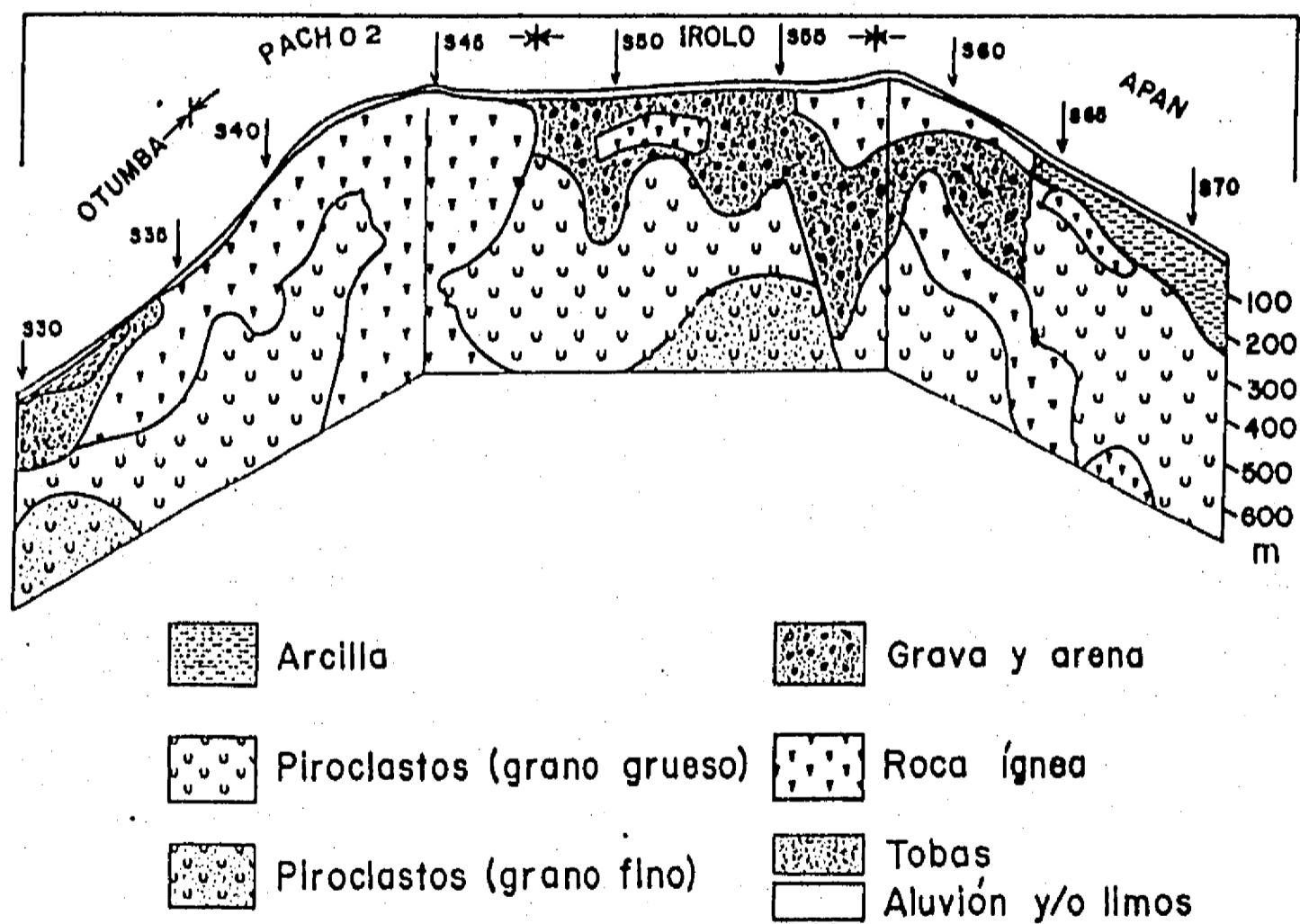
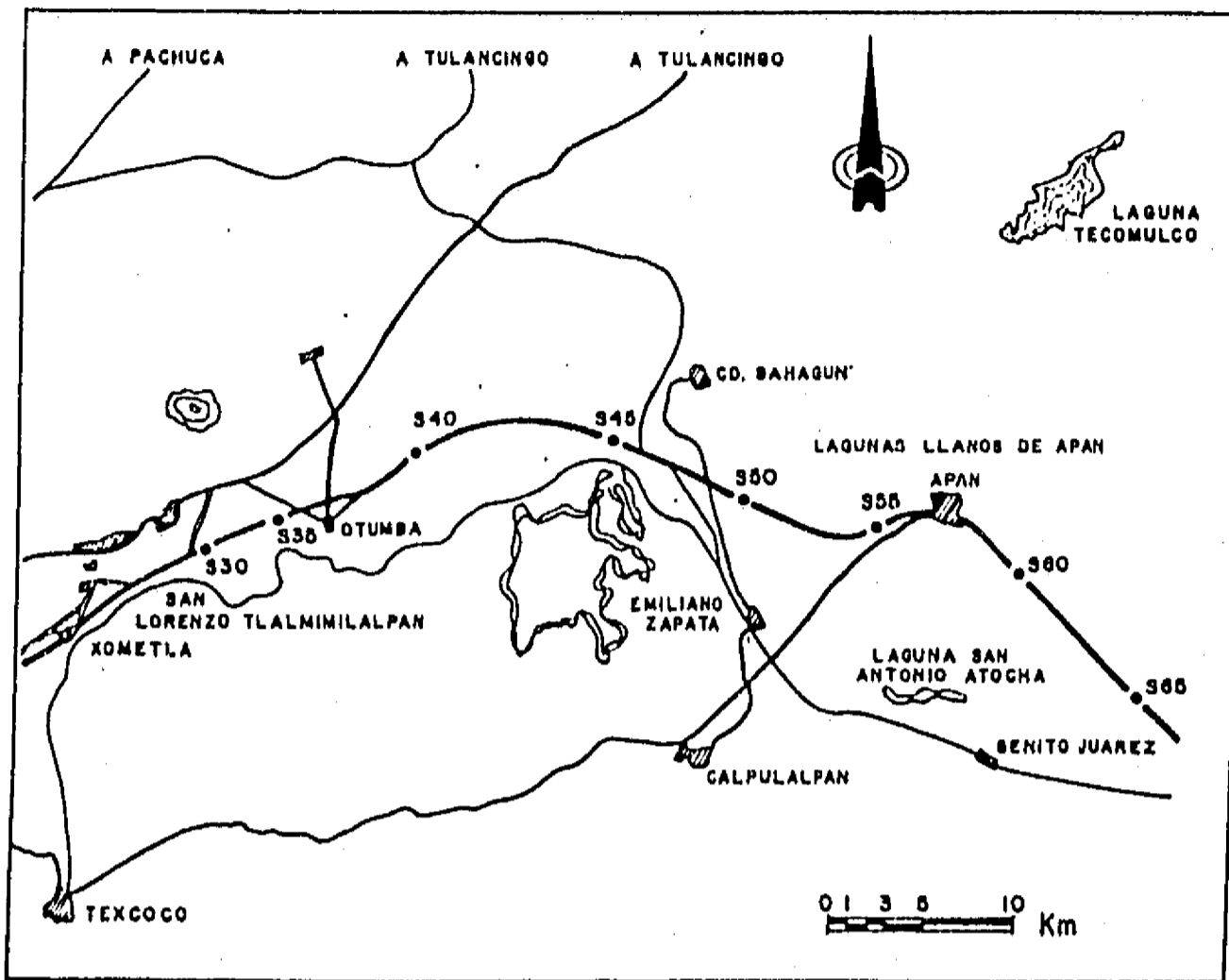


Figura 6.5-Ubicación de perfiles geoelectrónicos y su correlación litológica

los SEV's 59 al 67 se presenta una unidad con resistividad de 118 a 334 Ω -m y espesor variable, se visualiza a una profundidad mayor de 200 metros, su geometría podría estar controlada por los eventos volcánicos que le dieron origen, se asocia a andesitas del Plioceno, siendo su fuente de emisión el cerro de San Pedro, esta unidad se observa de nuevo entre los SEV's 68 y 69 a una profundidad mayor de 500 metros. Entre las unidades de andesitas se observan piroclásticos con predominio de material de grano fino que posiblemente estén rellenando una superficie de erosión. Entre los SEV's 58 al 65 se observa una unidad con características geoelectricas semejantes a piroclásticos del Plioceno con material de grano grueso, observándose a una profundidad de 400 metros.

VI.5.2 Línea IROLO

En esta línea se distinguen 5 unidades geológicas. En los primeros 25 metros se distingue una capa de aluviones con rango resistivo es de 11 a 36 Ω -m. Le subyace una unidad con rango resistivo es de 26 a 70 Ω -m y espesor variable, esta unidad se extiende a lo largo de la sección y se asocia a piroclásticos del Plioceno (arenas, gravas y arcillas) de la Formación Calpulalpan (Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera, *op. cit.*), esta unidad es visualizada también en la línea Apan.

Entre los SEV's 49 al 53 a una profundidad de 80 metros se evidencia un cuerpo con resistividad de 130 a 250 Ω -m y espesor medio de 70 metros, se asocia a basaltos fracturados con interdigitaciones de escoria, siendo posiblemente su fuente de emisión el cerro Zontepéc. A una profundidad mayor de 200 metros se visualiza, entre los SEV's 48 y 58, una unidad con resistividad de 13 a 36 Ω -m y espesor variable, se asocia a piroclastos del Plioceno inferior con predominio de material de grano grueso de la Formación Calpulalpan.

Entre los SEV's 52 al 57 se observa una unidad con

resistividad menor de 15 Ω -m a una profundidad mayor de 400 metros, se correlaciona con piroclastos del Plioceno inferior con predominio de materiales de grano fino, de baja permeabilidad.

Entre los SEV's 54 y 55 se detectó una discontinuidad geoelectrica a profundidad relacionada con una zona de fallamiento.

VI.5.3 Línea PACHO2

En esta línea, se identificaron 3 unidades geológicas. La primera se extiende a lo largo del perfil y se visualiza en los primeros 20 metros, se caracteriza por un rango resistivo de 13 a 31 Ω -m y se asocia a aluviones. Le subyace una unidad con rango resistivo de 255 a 3000 Ω -m y espesor variable, se correlaciona con basaltos sano fracturados del Cuaternario, lo que explica su amplio rango resistivo. Entre los SEV's 40 al 47 y a una profundidad mayor de 100 metros esta unidad se visualiza más fracturada y con grado de saturación mayor, donde su resistividad varia de 25 a 70 Ω -m. Entre los SEV's 41 al 44 se encuentra esta misma unidad con un menor grado de alteración, presentando una resistividad de 3000 Ω -m. Le subyace una unidad litoestratigráfica del Plioceno Inferior que presenta predominio de materiales de grano fino.

VI.5.4 Línea OTUMBA

En esta línea se identificaron 5 unidades geológicas. La primera se extiende someramente a lo largo del perfil. Por su carácter geoelectrico se le asocia a aluviones, siendo estos material de arrastre de los cerros circunvecinos. Le subyace, entre los SEV's 30 al 33, una unidad con rango resistivo de 23 a 30 Ω -m y espesor medio de 40 metros, se le asocia a arcilla lo que le da un confinamiento al acuífero que le subyace. Estas arcillas pueden ser

el resultado de los procesos de sedimentación relacionados con remanentes del lago de Texcoco.

Entre los SEV's 30 al 34 se distingue una unidad con rango resistivo de 66 a 88 Ω -m y espesor de 300 a 100 metros, se asocia con piroclastos del Cuaternario de la formación El Pino. Le subyace a partir del SEV 32 en adelante una unidad con espesor variable y rango resistivo mayor de 239 Ω -m, se asocia con los basaltos sanos y fracturados de la línea PACHO2.

A una profundidad de 250 metros se evidencia una unidad con resistividad de 28 a 43 Ω -m y espesor variable, se asocia con piroclastos del Plioceno con material de grano medio a fino, encontrados también en la línea PACHO2.

A los 400 metros de profundidad se detectó entre los SEV's 30 al 32 una unidad que por su carácter geoelectrico se le asocia a piroclastos del Plioceno inferior con predominio de materiales de grano fino, de baja permeabilidad.

Los resultados obtenidos de la correlación geoelectrica-geológica del macroperfil son resumidos en la tabla 6.3, en donde se han asociado intervalos resistivos a diferentes unidades litoestratigráficas. Se puede observar que los materiales arcillosos presentan intervalos resistivos de 0.5 a 32 Ω -m, donde el valor mínimo corresponde a arcillas saturadas con agua mineralizada. Solo en la zona de Santa Catarina se tiene agua mineralizada (1100 mg/l); en el resto de la Subcuenca, la mineralización oscila entre 200 y 400 mg/l. Estas variaciones no son reflejadas en los valores resistivos obtenidos.

Roca	Intervalo (Ω -m)	Localización
arcilla (saturada con agua mineralizada)	8 - 16 19 - 30 18 - 32 0.5 - 8.0	Huehuetoca-Zumpango Otumba-Teotihuacán Apan Santa Catarina
arenas, tobas arcillas y gravas	4 - 20 30 - 35 60 - 66	Huehuetoca Irolo-Apan Apan
aluviones	10 - 24 17 - 31 15 - 28 12 - 24 16 - 37	Teotihuacán Otumba Irolo Apan Zumpango
limos	16 - 38	Zumpango-Tecamac
basaltos (no alterados)	500- 3000 3000	Otumba-Irolo Teotihuacán
basaltos (fracturados)	300 200- 585 48 - 70 (saturados) 132- 230	Teotihuacán Otumba-Irolo Otumba-Irolo Irolo
andesitas	102- 334 137- 250	Apan Zumpango
piroclastos del Plioceno (grano fino)	> 10 > 14	Otumba-Teotihuacán Tecamac-Zumpango Apan
piroclastos del Plioceno (grano grueso)	26 - 45 24 - 55	Otumba-Teotihuacán Tecamac-Zumpango Irolo-Apan
piroclastos del Mioceno	22 - 39	Huehuetoca

1100 mg/l

Tabla 6.3 - Identificación geoléctrica de algunos tipos de rocas en la Cuenca de México.
(modificada de Rodríguez y Ochoa, 1989)

CAPITULO VII

LA SUBCUENCA DE CHALCO

Se eligió como zona piloto, para este trabajo, la subcuenca de Chalco, ya que para los objetivos de la investigación presenta características y dimensiones ideales.

Los aspectos distintivos más importantes de esta región, que la hacen representativa de la Cuenca de México (CM), pueden ser resumidos en la siguiente lista:

- i) Es una cuenca hidrológica bien delimitada superficial y subterráneamente, con patrones de flujo equivalentes (de las montañas circundantes hacia el centro) y semejantes regímenes preferenciales de recarga, originada en las sierras vecinas.
- ii) Su constitución geológica es similar al del resto de la CM. Presenta un paquete sedimentario lacustre, un multiacuífero en medios granulares y fracturados y un contenedor impermeable de origen volcánico.
- iii) Existe información geológica, hidrogeológica, hidrogeoquímica y geofísica de calidad confiable.
- iv) Fenomenología geológica, hidrogeológica y socioeconómica similar.
- v) EL sur de la zona, presenta el mayor desarrollo urbano al igual que en la CM. En la Subcuenca, se conserva una de las pocas reservas ecológicas existentes. La expansión urbana, se extiende también hacia las áreas preferenciales de recarga.
- vi) Actualmente, presenta la mayor velocidad de subsidencia de la CM y fenómenos de subsidencia, semejantes a los que tuvo la CM en décadas pasadas.
- vii) Los volúmenes de extracción de la Subcuenca son equiparables, porcentualmente, a los de la CM, considerando las dimensiones acuíferas y la población abastecida.

viii) Se encuentran en ella fuentes de contaminantes bien identificadas similares a los de otros puntos de la CM. Entre ellos uno de los tiraderos de residuos municipales, más grandes de la Cuenca, así como canales de aguas negras.

Los puntos citados, remarcen algunos de los principales aspectos tomados en consideración, para la selección de la subcuenca de Chalco como cuenca piloto para estudios hidrogeofísicos de impacto ambiental. La validez de estos resultados, podría ser extendida también a cuencas similares ubicadas en el Eje Volcánico Mexicano, ya que se trata de cuencas y valles intermontanos de origen volcánico.

La subcuenca de Chalco puede ser considerada como un inmenso campo experimental, para estudios del agua subterránea, dada la relevancia de los procesos hidrogeológicos, socioeconómicos y de impacto ambiental que se han producido y los que tienen lugar.

El medio ambiente actual, es el que más se parece, de entre las otras regiones de la Cuenca de México, al antiguo paisaje, que ésta ofrecía. El drenaje artificial de las principales extensiones lacustres de la Cuenca, completado alrededor de 1900, ha representado, junto con la eliminación de los recursos silvestres de una zona acuática de gran productividad, la deforestación, la erosión y la contaminación del aire y agua, una más de las múltiples degradaciones ecológicas, que ha sufrido la Cuenca. Algunos de estos procesos han ocurrido ya, y otros se encuentran en desarrollo en la Subcuenca. Su estudio puede propiciar políticas preventivas y correctivas, cuyos resultados pudieran extenderse a la Cuenca de México.

Las zonas centro y sur de la subcuenca de Chalco, representan las áreas de desarrollo urbano más acelerado de la Cuenca de México, afectando inclusive las zonas de recarga de formaciones acuíferas locales, donde la incontrolable expansión urbana altera el ciclo hidrológico reduciendo las zonas de infiltración. La gran necesidad de agua potable, ha propiciado que en esta región la planicie lacustre presente la mayor velocidad de subsidencia de la

Cuenca debido al intenso régimen de extracción de más de 3 m³/s.

La presencia del basurero de Santa Catarina, uno de los más grandes en actividad, en las inmediaciones de la Subcuenca, ubicado en terrenos con permeabilidades variables facilita, en principio, la migración de lixiviados generados en el Basurero hacia las formaciones acuíferas actualmente en explotación, pudiendo comprometer los volúmenes explotados por baterías de pozos como la de Santa Catarina (14 pozos, con una extracción media de 90 l/s).

Superficialmente, la incorporación de otros contaminantes al sistema acuífero, provenientes de fuentes contaminantes ubicadas en la antigua planicie lacustre, se ve limitada por la presencia de un gran paquete arcilloso. Las arcillas lacustres, que se depositaron en los últimos 10,000 años (Marzal, 1975), juegan un papel importante en el control de la migración de contaminantes por su gran espesor y baja permeabilidad.

Este estudio pretende contribuir al conocimiento que se tiene de la Subcuenca, como parte integral de la Cuenca de México, desde el punto de vista de la íntima vinculación que existe entre la hidrogeología, la geofísica y el medio ambiente.

VII.1 Marco geográfico

La subcuenca de Chalco se encuentra ubicada al SE de la Ciudad de México, entre los paralelos 19° 19' y 19° 12' de latitud Norte y los meridianos 99° 00' y 98° 55' de longitud Oeste, con una altura promedio de 2240 m s n m cubriendo una extensión de aproximadamente, 1185 km². Forma parte de la Cuenca de México con la que está comunicada hidráulicamente.

El parteaguas de esta Cuenca hidrográfica (figura 7.1) está definido, en su parte septentrional, por el volcán Xaltepec, los cerros Telecón, el volcán Guadalupe, el volcán la Caldera, el cerro el Pino y los cerros Tejolote chico y grande continuando en dirección del cerro Telapón, ubicado en la sierra de las Cruces. De ahí, cambia de dirección hacia el sureste hacia los grandes

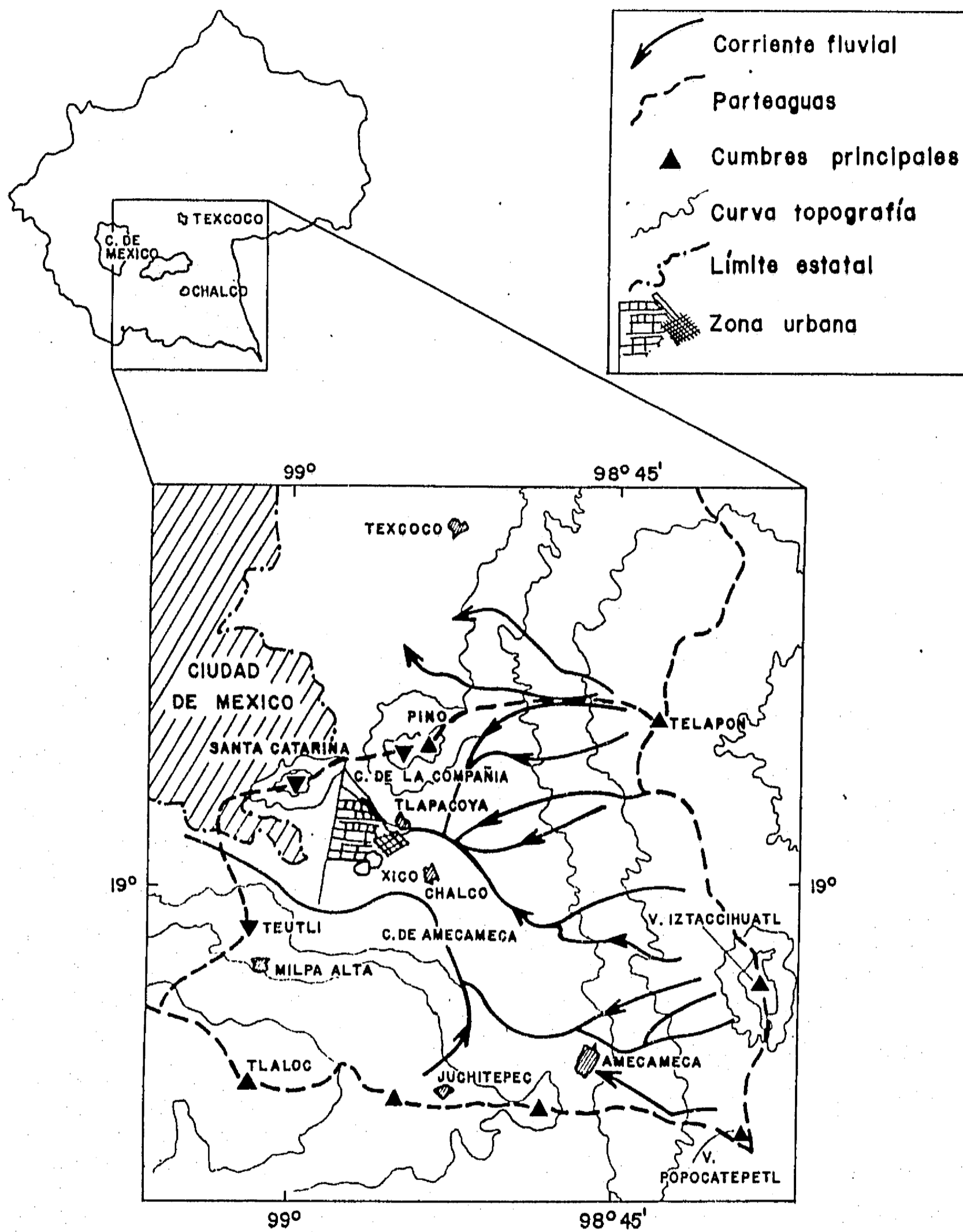


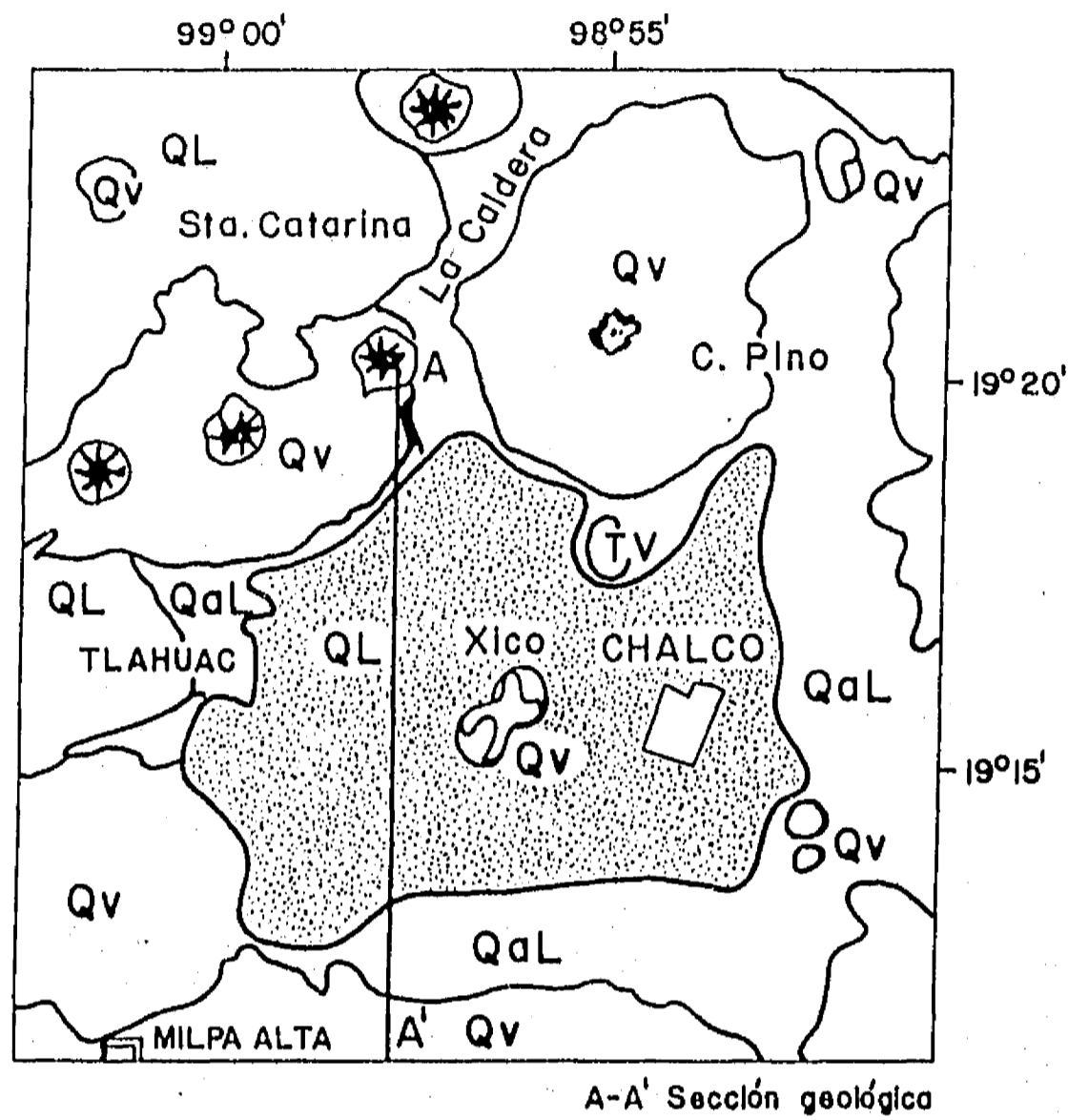
Figura 7.1 - Mapa de la subcuenca de Chalco y su localización dentro de la cuenca de México.

volcanes de sierra Nevada (Iztaccíhuatl y Popocatepetl) pasando por el cerro Papayo. El parteaguas meridional, de este a oeste, parte del Parque Nacional Izta-Popo, uniendo numerosos aparatos volcánicos pertenecientes a la Formación Chichinautzin, hasta el volcán Tláloc. Su límite occidental está definido por el alineamiento de los volcanes Tláloc y Teutli, cruzando la región de Milpa Alta y la zona chinampera de Tláhuac, para cerrar en el volcán Xaltepec.

En la parte central, se encontraba el antiguo lago de Chalco (115 km²), con una profundidad media, en 1866, de 2.05 m (Niederberger *op. cit.*), que corresponde a una planicie lacustre donde llegaban el río Ameca, que nace en la parte sur del volcán Iztaccíhuatl y el río de la Compañía (figura 7.1), que se ha convertido ahora en parte del Gran Canal, conduciendo, hacia el lago de Texcoco, aguas negras generadas en el área urbana de la ciudad de Chalco. Dentro de la zona previamente cubierta por el antiguo lago encontramos la antigua isla de Tlapacoya y un anillo de tefra de 100 metros de altura y 1,500 de diámetro denominado el cerro el Xico, fusionado con otra estructura, (Xico Viejo)

En la región, se encuentra ubicada una de las pocas reservas ecológicas que actualmente existen en las vecindades de la Ciudad de México. Cuenta con un área de más de 15 km² ubicada en la antigua zona chinampera. Esta reserva, en su porción central, es cortada por la batería de pozos de Santa Catarina-Yecahuizotl. Esta consta de 14 pozos de explotación con gastos del orden de 90 l/s cada uno que contribuyen al abastecimiento de agua potable del sur del Distrito Federal, principalmente la de Tláhuac.

En esta zona también se encuentra localizado uno de los asentamientos irregulares suburbanos más grandes del mundo que aún, hasta 1990, carecía de servicios públicos (agua potable, alcantarillado, servicios médicos, etc.) y uno de los mayores tiraderos municipales ubicado en el norte del área de estudio, en las faldas de una prominente estructura volcánica, conocida como la Caldera, que se eleva directamente del piso del antiguo lago (figura 7.2).



Rocas del Terciario

- Depósitos cuaternarios
- QL Depósito lacustre
 - QaL Aluvión alrededor de zonas lacustres
 - Qv Lavas, cenizas y depósitos epiclásticos de composición eminentemente andesítica y dacítica.
 - TV Incluye derrames de lava de composición dacítica.

Figura 7.2- Esquema geológico simplificado de la Subcuenca de Chalco.

VII.2 Marco geológico y geomorfológico

La subcuenca de Chalco está representada por la porción meridional de la Cuenca de México. Está limitada al norte, por las formaciones de Santa Catarina y el Pino, al este por las sierras Nevada y de Río Frio y al suroeste por el complejo volcánico de la Formación Chichinautzin, principal captador natural de agua subterránea. En el área se encuentran numerosos aparatos volcánicos de diferentes edades compuestos por productos expulsados de diversa índole. En la parte central, se formó una extensa planicie lacustre cuyas formaciones están relacionadas con la interrupción del drenaje, hacia el sur, que dió lugar a una cuenca cerrada.

El origen y formación del relieve de esta Zona, localizada al sur de la zona urbana de la Ciudad de México, se ha venido realizando a través de una serie de procesos tales como intemperismo, erosión, acumulación de sedimentos y tectonismo (que a su vez ha provocado vulcanismo). En general, hacia las márgenes está representada por un paisaje de conos cineríticos, abanicos volcánicos, laderas, coladas de lavas andesíticas y andesítico-basálticas, todas ellas afectadas por erosión reciente (Lugo, 1984).

El relieve producto de una gran actividad volcánica a fines del Pleistoceno y en el Holoceno está caracterizado por explosiones piroclásticas, efusión de lavas y alternancia de emisiones de lavas y piroclastos; formas características originadas por estos procesos son: conos cineríticos, abanicos volcánicos, laderas, coladas de lavas y estratovolcanes (Lugo, *op. cit.*).

Al norte, encontramos la Sierra de Santa Catarina, constituida principalmente por lavas andesíticas y tobas del Plioceno y Cuaternario y la Formación el Pino, que presenta sucesiones de lavas dacíticas, con intercalaciones de piroclásticos (figura 7.2). Constituyen parte de estas formaciones los conos cineríticos de Guadalupe, San Nicolas y Xaltepec y una gran estructura de forma elipsoidal (altura relativa 2200 m), con dos cráteres anidados,

conocida como la Caldera, que se elevaba del piso del antiguo lago de Chalco. Estos conos parecen ser morfológicamente intermedios entre conos de escoria y anillos de tefra, pero parecen estar constituidos por material piroclástico con muchas de las características de los anillos de tefra (Francis and Thorpe, 1974). La permeabilidad de las formaciones de Santa Catarina es de media a alta (10^{-4} - 10^{-3} m/seg).

Las rocas más antiguas de la región (terciarias) se encuentran en la antigua isla de Tlapacoya (llamada también, por su morfología cerro del Elefante) constituida principalmente por derrames muy erosionados, cubiertos por sedimentos lacustres y piroclásticos (figura 7.2). En el centro de la planicie lacustre, se localiza una estructura volcánica, el Xico, con una elevación menor de 100 metros, y diámetro de 1500 m. en su base fusionada con otro volcán (el Xico viejo). Esta estructura se considera como volcánico explosivo anterior a diferencia del Xico que se considera como explosivo freático.

Al sur, encontramos algunas estructuras constituidas por tobas, andesitas, dacitas, y riolitas, pertenecientes al grupo Chichinautzin. Al oeste, se encuentra el área chinampera de Tláhuac, sobre depósitos lacustres y aluviales. Esta unidad litoestratigráfica sedimentaria se encuentra constituida principalmente por cenizas volcánicas, material piroclástico, tobas, brechas y arcillas. Al este, el área de estudio está limitada por las sierras Nevada y de Río Frío.

VII.2.1 Tectónica y sucesión litoestratigráfica.

Como se ha mencionado anteriormente, la subcuenca de Chalco, como parte de la Cuenca de México, presenta características líticas y correlaciones estratigráficas comunes, especialmente en las unidades volcánicas terciarias y cuaternarias. En la tabla 6.1, se ha presentado la estratigrafía de la Cuenca y se han marcado con un

asterisco (*), unidades presentes en la subcuenca de Chalco (ver APENDICE E).

En el área de estudio, respecto a los aluviones y sedimentos lacustres y a las manifestaciones eruptivas más recientes, se pueden evidenciar, al menos, tres tipos de relaciones (Bellia et al., 1992).

- 1) *Contacto progresivo* - Caracterizado por formaciones lávicas y piroclastos cubiertos por depósitos aluviales y al mismo tiempo por depositaciones, más recientes de arcillas lacustres.
- 2) *Contacto interestratificado* - Establecido entre fases aluviales y lacustres que se presentan alternadamente, dando lugar a sucesiones heterogéneas y,
- 3) *Contacto interdigitado* - Presente entre los depósitos lacustres, los aluviales y los depósitos volcánicos.

Desde el punto de vista de la actividad volcánica, la subcuenca de Chalco presenta un gran número de aparatos volcánicos con un evidente patrón tectónico. Es el caso, de los aparatos volcánicos existentes; los conos tobáceos de la sierra de Santa Catarina, del volcán Xico, de evidente génesis freatomagmática, de los numerosos aparatos existentes en la formación Chichinautzin y de los aflorantes entre Tenango del Aire y San Rafael.

Todos los aparatos y edificios volcánicos cuaternarios, que afloran en la subcuenca de Chalco, presentan un control tectónico con orientación prevaeciente NE-SW y NW-SE. Esta evidencia encuentra, una correlación posterior, con la orientación general de las coladas lávicas y los flujos piroclásticos que tienden a orientarse en las dos direcciones, arriba mencionadas.

VII.2.2 Aspectos petrográficos y geoquímicos

La composición química de las rocas volcánicas puede ser expresada en términos de sus componentes sin necesidad de hacer

referencias a sus fases. Normalmente, los análisis químicos de estas rocas están reportados en porcentajes de peso de sus óxidos principales. La finalidad de estos análisis es permitir una fácil comparación con otras rocas. En general, los datos se presentan en cierto orden establecido, como lo muestra la tabla 7.1.

Usualmente, es difícil detectar similitudes y diferencias comparando los análisis químicos. Por esto, se utilizan gran cantidad de diagramas que permiten establecer tendencias en la composición, propiedades y cambios de fase de estas rocas (Baker, 1983).

Un esquema general de clasificación, de las rocas volcánicas consiste en subdividir las en subalcalinas, alcalinas y peralcalinas. Dentro de la segunda división se encuentran las series basalto toleíticas, las de basalto olivinoalcalina y las series calcoalcalinas.

Debido a que estas rocas muestran gran variación en SiO_2 , uno de los diagramas de variación que más se han utilizado (Harker), consiste en graficar porcentajes de los datos originales, en la componente de algún óxido contra los contenidos de óxido de sílice.

Otro de los principales problemas que se presentan, es la diferenciación entre series alcalinas y subalcalinas, principalmente en tipos de basaltos. Una forma efectiva para resolver esto, consiste en graficar los porcentajes de $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ vs SiO_2 , pudiéndose separar las rocas de composición alcalina y subalcalina (Irvine and Barager, 1970). Otros diagramas de variación, ampliamente usados son aquellos que emplean tres componentes, recalculando la suma al 100 %, en un diagrama triangular. Una de estas versiones consiste en graficar MgO , hierro total (FeO), y alcalis totales ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) en un diagrama AFM. Las series calcoalcalinas, generalmente, comprenden una gran porción de andesitas, dacitas y riolitas. Químicamente, es común identificarlas por su tendencia o posición en un diagrama AFM, donde son separadas las composiciones toleíticas y las calcoalcalinas, después de eliminar las composiciones alcalinas (Irvine and Barager, *op. cit.*). Otros diagramas ($\text{An} - \text{Ab} - \text{Or}$)

permiten distinguir entre rocas subalcalinas ricas o pobres en potasio.

Se realizaron muestreos de las rocas aflorantes en el área, dirigido sobre todo, hacia la caracterización de los productos efusivos pertenecientes a diversos edificios volcánicos diferenciándolos por la edad y características, de los productos expulsados.

El estudio al microscopio, de secciones delgadas de láminas de roca, han evidenciado para todas las formaciones volcánicas muestreadas, la presencia de una textura porfírica más o menos evidente (Bellia *et al.*, *op. cit.*), con fenocristales y asociaciones mineralógicas relacionadas con los procesos de formación de los magmas.

La tabla 7.1, muestra los datos geoquímicos de las muestras volcánicas seleccionadas, que comprenden cuatro muestras de

%	Santa Catarina				Tlapacoya		Pino	M. Alta	Tezompa
	10	27	30	31	12	13	14	16	24
SiO ₂	58.00	59.13	59.06	57.70	65.35	65.96	65.73	62.51	58.60
TiO ₂	1.38	1.24	1.26	1.38	0.83	0.71	0.70	0.83	1.11
Al ₂ O ₃	16.55	16.70	16.87	16.64	15.24	15.90	16.06	16.81	16.14
Fe ₂ O ₃	0.85	1.37	1.10	1.80	1.31	1.74	1.17	0.89	1.18
FeO	6.35	5.44	5.66	5.53	3.56	2.43	2.83	4.13	5.41
MnO	0.13	0.12	0.12	0.13	0.08	0.07	0.06	0.09	0.12
MgO	3.06	2.84	2.88	3.33	2.49	2.16	2.14	3.23	4.43
CaO	6.53	6.17	6.16	6.36	4.89	4.04	4.14	5.46	6.45
Na ₂ O	4.10	4.57	4.41	4.00	4.06	3.86	3.87	4.31	4.03
K ₂ O	1.71	1.65	1.68	1.82	1.94	1.48	1.48	1.38	1.81
P ₂ O ₅	0.43	0.68	0.59	0.55	0.22	0.13	0.09	0.16	0.33
L.O.I	0.00	0.00	0.00	0.23	0.00	1.36	1.48	0.00	0.00
Suma	99.27	99.91	99.79	99.47	99.97	99.84	99.75	99.80	99.61

L.O.I- Loss of Ignition. Incluye H₂O⁺, H₂O⁻, CO₂ y otros volátiles

Tabla 7.1-Resultados geoquímicos de muestras de rocas de la zona de estudio (modificado de Bellia *et. al.*, 1992).

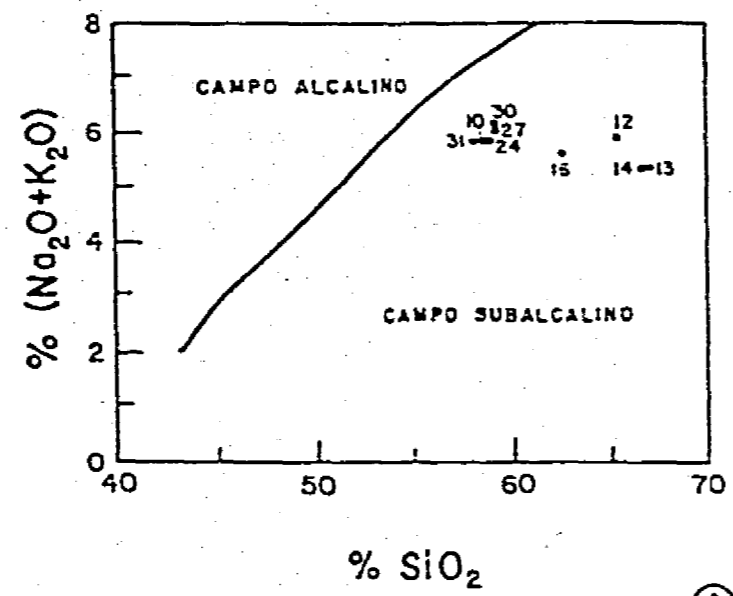
diferentes lugares de la sierra de Santa Catarina, dos de la antigua isla de Tlapacoya y una de la Formación el Pino, de Milpa Alta y Tezompa. De estas muestras, la 27 pertenece a la perforación que se realizó junto al antiguo pozo 3 de la batería de Santa Catarina.

Los resultados geoquímicos presentados en la tabla anterior, fueron graficados en un diagrama Alkali-Sílice Total. Todos los productos muestreados, caen en el sector inferior del diagrama relativo a los productos subalcalinos (figura 7.3a). Particularmente haciendo uso de la clasificación K_2O/SiO_2 (Peccerillo and Taylor, 1976), los productos relativamente más antiguos, muestreados en los aparatos volcánicos, de Tlapacoya y el Pino están dentro de la clasificación de las dacitas, mientras que los volcánicos de Santa Catarina, Milpa Alta y Tezompa caen en el campo de las andesitas (figura 7.3b). Otros resultados de la aplicación de diagramas, como el AFM, permiten mostrar la composición calcoalcalina de las muestras (figura 7.3c) y también establecer, mediante un diagrama An- Ab- Or, una composición de plagioclasas, fuertemente dependientes en sodio (figura 7.3d).

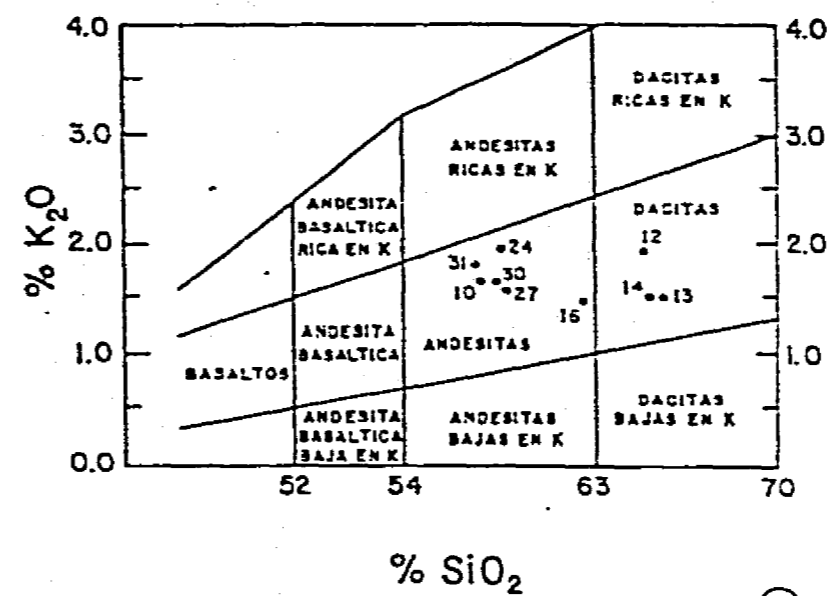
Respecto a la sierra de Chichinautzin, sus productos piroclásticos y lávicos son preferencialmente basaltos y andesitas de composición calcoalcalina, aunque localmente existan composiciones mas ácidas (Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera, *op. cit.*)

VII.3 Esquema hidroestratigráfico de las formaciones acuíferas

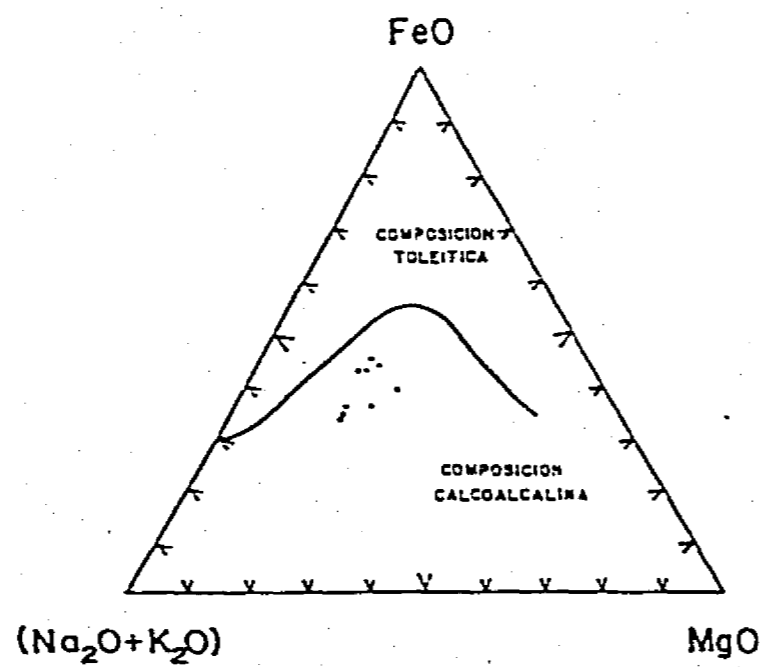
Desde el punto de vista hidrogeológico en la subcuenca de Chalco está definido un complejo multiacuífero albergado en un contenedor impermeable de origen volcánico, originado por diversos aparatos de emisión, en diversos periodos de actividad, cuya morfología será descrita posteriormente. La reconstrucción de la geología establece un espesor variable de sedimentos lacustres y



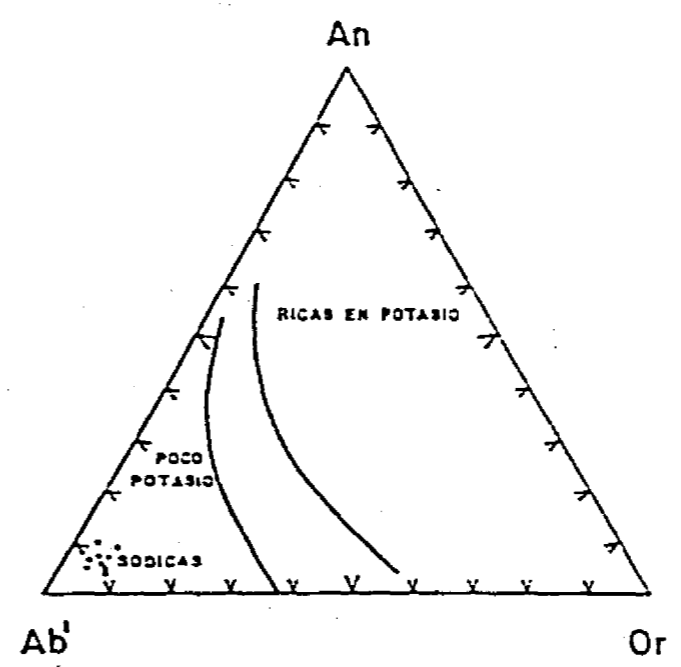
(A)



(B)



(C)



(D)

Figura 7.3 - Resultados geoquímicos de las muestras obtenidas en diversos tipos de diagramas.

aluviales cuaternarios que en su sucesión se intercalan, en forma variable, con materiales piroclásticos y coladas lávicas de varias decenas de metros, que han sido cortadas por las perforaciones de varios pozos. Este paquete sedimentario yace sobre una potente secuencia de formaciones volcánicas y piroclastos, en ocasiones muy fracturadas. El material, dentro de esta cuenca hidrológica subterránea puede agruparse, en un esquema simple, (figura 7.4), que consta fundamentalmente, de tres grandes unidades hidroestratigráficas :

- a) Una unidad arcillo-arenosa, de baja permeabilidad, que establece un acuífero semipermeable (acuitardo).
- b) Una unidad acuífera, granular, de origen volcánico, actualmente en explotación, que presenta carácter semiconfinado en el centro de la Subcuenca y libre en sus márgenes, y
- c) otra, formación acuífera constituida por una serie de secuencias volcánicas y piroclásticos, que se encuentra fracturada y saturadas con agua.

VII.4 Comportamiento hidrogeológico de las formaciones acuíferas.

A partir del marco geológico superficial, la información, geológica y estratigráfica, de pozos, y de la integración de resultados de diversas campañas de prospección geofísicas llevadas a cabo, en el área, se infieren algunas características hidrogeológicas de las rocas de la región :

Las rocas volcánicas terciarias más antiguas, del Mioceno, localizadas en las porciones centro y sur de la Cuenca de México presentan, generalmente, permeabilidad y porosidad baja, debido principalmente a su estructura masiva y escaso fracturamiento, funcionando como basamento.

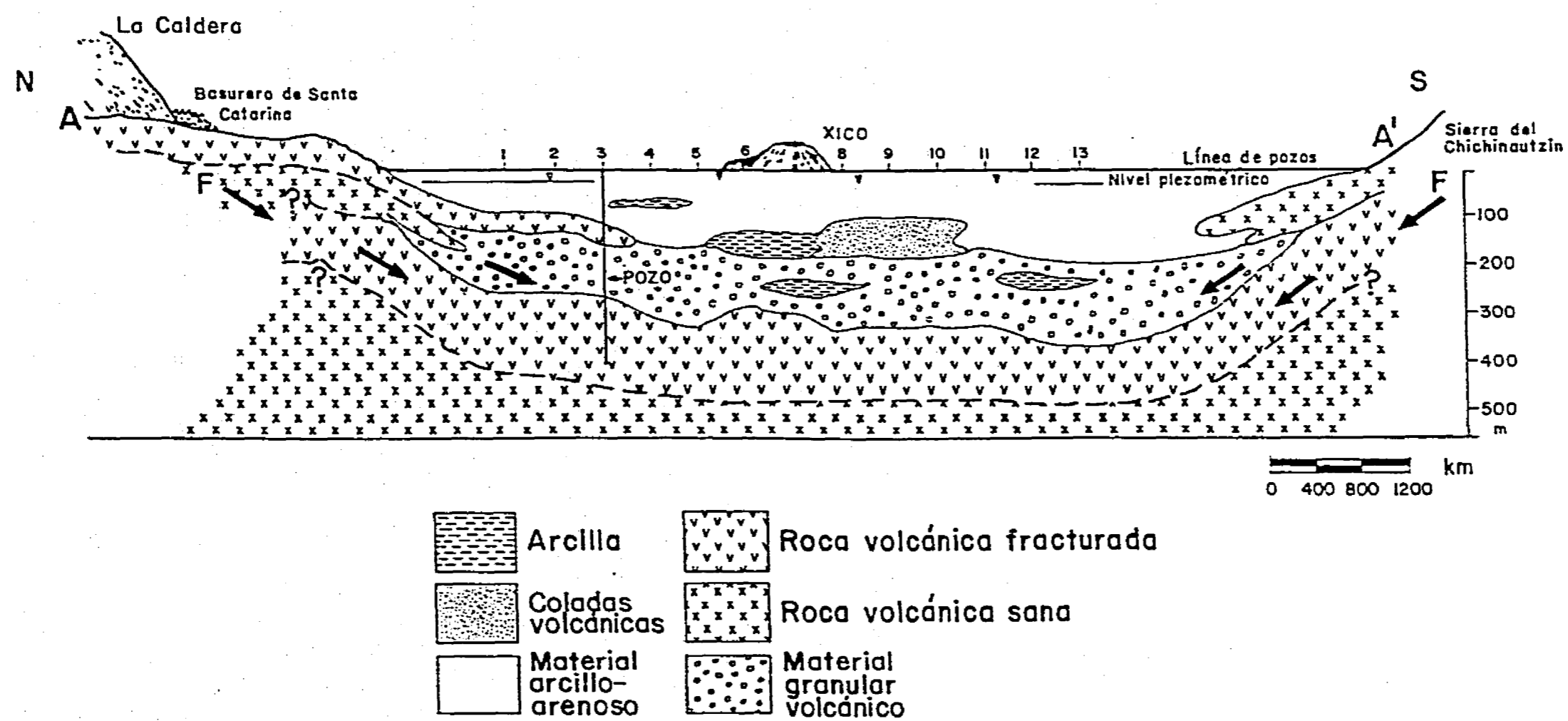


Figura 7.4- Corte geológico N-S realizado mediante la integración de registros geofísicos de pozos de la batería de Santa Catarina y la geología de los mismos.

Las rocas de las sierras, principalmente andesitas y dacitas, que circundan la Cuenca, tienen porosidad primaria, baja, y una permeabilidad de media a alta (10^{-4} - 10^{-3} m/seg), debidas al fracturamiento por lo que actúan como importantes áreas de recarga (D.G.C.O.H., 1986).

Por otra parte, los derrames lávicos por su estructura y fracturamiento adquieren alta porosidad secundaria y por lo tanto buena permeabilidad. Los extensos afloramientos en las sierras de Chichinautzin y Santa Catarina constituyen excelentes receptores y transmisores para la recarga del agua subterránea, producto de las intensas precipitaciones, en las partes altas de las sierras. Sin embargo, también intercalaciones de este tipo de roca en la unidad litoestratigráfica sedimentaria, en la subcuenca de Chalco, pueden propiciar la rápida incorporación de contaminantes al flujo subterráneo.

Los depósitos lacustres ampliamente distribuidos en la Cuenca de México tienen una elevada porosidad (llegando a ser mayor a 60%) (Herrera *et al.*, 1977) y una permeabilidad casi nula. Generalmente, se encuentran saturadas con aguas "viejas" con altos contenidos de sales. La extracción de agua del acuitardo por pozos someros y el régimen de extracción actual del acuífero granular por pozos más profundos, induce flujos verticales, descendentes, generando una zona de mezcla, originando los conocidos problemas de subsidencia de la Cuenca. El acuitardo logra alcanzar alrededor de los 300 m, en las partes más profundas del sistema lacustre (Rodríguez y González-Morán, 1989). El piedemonte del oriente de la Cuenca de México es la zona más favorable para la formación de grietas (Lugo-Hupp *et al.*, 1991).

La permeabilidad de la unidad hidroestratigráfica sedimentaria, debido a variaciones en granulometría, debe presentar un amplio intervalo de variabilidad, función de la cantidad de material piroclástico intercalado en las formaciones arcillosas.

El régimen de flujo subterráneo, a nivel regional, se caracteriza por tener una dirección preferencial N - S (Lesser, 1984) en la parte norte de la subcuenca de Chalco y una dirección

contraria en la parte sur, resultado de las sierras circundantes (Chichinautzin y sierra Nevada) que actúan como zonas preferenciales de recarga del sistema acuifero (figura 6.4). Este flujo, que alimenta directamente al acuifero, actualmente en explotación, puede presentar entre 300 y 400 metros de espesor, en sus partes más profundas, y que está constituido, principalmente por piroclastos, sedimentos de la Formación Tarango y coladas lávicas. Debido a que el régimen de flujo se obtiene de la información piezométrica, con respecto al área cubierta, no es posible obtener valores confiables de velocidades. Aún así es posible calcular rangos de velocidades para las formaciones lávicas fracturadas (300 - 1000 m/año). Estos valores se han obtenido considerando desplazamientos promedio y estimando los tiempos de aparición de las primeras manifestaciones de contaminación por lo que estos valores son meramente ilustrativos. Los pozos en explotación, ubicados en este acuifero, presentan ademe ciego en la parte superior y ranurado en la inferior con la finalidad de no afectar el cuerpo de agua mineralizada (cerca de 1100 ppm), que se encuentra en la parte superior (acuitardo). Esta unidad acuifera se encuentra bajo una interdigitación de sedimentos lacustres y piroclastos (figura 7.4). EL agua del acuifero en explotación es de buena calidad, presentando contenidos de sales entre 200 - 300 ppm (Rodríguez y González-Morán, *op. cit.*).

El material de grano fino de las capas superficiales en la parte central de la Subcuenca, deben presentar baja permeabilidad ya que ocasionan acumulaciones someras de agua por lo que no se puede hablar de infiltración. Sin embargo, podría pensarse en la presencia de flujos verticales ascendentes, por el carácter perenne de los remanentes del lago, dada la anisotropía que presenta la unidad hidroestratigráfica arcillo-arenosa, en las márgenes y a las altas presiones hidrostáticas producto de la intensa recarga local. El nivel del agua se encuentra a 10 m de profundidad.

En las márgenes sur de la subcuenca de Chalco, han existido manifestaciones superficiales del nivel freático (tanto de manantiales de agua dulce, como salobre) (Durazo, *op. cit.*) que han

ido desapareciendo, en razón directa del descenso paulatino del nivel piezométrico, tornándose en sumideros que actualmente son aprovechados por los habitantes de la zona para canalizar sus desagües de aguas negras que se incorporan rápidamente al sistema acuífero por las altas velocidades que se llegan a presentar, en rocas fracturadas (Rodríguez y González-Morán, *op. cit.*).

La creciente urbanización que presentan las márgenes de la sierra de Chichinautzín puede llegar, a mediano plazo, a alterar el régimen de escurrimiento e infiltración que se produce en las partes altas y piedemonte de alta permeabilidad por el grado de fracturamiento. En estas zonas de recarga donde el espesor del acuitardo es menor (figura 7.4), la circulación del agua hacia el acuífero es relativamente rápida, aprovechando la existencia de un medio fracturado, para después fluir por las formaciones volcánicas granulares de porosidad variable.

Por otra parte, el bombeo efectuado, básicamente en el acuífero inferior volcánico granular, está provocando un flujo vertical descendente del acuitardo hacia éste, dando lugar a una mezcla de aguas cuya calidad por efectos de dilución no se ve alterada (Rodríguez y Lara, *op. cit.*). No es posible, realizar una evaluación de este aporte dado que el acuitardo está constituido por una alternancia variable de material granular, principalmente arcillas y arenas, cuyos valores de compresibilidad y permeabilidad son difíciles de evaluar, requiriéndose de núcleos vírgenes de arcilla para estas determinaciones.

VII.4.1 Acuitardo

La parte superior del multiacuífero de la subcuenca de Chalco, está integrada por interdigitaciones de sedimentos de grano fino, con material de grano medio a grueso, así como coladas basálticas cuyo grado de alteración, no está bien determinado.

Esta unidad arcillo-arenosa, constituye un acuitardo con

características hidrodinámicas distintas a las de la unidad acuífera subyacente, actualmente en explotación, propiciando la subsidencia actual de la zona, la mayor en la Cuenca de México, en esta época (14 cm/año) (DDF-DGCOH, 1984).

La distribución espacial de esta unidad, ha sido obtenida aprovechando el contraste en mineralización entre las aguas de la misma y las de la unidad acuífera, actualmente en explotación. Se observa, una mineralización de 200-300 mg/l para el acuífero granular volcánico en explotación contra valores mayores (cuatro o cinco veces) para la unidad arcillo-arenosa. Esta diferencia en las propiedades fisicoquímicas, de estas dos unidades, facilita su diferenciación geoelectrica (Rodríguez y González-Morán, *op. cit.*). En términos geoelectricos, representa contrastes resistivos de 0.5-2.0 Ω -m y 15-25 Ω -m para la primera y segunda unidades, respectivamente.

VII.4.2 Acuífero en explotación

El acuífero, actualmente en explotación, subyace al acuitardo y ocupa al igual que éste cerca del 90% de la superficie de la Subcuenca. Está integrado por dos cuerpos, bien definidos:

Uno, constituido por material clástico, de origen volcánico,

y otro inferior, integrado por rocas volcánicas fracturadas.

La mayoría de los pozos de abastecimiento urbano, con profundidades mayores o iguales a 200 metros, extraen agua tanto del acuitardo como de la parte superior del acuífero. En la parte central, donde el espesor del material granular es del orden de 100 a 150 m, sobre la cima del material volcánico fracturado (Rodríguez

et al, 1986), sólo se explota la parte superior del acuífero ya que los pozos de esta zona presentan 200 m de ademe ciego y 200 m de ranurado, en la parte inferior, impidiendo la extracción del acuitardo. Baterías de pozos ubicadas en el sur de la Subcuenca, como el ramal Tecómilt-Mixquic, extraen agua del acuífero volcánico, en roca fracturada. Estos dos cuerpos permeables, son difíciles de diferenciar geoelectricamente y presentan una excelente comunicación hidráulica.

Caracterizar hidráulicamente estas unidades, por mediciones, directas o indirectas, es un proceso complicado. En toda la Subcuenca, donde se tienen más de 100 obras hidráulicas, sólo se cuenta con algunas pruebas de bombeo, confiables, sin pozo de observación. Esto es explicable, si se toma en cuenta la urgencia por lograr el abastecimiento de agua y el violento régimen continuo de extracción; lo cual impide, por ejemplo la suspensión parcial de la extracción para la realización de pruebas de bombeo o la medición de niveles estáticos.

VII.5 Consideraciones sobre agua disponible para infiltración

La recarga natural del agua subterránea generalmente, de origen meteórico, puede ocurrir por precipitación, ríos, canales o lagos y ocasionalmente por la llamada agua juvenil de origen volcánico o magmático.

Es una cantidad de agua, que contribuye temporal o permanentemente a incrementar el volumen de agua del subsuelo. Está representada por una compleja función de las características meteorológicas, geomorfológicas e hidrogeológicas de cada región. Aunque pueda significar diferentes cosas para la gente, es considerada un proceso de movimiento del agua, hacia abajo, a través de la zona saturada bajo fuerzas de gravedad o en la dirección determinada por las condiciones hidráulicas. En este proceso uno de los factores más importante es el período de tiempo

en el cual el agua meteórica entra a la zona saturada y el período, en que esta se manifiesta como una fuente del agua subterránea, efectivamente explotable (Balek, 1988).

Las propiedades del suelo y de las formaciones acuíferas, incluyendo los procesos de recarga varían de lugar a lugar. En estudios regionales, donde las características son determinadas con base en promedios o medidas aisladas dentro de las fronteras (Balek, *op. cit.*), concluye que la infiltración promedio y la recarga promedio son idénticas para períodos largos de tiempo y que las diferencias que las distinguen solo son debidas por el tiempo de retardamiento y suavizamiento, que la percolación a través de la zona no saturada impone transformando la infiltración en recarga.

Tradicionalmente los análisis de infiltración y recarga han estado basados en la comparación de lluvia y medidas de flujo base. Hay diferentes maneras de realizar balances hídricos. Los más utilizados se realizan a partir de datos de lluvia, evaporación y la capacidad de retención del suelo. Otros balances están basados en observaciones de la variación del nivel piezométrico del agua subterránea para deducir de ellas, tomando en cuenta las extracciones, el volumen infiltrado en un período dado. Otros autores, reportan que la caracterización química, isotópica y física pueden ayudar a estimar la recarga del agua subterránea (Allison, 1988). Los análisis químicos que determinan las concentraciones de cloruros (por su carácter conservativo) y su evolución en el agua subterránea y en la lluvia de la zona, pueden recabar información del volumen que ha sido incorporada al agua subterránea (Custodio y Llamas, 1983). Sin embargo en regiones semiáridas esto resulta problemático por la variabilidad de la lluvia, que la hace altamente dependiente del tiempo o también en el caso de métodos físicos cuando los flujos son bajos y los cambios en estos parámetros son pequeños y difíciles de detectar. Allison, *op. cit.*, considera que los métodos químicos o isotópicos pueden ser más promisorios. Los trazadores más usados en estudios de recarga son ^3H , ^{14}C , ^{15}N , ^{18}O , ^2H , ^{13}C y cloro.

Otros métodos que pueden prestar ayuda, en el balance de agua son los sensores remotos que permiten investigar acerca de las características del suelo y la evapotranspiración (Van de Griend and Guarney, 1988).

Otras dificultades para analizar la infiltración se presentan a través de suelos con versatilidad en permeabilidad por fisuras. Los procesos involucrados son funciones no lineales de la acumulación de lluvia por la simple razón que la permeabilidad del suelo se altera con el contenido de humedad (Gieske and Salaolo, 1988).

Cuando un terreno recibe una aportación exterior (riego o lluvia) se produce una saturación de los poros de las capas superiores y el agua desciende por gravedad. Al cesar la aportación y transcurrido cierto tiempo desaparece el estado de saturación pero parte del agua queda retenida en el terreno por fuerzas capilares. Una gran parte del agua que llega a la tierra vuelve a la atmósfera en forma de vapor por evaporación a través de la transpiración de las plantas. La influencia de estos fenómenos en el ciclo hidrológico es importante si se considera que en muchas partes del mundo el 70 % del agua total recibida en una zona por precipitación es devuelta a la atmósfera por evapotranspiración y que en algunos otros, este porcentaje alcanza el 90% (Custodio y Llamas, *op. cit.*). Dentro de los factores que afectan la evaporación esta la radiación solar. La variación diaria de la evaporación esta estrechamente ligada a la temperatura. Ciertos factores metereológicos, la luminación, temperatura, humedad del aire influyen en el fenómeno de transpiración. El término evapotranspiración es utilizado considerando estos dos procesos. Es un fenómeno microclimático, por lo que serán mas válidos los métodos que consideran estas cuestiones. Todos los factores que influyen en la evaporación y en la transpiración influyen por consiguiente en la evapotranspiración. En este proceso, la influencia de factores como el desarrollo vegetativo de las plantas es difícil de medir.

La necesidad de establecer por lo menos el orden de magnitud del agua disponible para infiltración, hace aceptar resultados obtenidos de fórmulas empíricas que están apoyados en datos meteorológicos, que son accesibles de estaciones climatológicas.

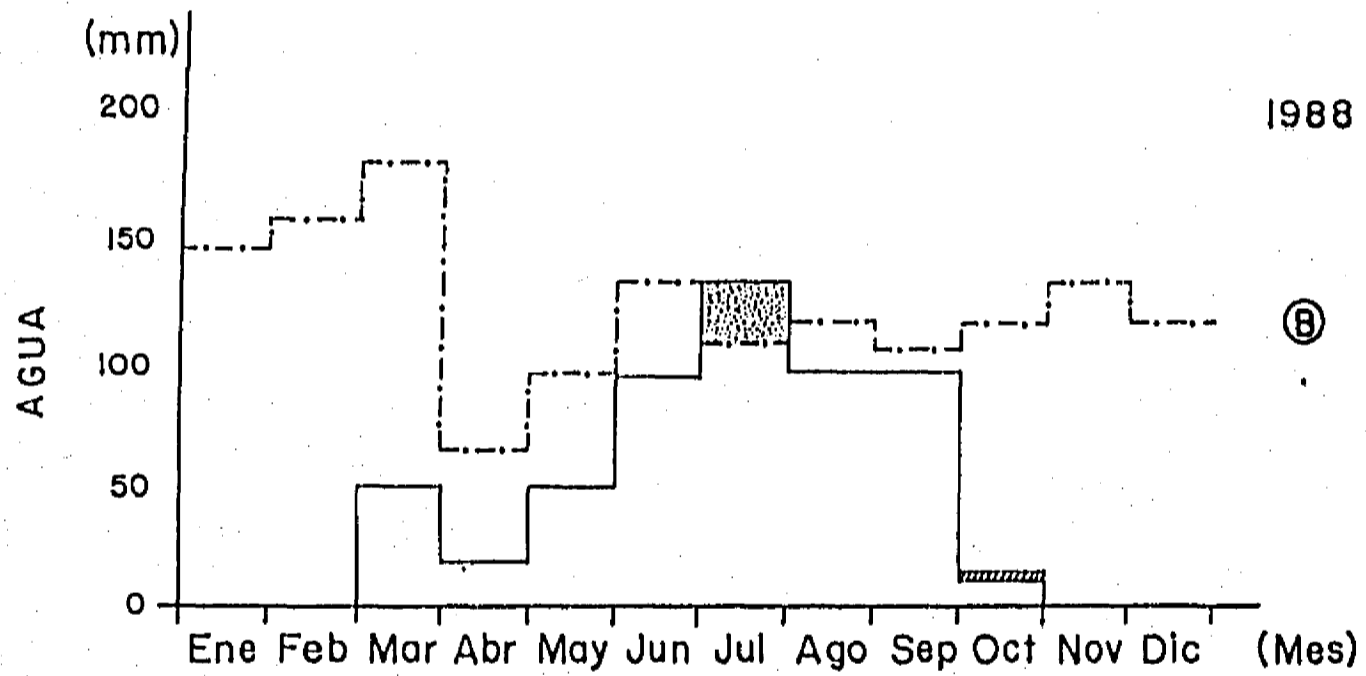
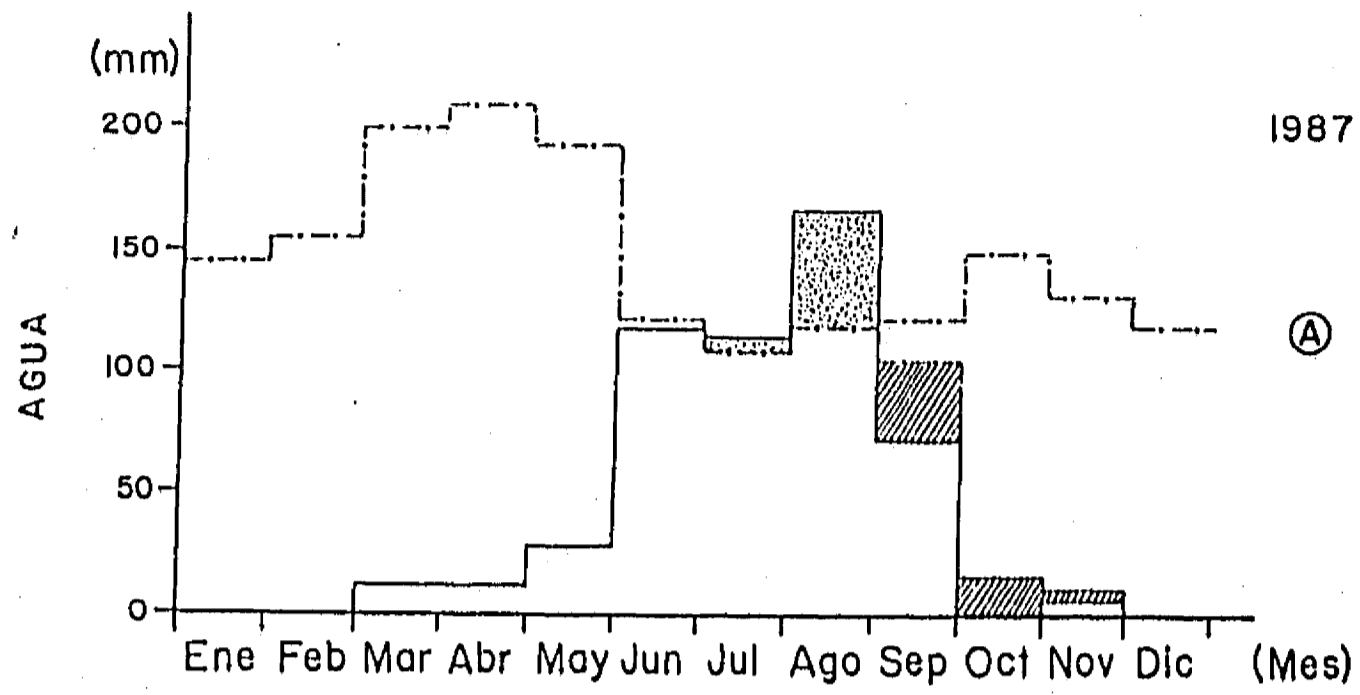
Aunque existe poca información, la precipitación en la subcuenca de Chalco se caracteriza por su variabilidad espacial. De los 500 mm anuales, en las estaciones pluviométricas ubicadas en la planicie lacustre e incrementándose estas cantidades hacia las partes más altas principalmente, en la zona sureste, en las faldas de la sierra Nevada, cuyas precipitaciones alcanzan valores entre 800 y 1000 mm anuales. En el período de 1920 a 1958, la precipitación media anual de la subcuenca de Chalco fue de 979 mm (Niederberger, *op. cit.*), lo que confirma lo anterior.

Dentro de la Subcuenca, existen escasos datos climatológicos. Sólo se cuenta con dos estaciones climatológicas, ambas ubicadas en la planicie lacustre. Como se ha mencionado existen variaciones en las zonas montañosas por lo que es difícil extrapolar resultados para esta zona. Se analizó información de los últimos diez años, seleccionándose por la continuidad de las mediciones, la de los años de 1987 y 1988. Los resultados presentados, pertenecen a la estación Chalco, ubicada en la parte central de la Subcuenca.

En general, se presenta un patrón estacional. La época de lluvias cubre 4 meses, que reciben entre el 75 y 80 % del total, de junio a septiembre y una zona de transición que puede presentarse entre marzo, abril, mayo y octubre con un período de secas que abarca de noviembre a febrero (figuras 7.5a y 7.5b).

La evapotranspiración potencial varía mensualmente, de 200 mm, en marzo de 1987, a 65 mm, en abril de 1988, alcanzando una tendencia promedio de 125 mm que oscila entre los meses de junio y diciembre.

El escurrimiento superficial no es representativo en el balance hidrogeológico regional excepto en la parte este, donde hay aportes hacia la parte ocupada por el antiguo Lago. La zona más permeable está representada, en la parte sur, por el complejo volcánico de Chichinautzin, importante captador natural de agua de



— Precipitación - - - - - Evapotranspiración
 ▨ Utilización del suelo ▩ Agua disponible para infiltración

Figuras 7.5-Balance hídrico en la Subcuenca de Chalco para los años 1987 y 1988.

lluvia, seguida de la parte este (sierra Nevada). Bouvier y Didon (1991), consideran que los coeficientes de escurrimiento no deben rebasar el 10 % .

El balance hídrico se puede calcular a partir de los valores medios mensuales de precipitación, evapotranspiración potencial y algunas características del suelo y vegetación, irrigación y escurrimiento. El método está basado en el modelo propuesto por Thorthwaite y Mather (1957). En áreas relativamente áridas, donde el suelo nunca alcanza su capacidad de campo, puede ser sustituido por el método de aproximaciones sucesivas (Donker, 1987), estableciendo que la expresión

$$H = C \exp(-P_a / C) \quad (6B.1)$$

donde

H = humedad del suelo¹ (mm)

C = capacidad del suelo² (mm)

P_a = pérdida potencial acumulada de agua (mm)

puede ser un buen sustituto de las tablas de Thorthwaite y Mather, *op. cit.* que permiten obtener el estado de humedad del suelo a partir de la pérdida potencial acumulada de agua para algunos valores de la capacidad de ésta. El uso de esta expresión o las tablas antes mencionadas, asume que por lo menos para el último mes (m), de un período cuya precipitación excede la evapotranspiración potencial, la zona de raíces del suelo está en capacidad de campo. Si el clima de la región de estudio es demasiado seco que la capacidad de la zona de raíces nunca se llena, el procedimiento de aproximaciones sucesivas es más confiable el método empírico de Thorntwaite (Donker, *op. cit.*) y

¹ Se emplea para referir el agua contenida en él y distinguirla del agua subterránea propiamente dicha.

² Es el grado de humedad de una muestra que ha perdido su agua gravífica.

puede ser usado para calcular el balance de agua creando una pérdida potencial acumulada de agua para el mes (m). Este incremento, junto con la correspondiente disminución en la humedad del suelo se transmite en los siguientes meses secos.

Existen dos formas de calcular la humedad del suelo:

- a) añadiendo humedad del suelo del periodo seco a la suma de los meses subsecuentes donde la diferencia entre la precipitación efectiva y la evapotranspiración potencial sea positiva, y
- b) aplicando la expresión anterior y utilizando la pérdida potencial acumulada del mes (m).

El método de aproximaciones sucesivas, se detiene cuando los resultados de los dos métodos se igualan.

En el área de estudio, fue seleccionado el método de aproximaciones sucesivas para estimar el orden de magnitud del agua disponible para infiltración que permitirá evaluar los volúmenes de lixiviados. Incluso para el mes (m) del periodo cuya precipitación excede la evapotranspiración potencial, la capacidad de agua no se alcanza. Los resultados del balance de agua se muestran en las figuras 7.5a y 7.5b. En ambos casos se observa un déficit de humedad de enero a junio y de septiembre a diciembre. No hay agua disponible para escurrimiento; nunca hay exceso de humedad. Para el caso (a), sólo en julio y agosto se tiene la posibilidad de humedad en el suelo para recarga y en (b) exclusivamente en el mes de junio. También se observa la posibilidad de agua para utilización del suelo en los meses de septiembre y octubre, para el primer caso y en octubre para el segundo.

VII.6 Vulnerabilidad del sistema acuífero

La subcuenca de Chalco, por sus características geológico-estructurales presenta, una serie de fenómenos geológicos

e hidrogeológicos cuya potencialidad incrementa la vulnerabilidad del sistema acuífero, a fuentes externas de contaminación. No sólo, el agua subterránea puede verse afectada en su cantidad y calidad, sino que también el ecosistema de la subcuenca es susceptible de degradación.

El desarrollo acelerado de asentamientos humanos, en la zona, ha provocado que se incrementen las fuentes potenciales de polución y alteración de la calidad de vida de sus habitantes.

VII.6.1 Riesgos geológicos e hidrogeológicos locales

La actividad sísmica de la Cuenca de México, no está asociada a vulcanismo local. La Cuenca, se encuentra ubicada en una región de alta actividad sísmica que tiene su origen en la evolución tectónica continental, provocada por el proceso de subducción de la Placa de Cocos, en el Pacífico. Esta situación, está íntimamente ligada a la constitución de las formaciones sedimentarias lacustres que amplificaron el efecto de los sismos, como quedó de manifiesto, durante los sismos de 1985.

En el área de estudio no se reportaron daños de consideración, no porque la zona no presente riesgos sísmicos sino porque no existen construcciones de varios niveles susceptibles de dañarse. Existe una sismicidad local asociada al tramo suroccidental de la zona de cizallamiento Tenochtitlán (De Cserna *et al*, 1987). Una serie de sismos someros, con epicentros a profundidades menores a 30 Km, se correlaciona con la presencia de fallas al sur y surponiente de la Cuenca. En la subcuenca de Chalco, no se han reportado sismos locales con magnitudes superiores a 2 ML. Sin embargo, no es posible detallar la sismicidad local, de existir ésta, ya que no se cuenta con un sistema de monitoreo sísmico.

La subcuenca de Chalco, está rodeada por sierras de origen volcánico lo cual elimina la posibilidad de deslaves de terreno que pudieran presentarse debido al régimen pluviométrico. Los cursos de

agua son la mayor parte de ellos intermitentes. Durante la época de lluvias, hacia el suroeste de la Cuenca de México, los caudales escurridos llegaron a provocar inundaciones de la Ciudad hasta los años 50. En la Subcuenca, este problema nunca ha tenido las magnitudes que se han presentado en la Ciudad de México y/o en las colonias periféricas del sur de la Delegación de Xochimilco; parte de los escurrimientos superficiales se drenan a través del canal de Amecameca, por el oeste, hacia Xochimilco y otra parte, por el noroeste, hacia el lago de Texcoco, por el río de la Compañía, que nace en las faldas de la sierra Nevada y conduce caudales reducidos, que no sufren incrementos notables en la época de lluvias. Actualmente, sirve de drenaje de las aguas negras de la ciudad de Chalco, asentamientos circunvecinos y vertedero de aguas residuales y desechos de pequeñas industrias y granjas (figura 7.1).

El azolvamiento de este canal de desagüe provocó, entre los años 70s y 80s, su desbordamiento, afectando los asentamientos de Santa Catarina. Al inicio de los 90s, se inicia un programa de remoción de azolves y remodelación del curso del canal, en algunas áreas críticas como el cruce del mismo con la autopista México-Puebla (figura 7.1). Estas acciones, han minimizado el riesgo de inundaciones de la creciente mancha urbana de Santa Catarina.

VII.6.2 Actividades antropogénicas

Las actividades antropogénicas, afectan el medio ambiente de una u otra manera. Planificar el crecimiento urbano de una metrópolis, en un país en vías de desarrollo, requiere de una infraestructura técnica y humana con la cual difícilmente se cuenta. Por otra parte, las necesidades, insumos y servicios que demanda esta población, son difíciles de garantizar y producen cambios en parámetros importantes del medio físico ya que la

explotación de los recursos naturales por lo general, no se dá de una manera planificada.

VII.6.2.1 Subsistencia local.

El fenómeno de subsidencia de la ciudad de México, es conocido desde principios de este siglo. En 1925, se publica el primer reporte, con carácter técnico-científico, que estudia el hundimiento de la Ciudad provocado por la extracción de agua subterránea para abastecimiento urbano (Gayol, 1929). La velocidad de subsidencia, promedio, osciló entre 4 y 7 cm/año entre 1890 y 1985, con un incremento de hasta 46 cm/año, en el período 1948-1952.

En un período de 100 años se tiene ya, un hundimiento acumulado de 7 m y una velocidad promedio de 7 cm/año. Se conocen sitios, como la Alameda Central, que han reportado este hundimiento y muy pocos en donde haya sido mayor. El sistema de piezómetros, instalado en los años 50's por Nabor Carrillo, si bien perseguía objetivos de mecánica de suelos, permite conocer con alta precisión la evolución piezométrica de las arcillas, principales agentes del fenómeno de hundimiento.

Como es bien sabido, la subsidencia se debe, principalmente, a la extracción de agua de la unidad arcillo-arenosa, la cual por sus características, fisicoquímicas, ya no recuperan el agua que contenía. Actualmente, con la idea de minimizar la velocidad de subsidencia, se han reubicado pozos a profundidades mayores al espesor del acuitardo, evitando la extracción directa de agua, del mismo. Esta estrategia ha logrado reducir el efecto de subsidencia a 3 mm anuales. Los llamados pozos profundos alcanzan los 400 m y están diseñados con ademe ciego, los primeros 100-150 m. Aún así, el régimen de extracción del acuífero granular que subyace al acuitardo, provoca flujos verticales descendentes del acuitardo al acuífero.

En la subcuenca de Chalco, se han reportado hundimientos diferenciales en algunos sitios. A diferencia de la zona urbana de la Cuenca de México, el área de la Subcuenca es de carácter preferencialmente rural por lo que no se cuenta con observaciones confiables. En el canal de Cuemanco, al occidente de la zona se han medido velocidades, de hasta 4 cm/año (DDF-DGCOH, *op. cit.*), mayores al promedio reportado para la Cuenca. Esto se debe a que aún existen pozos que se encuentran ubicados dentro de la unidad arcillo-arenosa y/o en pequeñas formaciones permeables inmersas dentro de éste material impermeable. Habría que recordar que el acuitardo, presenta espesores de hasta 200 m en la parte central de la Subcuenca (Rodríguez y González-Morán, *op. cit.*).

Una consecuencia de la subsidencia del terreno, aunado a procesos de tensión en las arcillas por evaporación y posterior encharcamiento por lluvia, es la aparición de grietas en las márgenes de la planicie lacustre (Alberro y Hernández, 1988), Lugo-Hupp *et al*, *op. cit.*, reportan nuevas grietas en las márgenes exteriores de poblaciones como Ayotla, Chicolapan, Ixtapaluca y Tlapilla, del piedemonte volcánico de las sierras Nevada-Río Frío al suroeste de la Cuenca de México, estableciendo que estos eventos pueden ir acompañados de un proceso complementario de sufosión.

VII.6.2.2 Crecimiento urbano

El rápido crecimiento que ha tenido, la Ciudad de México, aunada a los problemas inherentes de las grandes urbes le ha impedido seguir algún patrón preestablecido. Por otra parte, el desarrollo industrial, en la Cuenca, ha propiciado que se encuentre establecida en ella el 40 % de la capacidad industrial nacional, propiciando el rápido crecimiento de municipios de Estado de México, colindantes con el área metropolitana, como Tultitlán y Naucalpan. La "tierra" disponible fue vertiginosamente ocupada generándose crisis habitacionales para las clases de escasos

recursos económicos. Una zona que ofrecía posibilidades para asentamientos irregulares, producto de invasión de terrenos, fueron las faldas de las estribaciones montañosas del centro y sur de la Cuenca. Desde los años sesenta, las estribaciones del Ajusco y la sierra de las Cruces empezaron a ser urbanizadas de forma irregular. La competencia por espacios habitables propició que pequeñas comunidades establecidas en las faldas de la sierra de Chichinautzin, incrementaran su área urbana. En contadas ocasiones, la expansión urbana se ha venido realizando a través de fraccionamientos, con cierta organización, mas sin embargo la mancha urbana ha crecido, de manera irregular, sin control de ningún tipo.

Los asentamientos humanos irregulares, como el de Santa Catarina (figura 7.1), no contaron con servicios, como electrificación, agua potable, y drenaje, hasta fines de la década de los 80's e inicio de los 90's. En un medio geológico, como el estudiado, la falta de planificación del desarrollo urbano afecta de diversas maneras el medio ambiente. En especial, si estos asentamientos tienen lugar en zonas preferenciales de recarga, como lo son las sierras periféricas de la Cuenca ya que puede verse afectado el almacenamiento de agua subterránea al reducirse áreas de infiltración. La urbanización, afecta también el patrón de drenaje de estas zonas lo cual incide en la alteración del ciclo hidrológico regional. La pavimentación, en los asentamientos humanos, en fase de regularización, se efectúa sin tomar en cuenta los drenes naturales de los escurrimientos llegando a producir, en periodos "pico" de precipitación, flujos que invaden las zonas residenciales como ha llegado a ocurrir en colonias de Xochimilco y Tláhuac.

El manejo de los residuos sólidos domiciliarios, en este tipo de comunidades, refleja la complejidad socioeconómica del medio. Puesto que estas urbanizaciones se originan en la periferia de las grandes urbes, es frecuente encontrar también basureros que en su inicio, de operaciones, fueron tiraderos a cielo abierto. Este es el caso, de muchas colonias ubicadas en el entorno inmediato de los

basureros de Santa Cruz Meyehualco y Tezonco, al poniente de la subcuenca y los de Santa Catarina y Tláhuac en la zona de estudio.

VII.7 Identificación de fuentes potenciales de contaminación del agua subterránea en la región.

En la subcuenca de Chalco las formaciones sedimentarias de buena permeabilidad subyacen a la unidad hidroestratigráfica arcillosa, cuyo espesor va de unos cuantos metros, en las márgenes, hasta más de 300 metros en el zona de Tláhuac (ver figura 7.9). Esta unidad, juega un papel relevante en los procesos de lixiviación de contaminantes superficiales. La baja permeabilidad y el gran espesor de las formaciones arcillo-arenosas (acuitardo), impiden la infiltración de la superficie al acuífero granular. Esto se puede constatar, por la calidad del agua subterránea de los pozos ubicados, en la parte central de la zona (batería Santa Catarina-Mixquic pozos, 7-10), en donde se tienen concentraciones de sales de 200-300 mg/l (Rodríguez y González-Morán, *op. cit.*), (CAVM, 1986, 1987). El aporte de flujo del acuitardo es mínimo y no cuantificable no llegando a alterar sustancialmente la mineralización (Rodríguez y Lara, *op. cit.*). La vulnerabilidad del acuífero, a fuentes superficiales de contaminación, se incrementa notablemente, especialmente hacia las márgenes de la Subcuenca en donde se presenta la transición entre sedimentos de grano fino y materiales volcánicos. Esta alternancia, de formaciones geológicas puede transcribirse en términos hidráulicos por medio de un amplio intervalo de transmisividades, que van de 10^{-1} a 10^{-3} m²/seg. En sus márgenes las infiltraciones son preferencialmente verticales, hasta que alcanzan el acuífero granular en donde se desplazan en la dirección del flujo subterráneo. Los volúmenes infiltrados provocan que la dilución de los solutos contaminantes sea alta. Esto se refleja en la escasa alteración de la mineralización del agua y en las concentraciones de sólidos disueltos totales, que aún se

encuentran dentro de las normas internacionales para agua potable (CAVM, *op. cit.*).

No es factible, con la información con que se cuenta al momento, cuantificar el grado de contaminación del flujo subterráneo, entre otras razones, por la ausencia de análisis químicos sistemáticos de compuestos orgánicos, producto de lixiviaciones provenientes de residuos industriales sólidos y líquidos, que pudieran haber sido depositados en el basurero de Santa Catarina durante sus primeros años de operación. A partir de 1988, ya se tiene un control sobre el tipo de residuo depositado, impidiéndose la disposición de desechos industriales.

VII.7.1 El canal de la Compañía y la carencia de drenaje

El canal de desagüe del río de la Compañía, que fluye de oriente a norponiente en la zona, también puede presentar lixiviaciones, en aquellas áreas donde predominen arenas de granulometría variable en los sedimentos arcillosos de grano fino. Su papel, como fuente potencial de contaminación, aún no es del todo claro y difícil de diferenciar del efecto del basurero de Santa Catarina (figura 7.1).

El mismo carácter, revisten las infiltraciones que pudieren provenir de las letrinas del área urbana de Santa Catarina sobre todo de la zona más vulnerable, en las inmediaciones de la Sierra y el Volcán Xico, que carecía de servicios de drenaje hasta el año de 1990, cuando se inicia un ambicioso proyecto de dotación de servicios a esa comunidad y de agua potable.

Esta hipótesis, es corroborada por las acumulaciones someras de agua que se forman en la zona de reserva ecológica (figura 7.6), después del inicio de la época de lluvias, y que permanecen un par de meses después.

VII.7.2 El basurero de Santa Catarina; principal fuente de contaminación del agua subterránea en la Subcuenca de Chalco

Este basurero o tiradero a cielo abierto (figura 7.7), actualmente controlado, está ubicado en el Municipio de La Paz, Edo de México, en los límites de la delegación política de Ixtapalapa, a un costado de la autopista México-Puebla. Cubre un área de más de 50 hectáreas, de las cuales aproximadamente 15 se encuentran sobre la ladera del volcán la Caldera, una gran estructura de forma elipsoidal irregular, que se eleva directamente del piso del antiguo lago de Chalco. Forma parte de la Sierra de Santa Catarina integrada por materiales clásticos interestratificados de origen andesítico. Este volcán, de dos cráteres, está formado por material piroclástico, principalmente cenizas volcánicas y lapilli, con escasos bloques lo que le confiere un amplio rango de permeabilidad. Pruebas de permeabilidad, con carga variable, realizadas en muestras de suelo del área han dado valores del orden de 10^{-6} m s^{-1} . Esto indicaría, que el terreno es adecuado para la disposición final de residuos (González, 1985). Mas sin embargo, la heterogeneidad geológica de los materiales volcánicos puede presentar porosidad secundaria afectando la permeabilidad del medio.

Al inicio de sus operaciones, en diciembre de 1982, era un tiradero a cielo abierto. Ahora es manejado como un relleno sanitario, aunque no reuna todos los requisitos del mismo. Entre 1985 y 1988, llegó a recibir hasta 8,000 ton/día de basura. Recibe desechos domiciliarios y de mercado así como material de demolición (escombro). Se le considera un tiradero de tipo regional ya que da servicio a varias delegaciones urbanas, Iztapalapa, Ixtacalco, Benito Juárez y Cuauhtémoc y algunos particulares. Actualmente, se ha terraceado la falda del volcán para ampliar el área de depósito. Al igual que los otros lugares de depositación, del área metropolitana, no existe control de la producción de lixiviados ni de biogás. Esta en proceso de clausura y saneamiento, recibiendo

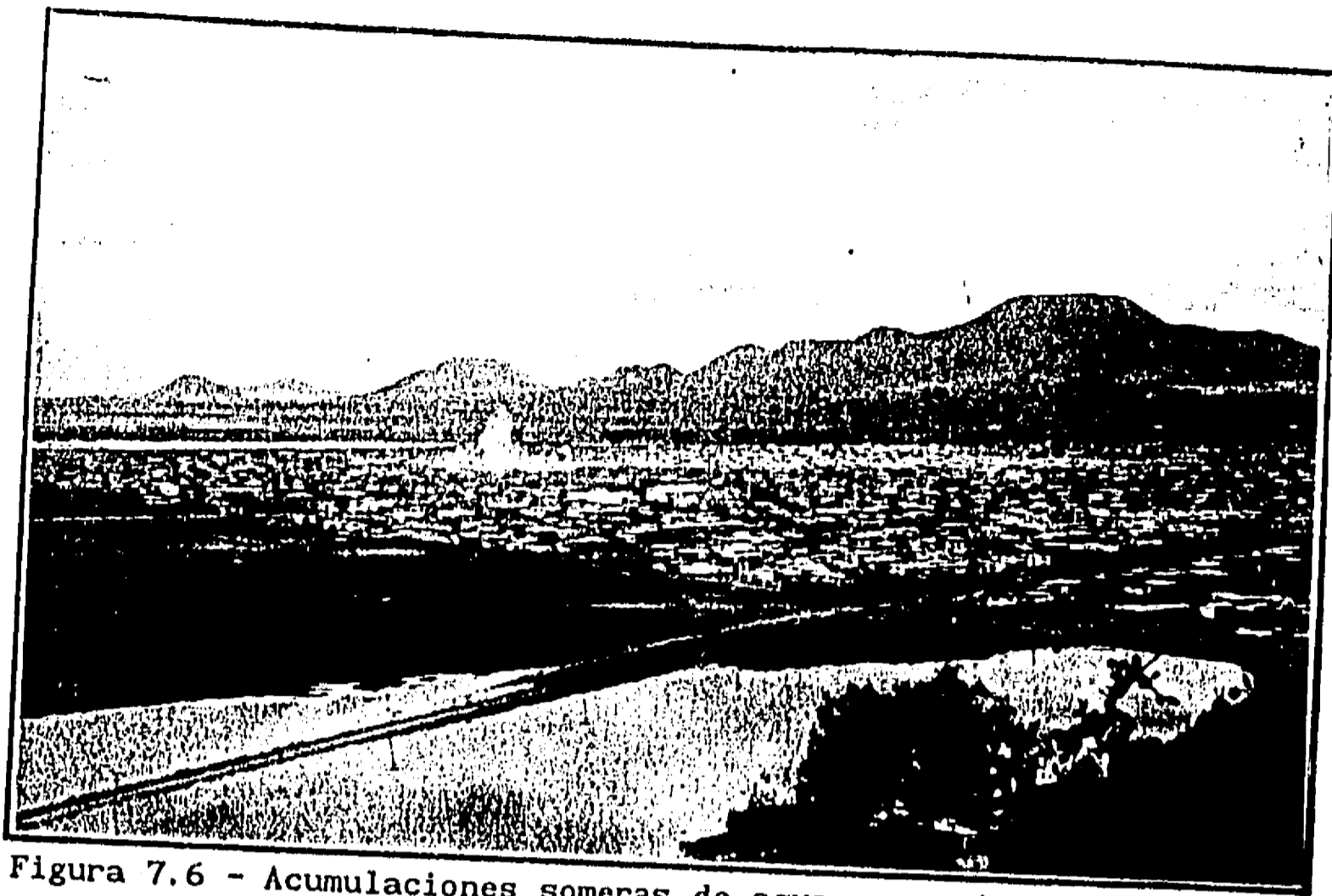


Figura 7.6 - Acumulaciones someras de agua y crecimiento urbano en la zona.

Figura 7.7 - Interior del basurero de Santa Catarina, observandose lixiviación en la parte inferior.



del orden de 2,000 ton/día de basura (Servicios Urbanos, DDF, 1992).

Las principales características de construcción y operación son resumidas en la tabla 7.2.

INICIO DE OPERACION	NOV-DIC 1982
TIPO DE RESIDUO	DOMICILIAR, MERCADO, ESCOMBRO
RECOLECCION DE LIXIVIADO	NO
ESPEJOR DE LA CAPA DE RESIDUOS	VARIABLE
DENSIDAD DE LOS DESECHOS COMPACTADOS	0.8 ton/m ³
VOLUMEN DIARIO DE DESECHOS DEPOSITADOS (1989-1990)	2500 - 3000 ton
PROFUNDIDAD DEL SITIO	D.D.
AREA DEL SITIO	>> 50 Has
PRODUCCION DE LIXIVIADO	D.D.
TIPO DE MATERIAL DEL PISO	TOBAS INTERMEDIAS BASICAS Y DEPOSITOS VOLCANO-CLASTICOS
CONTROL DE FUENTES DE AGUA	NINGUNO
INICIO DE OPERACION COMO TIRADERO CONTROLADO	1987

* FUENTE- Departamento del Distrito Federal, D.D.F. (modificado)
 + D.D. Dato desconocido

Tabla 7.2 - Características de sitio de disposición final de Santa Catarina, D.F.

Aunque se puede encontrar gran variabilidad en los constituyentes de los lixiviados, su composición y producción depende principalmente de la cantidad, tipo de residuos sólidos y de la disposición, almacenamiento y de etapa de estabilización de la basura y por supuesto de la cantidad de agua que entra al relleno que excediendo la capacidad de campo de los residuos depositados forma el lixiviado. Cheremisinoff y Kenneth, (1983)

establecen que los constituyentes que pueden encontrarse, en proporciones anormalmente altas en lixiviados de rellenos sanitarios son :

- Hierro (férrico y ferroso)
- Nitrógeno orgánico
- Fosfatos
- Sulfatos
- Sólidos totales (disueltos/suspendidos)
- Compuestos orgánicos
- Demanda química de oxígeno (DQO)
- Demanda bioquímica de Oxígeno (DBO)

No se han detectado manifestaciones importantes de lixiviación en las márgenes de La Caldera, mas sin embargo la comunicación hidráulica entre la parte superficial y los depósitos y/o el material que se encuentra al nivel de la carretera, es evidenciada por fugas de humo en las laderas del basurero y recientemente por incendios cerca de la carretera. Además de la producción de lixiviados, también se generan una serie de gases (los más abundantes CO_2 y CH_4), producto de los procesos bioquímicos que ocurren en la descomposición de la basura.

El DDF ha realizado, en el año de 1991, una serie de 18 perforaciones para el monitoreo de biogas en el interior y entorno de este sitio de disposición final. Estas muestras recabadas en estos pozos de monitoreo de biogas y analizadas por cromatografía de gases presentan porcentajes del 45 - 54 % en metano y 13 - 20 % en bióxido de carbono. También se han realizado otras perforaciones someras, a tres niveles, fuera del Basurero, paralelas a la autopista México-Puebla, con la finalidad de conocer la cantidad de gas presente en el subsuelo (Servicios Urbanos, DDF, *op. cit.*). El resultado de estas determinaciones corroboran la presencia de metano en todas las perforaciones y en algunos casos presentan niveles de metano semejantes a los de los pozos de extracción de biogas dentro del sitio de disposición, manifestando que existen en el subsuelo poros y fracturas que facilitan el movimiento del biogas y del lixiviado.

Como punto de referencia para la alteración de la calidad natural del agua subterránea, en el estudio de la pluma contaminante asociada al basurero, se tomó la caracterización físico-química y bacteriológica del lixiviado de Sta Catarina que el DDF realizó en época de lluvias en 1984.

La composición de lixiviados en un sitio de disposición final de residuos sólidos, presenta gran número de contaminantes orgánicos e inorgánicos así como un alto contenido de sólidos totales disueltos (ver CAPITULO IV). Aunque las determinaciones efectuadas, en el tiradero de Santa Catarina, son más bien de tipo inorgánico este antecedente es de gran utilidad, ya que sirvió como marco de comparación para los análisis de las muestras tomadas en los pozos. Un análisis del lixiviado, se muestra en la tabla 7.3.

Recientemente (abril de 1992), se han obtenido nuevos análisis físicoquímicos y bacteriológicos mucho más completos que el presentado en la tabla 7.3 y que pertenecen a muestreos realizados en pozos de monitoreo de lixiviados ubicados dentro del Tiradero de Santa Catarina. Estos análisis (tabla 7.4) ofrecen resultados sobre las demandas química y biológica de oxígeno, análisis bacteriológicos y acerca de la existencia de sustancias altamente tóxicas (arsénico, cadmio, cianuro, cromo, plomo) que indican la existencia de desechos de origen industrial que debieron ser depositados en algún momento. Recuerdese que hasta 1988, no se tenía control del tipo de residuo depositado.

VII.8 Indicadores de contaminación

La contaminación del agua subterránea puede deberse a muchos factores. Su calidad está sujeta a muchos cambios, ya sean naturales o producidos por la intervención del ser humano. Existen muchos parámetros que pueden ser utilizados para describir y especificar características que permiten obtener información sobre

TIRADERO DE SANTA CATARINA Epoca de lluvias		
TIPO DE ANALISIS .		
GRUPO	PARAMETROS	VALOR
FISICOS	PH	5.95
	TEMPERATURA (°C)	---
	SOLIDOS TOTALES	76894
	COND. ELECT. (µmhos/cm)	---
QUIMICOS	ALCALINIDAD TOTAL	13600
	DUREZA TOTAL (CaCO ₃)	4479
	CLORUROS	---
METALES PESADOS TOTALES	FIERRO TOTAL	83.35
	CADMIO TOTAL	n.d.
	CROMO TOTAL	0.83
	ZINC TOTAL	2.60
NUTRIENTES	NITROGENO TOTAL	3183
	FOSFORO	40.8
MATERIA ORGANICA	D.B.O. (5) TOTAL	n.e.
	D.Q.O. TOTAL	105200
BIOLOGICOS	COLIFORMES FECALES (col/100)	---
	COLIFORMES TOTALES (col/100)	2300
ORGANICO	S.A.A.M.	5.8

- * FUENTE- Departamento del Distrito Federal, 1984
- + Todos los parámetros estan representados en mg/l, excepto el pH y los que se especifican
- n.d. no detectado
- n.e. no existe
- sin determinación

Tabla 7.3 - Análisis del lixiviado del basurero de Santa Catarina recolectado en la parte central del mismo.

su calidad (Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 1985). A menudo se establecen resultados a priori acerca del uso y características del agua, que aunque son importantes para definir su calidad (color, olor, pH, dureza, turbiedad, sólidos totales disueltos), no estan directamente

CARACTERIZACION DEL LIXIVIADO EN EL SITIO

DE DISPOSICION FINAL DE SANTA CATARINA

PARAMETRO	MUESTREO		
	1	2	3
pH	8.10	8.00	8.10
TEMPERATURA (°C)	21.00	21.00	21.00
COND. ELECT. (µmhos/cm)	21195.00	30615.00	28260.00
ALCALINIDAD TOTAL	203.00	211.00	207.00
ALCALI. FENOFTALEINA	0.00	0.00	0.00
CARBONATOS	0.00	0.00	0.00
BICARBONATOS	203.00	211.00	207.00
HIDROXIDOS	0.00	0.00	0.00
ACIDEZ TOTAL	0.00	0.00	0.00
ACIDEZ MINERAL	0.00	0.00	0.00
DUREZA TOTAL	1994.37	3655.43	3590.61
SULFATOS	563.78	695.25	963.90
SOLIDOS TOTALES	20696.70	33750.00	36046.70
SOL. TOT. VOLATILES	7560.00	12127.50	12983.30
SOL. TOT. FIJOS	13136.70	1960.00	23073.40
SOL. SUSP. TOTALES	730.00	1960.00	6140.00
SOL. SUSP. VOLATILES	220.00	500.00	1600.00
SOL. SUSP. FIJOS	510.00	1460.00	4540.00
SOL. SEDIMENTABLES	0.40	2.90	8.50
SOL. DIS. TOTALES	19966.70	31790.00	29906.70
SOL. DIS. VOLATILES	7340.00	11627.50	11383.30
SOL. DIS. FIJAS	12626.70	500.00	18533.40
NITROGENO TOTAL	1780.86	1642.09	1137.90
NITRATOS	1429.31	1013.01	999.13
FOSFORO	4.38	3.00	3.06
D.Q.O. TOTAL	6587.00	7360.00	7084.00
D.B.O. TOTAL	4050.00	4200.00	3900.00
COLIFORMES TOTALES (col / 100 ml)	11000.00	13000.00	17000.00
COLIFORMES FECALES (col/100 ml)	800.00	800.00	800.00
CUENTA ESTANDAR	>6500.00	>6500.00	>6500.00
ARSENICO	0.06	0.07	0.71
ZINC	2.91	3.56	4.05
COBRE	0.93	1.89	2.23
MERCURIO	0.17	0.07	0.07
CROMO	1.28	1.41	1.53
PLOMO	0.65	1.15	1.38
FIERRO	60.12	42.84	70.20
MANGANESO	2.42	1.24	2.20
CADMIO	0.06	0.07	0.86

* FUENTE-Dirección técnica de desechos sólidos, 1991

+ Todos los parámetros están representados en mg/l, excepto el pH y las que se especifican.

Tabla 7.4- Análisis de lixiviados en el sitio de disposición final de Santa Catarina, (1991)

relacionados con la existencia de algunos elementos o grupos químicos existentes. Otras veces, solo pocos parametros son cuantificados, aunado con la preservación y manejo inadecuado de las muestras y limitantes existentes en los metodos empleados (Lamb, *op. cit.*).

Muchas de las veces, la mejor opción que se tiene consiste en determinar las concentraciones de uno o más constituyentes específicos del agua y de esta forma evaluar y cuantificar sus efectos. En análisis de potabilidad es prioritario conocer los límites en concentraciones de elementos que puedan repercutir por efectos no deseables en la salud. También, la identificación de bacterias del grupo coliforme es un buen indicador de contaminación reciente (ver CAPITULO III).

En general, el acceso a este tipo de información está vedado, se oculta o se permite en forma restringida. Esto ocasiona que muchas veces, se tengan que duplicar esfuerzos y propicia por la falta de información, que la magnitud de los problemas de contaminación pasen desapercibidos y al no tomarse medidas adecuadas o de control, puedan presentarse problemas sanitarios a mediano y largo plazo.

VII.8.1 Estudios bacteriológicos

Los estudios bacteriológicos son de gran importancia ya que de estos depende la valoración de la calidad higiénica del agua. La alteración de ésta origina multiples afectaciones en la salud.

Un indicador importante del estado sanitario del agua está representado por la presencia de microorganismos patógenos, especialmente por la presencia de bacterias coliformes, estreptococos fecales y *Clostridium Pergringens* que indican contaminación antropogénica por heces fecales o animales.

A continuación se presentan los resultados de algunos análisis bacteriológicos que se pudieron recabar y otros que fueron realizados, en la Facultad de Química de la UNAM.

En 1985, Gonzalez, *op. cit.*, menciona la existencia de agua putrefacta en un pozo a cielo abierto localizado en una escuela Primaria, localizada en las cercanías del Tiradero hacia el sureste.

Otros análisis reportan resultados pobres en el número de determinaciones efectuadas en 5 pozos en las vecindades del basurero de Santa Catarina (figura 7.8) (Química del Agua, 1983). El pozo ubicado en el rancho la Ascención, el que surte la población de Tlapizahua y el número 1, presentan agua no propia para uso potable, a diferencia de los otros dos, cuya calidad es adecuada.

Posteriormente se llevaron a cabo una serie de análisis bacteriológicos en la Facultad de Química de la UNAM (tabla 7.5). En los resultados presentados, se observan algunas discrepancias en la variación del número de microorganismos en algunos pozos, seguramente debido a algunos problemas en el manejo y traslado de las muestras. Sin embargo los resultados indican la mala calidad sanitaria de estos pozos. Otros análisis establecen que el pozo 315 TX (Km 20+689 m de la carretera Mexico-Texcoco y el 318 (km 21 carretera libre Mexico-Puebla) presentan las mismas características.

VII.8.2 Estudios hidrogeoquímicos

La evaluación de la calidad del agua, para consumo humano, depende de las concentraciones de sus componentes. Es por ello que el conocimiento de las características fisicoquímicas es fundamental y especialmente de aquellos constituyentes considerados nocivos para la salud.

En general, los análisis que se realizan de forma rutinaria en nuestro país presentan solo determinaciones de tipo inorgánico, muchas veces con unas cuantas determinaciones que no reflejan

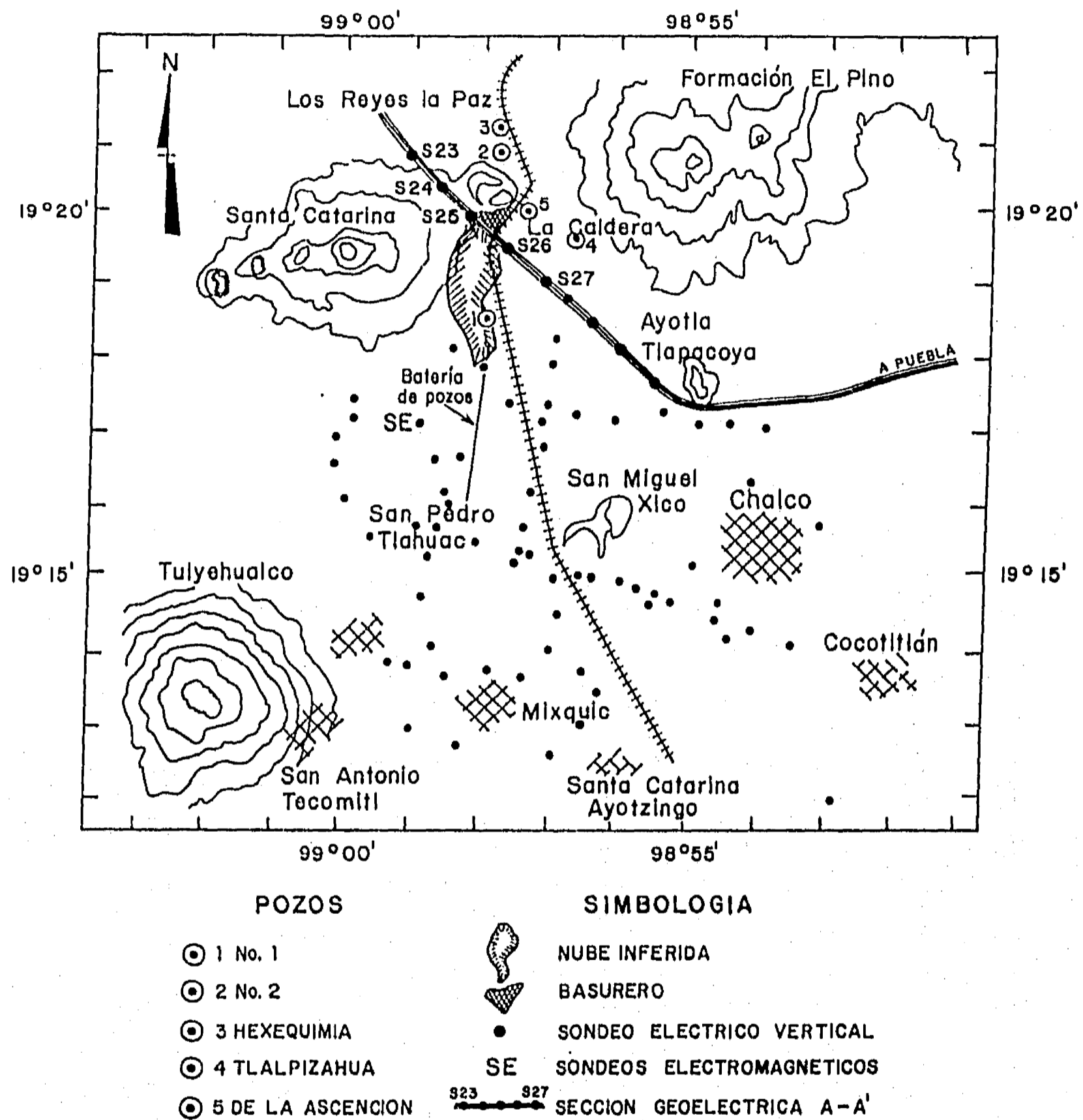


Figura 7.8-Mapa de ubicación de los SEV's, de la sección geoelectrica A-A', la batería de pozos de Santa Catarina y los sondeos electromagnéticos.
(Modificado de Rodríguez y González-Morán, 1989).

FECHA : 5 de Junio de 1987		
POZO	MESOFILOS AEROBIOS	COLIFORMES TOTALES
1 SC	INCONTABLES	179
2 SC	INCONTABLES	INCONTABLES
3 SC	INCONTABLES	102
317 CEAS	INCONTABLES	INCONTABLES
318 CEAS	INCONTABLES	INCONTABLES
324 CEAS	INCONTABLES	INCONTABLES

FECHA : 29 de Junio de 1987		
POZO	MESOFILOS AEROBIOS	COLIFORMES TOTALES
1 SC	INCONTABLES	INCONTABLES
3 SC	70	28
5 SC	12	60
6 SC	228	INCONTABLES
7 SC	INCONTABLES	INCONTABLES
8 SC	INCONTABLES	INCONTABLES
9 SC	126	155
11 SC	6	19
317 CEAS	9	34
324 CEAS	129	23

* Realizados en la Facultad de Química de la U.N.A.M.

+incontable.- Que sobrepasa la capacidad de cuantificación

Tabla 7.5 - Análisis bacteriológicos efectuados en muestras de pozos cercanos al sitio de disposición final de Santa Catarina.

indicio alguno de alteración en la calidad del agua potable. Los compuestos orgánicos, que ya representan una seria amenaza para la calidad del agua subterránea y la salud humana rara vez son analizados, muchas veces por la cantidad de estos compuestos, muchos de ellos sintéticos, la carencia de técnicas y equipos y el costo de los análisis. Poco a poco, estos análisis tendrán que hacerse obligatorios para un buen número de compuestos.

Los resultados presentados a continuación, son los que se han llevado a cabo y los que se han considerado mas relevantes en este estudio de la subcuenca de Chalco.

En la década de los 50s, se realizaron en la zona centro-oriente de la Subcuenca de Chalco una serie de estudios geoquímicos y geológicos (Molina, *op. cit.*) ya que esta región presentaba perspectivas para la extracción de agua subterránea y para el abastecimiento de la Ciudad de México. Se estudiaron geoquícamente 57 pozos con profundidades entre 45 y 150 metros con la intención de conocer la composición química del agua subterránea y el comportamiento geológico.

Los resultados obtenidos, establecen dos clases geoquímicas de aguas en la parte este de la Subcuenca:

La primera, que indica la relación existente entre la petroquímica de los sedimentos lacustres y la composición de la unidad arcillo-arenosa y la segunda, relacionada con el material piroclástico y granular, cerca de las laderas montañosas, cuyo origen es meteórico, mezclándose con aguas magmáticas. Establece que no varían las características geoquímicas de las aguas a diferente profundidad.

Este estudio reporta también :

Bajas cantidades en metales pesados y una importante distribución de zinc, principalmente en la zona norte (en las laderas de la Formación el Pino) 0.06 ppm, disminuyendo hacia el sur hacia Tlapacoya (0 ppm). Hacia el sureste del volcán Xico se presenta otra zona anómala, aunque de menor importancia (figura 7.8).

Otro estudio sobre la calidad del agua de la Cuenca de México, utilizando preferencialmente información fisicoquímica de la Comisión de Aguas del Valle de México (CAVM) (Durazo, *op. cit.*) que toma en cuenta pozos de 150-300 metros de profundidad (la mayoría de 200-300 m), que presentan ademe ciego en los primeros metros (en los estratos arcillosos) permiten establecer los siguientes resultados:

Los cloruros predominantes en la Cuenca de México se encuentran entre 15 y 30 mg/l. Identificandose agua baja en cloruros en las montañas que paulatinamente incrementan su contenido.

El sodio presenta concentraciones menores de 15 mg/l en la zona montañosa y mayor de 100 en la antigua zona lacustre y las concentraciones de magnesio de 4 a 32 mg/l.

El 82 % de los pozos muestreados en el censo de 1977, presentan cantidades de N-NH₄ arriba de la norma. Lo mismo sucede, con el 27 % de estos pozos que presentan N-NO₂ y 13 % de N-NO₃.

Las altas concentraciones de nitrógeno pueden estar relacionadas con desechos orgánicos y malos sistemas y servicios sanitarios. La distribución de nitrógeno esta gobernada por procesos de óxido-reducción y también, por supuesto, por la presencia o ausencia de oxígeno y a reacciones realizadas por microorganismos (ver CAPITULO III).

Ryan (1989), presenta un panorama muy general acerca de los compuestos nitrogenados en la Cuenca de México, sin embargo no encuentra diferencias significativas entre aguas superficiales y agua de pozos, tratando de demostrar que la fuente de contaminación del agua subterránea se debe a aguas negras. Reporta contaminación antropogénica, ya conocida, en la parte sur de la Cuenca de México (en la vecindad de los ramales de Tecomilt, Tláhuac y Santa Catarina) principalmente por los contenidos de amonio. No se reportan conductividad ni contenidos de nitratos en la batería de Santa Catarina.

También se observan áreas específicas que presentan con más frecuencia problemas de calidad (pie de monte de Tecomilt y Tuyehualco) donde 25 de 32 muestras de agua reportaron parámetros sobre las normas (coliformes totales, coliformes fecales, Fe, Mn, NH₃, salinidad) (DDF-DGCCCH, *op. cit.*).

Respecto a la calidad del agua en la zona de estudio se obtuvo información de los muestreos fisicoquímicos realizados por la Comisión de Aguas del Valle de México (CAVM, *op. cit.*). Estos análisis, realizados en los pozos de la batería de Santa Catarina, evidencian la presencia de compuestos nitrogenados, nitratos y altas concentraciones de nitrógeno amoniacal. Aunque no se realizaron análisis bacteriológicos existen evidencias de enfermedades gastrointestinales, en una escuela agropecuaria cercana al tiradero de Santa Catarina.

Arizabalo y otros (1987) establecen, que el canal de la Compañía no puede ser considerado como una fuente importante de contaminación del multiacuífero regional ya que las características isotópicas y fisicoquímicas de las aguas del canal, no se correlacionan con las características del agua subterránea.

Con la intención de obtener más evidencias de alteración de la calidad del agua en pozos ubicados en la periferia del Tiradero se seleccionaron una serie de 22 parámetros fisicoquímicos como indicadores realizando muestreos periódicos (15-20 días) a lo largo de 14 meses (septiembre de 1987 - octubre de 1988). Los análisis fueron efectuados en los laboratorios de la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería (DEPFI), de la UNAM (Becerril, 1991). Los muestreos se realizaron, tanto en los pozos de la batería de Santa Catarina, como en algunos pozos pertenecientes a la Comisión Estatal de Aguas y Saneamiento del Estado de México (CEAS).

Los parámetros fisicoquímicos seleccionados fueron : pH, temperatura, color, olor, turbiedad, conductividad, acidez, alcalinidad, carbonatos, bicarbonatos, fosfatos, cloruros, sodio, potasio, nitratos, nitritos, nitrógeno amoniacal y en metales pesados fierro, manganeso, cromo, cobre, plomo y aluminio. Las

técnicas usadas para determinar los parámetros están basadas en los Métodos Estandar para Análisis de Aguas y Aguas residuales (Standar Methods for the Examination of Water and Wastewater, *op. cit.*).

De todos los parámetros seleccionados son interesantes el pH, los nitratos, el nitrógeno amoniacal, la alcalinidad de bicarbonatos, la turbiedad y la conductividad ya que pueden ser relacionados para explicar la transformación de la materia orgánica de acuerdo con las condiciones que presenta el acuífero.

La calidad del agua de los pozos del ramal de Santa Catarina y pozos vecinos al tiradero de Santa Catarina no sufre una gran alteración. Los análisis fisicoquímicos realizados, destacan por presentar, cerca o arriba de las normas Nacionales e Internacionales de calidad para agua potable, algunos parámetros como el nitrógeno de nitratos, el nitrógeno amoniacal, fierro total y dureza total como CaCO_3 . La tabla 7.6, presenta los valores máximos, mínimos y promedios de los parámetros fisicoquímicos determinados a lo largo de 18 muestreos, excepto los del pozo 3 donde solo se realizaron 6 muestreos debido a su clausura. Todos los pozos presentan altas concentraciones de nitratos, notándose una disminución hacia la parte media de la Bateria de pozos.

Dentro del ramal de Santa Catarina, el pozo numero 3 presenta la mayor parte de parametros fuera de las normas de calidad para agua potable y sobre todo una excesiva conductividad (7640 $\mu\text{mhos/cm}$) que indican la presencia de gran cantidad de sales disueltos. En los últimos muestreos realizados, antes de su clausura definitiva, este pozo presentaba 100 mg/l de nitrógeno amoniacal. Arizabalo *et. al.*, *op. cit.*, establecen que este pozo es el único de la Bateria que presenta cierta sensibilidad a los procesos de infiltración en la temporada de lluvias, respecto a sus concentraciones de cloruros, sulfatos y compuestos nitrogenados. También reportan que los análisis isotópicos (deuterio y oxígeno-18) y fisicoquímicos en canales circunvecinos a este pozo no son la fuente potencial de contaminación ya que incluso presentan menor cantidad de sólidos totales disueltos. El pozo ha

Parámetro	Límites permit.	P O Z O								
		1			3			6		
		mínimo	máximo	promedio	mínimo	máximo	promedio	mínimo	máximo	promedio
pH	6.9-8.5	<u>6.48</u>	7.80	7.41	7.65	8.15	7.95	6.98	7.70	7.50
Turbiedad	10	0.19	1.60	0.63	0.36	<u>38.00</u>	10.88	0.17	3.40	0.77
Oxígeno disuelto	--	0.70	2.90	1.44	0.00	1.10	0.46	0.70	3.90	1.79
Dureza total.	300.00	180.00	285.00	215.67	95.00	165.00	130.83	165.00	<u>355.00</u>	210.33
N-NO ₃ ⁻	5.00	3.60	<u>12.95</u>	6.80	<u>15.57</u>	<u>44.92</u>	23.67	2.83	<u>8.96</u>	5.91
N-NH ₄ ⁺	0.50	0.50	<u>18.60</u>	6.07	<u>27.80</u>	<u>99.20</u>	60.28	0.48	<u>2.54</u>	1.58
Cu	1.50	0.00	0.46	0.06	0.00	0.07	0.02	0.00	0.05	0.02
Fe	0.30	0.00	<u>0.40</u>	0.12	0.08	<u>1.15</u>	0.53	0.00	<u>1.41</u>	0.24
Cr	0.05	0.00	<u>0.10</u>	0.02	0.00	0.04	0.01	0.00	0.04	0.01
Alc. CO ₃ ²⁻	400.00	0.00	20.00	4.67	0.00	350.00	93.00	0.00	20.00	5.88
Alc. HCO ₃ ⁻	--	155.0	380.0	255.67	1905.0	4225.0	2274.0	190.00	315.00	225.30
SO ₄ ²⁻	250.00	0.00	4.50	1.22	1.59	75.00	34.20	0.00	6.30	1.58
DBO	--	1.30	5.95	3.77	0.00	5.65	1.62	0.55	1.65	1.11
Na ⁺	--	110.40	431.25	195.00	1325.0	2127.5	1979.0	92.00	204.13	143.99
K ⁺	--	9.77	54.73	24.32	17.98	205.22	147.95	4.50	39.09	17.99
Conductividad	--	410.00	714.00	566.47	6210.0	7640.0	7058.7	94.13	456.00	361.65

+Todos los valores están en mg/l excepto el pH y la conductividad en μ mhos/cm.

++Los valores subrayados indican valores sobre los límites permisibles.

Tabla 7.6 Valores máximos, mínimos y promedio a lo largo de 18 muestreos en pozos de la Batería de Santa Catarina.

(Modificado de Becerril, 1991)

lado clausurado y reubicado, incrementando su profundidad a 450 metros.

Respecto al pozo ubicado en el rancho de la Ascensión (figura 7.8), que como ya se ha mencionado no presenta características bacteriológicas adecuadas para agua potable, en los pocos muestreos químicos realizados presenta también valores sobre las normas de calidad de agua potable para los compuestos nitrogenados, pero menores que los obtenidos para el ramal de Santa Catarina. El hierro también rebasa las normas.

Los análisis que presenta Química del Agua, *op. cit.* presentan determinaciones fisicoquímicas muy limitadas. El pozo que surte a la población de Talpizahua se excede en su contenido de hierro. Los pozos de Hexequimia y el pozo (figura 7.8) presentan elevados contenidos en alcalinidad total, dureza total, sulfatos, color y turbiedad y por supuesto altos valores de DBO y DQO.

Otros estudios ofrecen información acerca de la geoquímica del subsuelo (Urrutia, 1990). El muestreo de las primeras capas de tefra intercaladas con sedimentos lacustres, realizada en la parte central del antiguo lago de Chalco, indica entre otros parámetros la presencia de hierro pero en cantidades menores a las encontradas en los análisis fisicoquímicos de agua. No obstante, estos resultados son demasiados locales para el tipo de estudio presentado.

Los altos contenidos de nitratos y nitrógeno amoniacal presentes, parecen indicar la presencia de mezclas entre aguas de buena y mala calidad. Las altas concentraciones de nitratos encontradas (mayores de 10 mg/l) podrían deberse a oxidaciones del nitrógeno amoniacal y los nitritos, tanto por acción química, como bacteriológica y pueden representar un grave problema sanitario.

Los compuestos del nitrógeno se muestran inestables en los ambientes geoquímicos de la Cuenca de México. Se posibilitan procesos importantes de desnitrificación y reducción de nitratos a amonio. El manganeso y amonio en altas concentraciones y los sulfitos en bajas concentraciones, pueden ser asociados a zonas

altamente reductoras (existiendo la tendencia a disminuir el oxígeno).

VII.9 Prospección geofísica para estudiar el subsuelo y la contaminación del acuífero

El conocimiento del medio ambiente, la determinación y distribución de parámetros físicos, hidrogeológicos y la detección y monitoreo de agentes contaminantes en el agua subterránea pueden ser realizados mediante el empleo de técnicas de prospección geofísica. En el CAPITULO V, ya se han visto y discutido una amplia gama de métodos geofísicos que pueden ser aplicados en estudios hidrogeológicos. En seguida se presentaran los resultados mas relevantes que estan relacionados con el empleo y aplicación de métodos geofísicos en la subcuenca de Chalco.

VII.9.1 Levantamiento geoelectrico.- Configuración de la unidad hidroestratigráfica arcillosa.

Aprovechando una serie de estudios geofísicos, principalmente sondeos eléctricos verticales (SEV's) (Rodríguez,1987), se ha podido hacer una parametrización de las principales formaciones acuíferas de la Cuenca de México. Estos resultados permiten, ahora una fácil asociación entre entidades geoelectricas y unidades litoestratigráficas.

Se seleccionaron alrededor de 70 SEV's (figura 7.8) efectuados por el Departamento de Recursos Naturales, del Instituto de Geofísica, de la UNAM, y la Comisión Federal de Electricidad, (CFE), para establecer la geometría espacial de la cima de la unidad hidroestratigráfica arcillosa, aprovechando el contraste resistivo que presentan las formaciones arcillosas, respecto al material granular (0.50 - 8.0 ohm-m vs 20.0 - 35.0 ohm-m)

(Rodríguez y González-Morán, *op. cit.*). El proceso de reinterpretación, basado en algoritmos computacionales, iterativos, busco más la determinación del espesor del acuitardo que la definición estratigráfica del mismo. La figura 7.9, representa la configuración tridimensional de la base de la unidad hidroestratigráfica arcillosa. Los resultados geoelectricos, fueron calibrados con información estratigráfica de pozos del área y correlacionados con aquellos, obtenidos del estudio sísmico de refracción, efectuado en el año de 1986 por la CFE (Benhumea y Vázquez, 1988).

Como muestra la figura 7.9, el acuitardo presenta sus máximos espesores (cerca de los 400 m), en la porción sur de la sierra de Santa Catarina (bajo la zona urbana de Tláhuac), indicando que los remanentes lacustres, que lo originaron, tuvieron en esa zona sus mayores profundidades; aunque pudiera tratarse también, de un reflejo de la tectónica del área o una combinación de ambos.

En el área comprendida entre la antigua isla de Tlapacoya y el volcán Xico no se pudo obtener información confiable, ya que el trabajo de campo se vio obstaculizado por el asentamiento irregular suburbano, establecido en la zona. La distribución clandestina de energía eléctrica produce potenciales parásitos, ruido geoelectrico, alterando la señal. Se detectaron diferencias de potencial de 50 -100 mV con variaciones que no se pudieron tipificar. Hacia la frontera oriental, como era de esperarse, el acuitardo pierde potencialidad rápidamente, pasando de 100 a 30 metros de espesor en un kilómetro, hasta desaparecer en las márgenes de la sierra Nevada. Uno de los perfiles geoelectricos, que pasó al pie del volcán Xico, puso en evidencia que éste aparato volcánico, no presenta continuaciones laterales, confirmando su origen, como un evento tipificado como *derrame de fisura*.

El cerro Tlapacoya, por la geometría obtenida de este estudio geoelectrico, solo parece continuarse a profundidad hacia el norte. Los espesores del acuitardo son del orden de 50 - 60 metros en las inmediaciones sur, este y oeste.

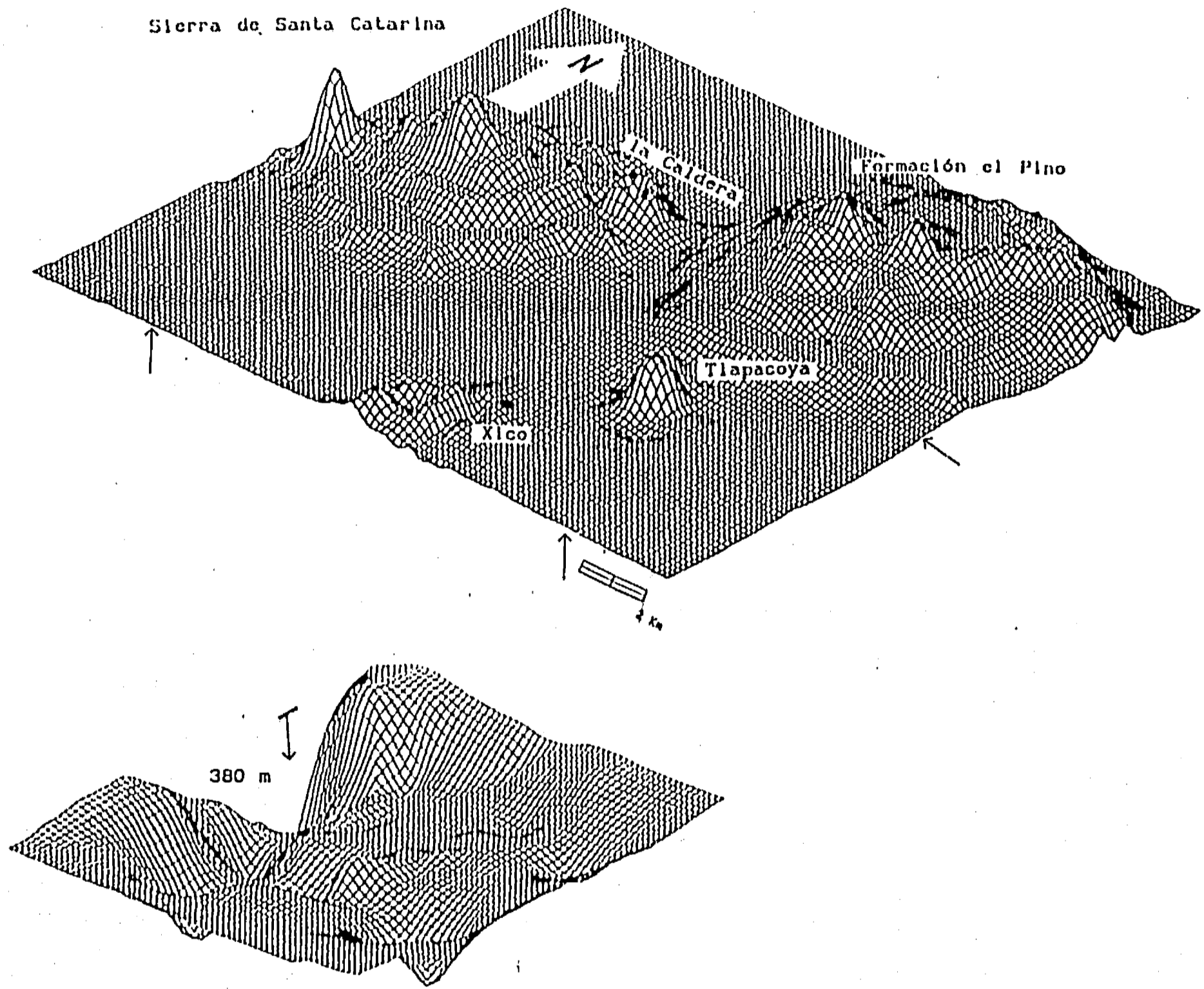


Figura 7.9 - Configuración tridimensional de la sima de la unidad arcillo-arenosa y de la topografía de la región.

Como muestra la figura 7.9, el acuitardo presenta sus máximos espesores (cerca de los 400 m), en la porción sur de la sierra de Santa Catarina (bajo la zona urbana de Tláhuac), indicando que los remanentes lacustres, que lo originaron, tuvieron en esa zona sus mayores profundidades; aunque pudiera tratarse también, de un reflejo de la tectónica del área o una combinación de ambos.

En el área comprendida entre la antigua isla de Tlapacoya y el volcán Xico no se pudo obtener información confiable, ya que el trabajo de campo se vio obstaculizado por el asentamiento irregular suburbano, establecido en la zona. La distribución clandestina de energía eléctrica produce potenciales parásitos, ruido geoelectrico, alterando la señal. Se detectaron diferencias de potencial de 50 -100 mV con variaciones que no se pudieron tipificar. Hacia la frontera oriental, como era de esperarse, el acuitardo pierde potencialidad rápidamente, pasando de 100 a 30 metros de espesor en un kilómetro, hasta desaparecer en las márgenes de la sierra Nevada. Uno de los perfiles geoelectricos, que pasó al pie del volcán Xico, puso en evidencia que éste aparato volcánico, no presenta continuaciones laterales, confirmando su origen, como un evento tipificado como *derrame de fisura*.

El cerro Tlapacoya, por la geometría obtenida de este estudio geoelectrico, solo parece continuarse a profundidad hacia el norte. Los espesores del acuitardo son del orden de 50 - 60 metros en las inmediaciones sur, este y oeste.

Hacia el norte, entre la sierra de Santa Catarina y el cerro el Pino, el comportamiento es similar al de la parte sur, adelgazándose la arcilla hacia el cuerpo volcánico la Caldera, alternándose con material detrítico volcánico y cenizas.

También, se analizaron los registros eléctricos de los pozos del ramal de Santa. Catarina (Rodríguez y Lara, *op. cit.*) a fin de lograr una mejor asociación entre los valores de resistividad y la composición geológica de las formaciones geológicas, detectadas. Logrando explicar la presencia de dos cuerpos de agua en aparente discordancia:

Uno de agua mineralizada (en el acuitardo) sobre
otro, de agua dulce (en el acuífero)

La zona de mezcla de estos dos cuerpos de agua produce una capa de resistividad, variable, que complica el proceso de interpretación geoelectrica. Igualmente, se aprovecharon los resultados del macroperfil geoelectrico, que se realizó en la parte central norte de la Cuenca de México, con el cual se definieron rangos resistivos para las principales formaciones geológicas comprometidas con el multiacuífero (tabla 6.3).

VII.9.1.1 Sección geoelectrica A - A'.- Modelo del proceso de Lixiviación.

Para su análisis, se seleccionaron los 5 sondeos eléctricos verticales (S23,.....,S27) (ver ANEXO I) realizados por la CFE, utilizando un equipo Scientrex, con receptor IPR-10, que elimina automáticamente el potencial natural y un transmisor TSQ-3 de 3000 Watts de potencia y una fuente de energía de 220 volts de salida (Benhumea y Vázquez, *op. cit.*), que se encuentran ubicados sobre la carretera de cuota México-Puebla y en las proximidades del tiradero de Santa Catarina (figura 7.8).

Los SEV's, antes mencionados, con apertura electródica máxima de $AB/2$ de 1000 metros, y arreglo Schlumberger, fueron procesados mediante un programa de computadora que emplea el filtro lineal de O'Neill asumiendo un modelo de capas (Argelo, 1967). Este filtro corto consta para el dispositivo Schlumberger, de 20 coeficientes, y un intervalo de muestreo igual a $1/6 \ln(10)$. El proceso de interpretación fue apoyado en información geológica de pozos del CEAS, los resultados de la caracterización geoelectrica de las principales unidades litoestratigráficas identificadas en la Cuenca (CAPITULO VI) y aquellos, anteriormente discutidos, que permitieron establecer la geometría espacial de las formaciones arcillosas,

respecto al material granular.

La integración de estos modelos de capas (ver ANEXO II) permitió reconstruir una pseudo-sección geoelectrica de resistividad que permite visualizar el subsuelo mediante un modelo estratificado de capas. La figura 7.10, muestra la sección geoelectrica A-A' conformada básicamente por 7 capas cuyos intervalos resistivos pueden ser correlacionados con la litología del subsuelo.

Debe recalcar el hecho, que la subcuenca de Chalco ha estado sometida a intensa actividad volcánica reciente con gran número de aparatos volcánicos que establecen un evidente patrón tectónico. En particular, la sección A-A' esta ubicada en un "ambiente" netamente volcánico y morfológicamente complejo, entre los productos relacionados con la actividad volcánica de la sierra de Santa Catarina y los conos escoreros del volcán la Caldera.

Destaca, por su potencialidad, una gran unidad litológica (12-25 Ω -m) que presenta espesores, en sus partes más profundas, de 200 a 300 metros correlacionable con material granular volcánico, permeable, saturado con agua de buena calidad que incluso puede presentar algunos derrames lávicos, mucho más resistivos, pero de pequeños espesores, que no pueden ser identificados por este tipo de métodos. Interdigitada dentro de esta unidad, se presenta una zona conductiva (9 Ω -m) que definitivamente, por su posición, ya que se encuentra encajonada dentro del material volcánico, no puede ser asociada a material arcilloso de origen lacustre. Por otra parte, si bien sólo es detectada en el sondeo 26, ubicado frente al basurero de Santa Catarina, esta unidad no es evidenciada en el sondeo anterior (S25), ubicado topográficamente más alto, por las siguientes razones:

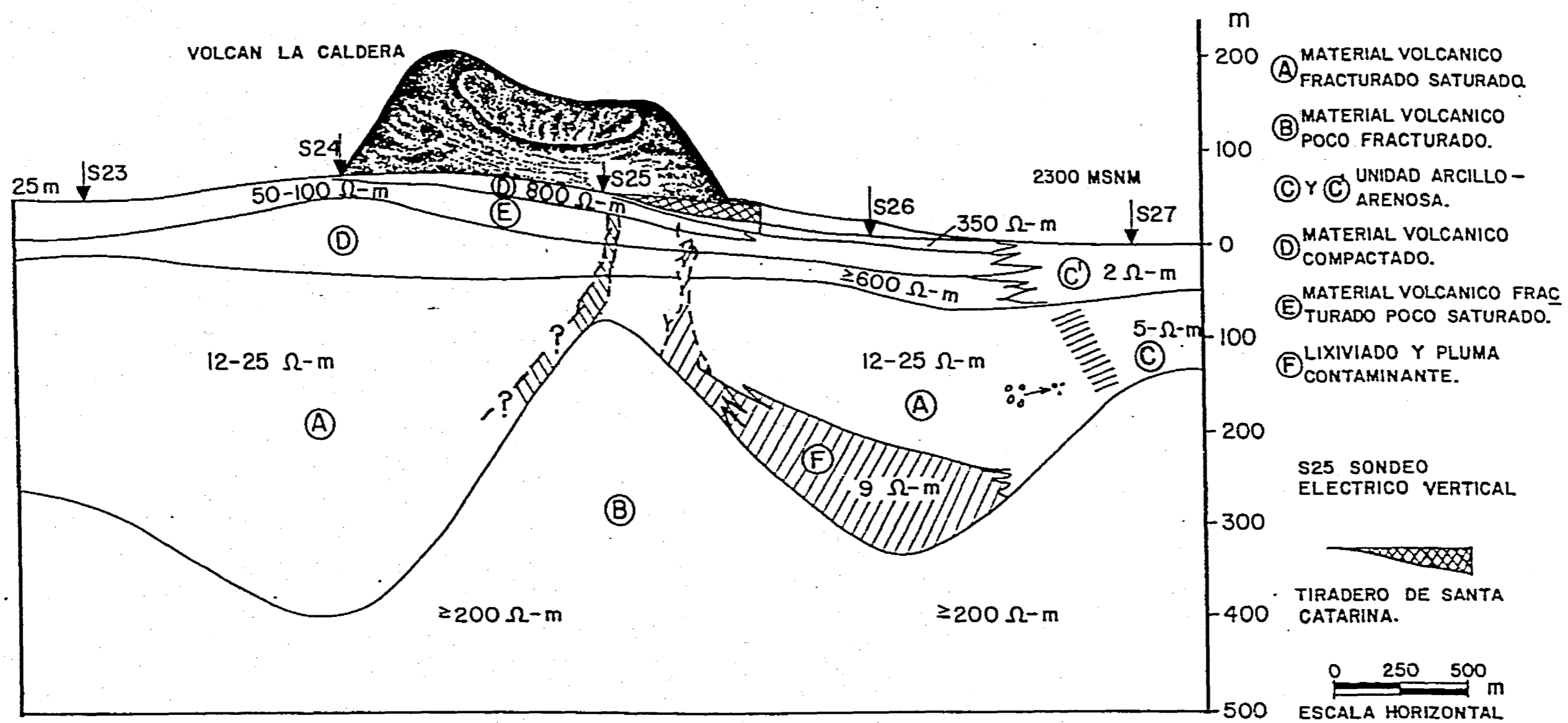


Figura 7.10 Sección geoelectrica A-A'.

- a) En el proceso de lixiviación generado, por la acumulación de residuos sólidos en el área de depositación del Basurero, los líquidos percolados viajan preferencialmente de manera vertical por la acumulación de horizontes láyicos, ampliamente fisurados y con gran cantidad de vacuolas intercomunicadas, donde se intercalan niveles discontinuos de piroclastos porosos. Su desplazamiento lateral se vé afectado por la presencia de material arcillo-arenoso y coladas de material volcánico compacto. Este hecho, es evidenciado por la ausencia de lixiviación en el entorno del basurero y por la presencia del mismo, en pozos de observación, de 20 metros de profundidad, sobre la autopista a Puebla, en la periferia del Basurero. Aumentando su volúmen en la dirección preferencial del flujo local (SE), que controlan el proceso de lixiviación en esta dirección y hacia el SEV(25).
- b) Por otra parte, el flujo subterráneo regional establecido en la zona presenta una dirección preferencial, SE-SW, (Lesser et al, *op. cit.*)(figura 6.4), alimentando directamente el material granular, piroclástico, y rocas volcánicas fracturadas bajo las formaciones lacustres. La nube contaminante, una vez incorporada al flujo regional se mueve en la misma dirección.
- c) Otro factor, de tipo estructural, que también controla la dirección de flujo de la lixiviación se establece por la elevación de la unidad litoestratigráfica, más profunda y resistiva, ($> 200 \Omega\text{-m}$) que presenta un alto hacia el sondeo 25, disminuyendo rápidamente hacia el 26.
- d) No es posible establecer con la información recabada, la zona de lixiviación que se encuentra ubicada entre los sondeos 25 y 26, puesto que el volúmen percolado es muy pequeño comparado con el espesor de las primeras tres o cuatro capas, de secuencias volcánicas, que en conjunto tendran un espesor entre 60 y 100 m. La realización de nuevos sondeos, con abertura eléctrica $AB/2 = 600 \text{ m}$ resultaron poco satisfactorios al no poder vencerse la resistencia de contacto con el equipo utilizado (5000 Watts). Esta se incrementa artificialmente al no poder ubicar los electrodos de corriente sobre formaciones volcánicas firmes. Asi mismo, la topografía irregular de la zona, aunada a la interdigitación de materiales volcánicos consolidados, con depósitos piroclásticos, de grano grueso y fino, limita y controla, el seguimiento lateral de la lixiviación.

e) Lateralmente, en dirección del sondeo 27, se observan otras unidades geoelectricas, conductivas, que corresponden a formaciones volcánicas saturadas con agua de buena calidad ($12 - 25 \Omega\text{-m}$) que cambian su carácter resistivo ($2 - 5 \Omega\text{-m}$) por la intercalación de material arcillo-arenoso saturado con agua de mala calidad relacionada con los depósitos lacustres del lecho del antiguo lago de Chalco.

Es probable que también exista migración de lixiviados a la altura del sondeo 25. Sin embargo no se pudo corroborar esta hipótesis ya que se carece de los contrastes resistivos adecuados, para su detección en superficie, principalmente porque los volúmenes de lixiviación deben ser menores que los involucrados a la altura del sondeo 26.

El papel del tiradero de Santa Catarina, uno de los más grandes de la metrópoli, como fuente de contaminación por la lixiviación de los desechos depositados, es explicado por la geometría obtenida de una zona conductiva asociada a la presencia de una pluma contaminante, proveniente del basurero. Su desplazamiento solo se produce por el material volcánico fracturado de la sierra de Santa Catarina, que facilita su circulación.

VII.9.2 Información gravimétrica.- Configuración de la superficie de la unidad litoestratigráfica volcánica.

Con la finalidad de tener un conocimiento integral de la zona de estudio, y no solo información superficial del paquete sedimentario, obtenida mediante el análisis de la información geoelectrica, se proceso información gravimétrica de un levantamiento efectuado por Servicios Geofísicos, en 1953, que cubre la mayor parte del área metropolitana.

Existen pocos estudios, realizados en la Cuenca de México, que permiten conocer algo de sus estructura profunda. Se puede mencionar:

1) El estudio sísmico de refracción del pozo Texcoco, localizado al norte de cd Netzahualcoyotl, que evidenció la presencia de cuatro unidades litoestratigráficas, en los primeros 1500 metros de profundidad (DDF, 1975), con relieve suave, y que pueden ser correlacionadas con:

- a) Depósitos lacustres, muy compresibles, saturadas con agua, con una velocidad de onda sísmica de 60 m/seg.
- b) Una formación arcillo-arenosa, poco compacta, saturada con agua, con una velocidad de 1700m/seg.
- c) Tobas volcánicas, con horizontes de arena, con velocidad de 2900 m/seg, y
- d) Rocas compactas, posiblemente ígneas, con velocidades de 4500 m/seg.

2) En 1986, Petróleos Mexicanos (Pérez-Cruz, 1988), realiza un levantamiento sísmológico de reflexión, a lo largo de calles y avenidas de la Ciudad de México, consistente en 26 líneas (243 km), con longitudes entre 2 y 28 kilómetros. Los resultados obtenidos, son complementados con la perforación de 4 pozos profundos de los cuales se obtuvieron muestras de canal, núcleos, registros sísmicos de porosidad y densidad compensada.

Dado que no se tienen valores representativos de las densidades de las diversas unidades litoestratigráficas, se consideró que el pozo Tulyehualco-1 tiene características similares a las condiciones geológicas del área de estudio, lo que permitió seleccionar valores promedios de contrastes de densidad.

Con la información disponible se propuso, un modelo sencillo que divide la litología, del subsuelo, en tres unidades concordantes con la geología de la región, para correlacionarlas con el plano de anomalías de Bouguer (figura 7.11):

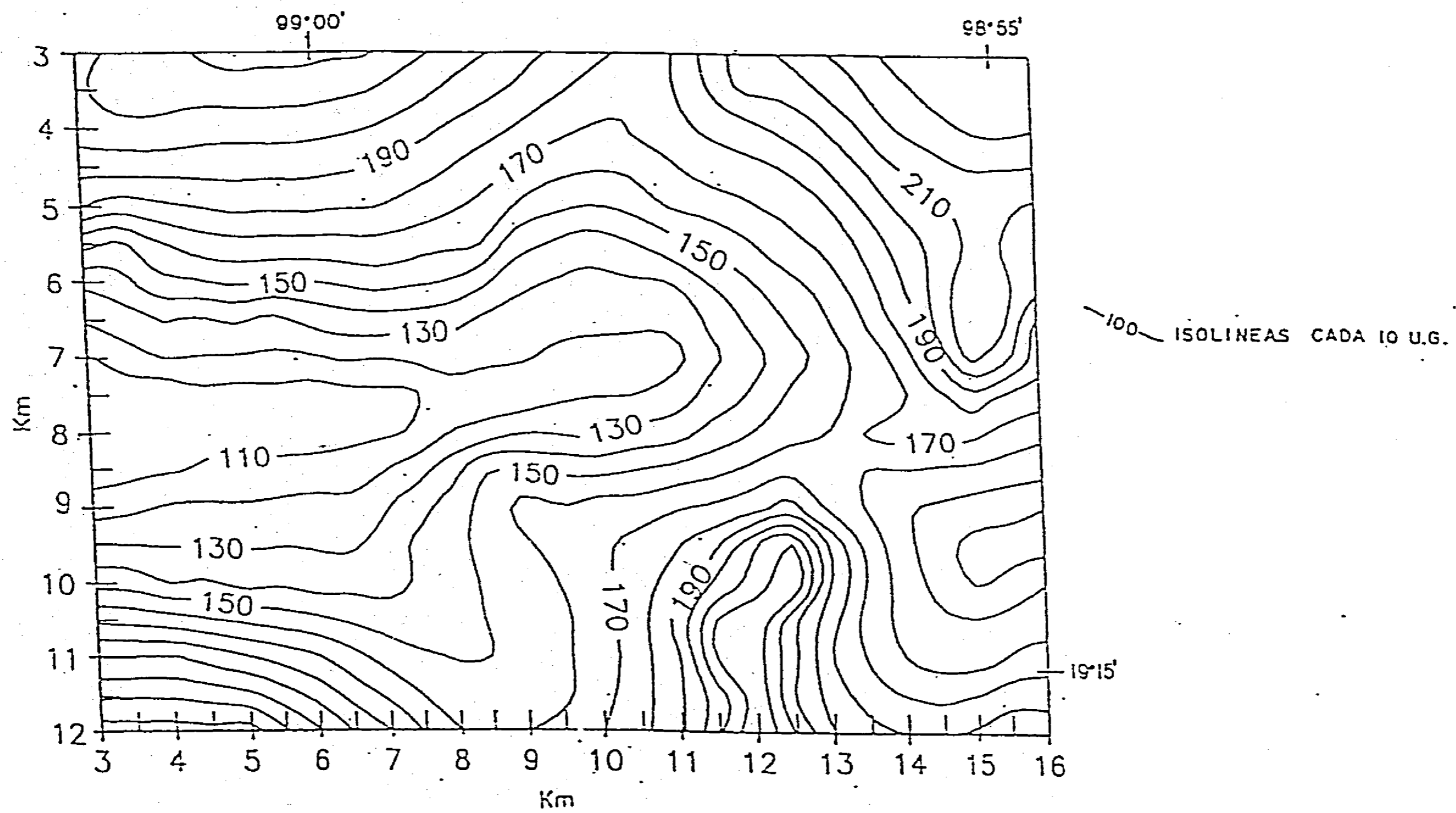


Figura 7.11 - Mapa de anomalía de Bouguer de la subcuenca de Chalco.

La primera, con densidad 1.60 gr/cc, asociada al material lacustre, compuesto principalmente de arcillas e intercalaciones de arenas.

La segunda, asociada con secuencias volcánicas constituidas principalmente por tobas, conglomerados, algunas brechas, y en menor proporción por intercalaciones de coladas de material volcánico con una densidad promedio de 2.10 gr/cc.

Y la última, correlacionada con la unidad volcánica inferior, a la cual se le asignó, una densidad de 2.50 gr/cc. Está constituida principalmente por andesitas, que representan el basamento ígneo de la región.

Después de aplicar las correcciones necesarias a la información gravimétrica se eliminó la tendencia regional, resaltando una anomalía, "negativa", que puede correlacionarse con una zona de baja densidad, asociada a la zona lacustre que ocupaba el antiguo lago de Chalco y una serie de anomalías, "positivas", asociadas a elementos estructurales bien conocidos (La sierra de Santa Catarina, el cerro el Pino, Tlapacoya, Xico)

Se utilizó un algoritmo basado en Banerjee y Das Gupta (1977), que calcula la atracción gravitacional de prismas rectangulares finitos. Se propone un modelo inicial, basado en información geológica y geofísica, formado por una colección de prismas rectangulares de diferentes dimensiones y densidad.

El proceso de modelación incorporó información geológica de los pozos de la batería de Santa Catarina. El proceso de ajuste entre la anomalía observada y la calculada, se realizó por ensayo y error modificando los parámetros de los prismas.

El modelo final propuesto consta de 162 prismas. Cabe destacar que en cada prisma se ha considerado el contraste de densidad de cada una de las formaciones, respecto a la primera, ya que se pretende resaltar el efecto de las formaciones volcánicas.

El proceso es complejo, cada vez que se modifican los parámetros de un prisma, se alteran los parámetros de los prismas

vecinos y los de las capas superiores y por lo tanto el efecto gravimétrico producido. La figura 7.12, muestra una representación espacial de la forma del contenedor impermeable. Los resultados obtenidos, permiten establecer el buzamiento a profundidad, hacia el oeste de la Subcuenca, de las formaciones volcánicas. Estos resultados concuerdan con lo establecido por Rodríguez y González-Morán, *op. cit.*, que postulan el engrosamiento de la unidad arcillo-arenosa bajo el área urbana de Tláhuac, estableciendo una zona, de máximo, relleno sedimentario, asociada a procesos de depositación del antiguo sistema de lagos someros que existían en la Cuenca.

Hacia las estribaciones de la sierra de Santa Catarina y del volcán Teutli se observa un adelgazamiento del paquete sedimentario. Evidenciándose grandes espesores de formaciones volcánicas que pueden ser asociados al cerro el Pino y el antiguo cerro del Elefante (Tlapacoya).

En la parte ESE se observa una zona de baja densidad, que puede interpretarse como una posible, antigua y somera, conexión del sistema lacustre Chalco-Xochimilco que pudiera haber sido interrumpida por alguno de los múltiples eventos tectónicos y/o volcánicos que han ocurrido en el área.

VII.9.3 Información electromagnética.-

Sondeos audiomagnetotelúricos; caracterización del medio.

Con la finalidad de probar nuevos métodos de prospección geofísica, se realizaron una serie de sondeos electromagnéticos con fuente controlada en audiofrecuencias para conocer la versatilidad de los métodos electromagnéticos en estudios hidrogeofísicos y establecer nuevos resultados que enriquezcan el conocimiento acerca del medio físico y de las propiedades y geometría del multiacuífero regional.

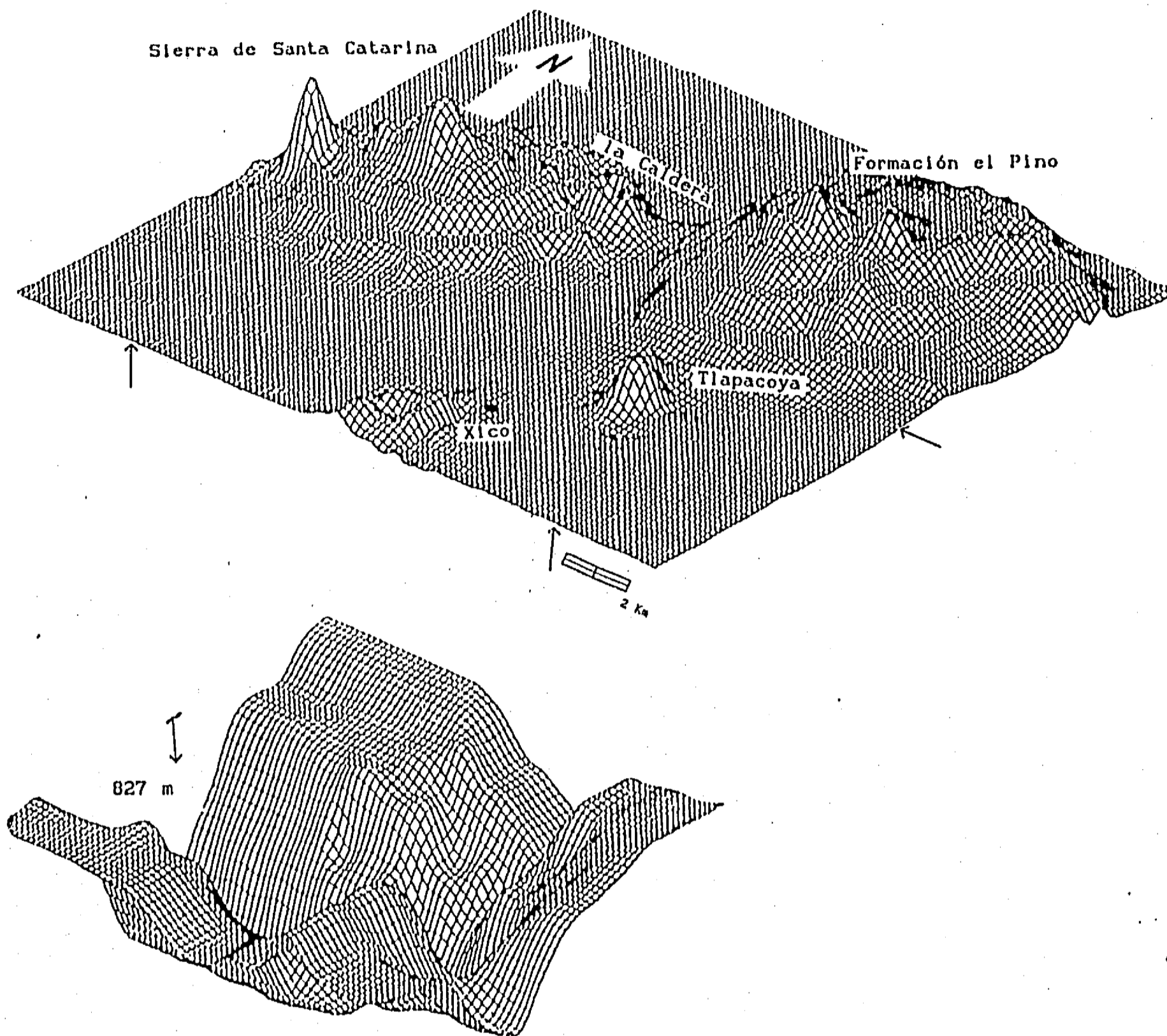


Figura 7.12- Configuración tridimensional del contenedor volcánico y de la topografía de la región.

Como se ha visto anteriormente, la integración de información geológica y su correlación con información geoléctrica ha permitido establecer la morfología de la unidad hidroestratigráfica arcillosa y también algunas propiedades del sistema acuífero.

El equipo utilizado consiste del receptor V-4, instrumento multicanal (8 canales) que puede servir para múltiples aplicaciones (polarización inducida, trabajar en frecuencia o en el dominio del tiempo y sondeos audiomagnetoteléurico de fuente controlada (CSAMT)) que lleva integrado un microprocesador que permite el control y procesado de la señal electromagnética.

Para la realización de los trabajos de CSAMT se requiere también el uso de un transmisor capaz de operar en el espectro de frecuencias requerido y una fuente de poder (en nuestro caso el equipo T-30, que proporciona 30 Kilowatts de potencia).

En los estudios electromagnéticos, donde se emplea la técnica de CSAMT, son medidos el campo eléctrico (E) y el campo magnético (H). Utilizando ambos campos es posible calcular el valor de una resistividad aparente del subsuelo en cada punto de medición. La profundidad efectiva de investigación para cada resistividad aparente determinada esta directamente relacionada con la "depth skin" para los campos magnéticos a la frecuencia empleada. Esta profundidad esta inversamente relacionada con la frecuencia del campo magnético aplicado. Así, realizando medidas de resistividad aparente en CSAMT en un amplio intervalo de frecuencias, es posible obtener una pseudosección aparente de resistividad contra profundidad.

La campaña de trabajos de campo de CSAMT (Junio de 1990) estaba planeada para realizar tres sondeos, perpendiculares a la batería de pozos de Santa Catarina de los cuales solo se pudieron realizar dos por problemas con el equipo (figura 7.8).

La fuente de poder y el tendido de electrodos de corriente fueron ubicados sobre la carretera que conduce al poblado de Chalco, utilizando una apertura electródica de 2 kilometros. Dadas las condiciones que presentan las primeras capas del subsuelo fue necesario la colocación de nidos de electrodos en un canal y

utilizar papel aluminio con la finalidad de poder inyectar la corriente eléctrica correctamente en el subsuelo. Para este trabajo, se tuvieron que inyectar en algunas ocasiones hasta 25 amperes de corriente. Por otra parte el receptor se ubicó, para la primera sección a la altura del pozo 7 del Ramal de Santa Catarina, desplazando 100 metros el tendido de electrodos de potencial para eliminar ruido producido por una línea de alta tensión. El tendido electródico consistió de 7 electrodos separados entre si 100 metros (4 al oeste del pozo y 3 al este), que fueron mantenidos fijos mientras se modificaba en la consola de transmisión la frecuencia (de 0.25-4096 Hz (2^n $n=-2, -1, 0, 1, 2, \dots, 10, 11$ Hz)).

Posteriormente, se realizó el mismo procedimiento trasladando el tendido electródico 200 metros (en dirección al pozo # 6), obteniéndose la segunda pseudosección aparente. La información obtenida fué corregida, por efecto de campo cercano, ya que no se tienen medios homogéneos y es necesario corregir el efecto de la estratificación.

Sin embargo dado que las secciones obtenidas presentaban aun bastante ruido, se decidió suprimir las frecuencias mas altas trabajando las secciones de seudorresistividad aparente en el intervalo de frecuencias de 0.25 - 128 Hz y así garantizar la obtención de un esquema lo mas apegado a un modelo de capas. Asimismo, problemas de calibración del equipo impidieron utilizar el espectro de fase.

La figura 7.13, muestra las dos secciones de resistividad aparente contra frecuencia. La primera gráfica muestra una anomalía de baja resistividad entre los 8 - 64 Hz de frecuencia incrementándose relativamente los valores resistivos a medida que disminuye la frecuencia. Esto implica que a mayores profundidades los valores de resistividad aparente son muy uniformes. La otra gráfica muestra un comportamiento similar observándose un par de anomalías de baja resistividad en 8 Hz, incrementándose los valores resistivos a mas bajas frecuencias.

La información electromagnética fue procesada y modelada utilizando el esquema de inversión analítica propuesto por Fisher y

otros (1981), en términos de un conjunto discreto de capas cada una de ellas con conductividad uniforme y que pueden ser modificadas progresivamente hasta lograr el ajuste "adecuado" con los datos observados. La idea básica de este esquema esta basada en que para un período T dado, la impedancia superficial es unicamente afectada por la influencia de las estructuras que descansan a máxima profundidad. El esquema parte de la información de períodos cortos para tratar de explicar la respuesta de la señal observada, especificando la resistividad aparente y la fase en términos de un modelo de dos capas. Posteriormente, para períodos largos se introducen nuevas capas a mayores profundidades. El esquema presenta ademas, la particularidad que es muy estable y nunca diverge. Los modelos iniciales estan basados en el conocimiento geológico actual que se tenga de la zona de estudio y resultados de algunos estudios geofísicos como podrían ser la aplicación de métodos eléctricos.

Cuando el modelo esta siendo ajustado es necesario cambiar algunos de sus parámetros con la finalidad de reproducir las observaciones de campo. Dentro de este proceso es necesario contar con algún criterio del grado de ajuste del intento de modelación. La desviación estandar parece ser, en el caso de modelación magnetotelúrica un indicador convincente (Fisher and Le Quang, 1981).

El proceso de modelación requiere intenso trabajo de computadora ya que se requiere realizar un proceso iterativo hasta minimizar la desviación estandar entre la respuesta calculada del modelo sintético y los datos originales. También es necesario considerar que siempre es posible añadir nuevas capas al modelo sin que mejore adecuadamente el ajuste. Siempre es conveniente utilizar un modelo que se caracterize por su simplicidad, utilizando el menor número de capas posible sin que aumente la dispersión de los datos originales. Naturalmente, el modelo resultante no puede tener una respuesta idéntica a los datos originales pero si puede obtener un buen ajuste de los mismos.

Los modelos calculados (ver ANEXO II) fueron procesados en la Ecole Polytechnique de Montreal, Canada, utilizando un paquete de computadora que tuvo que ser modificado y adecuado para señales de CSAMT y que emplea el algoritmo de Fisher. Los datos originales de casi todos los sondeos muestran la particularidad de presentar el efecto de una capa de baja resistividad representada por el efecto de la unidad litoestratigráfica arcillosa y el efecto de una unidad más resistiva que en las curvas (ANEXO II) presentan una pendiente mayor de 45° , al igual como sucede en la modelación de sondeos eléctricos verticales no es posible lograr el ajuste deseado y la curva deberá ser aproximada, lo mejor posible a los datos de campo. A partir de los modelos sintéticos constituidos por 3 y 4 capas se configuraron las secciones de resistividad contra profundidad (figura 7.14). La profundidad de investigación fue de alrededor de 300 metros. Esta figura muestra, en las secciones dos grandes unidades litoestratigráficas que son correlacionadas, mediante el conocimiento que se tiene del subsuelo. Una de ellas de $1 \Omega\text{-m}$, asociada a la unidad litoestratigráfica arcillo-arenosa que comprende espesores de alrededor de 100-120 metros y la inferior ($18\text{-}40$, $22\text{-}50 \Omega\text{-m}$) correlacionada con material granular. La pequeña diferencia en el rango resistivo, es explicable en términos de la inhomogeneidad de los materiales volcánicos presentes. Entre estas dos unidades destaca una formación resistiva ($80\text{-}100 \Omega\text{-m}$) que pudiese estar relacionada con algún derrame lávico proveniente de la sierra de Santa Catarina, y que han sido detectados en el pozo 3 y 7 de la Bateria de mismo nombre.

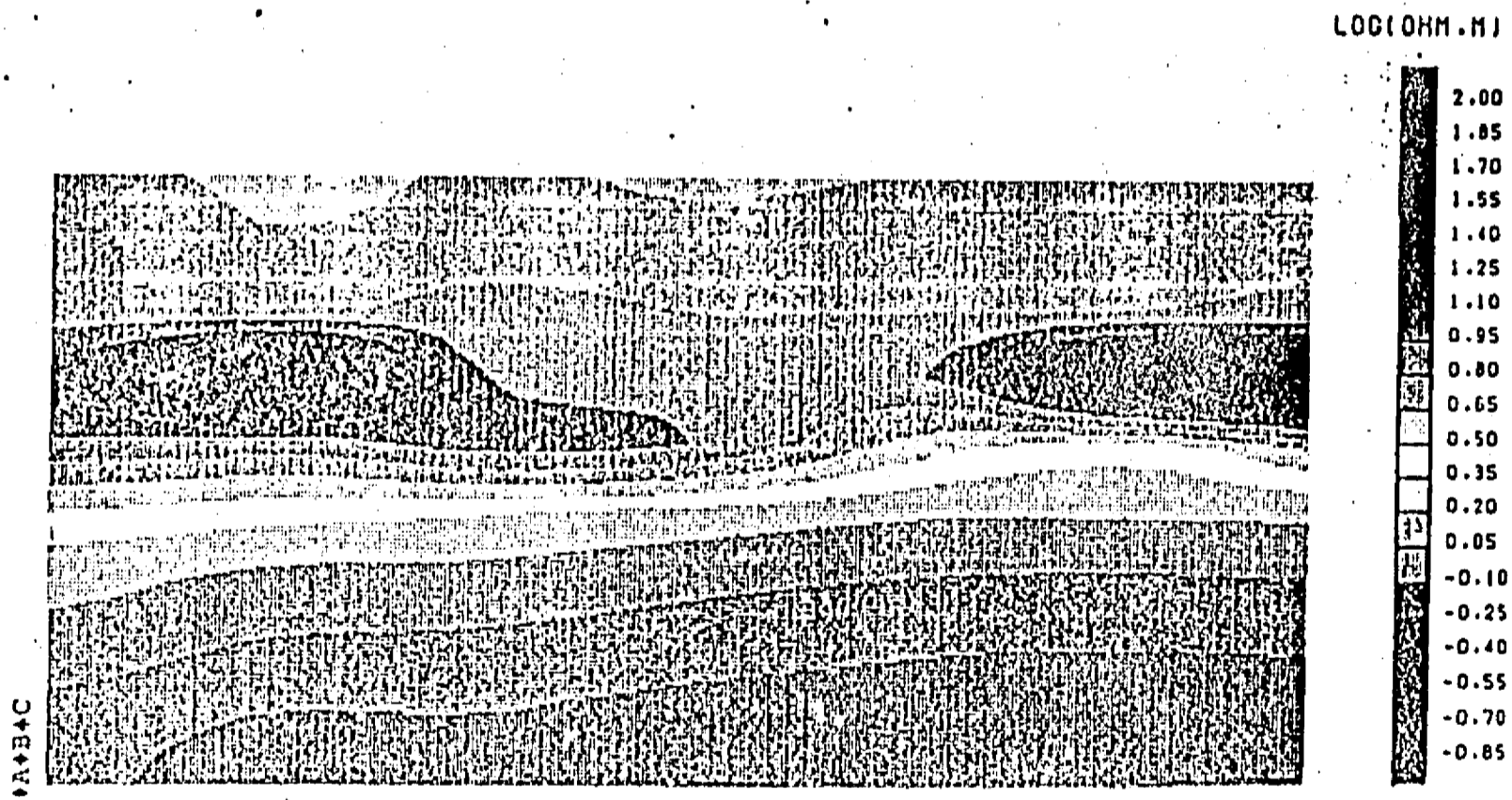
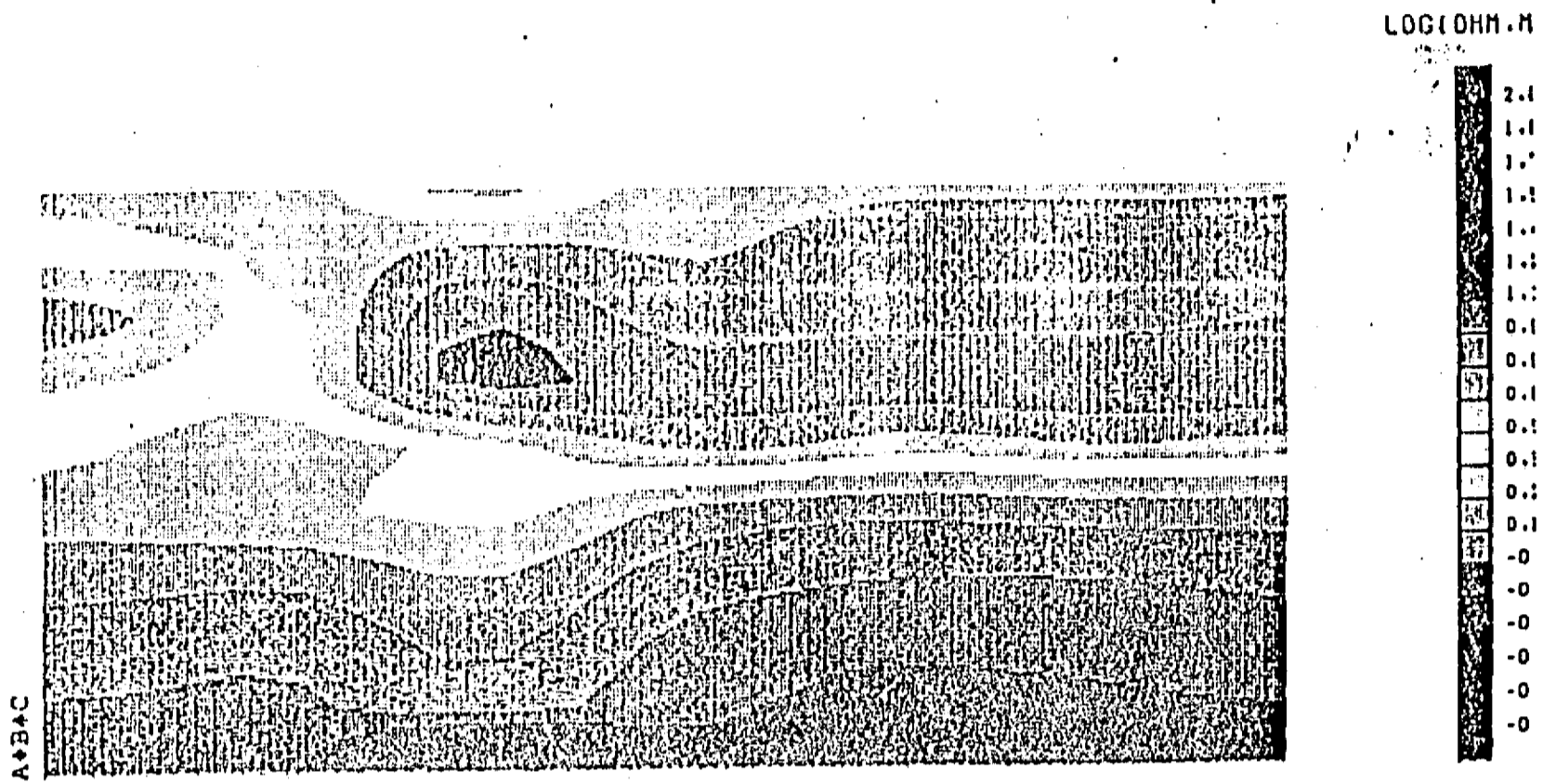
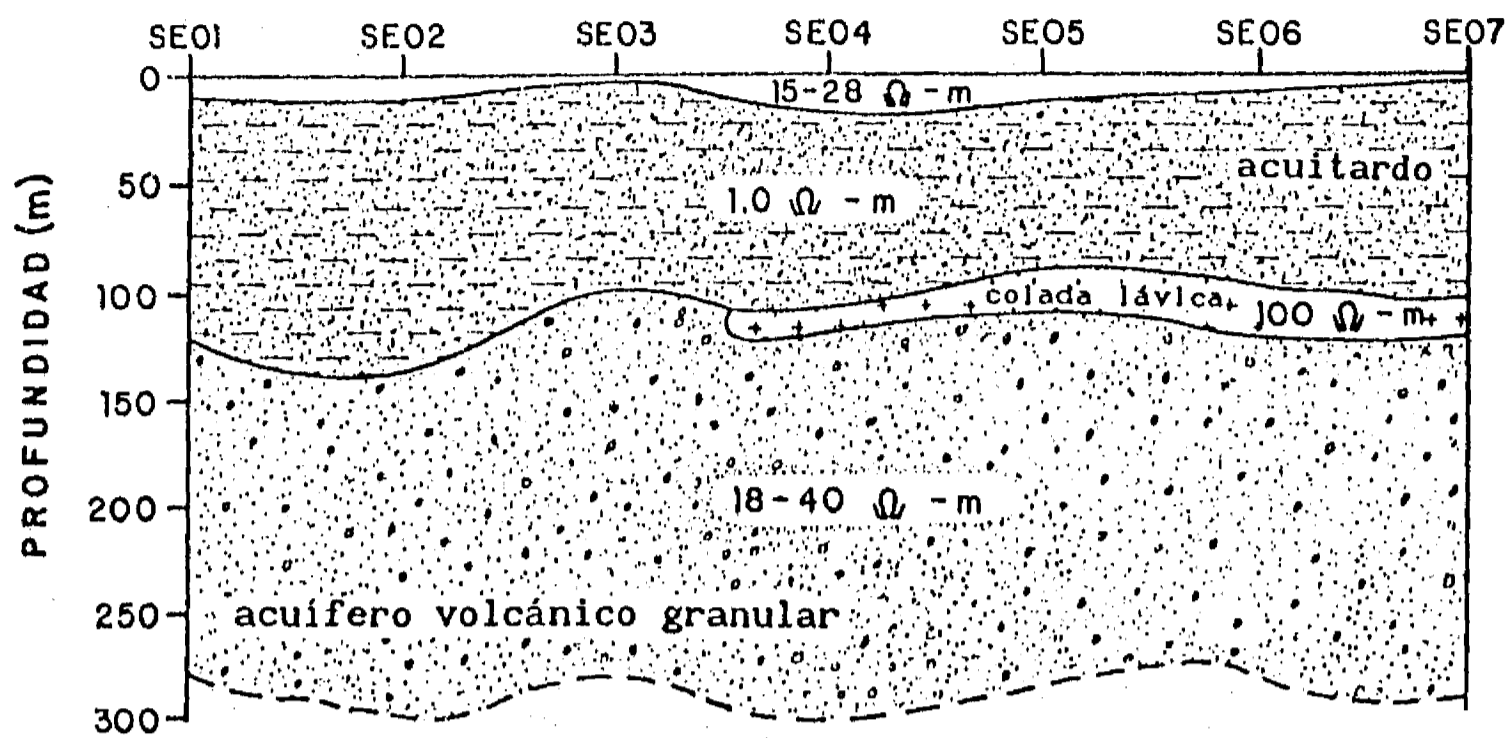
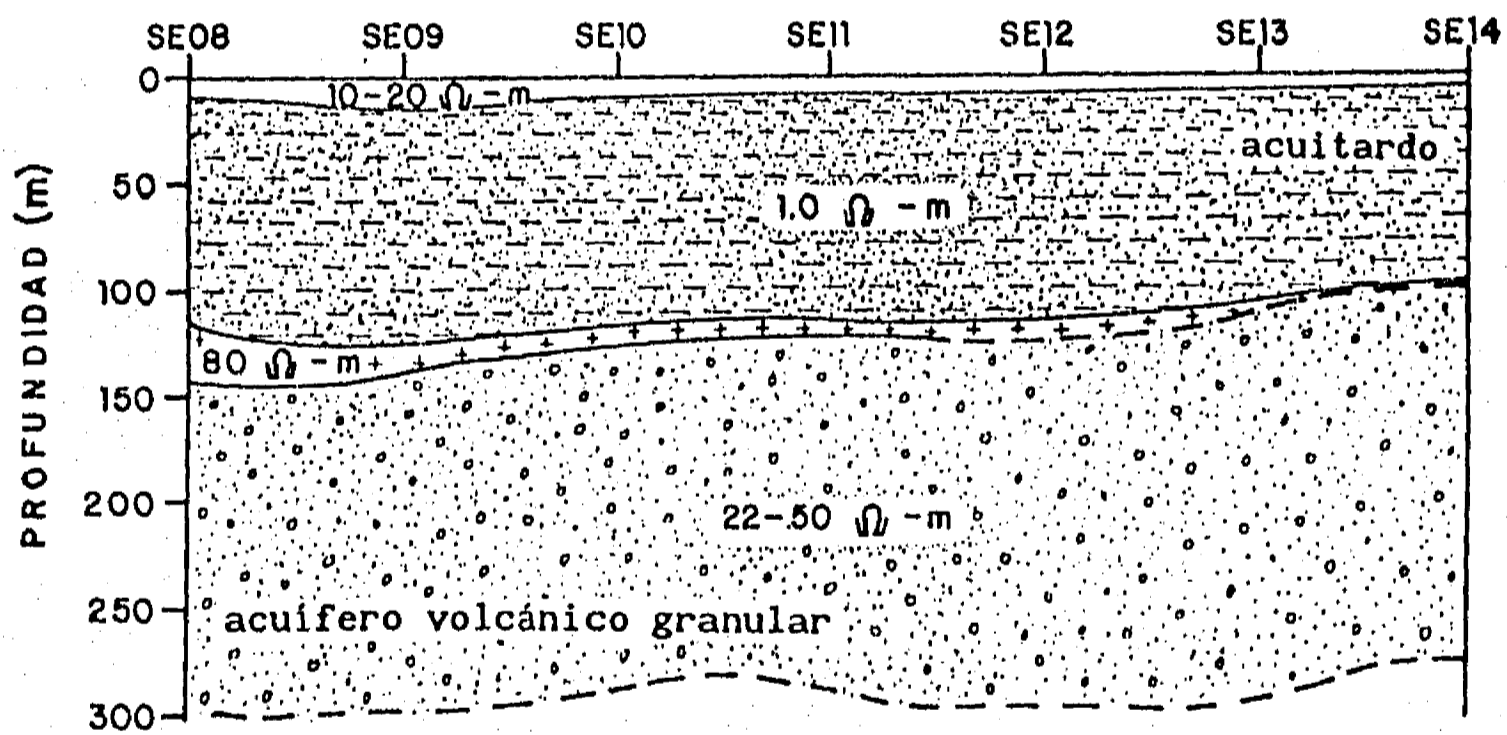


Figura 7.13- Pseudosecciones de resistividad aparente vs frecuencia.



Distancia entre sondeos= 200m



Distancia entre sondeos= 200m

Figura 7.14- Secciones de resistividad aparente vs profundidad modeladas utilizando el algoritmo de Fisher.

CAPITULO VIII

DISCUSION

La definición del papel contaminante de un basurero con las condiciones de desarrollo tan irregulares como ha presentado el de Santa Catarina, en un ambiente geológico tan complejo como lo es el de la porción norte de la subcuenca de Chalco, requiere de la integración y correlación de resultados de diversas metodologías más que de la innovación o proposición de una técnica específica de muestreo o monitoreo. No se trata de la migración de solutos bien caracterizados, en un acuífero somero, de geología conocida detalladamente, en donde se pueden aplicar esquemas metodológicos basados en monitoreos verticales con un muestreo tan fino como las relativas inhomogeneidades del terreno lo permitan.

Las dimensiones tanto de la pluma contaminante, como de las formaciones acuíferas, del presente caso, fueron por lo menos de un orden de magnitud superior a los casos reportados en la literatura especializada (Greenhouse *et al*, 1983, 1986, Monier - Williams *et al*, 1990) además que no se trató de un medio granular con porosidad efectiva medianamente conocida (lo que facilitaría su estudio), sino de un medio no homogéneo, con porosidad secundaria difícil de calcular. Como se ha visto, la migración del lixiviado se inicia en un medio fracturado en donde no se cuentan con elementos necesarios para ser tratado como medio poroso equivalente. Tampoco se conoce con precisión, la comunicación hidráulica entre las rocas volcánicas y el paquete sedimentario; aun así la dilución del lixiviado en el flujo regional es tal que ya no puede hablarse de una pluma contaminante, sino de un proceso regional de la degradación diferencial de la calidad del agua subterránea, en la parte norte de la subcuenca de Chalco, como lo muestran los resultados presentados en el CAPITULO VII.

La selección de algún elemento como los nitratos o cloruros como parámetro representativo de la lixiviación proveniente del basurero, puede inducir conclusiones debilmente fundamentadas sobre el origen de la contaminación del acuífero de Chalco. Sin embargo el origen de elementos como cromo y fierro conjuntamente con nitratos y coliformes fecales llevan a postular la existencia de una fuente activa con importantes concentraciones, como lo puede ser un basurero urbano, donde se pudieron depositar residuos de origen industrial. La incorporación de los elementos citados, desde la superficie del terreno, a través de los pozos, es descartada ya que la batería de Santa Catarina se encuentra en la zona ecológica, donde el acceso es restringido y los pozos protegidos.

La detección de una zona conductiva por métodos geoelectricos, en las inmediaciones del basurero de Santa Catarina, en un medio altamente resistivo, lleva a la confirmación de la hipótesis que origina ésta investigación sobre la existencia de una pluma contaminante asociada al lugar de disposición final de residuos sólidos, lo cual es soportado por la evolución química de los primeros pozos de la batería de Santa Catarina y por la clausura y reubicación del pozo 3 de este ramal (Becerril, *op. cit.*, CAVM, *op. cit.*).

El esquema metodológico propuesto (CAPITULO II) es una contribución en el area de Evaluación de Impacto Ambiental e Hidrogeofísica en donde se pone de manifiesto la relevancia de una investigación sistemática de los procesos de contaminación del agua subterránea. La aplicación de métodos electromagnéticos, conjuntamente con información estratigráfica e hidrodinámica permiten pasar de un modelo conceptual a uno funcional del cual podrán derivarse los parámetros geométricos, necesarios para la implementación de un modelo computacional de flujo y transporte de solutos.

Del análisis presentado sobre la aplicación de los métodos geofísicos en la prospección de plumas contaminantes, los más recomendables resultan los eléctricos y electromagnéticos siempre y cuando los solutos dominantes en la pluma contaminante proporciona

una diferenciación física aniónica en el medio natural y de la extensión de la misma, en comparación con las dimensiones de los estratos acuíferos. El tipo predominante de soluto no puede ser inferido de manera indirecta. En este Proyecto, se aplicaron diferentes métodos geofísicos tratando no solo de detectar una pluma contaminante, sino de inferir la constitución del sistema acuífero e incrementar el conocimiento del medio físico. Lo más relevante de ésta investigación es discutido a continuación.

Como se ha mencionado, el marco geológico de la subcuenca de Chalco esta definido por un contenedor impermeable de origen volcánico y un gran paquete sedimentario de origen lacustre. El relieve de la superficie impermeable fue factible de determinar a través de la reinterpretación de la información gravimétrica. Este proceso requirió de valores de densidad representativos de las formaciones modeladas que fueron obtenidos de los datos reportados por PEMEX. Su representatividad se logró al analizar una serie de variantes en el patrón del modelo de prismas considerado. De no haber contado con rangos representativos de densidad se pudo haber llegado a valores de similares correlacionando la geología con valores reportados en la literatura. El proceso de interpretación, una vez fijados los valores de densidad (ρ), se basó en la adecuación de modelos geométricos iniciales que reproducen una anomalía teórica que se aproxima a la observada en función del conocimiento de las tendencias geológicas regionales. La distribución y modelado de los prismas seleccionados, se fue modificando tomando como punto de partida la litología de la batería de pozos de Santa Catarina y algunos resultados de sondeos eléctricos verticales de la zona, lo cual simplificó el proceso logrando un modelado gravimétrico confiable.

Un levantamiento magnético no hubiera resultado tan resolutivo como el gravimétrico ya que la respuesta del basamento se ve influenciada por las secuencias volcánicas superiores (constituidas principalmente por tobas y piroclásticos). Se reprodujeron algunos modelos magnetométricos usando versiones modificadas del algoritmo de Talwani y 2 dimensiones $1/2$, en donde se observó que en la

respuesta teórica no era posible diferenciar esas secuencias volcánicas del basamento, ya que no presentan un adecuado contraste en susceptibilidad magnética (μ). Los valores de μ , a diferencia de los ρ fueron tomados de la literatura por lo que su representatividad es menor que el caso anterior.

En relación a la identificación del paquete arcillo-arenoso, su modelación fue posible gracias a que dispuso de valores representativos de la resistividad de los principales componentes del mismo. El espectro de resistividades se integró con los registros geofísicos (eléctricos normal y lateral y de potencial natural) de la batería de pozos de Santa Catarina. La revisión de 14 registros representativos de 400 metros c/u, implicó el análisis litoestratigráfico de las columnas de los pozos y de la mineralización del agua reportada para cada capa (Rodríguez y Lara *op. cit.*). Como la prospección geoelectrica de medios conductivos, está restringida por contrastes resistivos entre las capas adyacentes se definieron valores promedios para cada capa, sobre todo para la primera (paquete arcilloso). Estos rangos fueron obtenidos usando el algoritmo de O'Neill modificado, considerando modelos de hasta 15 capas de los cuales se obtuvieron modelos equivalentes de una sola capa con valores promedio de 0.5 - 8 Ω -m. La variación de resistividad resultó ser para éste caso, función básicamente del predominio de arcillas. Se consideró también en este proceso la resistividad producida por un paquete arcilloso con resistividad de 2 Ω -m saturado con agua mineralizada con 1100 mg/l lo cual da la respuesta geoelectrica de 0.5 Ω -m. Este proceso de modelación directa, permitió la adecuada interpretación de los SEV's en la zona.

La modelación geoelectrica de este ambiente geológico llega a tener un grado de resolución del 95 % hacia las parte sur de la subcuenca (pozos 11-14, figura 7.4) en donde el modelo geológico puede ajustarse a un modelo de capas. La resolución geoelectrica entre el pozo 5-14 presenta una resolución del 98 % en los primeros 100 metros en donde el mayor contraste lo define la saturación del paquete superficial. La presencia de lentes bien definidos de

arcilla y derrames lávicos la disminuye a un 80 % hasta los 300 metros. Hacia ambos márgenes de la Subcuenca ésta resolución disminuye a 85-95 % , debido a la interdigitación de material volcánico (figura 7.4) el cual no presenta continuidad lateral lo que produce modelos geoelectricos erroneos.

La baja conductida del primer paquete limita la penetración de la corriente, lo cual puede originar modelos geoelectricos con una profundidad de investigación asociada erroneamente con la apertura electrodica AB. Este problema fue minimizado con la utilización de equipos geoelectricos con motogenerador. Primeramente se utilizó un equipo portatil de 5 Kw el cual ofreció buena penetración hacia las márgenes. En la parte central la penetración no correspondía con la apertura electrodica (aproximadamente AB/3) por lo que se recurrió al sistema T-30 con una potencia de 30 Kw lográndose profundidades de investigación de 400-500 metros. La capacidad de los equipos requirió de experimentos con sistemas multielectrodicos (arreglos de 4-6-8-10 electrodos, saturados con solución de sulfato de cobre) para vencer las altas resistividades de contacto en algunas zonas, con predominio superficial de cenizas volcánicas no saturadas.

Fue posible obtener una diferenciación geoelectrica entre la zona saturada y no saturada, del acuitardo. Entre el acuitardo y el acuífero granular volcánico, así como entre éste y el basamento geoelectrico en la vecindad de Tecomilt. También se logró identificar coladas volcánicas provenientes de la sierra de Santa Catarina. Estas no pueden estar asociadas al volcán Xico ya que éste evento volcánico de fisura, difícilmente dió origen a derrames tan extensos. Los contrastes resistivos entre algunas lentes de arcilla y el acuitardo facilitaron la detección de algunas capas de arcilla. En esta área no fue posible diferenciar la pluma contaminante.

La reinterpretación de SEV's realizados por la CFE (Benhumea y Vázquez, *op. cit.*) permitió la identificación de una zona conductiva en un medio resistivo (pluma contaminante en un medio volcánico saturado) (figura 7.10), ya que se contaba con valores

medios de resistividad para rocas volcánicas saturadas y no saturadas con agua de buena calidad.

Aunque los métodos geoelectricos tradicionales ofrecían una resolución aceptable, se decidió recurrir a otros métodos de prospección como los electromagnéticos (VLF, MT y CSAMT) para conocer su versatilidad en ambientes conductivos y mapear la pluma a mayores profundidades. Se abandonó la prospección en muy bajas frecuencias (VLF) debido a que su penetración no fue superior a los 50 metros. Los resultados obtenidos con CSAMT confirman los resultados geoelectricos hasta los 300 metros no pudiendo diferenciar la parte contaminada del acuífero granular debido a que la dilución de los solutos produce alteraciones en resistividad solo de 1-2 Ω -m que no ofrecen suficiente contraste resistivo.

CAPITULO IX

CONCLUSIONES

El futuro se compra en el presente.

El estudio y análisis de la degradación del medio ambiente requiere llevar a cabo una serie de acciones e investigaciones interdisciplinarias. La población crece y en consecuencia la problemática de la contaminación ambiental. Hoy, son claros los resultados que conlleva el desenvolvimiento económico-social sobre el proceso urbano y los ecosistemas. La contaminación ambiental y el deterioro ecológico de grandes ciudades y regiones son algunos de los estragos cometidos, así como son palpables los cambios que tienen lugar en el medio ambiente, afectando directa o indirectamente a la sociedad a corto, mediano o largo plazo.

El ser humano, con su extraordinario poder para cambiar, alterar y destruir, debe adquirir una conciencia social y ecológica, obligándose a mantener una cuidadosa administración de la naturaleza y de los recursos existentes, implantando las medidas preventivas y correctivas necesarias. Es por ello, que es necesario inducir y motivar a los organismos responsables de las tomas de decisión de iniciar el análisis, planificación y evaluación interdisciplinaria de problemas ambientales, para llegar a soluciones generales. Estas, deben incluir campañas para la sustitución de algunos materiales por otros menos contaminantes, renovables y biodegradables, uso de estrategias energéticas, alternativas, métodos biológicos para el control de plagas, en lugar de plagicidas, reciclaje de residuos en lugar de su depositación, etc.

Por otra parte, hasta hace poco se había notado en las Universidades poco interés por realizar estudios, enfocados a

cuestiones de interés público, dentro de la problemática ambiental, principalmente por la falta de grupos multidisciplinarios y por otra parte, por las dificultades existentes para obtener financiamiento.

La complejidad científica de muchos de los problemas ambientales, las presiones sociales para juzgar las metas ambientales, cuyos logros son difíciles de advertir y evaluar, aunado al hecho de que pueden complicarse las ya difíciles condiciones económicas, de las empresas contaminadoras y/o de los organismos públicos encargados de su solución, generan movimientos ambientalistas, mal enfocados.

Actualmente nos encontramos entre distintas crisis de recursos, desaparición de reservas alimenticias, escasez de energéticos y por supuesto la falta de disponibilidad de agua.

¿ Cuales son las perspectivas, a largo plazo, en nuestro país?

Los estudios y posibles soluciones deberán efectuarse y tratarse para cada cuenca hidrológica en forma independiente, ya que los estudios varían mucho de una región a otra, respecto a su vulnerabilidad a cargas excesivas de contaminantes, y por ello es importante una caracterización detallada del medio físico y sus alteraciones.

Las perspectivas de disponibilidad de agua son en ocasiones tan inciertas como el clima. Las cantidades de agua subterránea y el escurrimiento superficial están controladas por una serie de factores tales como: clima, suelo, tipo de roca, vegetación, características geológicas y otras. Estos factores, donde el clima juega un papel fundamental y crítico para el agua, determinan el porcentaje de infiltración, evaporación y transpiración de la cubierta vegetal.

Las expectativas de crecimiento de la Ciudad de México y áreas conurbadas prevén dentro de poco 30 millones de habitantes. El

problema del abastecimiento del agua, es y será prioritario. La demanda de bienes de consumo generará cada vez mas residuos domiciliarios y aguas negras que deberán ser tratados y eliminados. Debe evitarse el enfrentamiento entre crecimiento económico y la protección de medio ambiente estableciendo la necesidad de realizar estudios que permitan conocer de manera integral, el subsuelo, las formaciones acuíferas, la distribución de fuentes contaminantes, la vulnerabilidad del medio a cargas contaminantes, legislando y ejecutando severas restricciones y lineamientos en actividades industriales y procesos del desarrollo urbano que mucho inciden en problemas de contaminación y de degradación paulatina en la calidad del medio ambiente, evitando mas daño a los ecosistemas, mediante una serie de acciones planificadas llevadas a cabo en programas de investigación. Las experiencias recabadas en éste trabajo, que tratan de impartirle un carácter fundamentalmente ecológico, sobre la subcuenca de Chalco como Cuenca piloto, pueden ser extendidas a la Cuenca de México y otras cuencas intermontanas con la que comparte gran cantidad de fenómenos y problemas similares.

La integración de resultados de una amplia gama de diversas disciplinas con la interacción de metodologías geofísicas e hidrogeológicas han permitido conocer en forma regional, el medio físico y sus características, así como la geometría de un paquete sedimentario de origen lacustre y la morfología del contenedor impermeable volcánico. Todos estos aspectos son importantes en las evaluaciones de impacto ambiental y su utilización en estudios de contaminación, ya que es necesario la identificación de elementos impactantes, sus alteraciones y efectos negativos en el medio ambiente evaluando los factores más importantes involucrados en los procesos contaminantes.

Dentro de esta investigación, se caracterizó en forma regional el subsuelo y el multiacuífero local. Se estudió el basurero de Santa Catarina, una de las fuentes contaminantes más importantes de la región, que pronto será clausurado y también se analizó la calidad natural del agua estableciéndose el mecanismo del proceso de lixiviación del Basurero.

Hay que recordar que nunca se realizaron estudios para la ubicación de este sitio de disposición final de residuos sólidos. Esta colocado en la falda del volcán la Caldera, una región con un evidente patrón tectónico y muchas manifestaciones eruptivas recientes, muy cerca de las margenes del lecho del antiguo lago de Chalco. Presentándose una interfase, entre sucesiones lávicas y depósitos piroclásticos con el material arcilloso lacustre, donde el medio volcánico fracturado establece mayor grado de vulnerabilidad ecológica en el entorno de este sitio de depositación de residuos sólidos, ya que establece la comunicación hidráulica con el acuífero granular.

La unidad arcillo-arenosa, formación confinante del acuífero en explotación, presenta contrastes resistivos de 0.5 - 2.0 Ω -m que permiten la diferenciación geoelectrica del acuífero granular con agua de buena calidad (18 - 50 Ω -m). La morfología del acuitardo presenta sus máximos espesores (alredor de 400 metros) hacia la porción sur de la sierra de Santa Catarina (zona urbana de Tlahuac), adelgazándose su espesor hacia el piedemonte de la sierra de Santa de Catarina y la Formación el Pino. Un comportamiento semejante se observa hacia el sur y oeste (figura 7.9). Aunque ésta unidad, no presenta una estratigrafía uniforme el grano fino de sus materiales constituye una protección que regula el paso de contaminantes hacia el acuífero en explotación. Sin embargo, en las márgenes exteriores de los poblados de Ayotla, Chicolapan e Ixtapaluca, los fenómenos de subsidencia aunados a procesos de tensión en las arcillas por evaporación y su posterior hidratación han ocasionado grietas que incrementan la vulnerabilidad de este multiacuífero. Por otra parte, este medio conductivo, enmascara y limita la capacidad y versatilidad de los métodos geoelectricos y electromagnéticos en la detección y determinación de la extensión de contaminantes en las formaciones acuíferas, volcánico granular, en explotación. Los resultados de los sondeos electromagnéticos (CSAMT) no fueron más resolutivos, que los proporcionados por los métodos geoelectricos en el ambiente geológico de la Subcuenca.

Otros factores importantes, además de las características geológicas e hidrogeológicas del lugar de disposición final de residuos sólidos y que determinan las características, volúmenes e hidrodinámica de los lixiviados son:

Las características de los residuos, la etapa de descomposición, material de cubierta de los mismos y su compactación y sobre todo el clima y la cantidad de agua disponible para infiltración.

En la subcuenca de Chalco existen escasos datos climatológicos. Solo se cuenta con dos estaciones pluviométricas, ambas en la planicie lacustre, lo cual limita su representatividad en la zona montañosa. La información analizada permite establecer un patrón estacional de lluvias (junio a septiembre) que comprende el 75 - 80 % del total y una zona de transición (marzo, abril, mayo y octubre) con un periodo de secas que abarca los meses de noviembre a febrero. La evapotranspiración potencial varía mensualmente, alcanzando una tendencia promedio de 125 mm, que oscila entre los meses de junio y diciembre (figuras 7.5a y 7.5b)

En el proceso de recarga, el captador natural más importante de la subcuenca de Chalco está representada por el complejo de Chichinautzin y en mucho menor escala por la sierra de Santa Catarina y la Formación el Pino. El resultado de los balances de agua realizados con los datos disponibles para 1987 y 1988, utilizando el método de aproximaciones sucesivas, muestran solo pequeños volúmenes de humedad en el suelo disponible para infiltración (15 - 60 mm), en los meses de julio y agosto. Aunque estos resultados son válidos en la estación Chalco, ubicada en la planicie lacustre, nos dan una idea de que no podemos esperar grandes volúmenes, para infiltración en la parte norte de la Subcuenca, ni tampoco la generación de grandes volúmenes de lixiviación. La poca producción de lixiviado es diluida al incorporarse al flujo subterráneo. En efecto en regiones semiáridas los volúmenes de lixiviación son menores, llegando a ser afectados por la evaporación, perdiéndose humedad. Los mayores volúmenes de lixiviados, generados en otras condiciones, se producen durante los

períodos de infiltración significativa. Es entonces, que puede concluirse que los lixiviados que forman la pluma detectada están relacionados con la humedad relativa de la basura y no presentan aportes importantes de fuentes externas como la precipitación. Al excederse la capacidad de retención de las primeras capas de residuos, los lixiviados generados se infiltran hacia las partes bajas del basurero, saturándolas e iniciando la percolación del lixiviado, hacia zonas más profundas.

Con el conocimiento recabado sobre los intervalos de variación de las diferentes litologías presentes en la Cuenca de México y su extensión a la de Chalco se construyó una sección geoelectrica (figura 7.10) basada en sondeos eléctricos verticales ubicados sobre la carretera Mexico-Puebla que muestra un modelo estratificado conformado por 7 capas y que permite identificar una zona conductiva ($9 \Omega\text{-m}$), encajonada dentro de un ambiente volcánico complejo, de productos volcánicos relacionados con la actividad de la sierra de Santa Catarina y el volcán la Caldera, que por su ubicación física no puede estar asociados con material arcilloso, sino con la presencia de una pluma contaminante. En esta zona el proceso de lixiviación se realiza preferencialmente en forma vertical, a través de fisuraciones en horizontes lávicos y otros productos volcánicos para incorporarse posteriormente al flujo subterráneo de la zona que presenta una dirección preferencial NE-SW.

La geofísica es una herramienta muy útil en la determinación y conocimiento de la distribución de parámetros físicos e hidrogeológicos. En el caso de la subcuenca de Chalco, la resistividad es el parámetro que ofrece la sensibilidad necesaria para este tipo de estudios resultando adecuada para delimitar y establecer la geometría del acuitardo, considerando los intervalos resistivos detectados, sin embargo y dado que la detección de sustancias contaminantes esta limitada por las diferencias existentes entre las propiedades físicas del contaminante, del medio contaminado y del método geofísico utilizado, los resultados solo han sido exitosos en la región que presenta un comportamiento

litoestratigráfico de sucesiones lávicas y subproductos volcánicos donde pudo ser identificada la pluma contaminante (figura 7.10) a diferencia de los obtenidos en la región ocupada por el antiguo lago donde la presencia de grandes espesores de arcilla ofrece dificultades técnicas para la inyección de corriente en el subsuelo (tanto en los sondeos geoelectricos como en los trabajos de CSAMT), careciéndose de contrastes resistivos adecuados, entre la nube poluante, muy diluida en el flujo subterráneo y los valores resistivos del acuífero granular actualmente en explotación. La hidrodinámica de la pluma contaminante es difícil de establecer dado que no se conoce con precisión el tiempo inicial de saturación del suelo t_0 ni el tiempo inicial t_0 del arribo de los lixiviados a la zona saturada, así como tampoco el tiempo t_1 de arribo a los pozos de explotación. El establecimiento de un patrón de líneas de flujo, en un medio fracturado, puede definirse a *grosso modo* si se cuenta con suficientes puntos de observación, lo cual permitirá considerarlo como un medio poroso equivalente. En el presente caso, esto no ha sido posible por la inexistencia de pozos de observación en la sierra de Santa Catarina. Con todo esto, solo se pudo establecer una zona hipotética de avance de los lixiviados en la dirección preferencial de flujo (figura 7.8).

Los rangos de velocidades de flujo (DDF-DGCOH, 1987) no están firmemente sustentados. Aún así se puede establecer un rango de velocidades, para las lavas fracturadas, con un mínimo de 300 m/año y un máximo de 1,000 m/año tomando en cuenta, las primeras manifestaciones de contaminación reportadas. La variación está en función principalmente del grado de fracturamiento del material volcánico. Los valores reportados (DDF-DGCOH, *op. cit.*) son mucho mayores y tal vez correspondan solo a variaciones puntuales.

Por otra parte, la realización de análisis químicos y bacteriológicos es fundamental. Representan el primer paso para conocer la calidad del agua subterránea y evidenciar la existencia de problemas de contaminación. Recuérdese que la magnitud del problema, muchas de las veces, pasa inadvertido y es considerado inexistente debido a la falta de información. La mayor parte de los

análisis fisicoquímicos y bacteriológicos realizados en la batería de pozos de Santa Catarina y otros circunvecinos al sitio de disposición final de Santa Catarina, presentan problemas en relación con parámetros como el nitrógeno amoniacal, los nitratos y hierro y evidencian la presencia de coliformes fecales indicando contaminación antropogénica reciente, cuya fuente, más probable es el tiradero de Santa Catarina, descartándose la segunda fuente potencial (el canal de la Compañía) por no presentar comunicación hidráulica inmediata con el acuífero granular.

Nueva información de análisis de lixiviados realizados en pozos de monitoreo ubicados dentro del Tiradero (abril de 1992), indican la presencia de sustancias tóxicas (arsénico, cadmio, cianuro, cromo, plomo) en concentraciones arriba de las normas establecidas por organismos internacionales como la Organización Mundial de la Salud y la EPA. Estos resultados establecen que el tiradero de Santa Catarina, donde no existía control alguno sobre el tipo de residuo depositado, ha recibido residuos provenientes de procesos industriales. Todos ellos altamente tóxicos, como desechos de industrias mineras, insecticidas y herbicidas, industrias de la galvanoplastia, del metal, plásticos, pinturas, colorantes, cerámica y química intermedia. A medida que se realicen mejores análisis y mas completos salen a la luz nuevos indicios de parámetros que pueden representar riesgos importantes para la salud humana como sería el caso el contaminantes orgánicos (fenoles, aceites, solventes, pesticidas).

Los problemas de contaminación por residuos tóxicos y peligrosos y su afectación a la salud constituyen uno de los problemas que menos atención ha recibido por parte de las autoridades y público en general. La carencia de información impide establecer indicadores básicos sobre los residuos peligrosos. Pese a la preocupación de las autoridades del país, el método más utilizado para la depositación de los residuos sólidos sigue siendo el *tiradero a cielo abierto*. Practicamente no hay control sobre los residuos generados por la industria. Los lugares de disposición

final no cuentan con los estudios previos, necesarios y metodologías de control y monitoreo de lixiviados. Existe una gran dispersión y acumulación de residuos, algunos de ellos introducidos ilegalmente en nuestro país, que no son tomados en cuenta aun cuando se conoce la problemática y magnitud del problema de contaminación del aire, suelo y agua.

La presencia del deficiente manejo en la administración, operación y disposición final de residuos municipales y peligrosos y sobre todo la falta de programas de investigación básica y aplicada hacen que ya se tengan que vivir los efectos negativos del deterioro en la calidad ambiental y de vida. Actualmente parece existir una preocupación de las autoridades por los problemas antes mencionados y que en un futuro cercano llevará al cierre de estos lugares de depositación final. Parece ser que el tiradero de Santa Catarina, actualmente en saneamiento, será cerrado definitivamente este año. Sin embargo es fundamental que sean realizados, despues de su clausura, los estudios necesarios para evaluar la evolución de éste lugar y la implementación de un programa de vigilancia ambiental.

CAPITULO X

REFERENCIAS

- Aguas, R. S., 1989. Identificación de las principales formaciones acuíferas en la subcuenca de Chalco. Tesis Licenciatura, Facultad de Ingeniería. UNAM.
- Akin, E. W., W. H. Benton and W. F. Hill, 1971. Enteric viruses in ground and surface waters. Proc. 13th Water Quality Conference. Univ. Illinois.
- Alberro, J. y R. Hernández, 1988. Genesis de las grietas de tensión en el Valle de México. El subsuelo de la Cuenca de México y su relación con la Ingeniería de cimentaciones, a cinco años del sismo.
- Alexander, M., 1961. Introduction to soil microbiology. N.York - London, A. Wiley.
- Allison, G. B., 1988. A review of the physical chemical and isotopic techniques available for estimating groundwater recharge. Estimation of Natural Groundwater Recharge, pp 49-72. NATO ASI Series. Serie C.
- Arellano, A. R., 1953. Estratigrafía de la Cuenca de México. Mem. Congreso Científico Mexicano. v.3, pp.172.
- Arizabalo, R. D., R. Rodriguez, A. Cortes y P. Fritz, 1987. Comportamiento del sistema acuífero del area de Santa Catarina, Ciudad de Mexico. Proceedings of a Regional Seminar for Latin-America on the use of isotope techniques in Hydrology, IAEA, ONU-IIN.
- Argelo, M., 1967. Two computer programs for the interpretation of standard graphs for resistivity prospecting. Geophysical Prospecting, v.15, n. 8, pp 71-79.
- Baker, S. D., 1983. Igneous rocks. Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, N. J., 417 pp.
- Balek, J., 1988. Groundwater recharge concepts. Estimation of Natural Groundwater Recharge, pp 3-10. NATO ASI Series. Serie C.

- Banerjee, B. y P. Das Gupta, 1977. Gravitational attraction of a rectangular parallelepiped. *Geophysics*, v. 42, pp 1053-1055.
- Becerril J., 1991. Estudio de la calidad del agua en pozos cercanos al tiradero de basura de Santa Catarina. Tesis de Maestría. División de Estudios de Posgrado de Ingeniería.
- Bellia, S., G. Cusimano, T. Gonzalez-Moran, R. Rodriguez y G. Giunta, 1992. El Valle de Mexico: consideraciones preliminares sobre los riesgos geologicos y análisis hidrogeológico de la Cuenca de Chalco. Quaderni IILA, Serie SCIENZA, n. 3, Roma, Italia.
- Benhumea Leon, M. y A. Vazquez, 1988. Estudios geofísicos del Valle de México. Departamento de estudios geofísicos. Superintendencia de estudios zona Centro. Comisión Federal de Electricidad.
- Bouvier, E. y E. Didon, 1991. Hidrología de la Cuenca de Chalco. Proyecto UAMX-ORSTOM.
- Buchan, S. and A. Key, 1956. Pollution of groundwater in Europe. *Bull. WHO* 14 pp. 949-1006.
- Buselli, G., C. Barber, G.B. Davis and R.B. Salama, 1990. Detection of groundwater contamination near waste disposal sites with transient electromagnetic and electrical methods. *Geotechnical and environmental geophysics. Investigations in geophysics. SEG. Vol. II. Environmental and groundwater.*
- CAVM, Comisión de Aguas del Valle de Mexico, 1986, 1987. Muestreos fisicoquímicos de los pozos de la batería de Santa Catarina.
- Cagniard, L., 1953. Basic theory of the magnetotelluric method of geophysical prospecting. *Geophysics* v.18, pp 605-635.
- Cahyna, F., O. Mazac and D. Venhodova, 1990. Determination of the extent of cyanide contamination by surface geoelectrical methods. *Geotechnical and environmental geophysics. Investigations in geophysics. SEG. v. 2, pp 97-99.*
- Castillo, B., H., 1983. La Sociedad de la Basura.- Caciquismo Urbano en la Ciudad de México. UNAM.
- Cheremisinoff, P. N and G. A. Kenneth, 1983. Leachate from hazards wastes sites. Technomic Publishing Co. Inc. L. Pennsylvania.
- Chian, E. S. and F. Dewalle, 1976. Sanitary landfill leachates and their treatment. *Journal of the Environmental Engineering Division, EE2*, pp. 411-425.

- Chian, E. S. and F. B. Daniels, 1977. Evaluation of leachate treatment. EP 600/2-77-186-A, V. 1.
- COMLURB, 1978. Aterro experimental de lixo. Documento final. Rio de Janeiro, Brasil.
- Custodio, E. y M.R. Llamas, 1983. Hidrología subterránea. II edición. Ediciones Omega. Barcelona, España.
- Davies, S. N. and R. J. DeWiest, 1967. Hidrogeology, N.York-London, A.Wiley.
- DDF, 1975. Memorias de las Obras del Sistema del Drenaje Profundo del Distrito Federal. Talleres Gráficos de la Nación. Tomo I-IV.
- DDF-DGCOH, 1984. Diagnostico preliminar del agua del area de Chichinautzin donde se proyecta la perforacion de nuevos pozos.
- DDF-DGCOH, 1986. Manual técnico de diseño de construcción, operación y mantenimiento de pozos en la Cuenca de México y Alto Lerma. Tomo I, ININSA, México.
- DDF-DGCOH, 1987. Estudios experimentales para prevenir y controlar la contaminación del acuífero de la ciudad de México. Contrato 7-33-1-0403.
- De Cerna Z.M., De la Fuente-Duch, M. Palacios-Nieto, L. Triay, L. M. Mitre-Salazar y R. Mota-Palomino, 1987. Estructura geológica, gravimétrica, sismicidad y relaciones neotectónicas regionales de la Cuenca de México. Bol. 104, Inst. de Geología, UNAM.
- Dirección Técnica de Desechos Sólidos, DDF, 1991. Análisis de lixiviados.
- Donker, N. W. H., 1987. WTRBLN: A computer program to calculate water balance. Computer & Geosciences, v. 13, n. 2, pp 95-122.
- Durazo, J. (coordinación), 1988. Estudio para evitar la contaminación del acuífero del Valle de México. Contrato IGF-SARH 85-406.
- E.P.A, 1974. Summary report : municipal solid waste generate gas and leachate. E. U. A.
- Everett, G. L., 1984. Guidelines and methodology for developing and implementing a groundwater quality monitoring program. Genium Publishing Corp.

- Ezcurra, E., 1990 .De las chinampas a la megalópolis.- El medio ambiente en la cuenca de México. La ciencia desde México. Fondo de Cultura Económica.
- Fair G. M., J. C. Geyer and A.D. Okun, 1984. Purificación de aguas y tratamiento y remoción de aguas residuales. Editorial LIMUSA, Mexico.
- Finstein M. S., L. M. Morris and F. P. Strom, 1980. Microbial ecosystems responsible for anaerobic digestion and composting. Department of Environmental Protection N. J., University of California, Berkeley.
- Fisher G., P.-A. Schnegg, M. Peguiron and B. V. Le Quang, 1981. An analytic one-dimensional magnetotelluric inversion scheme. Geophys J. Roy. astr. Soc., v.67, pp 257-278.
- Fischer G., and B. V. Le Quang, 1981. Topography and minimization of the standard deviation in one-dimensional magnetotelluric modelling. Geophys J. Roy. astr. Soc., v.67, pp. 279-292.
- Foster, S., 1985. Groundwater pollution protection in developing countries. IAH Intl. Contr. Hydrogeology, n.6, pp. 167-200.
- Foster, S., M. Ventura y R. Hirata, 1987. Contaminación de las aguas subterráneas (Un enfoque de la situación de América latina y el Caribe en relación con el suministro de agua potable), CEPIS, OPS. Reporte técnico, Lima, Perú.
- Foster, S. y R. Hirata, 1988. Determinación del riesgo de contaminación de aguas subterráneas, una metodología basada en datos existentes, CEPIS, OPS. Reporte técnico.
- Freeze, A. and J. Cherry, 1979. Groundwater. Prentice Hall.
- Fries, C., Jr, 1960. Geología del Estado de Morelos y de partes adyacentes de México y Guerrero, región central meridional de México. Bol. 60, 26 pp., Inst. de Geología, UNAM.
- Francis, W. P. and R. S. Thorpe, 1974. Significance of lithologic and geomorphologic variations of pyroclastic cones Geol. Soc. Am. Bull., 85, 927-930.
- Gayol, R., 1929. Breves apuntes relativos a la Catedral de México. Revista de Ingeniería y Agricultura. v. 11.
- Geofísica Internacional, 1989. Volumen Especial sobre la Cuenca de Mexico, v. 28, n.2.
- Gerba, C. P., C. Wallis and J. L. Melonick, 1975. Fate of waste water bacteria and viruses in soil. J. of Irrigation and Drainage División. ASCE. v. 101, pp. 157-175.

- Gieske, A. and E. Selaolo, 1988. A proposed study of recharge proceses in fracture aquifers of semi-arid Botswana. Estimation of Natural Groundwater Recharge, pp 117-124. NATO ASI Series. Serie C..
- Goldsmid, J. D., Y. Z. Argarman and Y. Kott, 1972 .Effect of dissolved salts on the filtration of coliformes bacteria in sand dunes. Proceedings of the 6th Int.Conference Jerusalem, p. 147-155.
- Goldstein, M. A. and D.W. Strangway, 1975. Audio frequency magnetotellurics with a grounded wire source. Geophysics v. 40, pp 669-683.
- Goldstein, N., S. Benson and D. Alumbaugh, 1990. Saline groundwater plume mapping with electromagnetics. Geotecnical and Environmental Methods. Investigations in Geophysics. SEG. v. 2, pp 17-25.
- Gonzalez-Moran, T. y R. Rodriguez, 1989. Monitoreo geofisico en el entorno de un basureo industrial de desechos de cromo. Geofisica Internacional v. 28, n.2, pp. 409-416.
- Gonzalez-Moran, T. y R. Rodriguez, 1989. Control geológico-estructural del frente de la intrusión salina en el Valle de Guaymas, Son. Topografía y Cartografía, V. VI, Número Especial del quinto Centenario del Descubrimiento de las Indias Occidentales.
- Gonzalez, G., 1985 .Proyecto de un relleno sanitario en Santa Catarina,D.F.Tesis Profesional, Facultad de Ingeniería.
- Greenhouse, J.P. and D.D. Slaine, 1986. Geophysical modelling and mapping of contaminated groundwater around three waste disposal sites in southern Ontario. Canadian Geotechnical Journal, V.23, n.6, pp. 372-384.
- Greenhouse, J.P. and R.D. Harris, 1983. Migration of contaminants in groundwater at a landfill: A case study. 7. DC, VLF and resistivity surveys. Journal of Hydrology, V.63, pp. 177-197.
- Griffen, R. A. et al 1975. Attenuation of pollutants in municipal landfill.- leachate by passage through clay. Illinois State Geological Survey.
- Gurria L. J., 1978. El desagüe del valle de Mexico durante la epoca novohispanica. Instituto de investigaciones historicas. Serie Historia, n.19, UNAM.
- Gutierrez, J., 1989. Modelo gravimétrico geológico-estructural de la Subcuenca de Chalco. Tesis Profesional. Facultad de Ingeniería. UNAM.

- Hendricks, D. W., F. J. Post and D. Khairnar, 1979. Adsorption of bacterias on soils. *Water, Air and Soil pollution*, v. 12, p. 219-232.
- Herrera, I., L. Leon, J. y L. Fernández del Olmo, 1977. Preconsolidations and its rheological implications. *Proc. Novena Conferencia de Mecanica de Suelos. Ing. de Cimentaciones. Tokio, Japon. V.1*, pp. 127-130.
- Herrera, I., R. Martinez y G. Hernandez, 1989. Contribucion para la administracion cientifica del agua de la Cuenca de Mexico. *Geofisica Internacional*, v. 28, n.2, pp 297-334.
- Humbolt, A., 1811. *Ensayo político sobre el reino de la Nueva España*. Edición en español de 1966. Editorial Porrúa, México.
- Irvine N. J. and Barager W. R., 1970. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Canadian Journal of Earth Sciences*, v. 8, pp. 523-548.
- Johansen, O. J. and D. Carlson, 1976. Characterization of sanitary landfill leacheates. *Water research* v.10 pp. 1129-1134.
- Keswich, B. H. and C. P. Gerba, 1980. Viruses in groundwater. *Environmental Science and Tecnology*, v. 14, n. 11, pp 1290-1297.
- Lakubovski, V, y L.L. Lljajov, 1980. *Exploracion electrica*. Ed. Reverte, S.A., Barcelona, 421 pp.
- Lamb J.C., 1985. *Water quality and its control*. J. Wiley, New York.
- Lance, J. C. and C. P. Gerba, 1980. Polivirus movement during high rate land filtration of sewage water. *Journal of Enviromental Quality*. v.9(1), p. 31-34.
- Landry, E. F., J. M. Vaughn, Z. T. McHarrel and C. A. Beckwith, 1979. Adsorption of enteroviruses to soil cores and their subsequent elution by artificial rainwater. *Applied Enviromental Microbiology*. v. 38(4), p. 680-687.
- Lesser, J. M., 1984. *Actividades geohidrologicas en el Valle de México*. Reporte Tecnico 4-33-1-676, DDF. Tomos I-III.
- Lesser, J. M., F. Sánchez y D. González, 1990. Aspectos hidrogeologicos de la Ciudad de México. *Revista Ingenieria Hidráulica en México*. v. V, n. 1, II Epoca. Enero/Abril.
- Lewis, W. J., 1980. The pollution hazard to village water supplies in eastern Botswana. *Proceedings of Institution of Civil Engineers*. v.69, part 2, p.281-293.

- Lewis, W. J., S. D. Foster and B. Draser, 1980. The risk of ground water pollution by on-site sanitation in developing countries. International Reference Centre for Wastes Disposal.
- Lorenzo, J. L. y L. Mirambel, 1986. Tlapacoya: 35,000 años de historia. Instituto Nacional de Antropología e Historia, México.
- Lugo, J., 1984. Geomorfología de la Cuenca de México. Revista del Instituto de Geografía, serie varia T.1 n. 8, UNAM.
- Lugo-Hupp, J., Pérez-Vega, A. y M. Reyes-Salas, 1991. Formación de grietas en la margen del antiguo lago al oriente de la Cuenca de México. Geofísica Internacional, v.30, n.2, pp. 87-95.
- MacLean, R. and D. Davison, 1969. The effect of tipped domestic refuse on groundwater quality: A survey in North Kent. Water Treat Exam. v.18, pp. 18-34.
- Marzal, R., 1975. The lacustrine clays of the valley of México. Proceedings of the International Clay Conference, México, 13 pp.
- Matthers, G., 1982. The properties of groundwater. N. York-London A. Wiley.
- McNabb, J. F., W. J. Dunlap and J. W. Keeley, 1977. Nutrient bacterial and virus control as related to groundwater contamination. U.S. Environmental Protection Agency report 600/8-77-010.
- Millar, E. C., L. M. Turk and H. D. Foth, 1981. Fundamentos de la ciencia del suelo. Cia Editorial Continental S. A.
- Molina, B., R., 1956. Estudios geoquímicos, geofísicos y geológicos de la Subcuenca de Chalco. Anales del Instituto de Geofísica, V.
- Monier-Williams, M.E., J.P. Greenhouse, J.M. Méndez and N. Ellert, 1988. Terrain conductivity mapping with topographic corrections at three waste sites in Brazil. Special volumen on environmental geophysics. Society of Exploration Geophysicist, Tulsa, Oklahoma.
- Mooser, F., 1975. Historia geológica de la Cuenca de México. Memorias de las Obras del Sistema del Drenaje Profundo, Tomo I
- Mooser, F. 1978. Geología del relleno cuaternario de la Cuenca de México. El subsuelo y la Ingeniería de cimentaciones en el area urbana del Valle de México. Soc. Mex. de Mec. de suelos, pp. 9-13.

- Mosey, F. E., 1980. Anaerobic biological treatment of food industry wastewater. *Water Disposal Control*, n. 11.
- Niebergerger, C., 1987. Paleopaysages et archeologie pre urbaine du bassin de México. *Centre d'Etudies Mexicaines et Centramericaines. Collection: Etudes Mesoamericaines*, Tome I.
- Nixon, G. T., A. Demant, R. L. Armstrong y J. E. Harakal, 1987. K-Ar and geologic data bearing of the Trans-Mexican Volcanic Belt. *Geofísica Internacional*, v. 26, n. 1, pp 109-158.
- Ochoa, A. C., 1988. Propiedades geoelectricas de las principales unidades acuíferas de la Cuenca. Tesis Profesional, Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura (Ciencias de la Tierra), IPN.
- Orellana, E., 1982. Prospección geoelectrica en corriente continua. Ed. Paraninfo, Madrid, España.
- Orozco y Berra, M., 1862. Memoria para la carta hidrográfica del Valle de México. *Boletín de la Sociedad Mexicana de Geografía y Estadística*. T. IX.
- Pecerrillo, A. and S.R. Taylor, 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area Northern, Turkey. *Contr. Mineral and Petrology*, v. 58, pp 63-81.
- Perez-Cruz, G., 1988. Estudio sismológico de reflexión del subsuelo de la Ciudad de México. Tesis de Maestría. DESFI, UNAM.
- Perrier E. and A. Gibson, 1980. Hidrologic simulation on solid waste disposal sites. MERL, Cincinnati, Oh.
- Piatkin, K., 1968. *Microbiologia*. Editorial MIR. Moscu.
- PNUD/Bco Mundial, 1984. La basura, problemas socioeconomicos de la recirculación. Subproyecto 3, apéndice B, del proyecto GLO/84/007.
- Química del Agua, (Jun) 1983. Reporte de analisis bacteriologicos y fisicoquímicos para SERCA CONSULTORES S.A.
- Ran, J.G. and D.C. Wooten, 1980. *Environmental impact analysis hanbook*, Mc.Graw-Hill Book Co.
- Rodriguez, R., E. Lima, T. Gonzalez-Moran, R. Alvarez, L. Del Rio y H. Niedzielsky, 1984. Ampliación al Estudio Geofísico del Valle de Guaymas, Son. Reporte Técnico 11, 390 pp. SARH/Depto. Exploración IGF-UNAM.

- Rodriguez, R., T. Gonzalez-Moran, P. Diaz, 1985. Investigación Geofísica en el Valle La Paz-El Carrizal en el Estado de Baja California Sur para el abastecimiento de agua en bloque a la Cd. de La Paz. Reporte Técnico 11., 315 pp., SARH/Depto de Exploración IGF-UNAM.
- Rodriguez, R., T. Gonzalez-Moran, R. Chavez, P. Diaz, R. Medina y J. Carrillo, 1986. Estudio Geohidrológico-Geofísica en la Cuenca de San Juan B. Londo, Municipio de Comondu, B.C.S. Reporte Técnico 11., 403 pp. SARH IGF-UNAM.
- Rodriguez, R. A. Armienta, T. Gonzalez-Moran, S. Villanueva, P. Diaz, A. Aguayo, A. Cardona, 1991. Estudio Hidrogeoquímico y modelación matemática del Acuífero del Río Turbio para definir las acciones encaminadas a proteger de contaminantes la fuente de abastecimiento de la Cd. de León Gto. Rep. Tec. 11 110 pp. IGF-UNAM, CNA-SARH.
- Rodríguez, R. y P. Diaz, 1987. Perfiles geofísicos del sur del valle de México. Reporte técnico, CAVM-SARH, IGF-UNAM, 379 pp.
- Rodriguez, R. y P. Diaz, 1988. Perfiles geofísicos en Pachuca-Teotihuacan, Apan-Otumba en el Valle de Mexico. Reporte Técnico 11., CAVM-SARH, IGF-UNAM, 110 pp.
- Rodríguez, R , 1987. Consideraciones preliminares basadas en resultados geolétricos sobre la interfase agua mineralizada-agua dulce en el área de Santa Catarina Yecahuitzol. México D.F. Geofísica Internacional, v.26, n.4, pp. 573-583.
- Rodríguez, R. y F. Lara, 1988. Proposal on the hydrodynamical behavior of the Santa Catarina Aquifer System. México, D.F. Geoelectrical hydrological Analysis. Geofísica, v.28. IPGH, México.
- Rodríguez, R. y C. Ochoa, 1989. Estudio geolétrico del sistema acuífero de la Cuenca de Chalco. Geofísica Internacional v. 28, n. 2, pp. 191-205.
- Rodríguez, R. y T. González-Morán, 1989. Comportamiento hidrodinámico del sistema acuífero de Chalco. Geofísica Internacional, v. 28, n. 2, pp 207-217.
- Rojas, T., R. A. Strauss y J. Laineros, 1974. Nuevas noticias sobre obras hidráulicas y coloniales en el Valle de México. S.E.P., I.N.A.H.. Centro de Investigaciones Superiores. Seminario de Ethnohistoria del Valle de México.
- Rudolph, L. D., Herrera, I. y R. Yates, 1989. Groundwater flow and solute transport in the industrial well fields of the Texcoco saline aquifer system near México City. Geofísica Internacional, v.28, n. 2, pp 363-408.

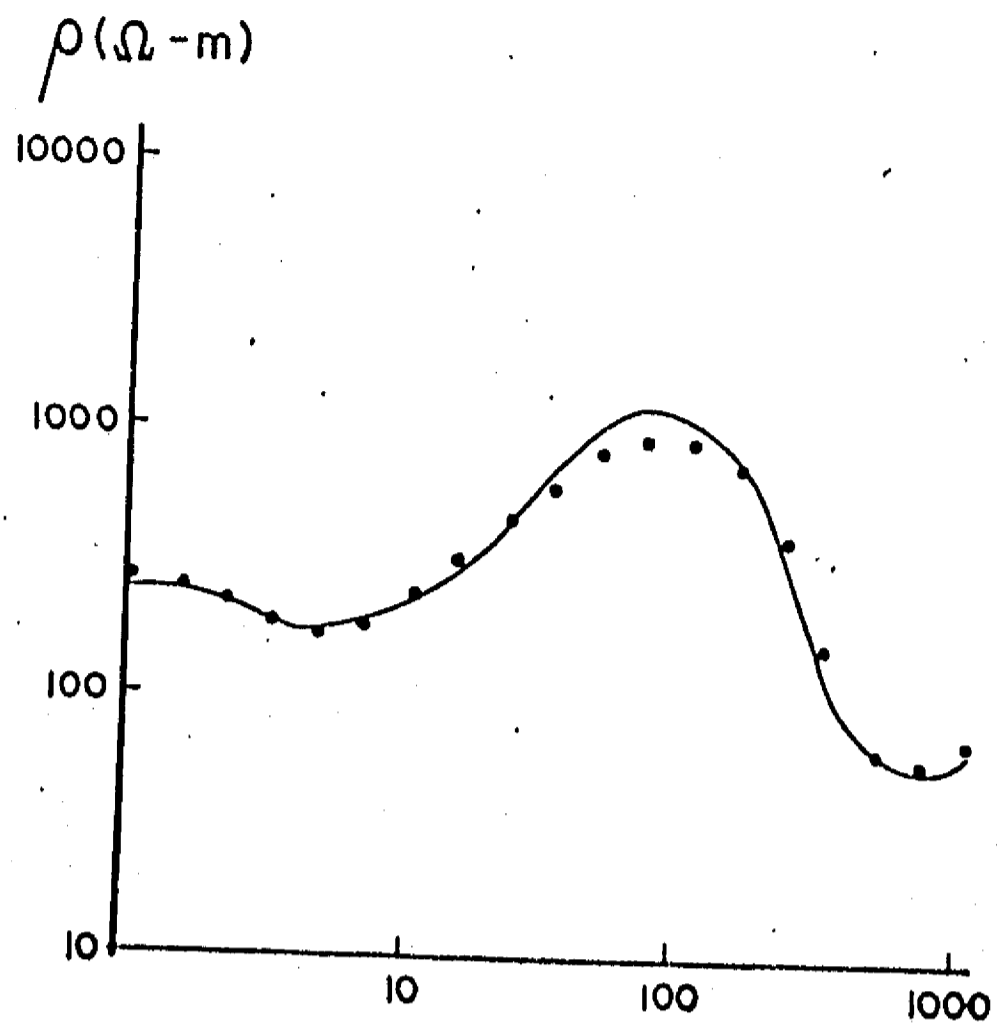
- Ryan, M. C., 1989. An investigation of inorganic nitrogen compounds in the groundwater in the Valley of Mexico. *Geofísica Internacional*, v 28, n. 2, pp 417-434.
- SARH, Comisión Hidrológica de aguas del Valle de México, 1983. *Hidrología DE LA Cuenca de México*.
- Schaepfer, C. J., 1968. Resumen de la Geología de la hoja México, D.F., Edo de México y Morelos. Instituto de Geología, Hoja México.
- Schilling, E., 1938. *Die schwinmenden Gärten von Xochimilco*, Kiel.
- Schoeller, H., 1962. *Les Eaux Subterraines*. Paris, Maison.
- SEDUE, 1984. Normas técnicas, NOM-AA-91.
- Servicios Geofísicos, S.A., 1953. Informe sobre el trabajo en el Valle de México. Instituto Nacional de la Investigación Científica de México, inedito.
- Servicios Urbanos, DDF, 1991. Reporte de muestreos de biogás y lixiviados del sitio de depositación de Santa Catarina.
- Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 1985. Edited by L. Clesceri, A. Greenberg and R. Trusell.
- Strangway, D. W., M. C. Swift and R.C. Holmer, 1973. The application of audio frequency magnetotellurics (AMT) to mineral exploration. *Geophysics* v.38, pp 1158-1175.
- Swift, M. C., 1989. Fundamental of the electromagnetic method, Cap. 1. Electromagnetic method in applied geophysics- Theory, V. 1 (edited by M.N. Nabighian. Society of Exploration Geophysicists.
- Syed, R. Q. and J. C. Burchinal, 1970. Leaching from simulated landfills. *Journal W.P.C.P.* pp. 371-379.
- Thorthwaite, C. W. and J.R. Mather, 1957. Instructions and tables for computing potential evaporation and water balance. *Publ. Climatology, Lab. Climatology, Centeron, New Jersey*, V. 10, n. 3, 244 pp.
- Uribe, E. S., 1986. Los rellenos sanitarios como parte del manejo de desechos sólidos en México. Tesis de licenciatura, Facultad de Ingeniería. UNAM.
- Urrutia, F. J., (coordinador) 1990. Paleomagnetismo, palinología, magnetoestratigrafía y paleolimnología de sedimentos lacustres de la Cuenca de Mexico. Reporte parcial. Proyecto DGAPA-INO 13589.

- Vacquier, V., C. Holmes, P. Kitzinger and M. Laverge, 1957. Prospecting for groundwater by induced electrical polarization. *Geophysics* v. 22, pp 660-687.
- Van de Griend, A. A. and R. J. Gurney, 1988. Satellite remote sensing and energy balance modeling for water balance assessment in (semi) arid regions. Estimation of Natural Groundwater Recharge, pp 89-116. NATO ASI Series. Serie C..
- Vázquez-Sánchez, E y R. Jaimes-Palomera, 1989. Geología de la Cuenca de México. *Geofísica Internacional*. v.28,n. 2, pp 133-190.
- Vizcaino, M. F., 1987. La contaminación en México. Fondo de Cultura Economica, México.
- Vozoff, K., 1972. The magnetotelluric method in the exploration of sedimentary basins. *Geophysics* v. 37, n.1, pp 98-141.
- Wait, J. R., 1962. The theory of magnetotelluric fields. *J.Res. NBS* 66D, pp 509-541.
- Walter, G. W., R. H. McBee and K. L. Temple, 1980. Introducción a la microbiología. Compañía Editorial Continental. S. A.
- Winkler, M., 1986. Biological treatment of waste-water. Ellis Horwood limited.

ANEXOS GRAFICOS

A N E X O I

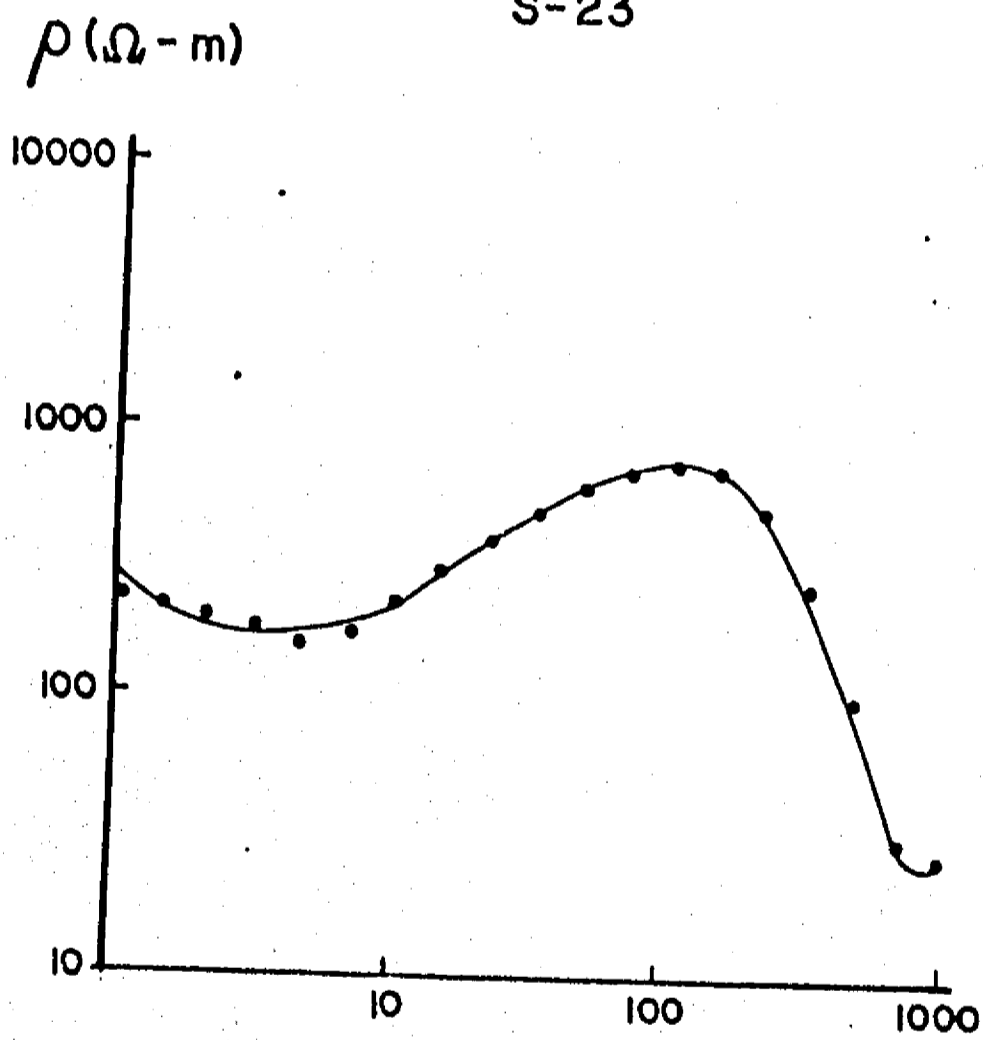
SONDEOS DE LA SECCION A-A' Y SUS MODELOS



S-23

AB/2 (m)

CAPA	ESPESOR	$\rho(\Omega\text{-m})$
1	1.0	310
2	4.0	130
3	7.0	620
4	19.0	4000
5	260.0	20
6		130

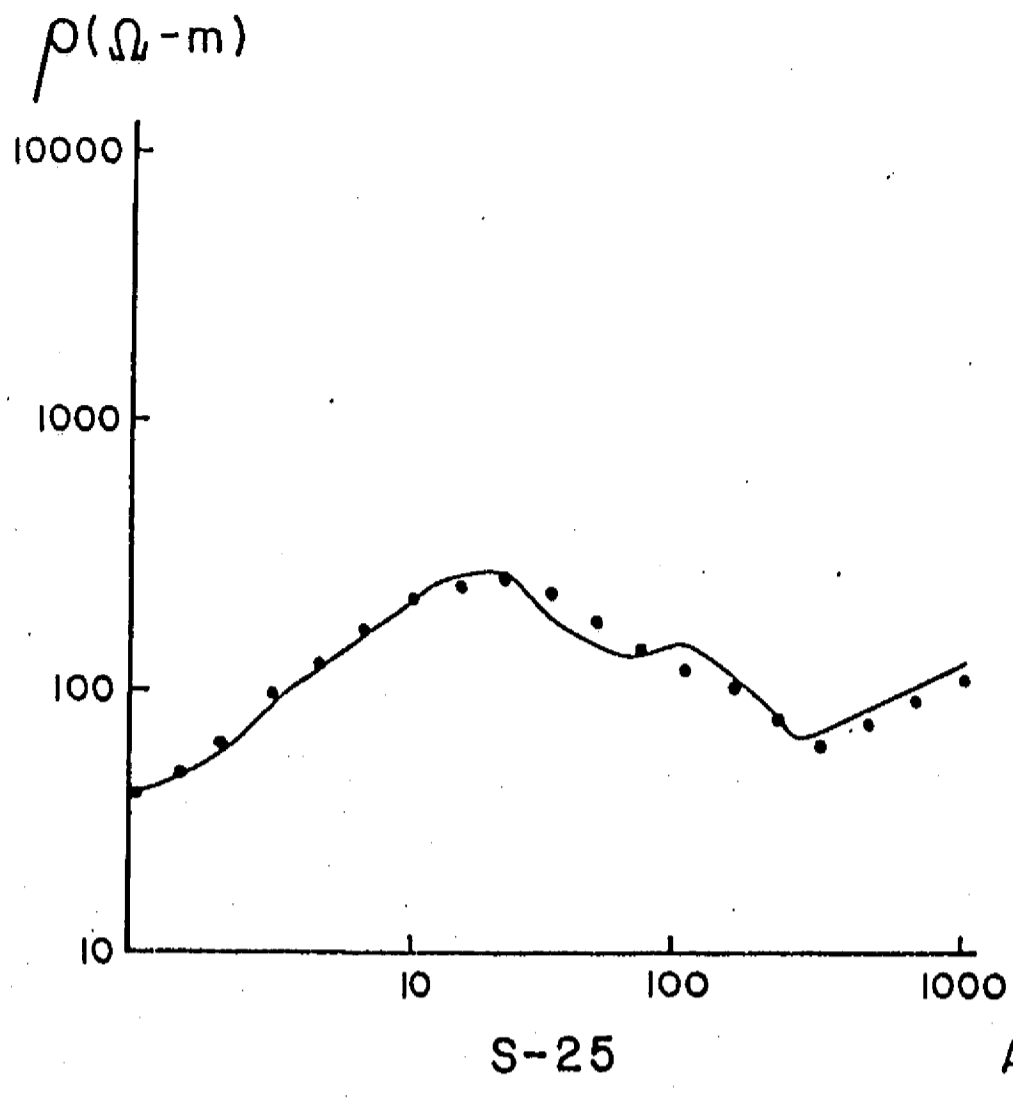


S-24

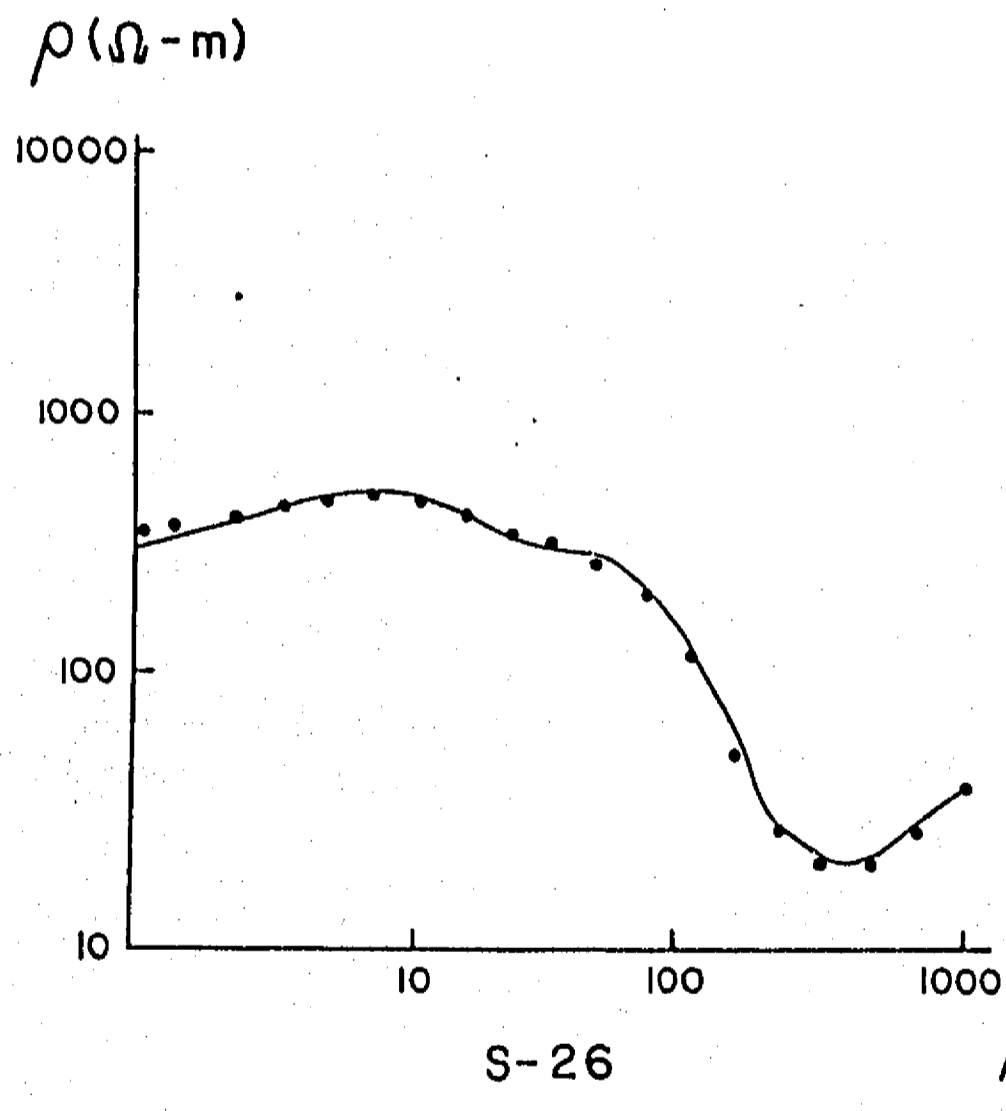
AB/2 (m)

CAPA	ESPESOR	$\rho(\Omega\text{-m})$
1	10	250
2	50	140
3	95.0	1000
4	380.0	12
5		70

• • datos de campo
 — curva calculada

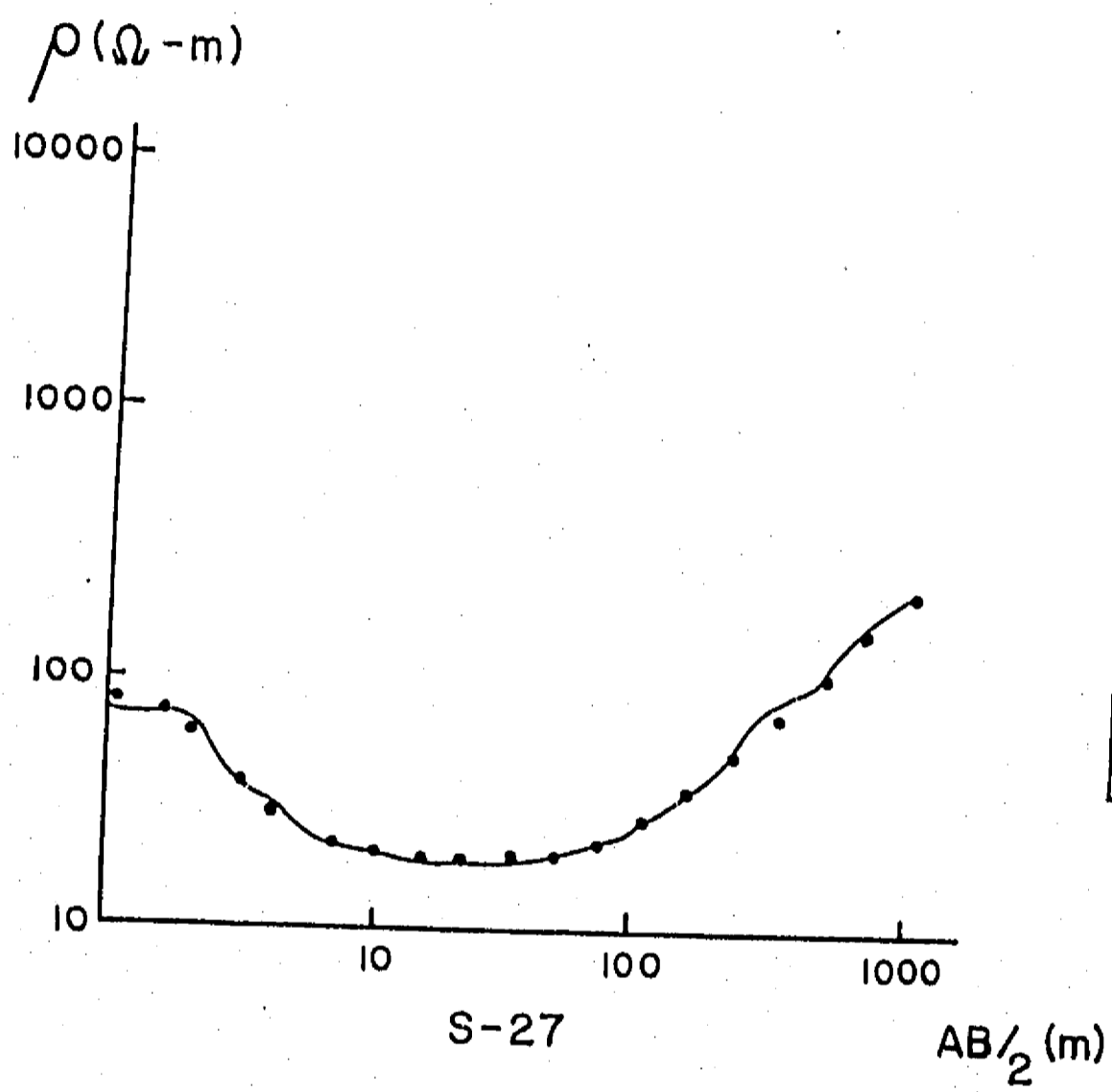


CAPA	ESPESOR	$\rho(\Omega\text{-m})$
1	1.0	30
2	6.0	800
3	18.0	50
4	15.0	500
5	80.0	20
6		180



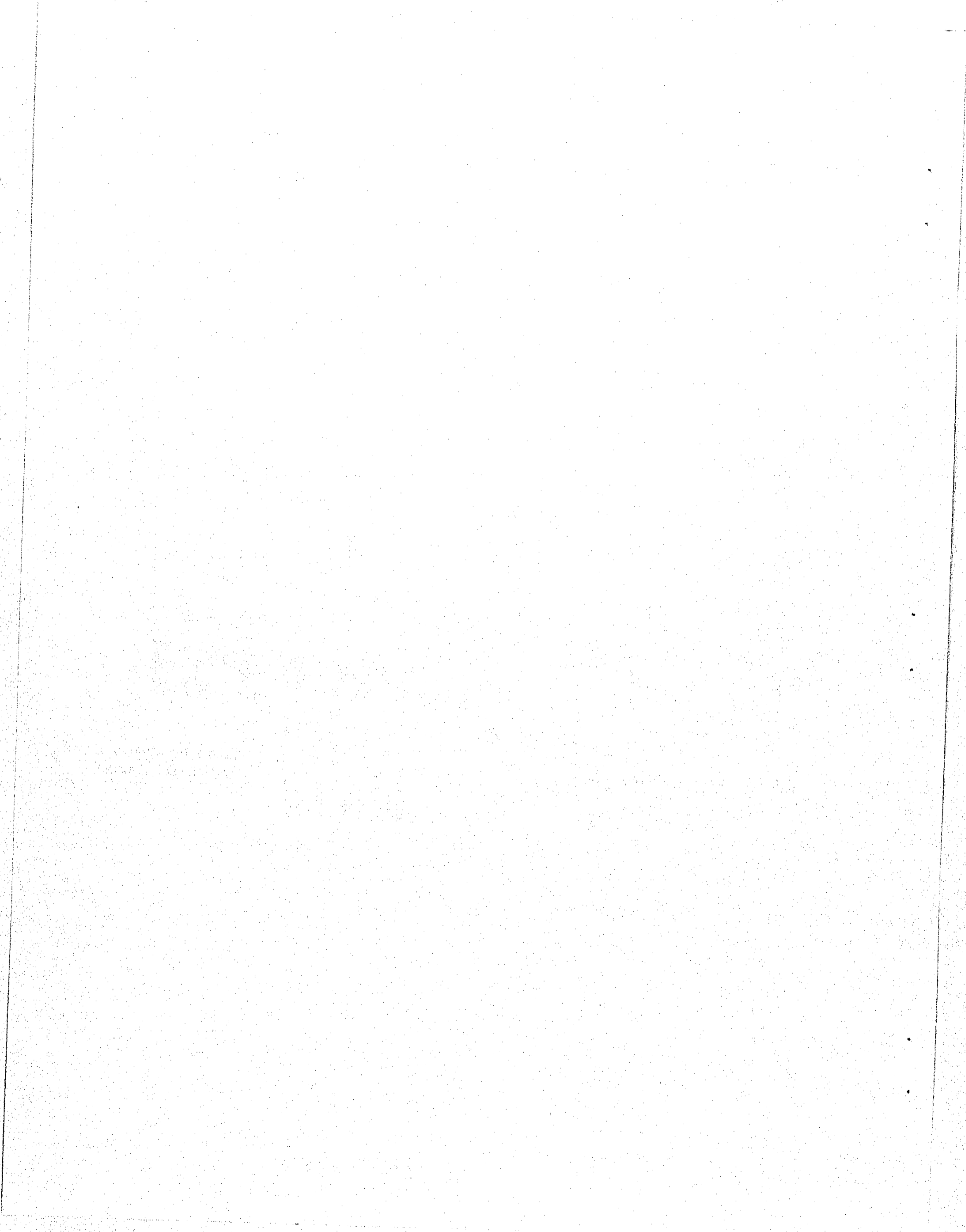
CAPA	ESPESOR	$\rho(\Omega\text{-m})$
1	1.0	350
2	5.0	550
3	15.0	300
4	12.0	600
5	140.0	25
6	140.0	9
7		100

• • datos de campo
 — curva calculada



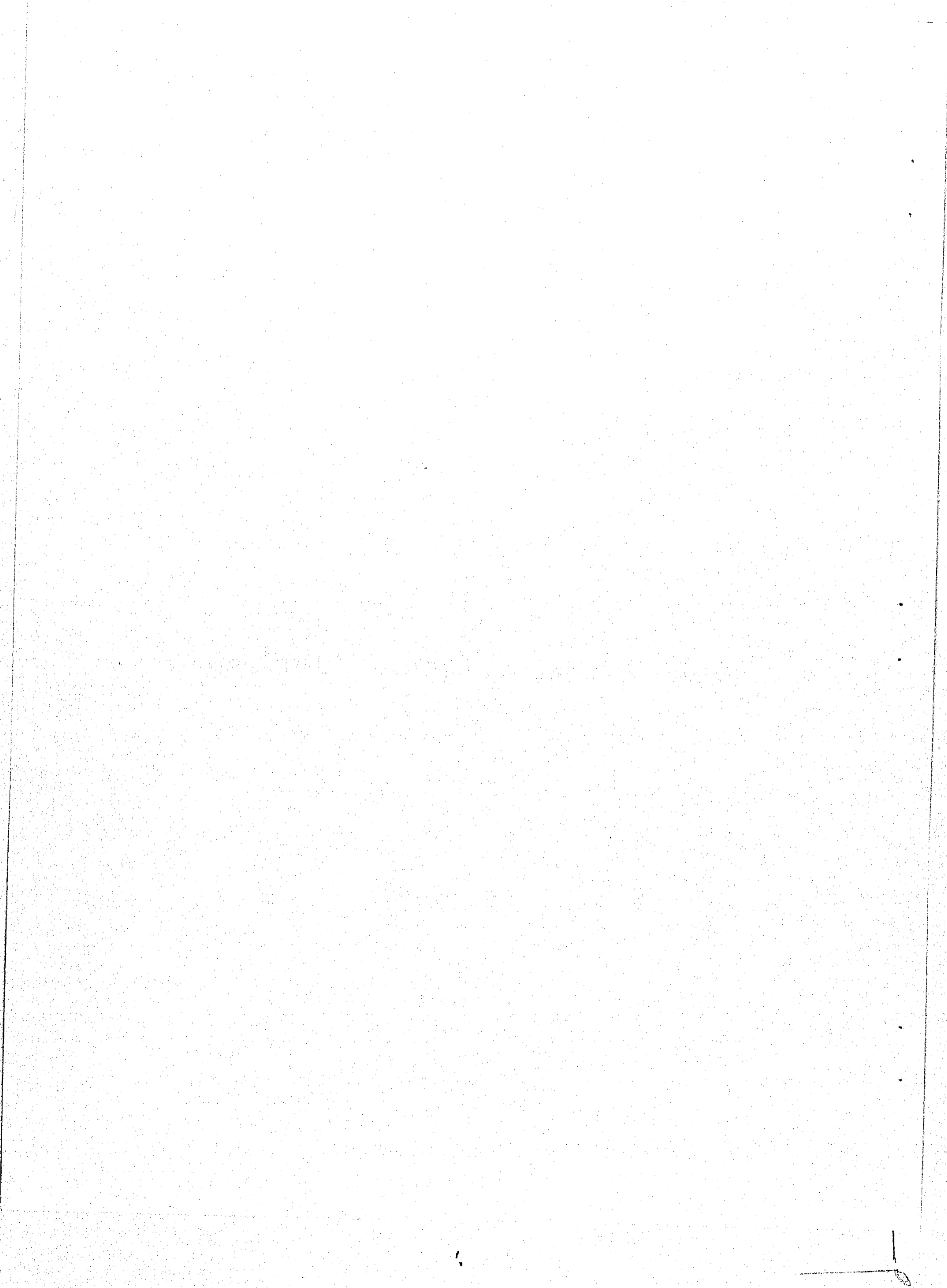
CAPA ESPESOR $\rho(\Omega\text{-m})$		
1	1.2	8
2	55.0	2
3	80.0	5
4	750	

• • datos de campo
 — curva calculada

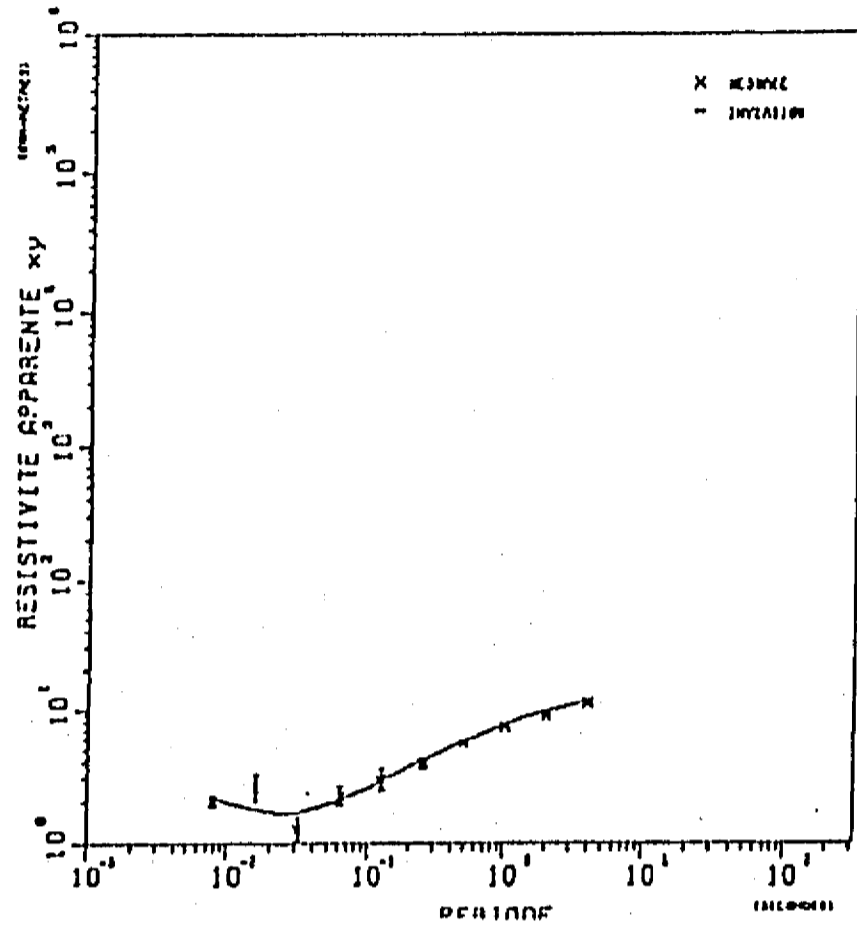


A N E X O II

SONDEOS ELECTROMAGNETICOS DE CSAMT Y SUS MODELOS

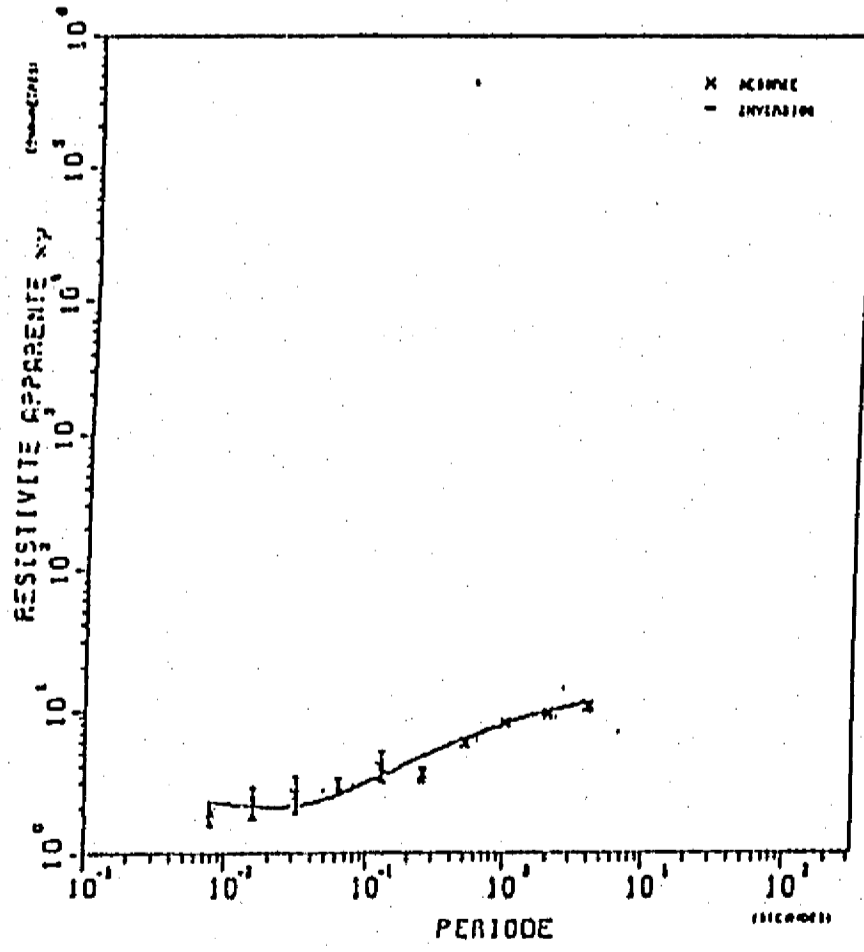


chalco01
chalco01



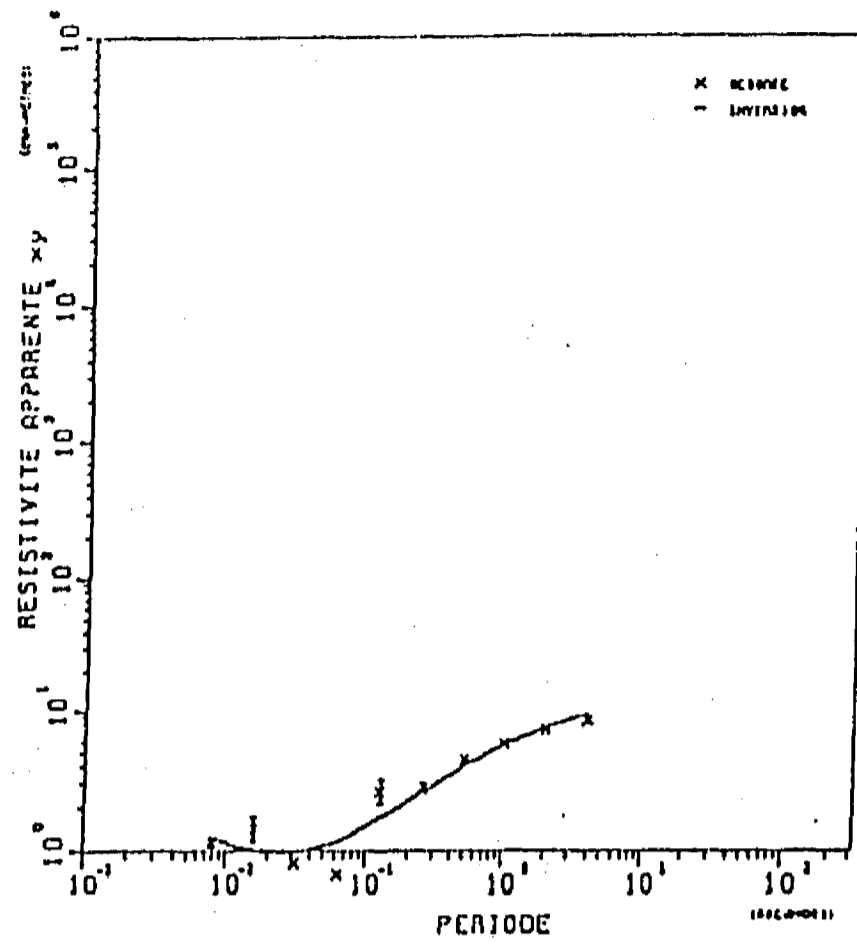
MODELE CALCULE	
RES (Ω -m)	EPAI (Km)
15.9	1.18E-02
1.59	0.101
10.5	----

chalco02
chalco02



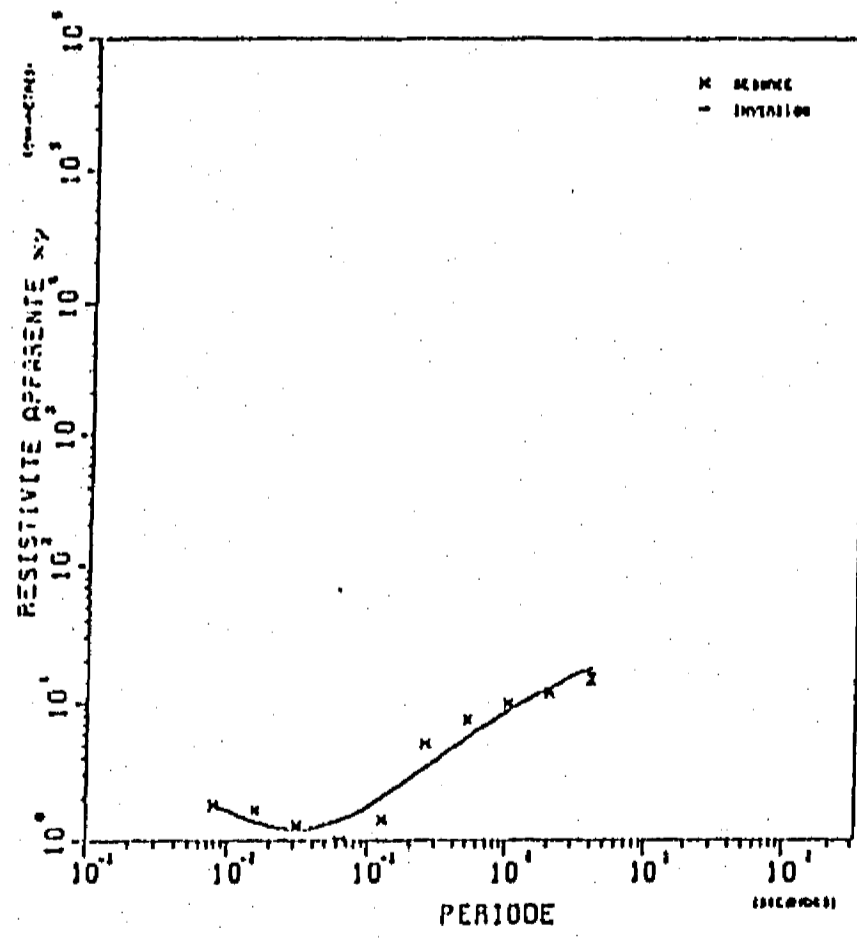
MODELE CALCULE	
RES (Ω -m)	EPAI (Km)
2.29	7.90E-02
2.52	5.90E-02
17.0	----

ch01co03
 oha1co03



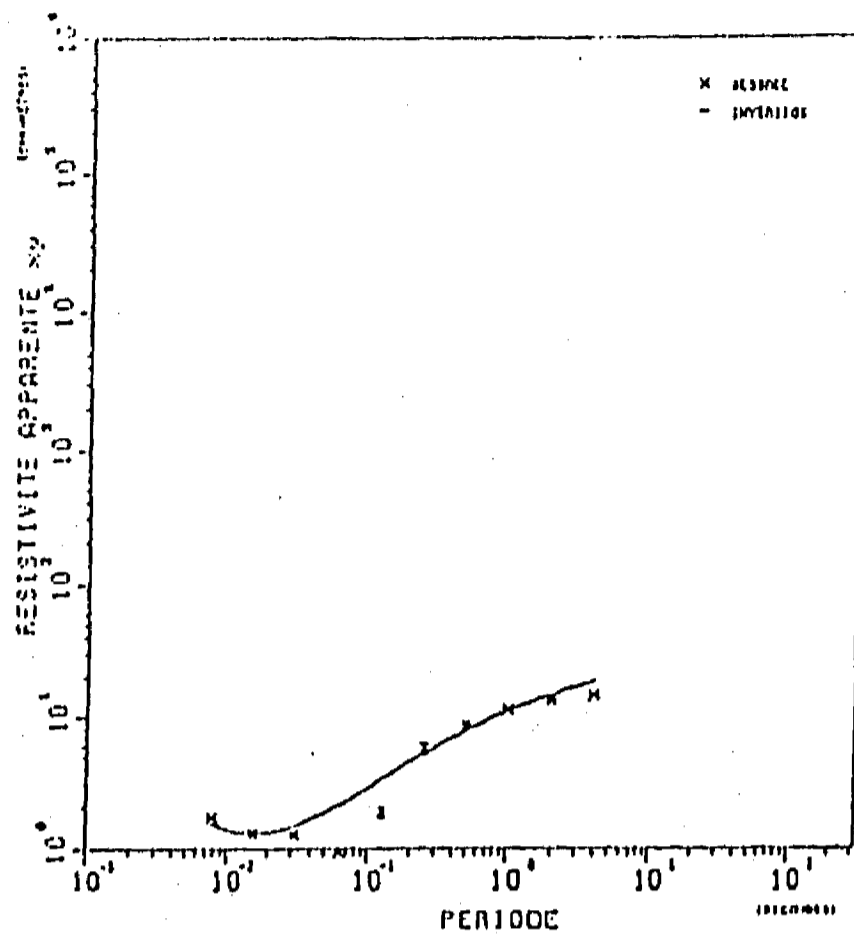
MODELE CALCULE	
RES (Ω -m)	EPAI (Km)
42.6	3.00E-03
0.918	8.70E-02
19.0	----

ch01co04
 oha1co04



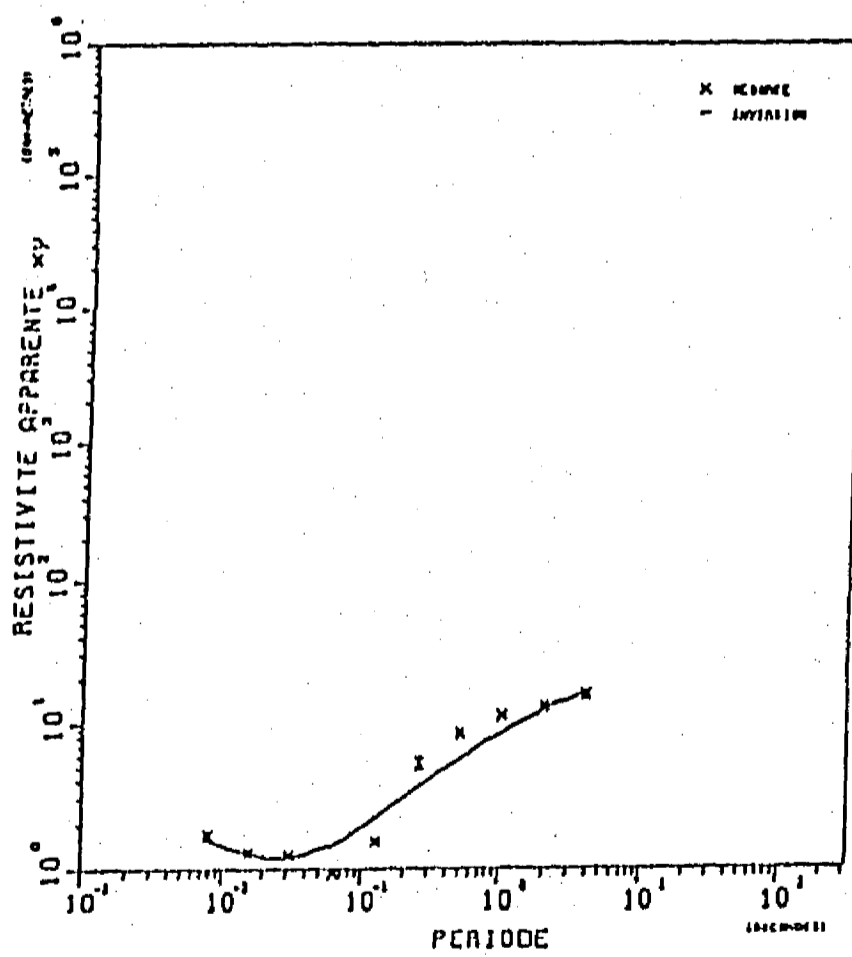
MODELE CALCULE	
RES (Ω -m)	EPAI (Km)
28.7	1.80E-02
1.08	8.50E-02
100.0	1.20E-02
25.6	----

chalo05
chalo05



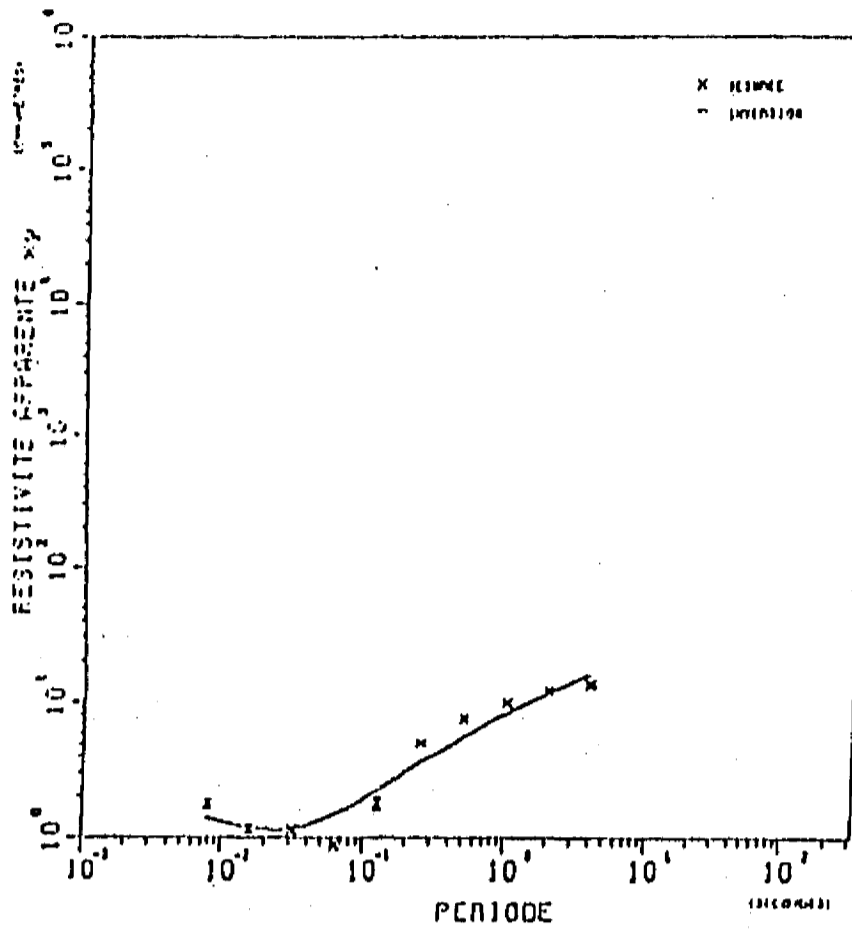
MODELE CALCULE	
RES (Ω-m)	EPAI (Km)
10.5	1.20E-02
1.00	6.50E-02
100.0	2.02E-02
44.0	----

chalo00



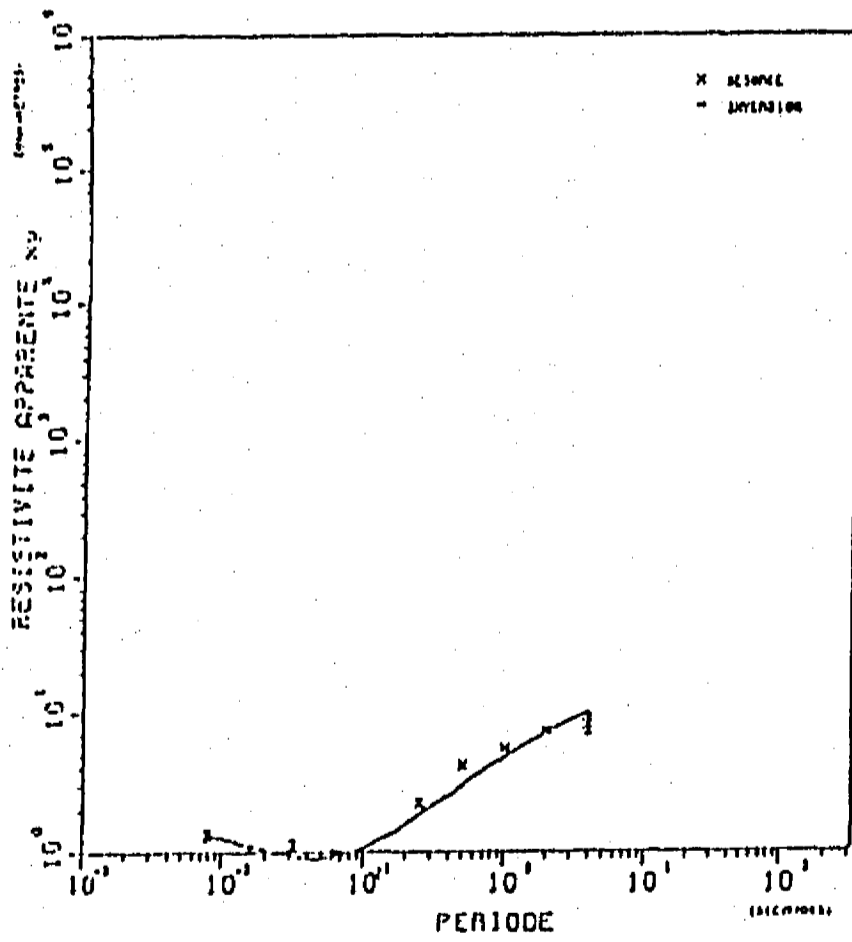
MODELE CALCULE	
RES (Ω-m)	EPAI (Km)
22.0	9.00E-03
1.15	9.00E-02
91.0	2.10E-02
54.0	----

chalco07
chalco07



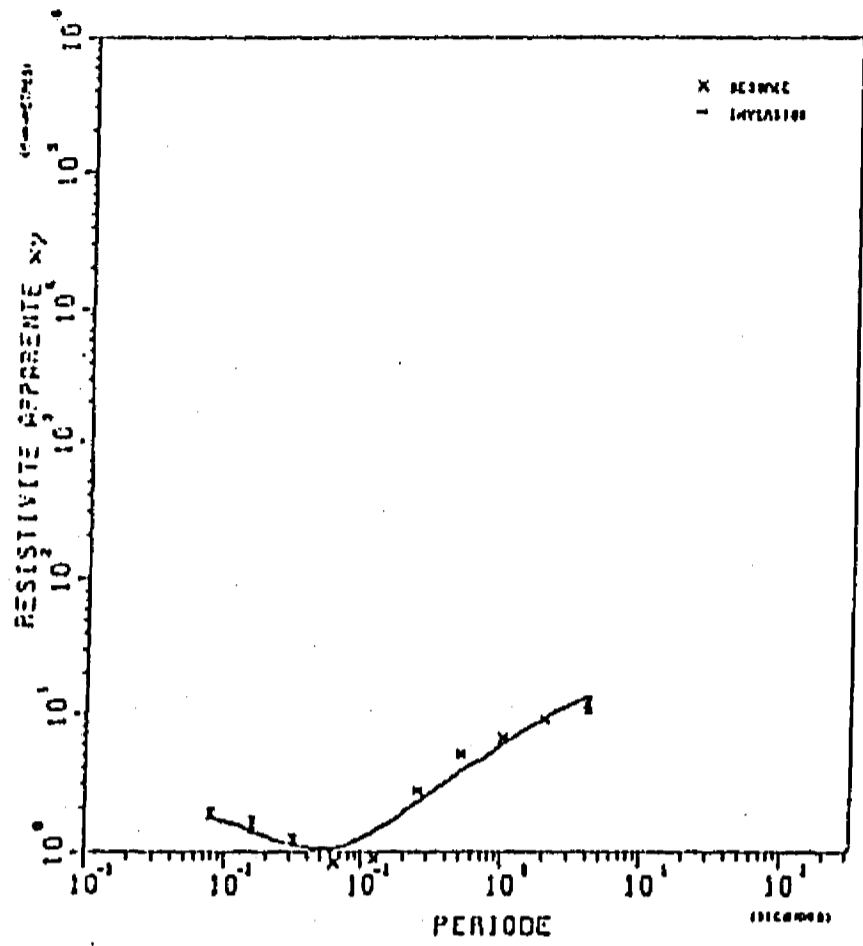
MODELE CALCULE	
RES (Ω -m)	EPAI (Km)
49.3	0.50E-02
1.24	10.00E-02
87.0	1.70E-02
41.0	----

chalco08
chalco00



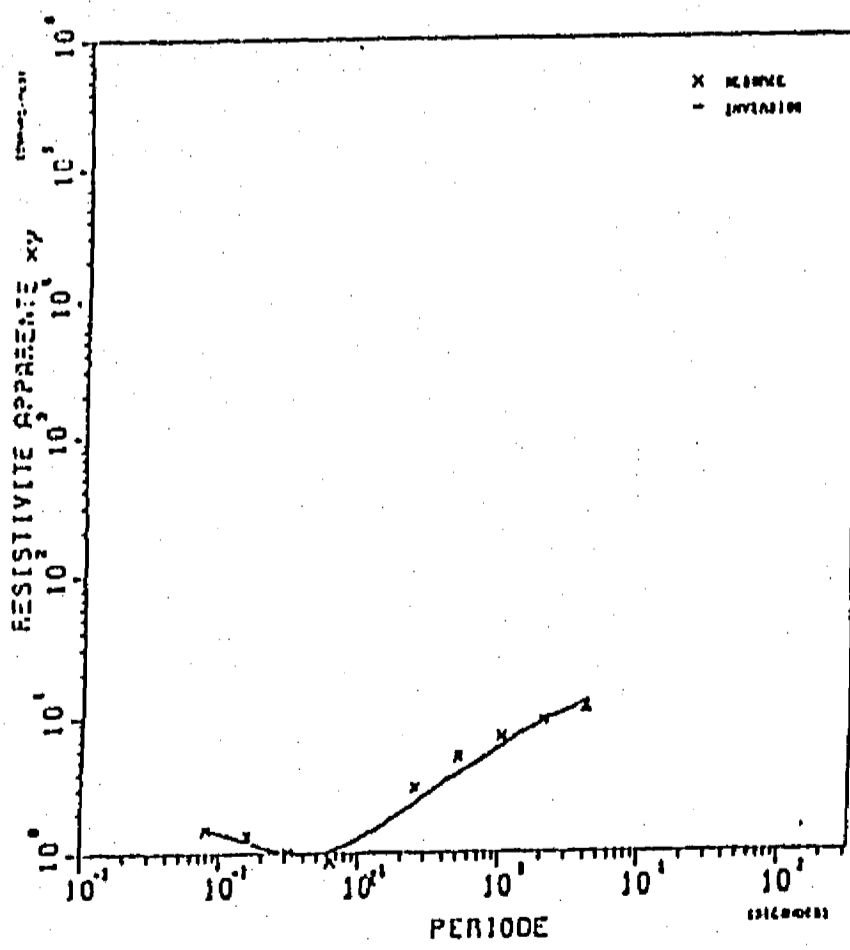
MODELE CALCULE	
RES (Ω -m)	EPAI (Km)
6.70	1.00E-02
0.91	10.50E-02
80.0	2.20E-02
29.2	----

ch01c09
 ch01c09



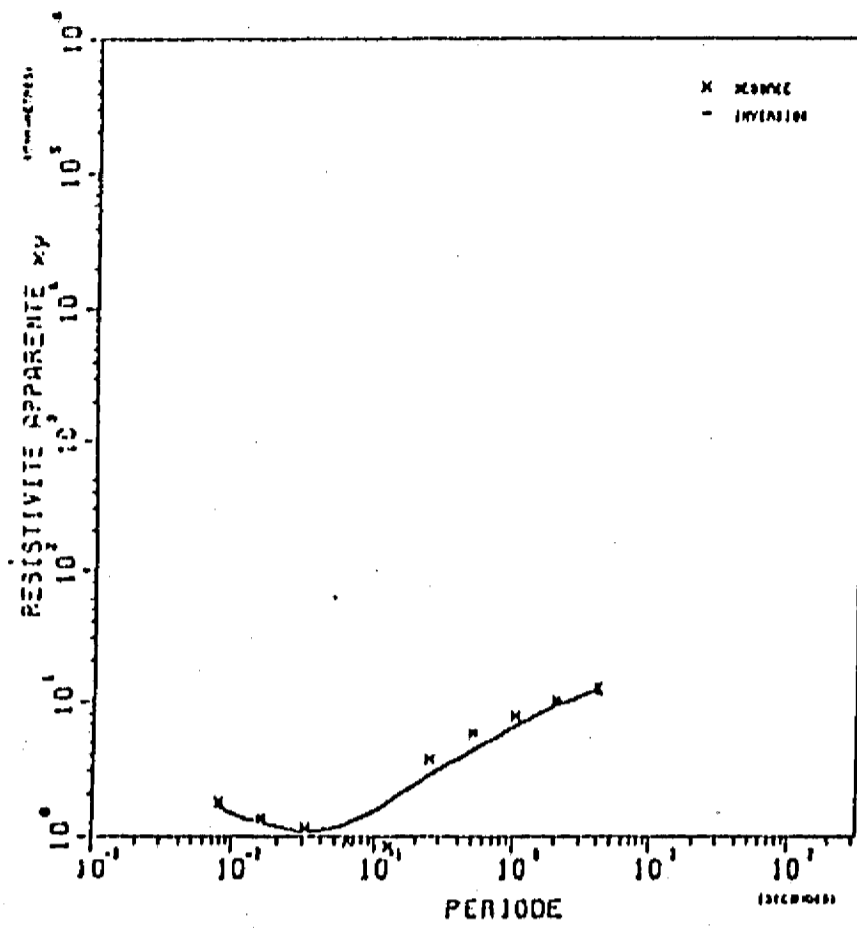
MODELE CALCULE	
RES (Ω -m)	EPAI (Km)
18.1	1.10E-02
1.02	11.50E-02
200.0	1.20E-02
51.0	----

ch01c10
 ch01c10



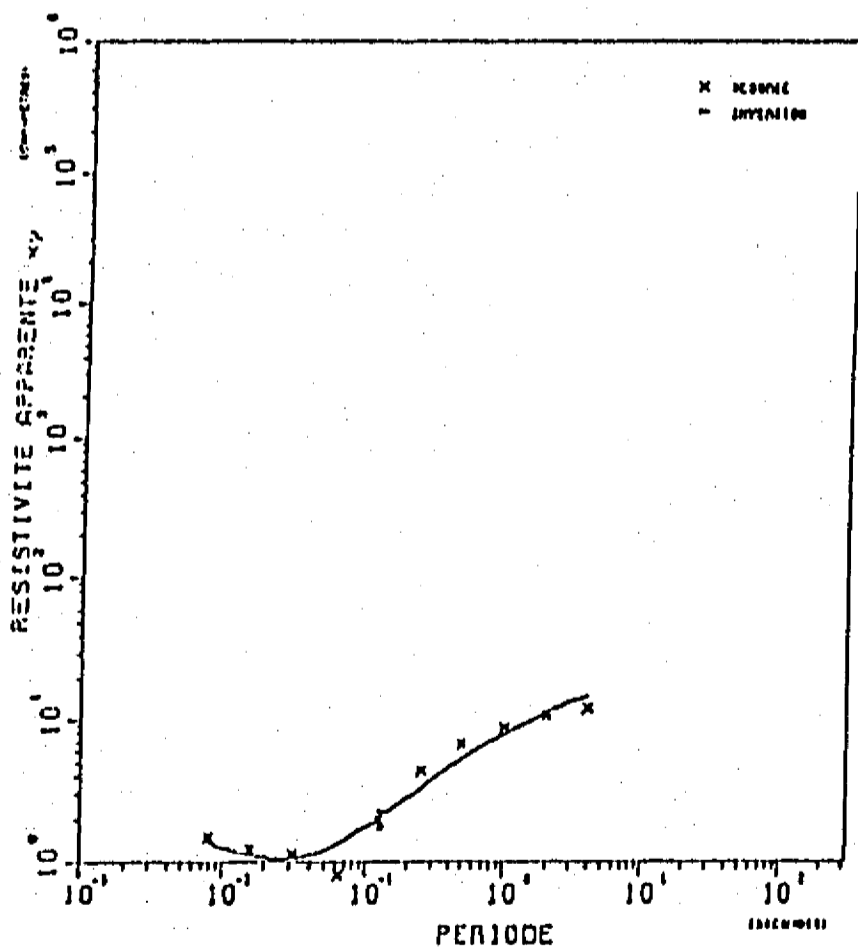
MODELE CALCULE	
RES (Ω -m)	EPAI (Km)
7.70	1.00E-02
0.98	10.80E-02
80.0	1.00E-02
49.0	----

chalcol1
 chalcol1



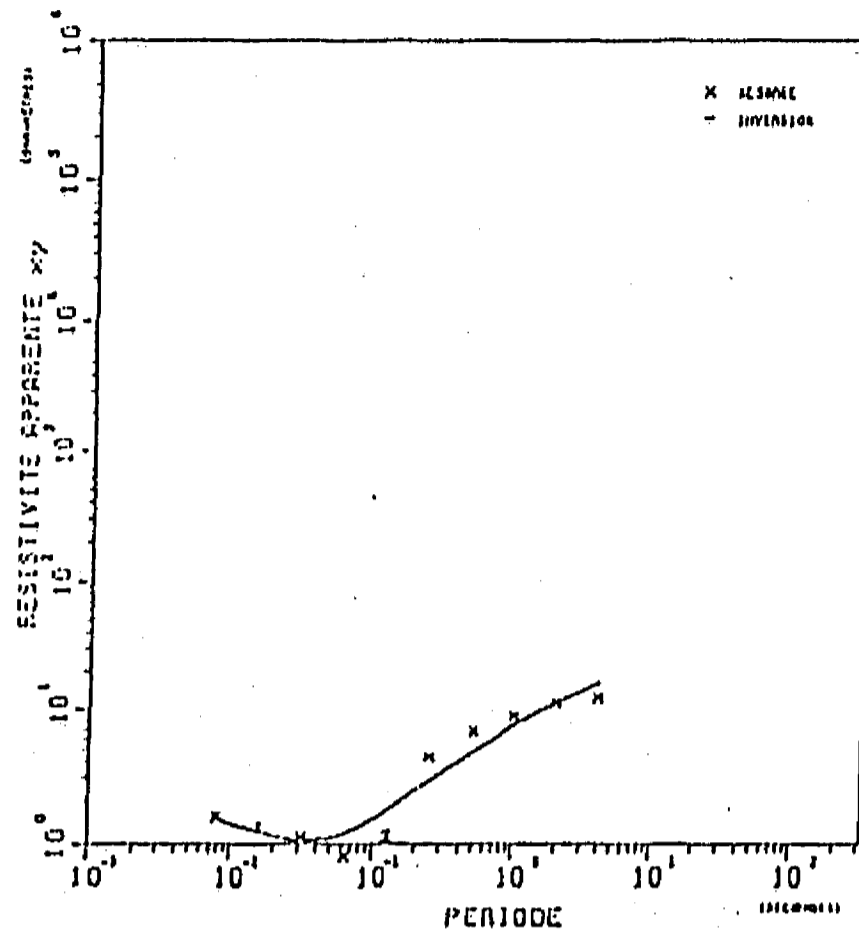
MODELE CALCULE	
RES (Ω -m)	EPAI (Km)
10.9	1.10E-02
1.01	10.80E-02
80.0	1.00E-02
33.6	----

chalcol2
 chalcol2



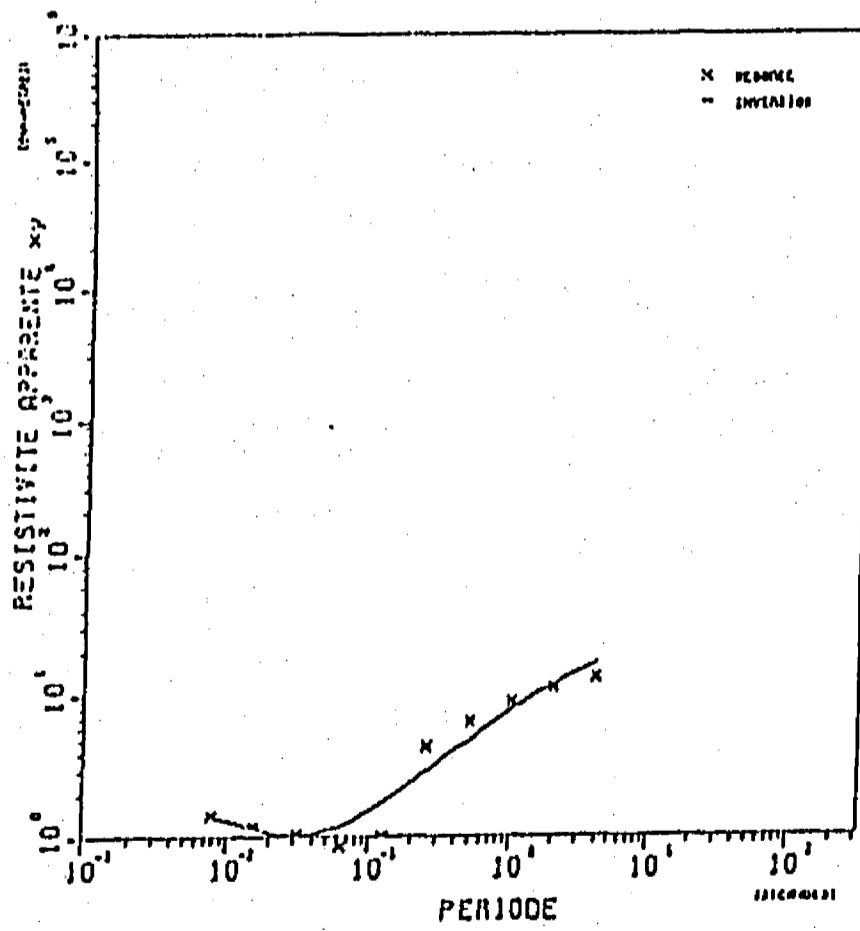
MODELE CALCULE	
RES (Ω -m)	EPAI (Km)
23.5	1.10E-02
1.49	11.00E-02
22.4	----

chalcol3
chalcol3

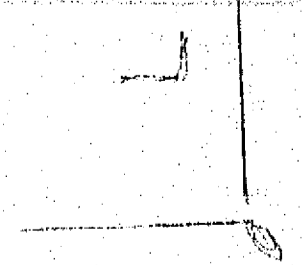
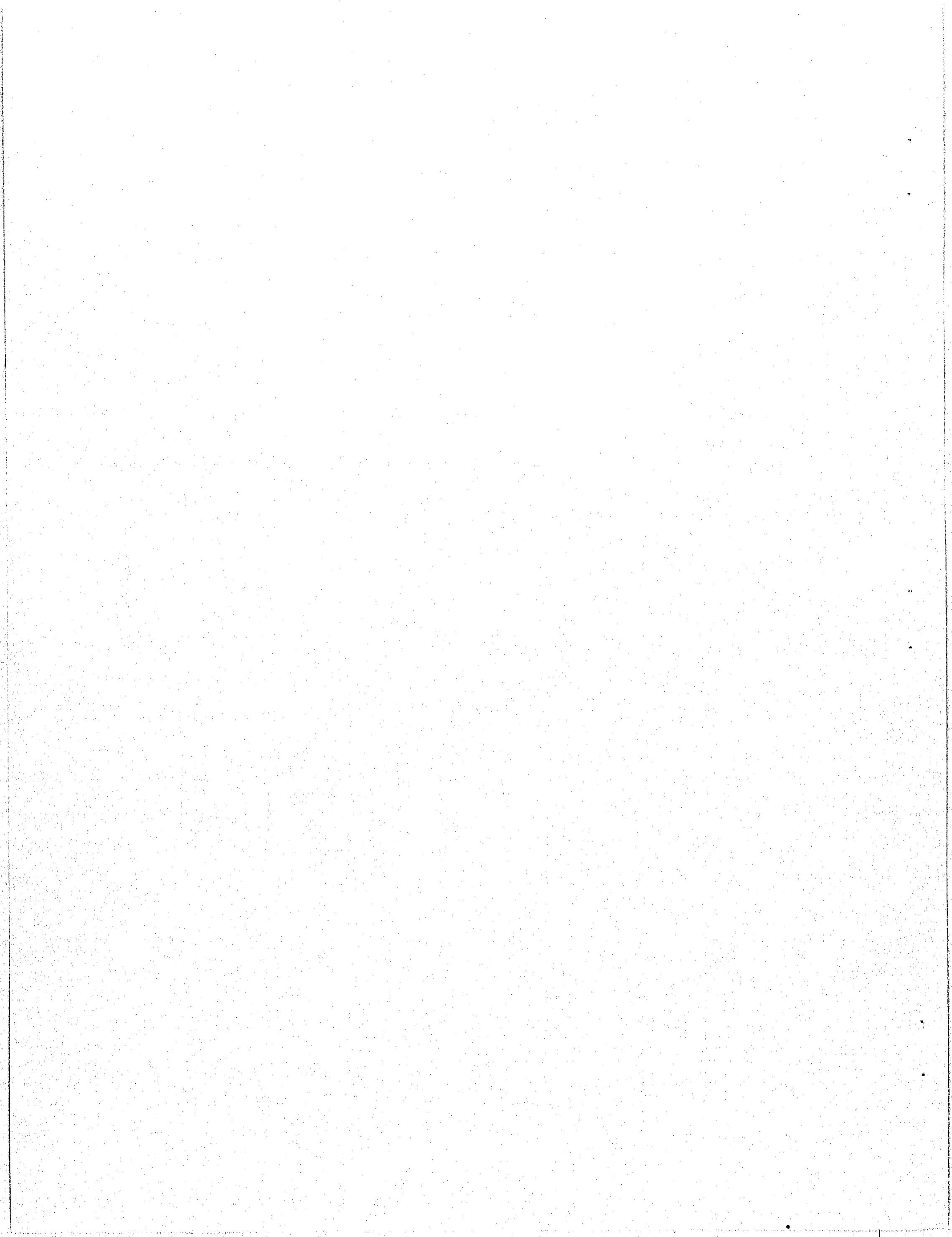


MODELE CALCULE	
RES (Ω-m)	EPAI (Km)
29.5	1.00E-02
1.09	9.60E-02
51.0	----

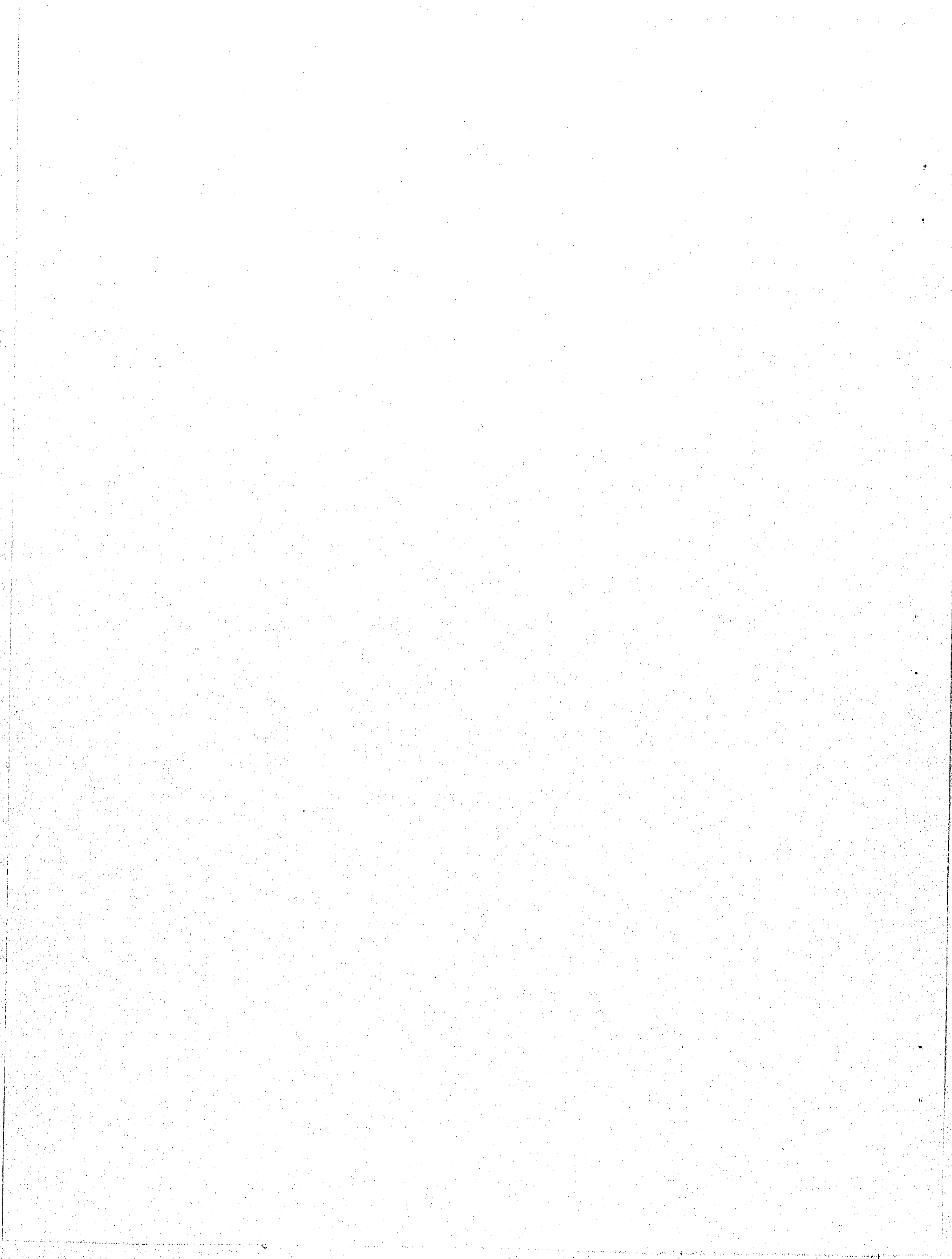
chalcol4
chalcol4



MODELE CALCULE	
RES (Ω-m)	EPAI (Km)
33.3	0.80E-02
1.05	10.00E-02
58.0	----

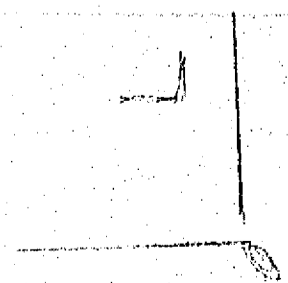
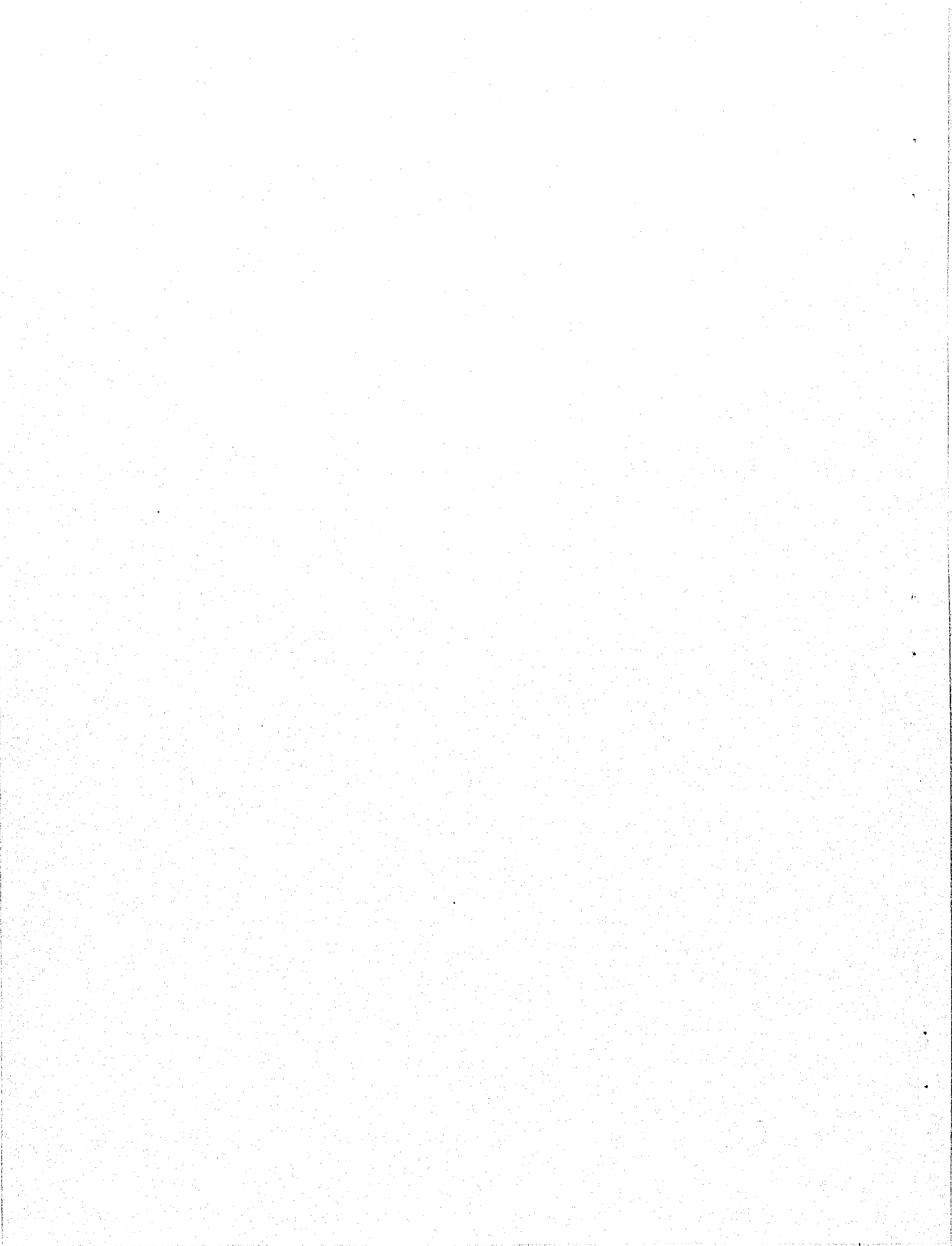


APENDICES



Handwritten marks at the bottom right corner, including a vertical line and a horizontal line forming a small corner, with some faint scribbles.

APENDICE A
OTROS INDICADORES DE CONTAMINACION



APENDICE A

OTROS INDICADORES DE CONTAMINACION

Algunas pruebas de laboratorio pueden proporcionar indicios sobre los procesos de contaminación. Permiten calcular un factor clave como lo es la cantidad de oxígeno necesario para la descomposición biológica aerobia de un material, expresando su fuerza contaminante.

Cuando un nutriente entra en el agua, los microorganismos aeróbicos consumen el oxígeno disuelto, al efectuar la descomposición del nutriente, de manera que se puede decir que ejerce una demanda sobre la disponibilidad de oxígeno disuelto. La demanda de oxígeno ejercida por una sustancia es una medida de su poder para causar contaminación.

A.1 Demanda bioquímica (o biológica) de oxígeno (DBO)

El agua en contacto con el aire se satura de oxígeno y a este fenómeno se le llama oxígeno disuelto (OD). Cuando el agua se contamina con materia oxidable como aguas negras u otros desechos industriales se reduce el OD. Esto puede no ser de cuidado si la contaminación no es muy intensa o si el oxígeno es rápidamente reemplazado por absorción atmosférica. Por otra parte, si existe intensa actividad microbiana y se descomponen muchas sustancias orgánicas, el oxígeno tiende a desaparecer, estableciéndose condiciones anaerobias.

En ríos y lagunas, los peces pueden morir cuando el contenido de oxígeno disminuye hasta valores menores de 50% de saturación, afectando plantas acuáticas (Walter et al, 1980). En cuerpos de agua este proceso se denomina eutricación.

La cantidad de oxígeno disuelto requerido para oxidar satisfactoriamente aguas negras y otros desperdicios se llama "demanda bioquímica de oxígeno" (DBO). La DBO se incrementa en proporción directa a la presencia de residuos vegetales, aguas negras y otros materiales oxidables que se encuentran en la corriente o cuerpo de agua.

La DBO, estima el oxígeno gastado en la descomposición biológica y es, efectivamente una simulación de laboratorio del proceso microbiano de autopurificación.

Este procedimiento se realiza de la siguiente manera : en una mezcla de residuos se diluye una mezcla conveniente con una población mixta apropiada de microorganismos. Se mide la concentración de oxígeno disuelto, y se incuba a una temperatura determinada. Después de un tiempo prefijado, se mide de nuevo la concentración de oxígeno disuelto. El cambio en la cantidad de oxígeno disuelto, da la cantidad de oxígeno utilizada durante este período de tiempo por los microorganismos al metabolizar nutrientes de dicha cantidad de agua. De este resultado se calcula la cantidad de oxígeno requerida para tratar un volumen diferente. La cantidad de nutrientes descompuestos en la prueba, y por tanto la cantidad de oxígeno disuelto consumido, dependen de la temperatura, la duración y la incubación (Winkler, 1986).

La completa descomposición de una muestra puede tomar varias semanas, de manera que para fines prácticos se utiliza un período de incubación más corto en el que se halla descompuesto una proporción razonablemente alta de la descomposición total (60 - 70% de materiales biodegradables). Las condiciones normales aceptadas son: incubar durante cinco días a 20 °C.

El proceso de descomposición de la prueba ocurre en dos etapas: En la primera, ocurre la descomposición de los nutrientes carbonáceos, cuya descomposición se acerca a su terminación después de tres semanas a 20 °C. En la segunda etapa, se oxidan primero los nutrientes nitrogenados; este proceso se hace significativo después de aproximadamente dos semanas a la misma temperatura, resultando predominante después de tres semanas. Así en la prueba de cinco

días, la DBO se debe virtualmente a la descomposición principal de nutrientes carbonáceos (Winkler, *op. cit.*)

La prueba de DBO es esencialmente un sistema microbiano de crecimiento, la mezcla de microorganismos debe tener los tipos capaces de metabolizar las sustancias presentes en la muestra. Por otra parte, las sustancias presentes deben suministrar un razonable balance nutricional para los microorganismos.

Es importante considerar que a veces algún componente de la muestra puede interferir con la prueba. Por ejemplo, si la muestra contiene fenol la prueba de DBO puede resultar cero ya que todos los microorganismos de la muestra están muertos y no se consumirá oxígeno. (Winkler, *op. cit.*)

Es apropiado seleccionar la correcta disolución de la muestra prueba, ya que si está demasiado concentrada, el oxígeno disuelto disponible se agotará antes de que transcurra el tiempo completo de oxidación. Por el contrario si está muy dividida y sólo se ha consumido una pequeña parte del oxígeno disuelto, los errores analíticos cometidos al determinar las concentraciones de oxígeno disuelto resultarán excesivamente significativos. Con una muestra desconocida, se debe usar un rango de diluciones de un tercio a un medio de oxígeno disuelto (Winkler, *op. cit.*)

Los nutrientes nitrogenados pueden originar problemas en la prueba del DBO, de la misma manera que causan problemas especiales de contaminación en las corrientes de agua. Debido a la lentitud del proceso de nitrificación, poca de la demanda nitrogenada de oxígeno (DNO) se podrá tomar en el período normal de incubación de 5 días a 20 °C.

Los productos químicos que reaccionan con el oxígeno (sulfitos, sulfuros, etc.), presentes en la muestra deformarán el resultado de la prueba del DBO, ejerciendo una demanda de oxígeno, a pesar de no ser, una demanda biológica.

A.2 Pruebas químicas de oxidación

La prueba del DBO ofrece limitaciones, especialmente el largo período transcurrido para obtener resultados. Se tratará de oxidar los contaminantes de la muestra usando un agente químico oxidante, haciendo la prueba más rápida y en general más reproducible.

Sin embargo el proceso de oxidación es totalmente diferente al de un sistema biológico (substancias orgánicas que no son biodegradables se oxidan químicamente y viceversa) por lo que la demanda de oxígeno evaluada químicamente no tiene la relación con la demanda de oxígeno que se ejerce en un proceso natural de autopurificación de una corriente de agua (Winkler, *op. cit.*)

No obstante, la demanda de oxígeno evaluada químicamente se puede, por lo general, correlacionar con la DBO de determinada muestra de agua.

Los agentes oxidantes más usados son el permanganato ácido de potasio, el bicromato ácido y el oxígeno a altas temperaturas. Otros sistemas de oxidación usan el permanganato alcalino de potasio, hipocloritos peryodatos y la combustión incompleta. El grado de oxidación de la prueba depende del sistema utilizado, del tiempo y la temperatura de la prueba (Winkler, *op. cit.*).

Los diferentes sistemas de oxidación pueden estar sujetos a interferencias de diversas substancias inorgánicas, como tampoco pueden ser correlacionados directamente los resultados de diferentes pruebas químicas.

A.2.1 Demanda química de oxígeno (DQO)

El oxígeno tomado por una muestra de agua residual del bicromato de potasio después de dos o tres horas de reflujo con ácido sulfúrico concentrado se conoce como demanda química de oxígeno (DQO) (Winkler, *op. cit.*).

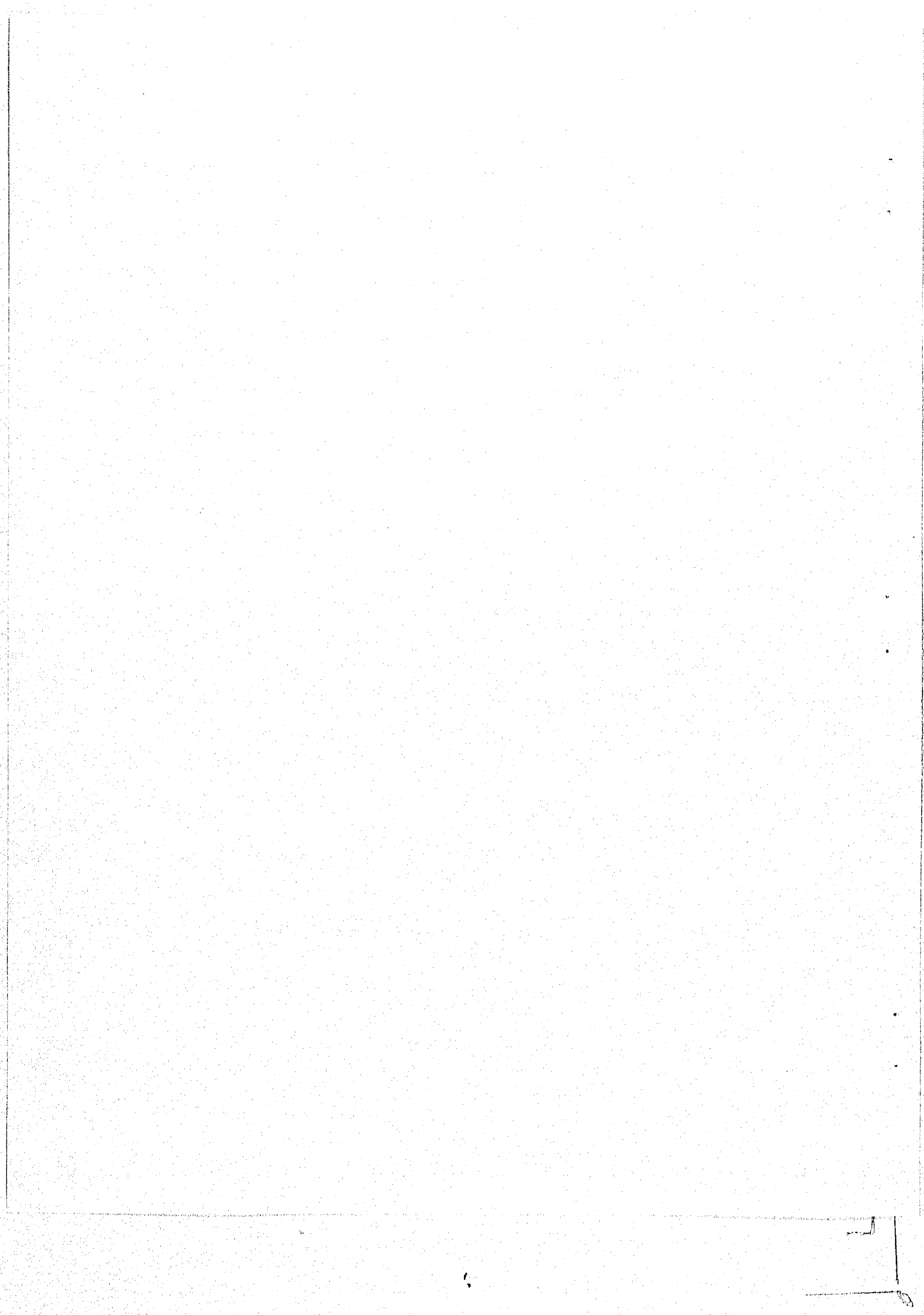
Casi todas las sustancias orgánicas se oxidan virtualmente en su totalidad con este procedimiento, con la excepción de ciertos compuestos aromáticos (piridina, benceno o tolueno). El valor de DQO da una idea del contenido orgánico total de un residuo (sea o no biodegradable), de manera que la relación DBO/DQO constituye una guía acerca de la proporción de las materias orgánicas presentes y las que son biodegradables.

La prueba del DQO está sujeta a la interferencia de cloruros, que se deben primero precipitar con sulfato mercúrico añadiendo sulfato de plata para catalizar la oxidación de los ácidos grasos.

A.2.2 Carbono orgánico total (COT)

Esta prueba permite determinar rápidamente en materia orgánica una pequeña cantidad de muestra.

Se inyectan pocos microlitos de muestra en un tubo que contiene un catalizador y que se mantiene a 900 °C. El anhídricocarbónico producido por la oxidación de materia carbonácea presente, se puede detectar por un analizador infrarrojo.



A P E N D I C E B

ACTIVIDAD MICROBIANA - FACTORES QUE AFECTAN LA SOBREVIVENCIA Y
MOVIMIENTO DE MICROORGANISMOS EN EL SUELO.

1

6

10

APENDICE B

ACTIVIDAD MICROBIANA - FACTORES QUE AFECTAN LA SOBREVIVENCIA Y MOVIMIENTO DE MICROORGANISMOS EN EL SUELO.

La inhibición de la actividad microbiana es importante para la eliminación de contaminación bacteriana superficial. Los microbios que lleva el agua son eliminados en gran escala al pasar a través de la superficie del medio. El contéo de coliformes decrece en función del espesor del filtro. Este contéo de la percolación en columnas de suelo de 1.5 - 2 m de longitud fue en la mayoría de los casos negativo en 100 cm³ (Matthers, 1982). También se ha encontrado que bacterias coliformes se han movido más rápidamente a través de materiales gruesos que en materiales finos después de pasar las capas de suelo biologicamente más efectivas, ya que el fluido encuentra menor superficie de contacto en los primeros, que en los últimos.

Excepto para tipos celulares que forman esporas, las bacterias que no encuentran suficientes nutrientes para su propagación bajo la superficie pueden ser capaces de multiplicarse en un tiempo sorprendentemente largo (a menudo algunos meses). Experimentos de sobrevivencia de bacterias coliformes y bacterias intestinales patógenas (Salmonelas) realizados en suelos arenosos han demostrado que después de dos meses todos los microbios están todavía vivos y que los coliformes (*E. coli*) sobreviven después de cuatro meses.

EL metabolismo microbiano es de gran importancia en la calidad del agua. Los microorganismos, no afectan la dirección de ninguna reacción resultado de restricciones termodinámicas del sistema, pero afectan la razón de la reacción. Por ejemplo, los sulfuros, el azufre y el tiosulfato en el suelo, pueden oxidarse sin ayuda microbiana. Sin embargo, la oxidación por procesos microbianos se realiza más rápidamente.

Bajo condiciones óptimas, de temperatura y actividad microbiana, los factores físicos y químicos son poco importantes comparados con los biológicos (Alexander, 1961).

Los microorganismos autotrofos, utilizan el CO_2 como fuente energética exclusiva para su metabolismo, obteniendo la energía necesaria, para este proceso, de la luz solar o de la oxidación de sustancias inorgánicas (hierro ferroso y manganeso). La mayoría de los microorganismos pueden usar sustancias orgánicas como carbón y fuentes energéticas, transformando estos ricos complejos energéticos en algunos más simples y finalmente en CO_2 y agua.

Los microorganismos se encuentran en gran número en cualquier lugar del suelo, pero también en el agua. En un gramo de suelo, existen alrededor de 25 billones de microbios con un peso seco de alrededor de 1 mg. Las condiciones geoquímicas son de gran importancia para su tamaño, adaptabilidad, crecimiento y razón metabólica. Una bacteria individual puede dividirse aproximadamente cada media hora, por lo que en condiciones óptimas pueden crecer en un día a 2^{48} individuos.

En la práctica, este número nunca se alcanza por falta de los nutrientes necesarios y por los desechos producidos que inhiben el metabolismo al no poder ser eliminados rápidamente. La razón metabólica de los microorganismos es considerable, en una hora pueden metabolizar cerca de 1000 veces su propio peso.

La población microbiana del agua subterránea puede tener considerables variaciones respecto a horizontes de suelos cercanos a la superficie y aguas someras, ricas en nutrientes. La composición de la microflora y conteo bacterial son influenciados por cambios en factores del medio ambiente, tales como la percolación de aguas ricas en nutrientes o por polución de agua subterránea.

B.1 Factores que afectan la sobrevivencia de los microorganismos

Uno de los mas importantes factores ambientales es la presencia o ausencia de oxígeno. Los microorganismos pueden dividirse, en este sentido, en tipos aeróbicos y anaeróbicos. El

oxígeno es un veneno mortal para tipos anaeróbicos, aunque otros organismos más simples, como las bacterias, usan el oxígeno ligado con moléculas orgánicas complejas o en moléculas inorgánicas (nitratos y sulfatos) en lugar de oxígeno libre. Otros grupos, (aerobios) requieren oxígeno libre para su metabolismo.

La gran mayoría de los microbios (al menos 80%) crecen en superficies sólidas formando concentraciones celulares que cubren el suelo con secreciones. Pero el transporte pasivo es posible al liberarse células y propagarse en el agua subterránea, que aunadas con diferencias locales en la calidad de agua pueden influir en su crecimiento.

La densidad de las poblaciones dependerá esencialmente de la cantidad de nutrientes y la eliminación de productos metabólicos dañinos. En presencia de fuentes energéticas, (principalmente sustancias orgánicas) los microorganismos pueden vivir a profundidad. Ya que generalmente el oxígeno libre decrece hacia abajo, los microorganismos aeróbicos disminuyen no así los anaeróbicos que se encuentran a varias profundidades; se han encontrado bacterias sulfato-reductoras en secuencias de rocas calizas, yeso y carbón a profundidades de cerca de 500 metros. También se han hecho hallazgos en depósitos de petróleo y en sedimentos marinos a más de 2700 metros (Davies and DeWiest, 1967). La evidencia de largos periodos de actividad de microorganismos a profundidad está dada por la presencia de sulfuros de hidrógeno y bajos contenidos de sulfatos en pozos recién perforados en cuerpos de agua subterránea.

La profundidad a la cual es posible determinar actividad microbiana está en función del suministro de nutrientes, su pH, contenido de sal, temperatura del agua subterránea y permeabilidad del acuífero. La humedad y temperatura son factores esenciales en la sobrevivencia de virus y bacterias, aunque en las bacterias los resultados son complejos por la posibilidad que tienen de reproducirse. Hay mayor supervivencia durante la temporada de lluvias en la mayoría de los suelos. En 1980, Keswick y Gerba encontraron que la sobrevivencia de virus es mayor dependiendo de

la profundidad de penetración. Este factor también se incrementa con el grado de adsorción viral al suelo. Las bacterias tienen corta vida en suelos ácidos (pH 3-5). Hay que notar que a temperaturas arriba de 100 °C la mayoría de los organismos probablemente morirán. Las bajas temperaturas favorecen la supervivencia de la mayoría de las bacterias (< 4 °C). Altas concentraciones de NaCl tienen solo un pequeño efecto adverso en la actividad microbiana y su población tiende a adaptarse al medio salino.

Gerba y otros (1975), encontraron actividad viral en columnas de suelo después de 6 meses. Hendricks y otros (1979) encontraron sobrevivencia de algunas salmonelas en diferentes suelos, 70 días después. En suelos secos las bacterias no sobrevivían más de 20 días y en suelos ácidos este tiempo se reducía a la mitad. También observaron que las coliformes bajo condiciones frescas y húmedas pueden sobrevivir por muchos meses. Si las condiciones son secas y calientes es posible la eliminación de contaminación fecal a los dos meses.

Los virus difieren fundamentalmente de otros microorganismos que se encuentran en el agua. Consisten de un solo tipo de ácido nucleico rodeado por una cubierta protectora de proteínas. Son transmitidos como partículas inertes e incapaces de replicarse fuera de una célula viviente. Tienen la habilidad de causar enfermedades en la gente que los ingiere al beber agua. Más de 100 tipos diferentes de virus han sido aislados en materia fecal. Son conocidos como enterovirus, auténticos enterovirus (polio, echo y coxavirus), reovirus, adenovirus y rotavirus (como el agente de la hepatitis infecciosa).

En general, la dosis infecciosa para virus son bajas (<100 organismos comparado con 1000 o más en bacterias) la resistencia de la inactivación varía dependiendo de los diferentes tipos de virus. Pueden ser transportados, al igual que las bacterias, mediante filtración en el agua subterránea y al ser ingeridos causan infección. Sin embargo, el principal mecanismo de contagio es por comida contaminada, mal aseo, moscas o por vía hematogena.

B.2 Factores que afectan el movimiento de organismos patógenos.

La zona no saturada es la línea de defensa más importante contra la contaminación fecal de acuíferos. El tiempo de permanencia en la zona no saturada parece ser un factor clave en la eliminación de bacterias.

La filtración, parece ser el mecanismo involucrado en la eliminación de microorganismos en la zona saturada, sólo en estratos de grano fino donde el diámetro de los poros del acuífero sean menores que el tamaño de los organismos ($< 0.5 \times 10^{-6} \text{ m}$)

Sin embargo los virus son más pequeños que las bacterias y su remoción parece realizarse totalmente por adsorción. Se ha encontrado (Lewis y otros, 1980), que la adsorción de estos coloides hidrofílicos está fuertemente influenciada por el pH del terreno, la presencia de cationes y la de grupos ionizables. Los virus son fuertemente negativos a pHs altos y altamente positivos a bajos pHs. El pH isoeléctrico para virus entéricos es usualmente menor de 5. En el rango de pHs de la mayoría de los suelos los enterovirus tienen carga negativa. Los pHs bajos favorecen la adsorción de virus.

Sin embargo los microorganismos adsorbidos en las partículas del suelo no necesariamente permanecen inmóviles. La adsorción es un fenómeno reversible y los microorganismos pueden seguir penetrando el suelo. En 1972, Goldshiml y otros al investigar el comportamiento de *E. Coli* en columnas de arena estériles encontraron que la remoción era mayor utilizando agua de la llave que agua destilada. Al usar agua triple destilada casi no ocurrió remoción bacteriana. También observó que disminuyendo el pH de 9 a 4 o incrementando la concentración de cationes o su valencia, aumentaba la capacidad de remoción del suelo. Otros investigadores (Landry et al., 1979) observaron que inundando el suelo con agua desionizada se incrementaba el movimiento de virus y que el número de virus movilizado con el agua de lluvia, dependía de la especie de virus.

El fenómeno de desadsorción que disminuye con la fuerza iónica tiene fuertes implicaciones para la contaminación del agua. Las bacterias y virus previamente adsorbidos pueden ser liberados por fuertes lluvias.

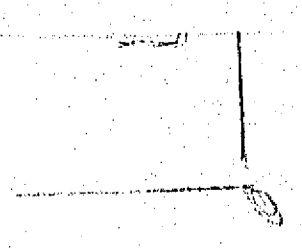
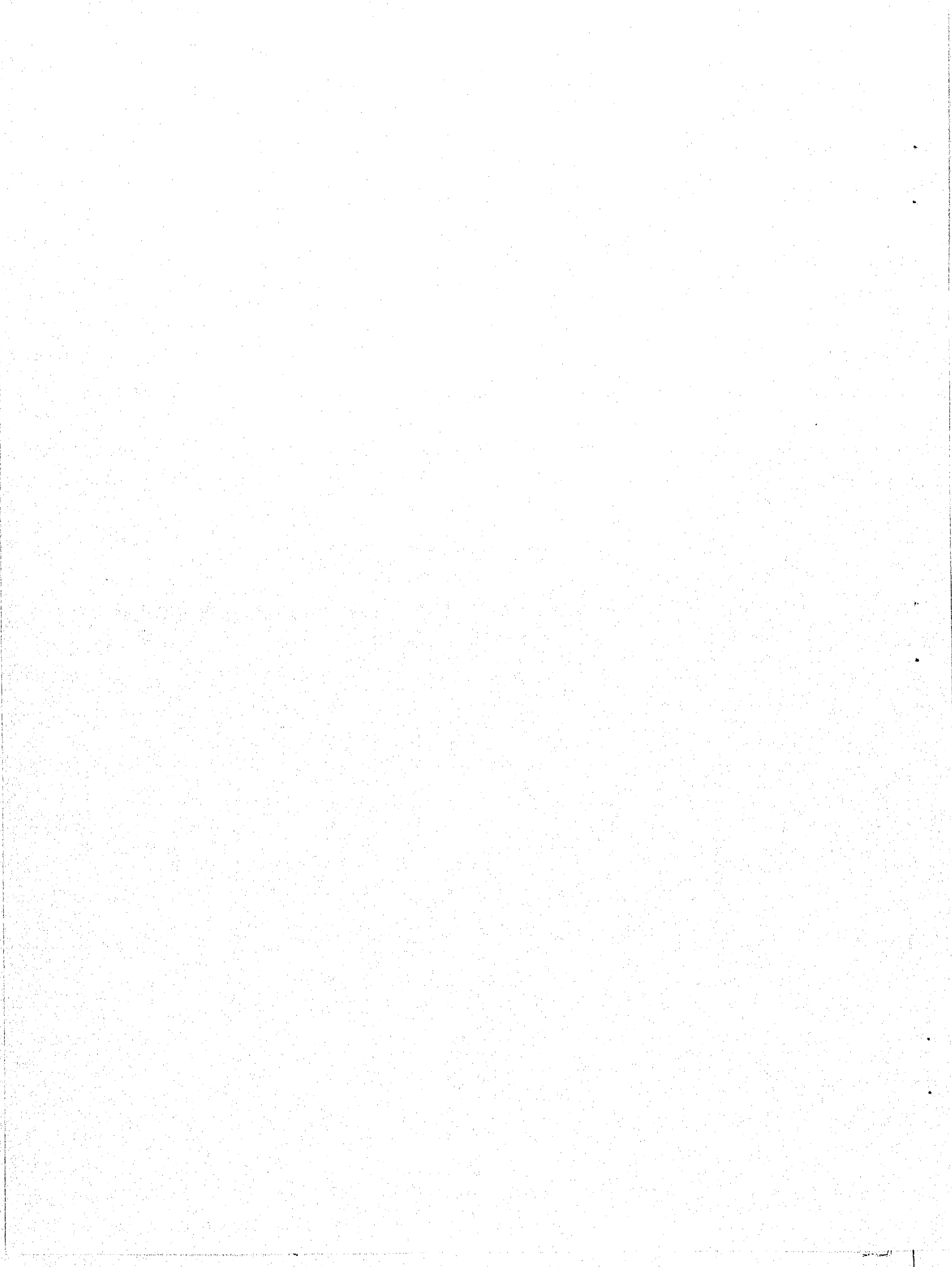
Sin embargo, Lance y Gerba (1980), sugieren que la velocidad de movimiento del agua a través del suelo puede ser el factor más importante en la penetración de virus en el suelo. Una vez que las bacterias y virus penetraron el nivel piezométrico pueden ser transportados considerables distancias y su movimiento controlado por factores hidrogeológicos.

La información acerca de virus y bacterias en la zona saturada es limitada, se conoce poco de la sobrevivencia de virus, aunque parece ser que su efectividad está principalmente determinada por la temperatura y el grado de contaminación. Es mayor en agua limpia o muy contaminada (Akin *et al.*, 1971). En bacterias, se acepta generalmente que su sobrevivencia debe ser mayor en el agua subterránea que en la superficie, debido a la ausencia de luz solar. Otra vez, la temperatura es importante (mayor sobrevivencia a bajas temperaturas). La naturaleza química del agua también afecta la sobrevivencia; las bacterias entéricas son generalmente intolerantes a condiciones ácidas.

APENDICE C

BREVE HISTORIA DE LA BASURA Y DE LOS LUGARES DE DISPOSICION FINAL
EN LA CIUDAD DE MEXICO

1



APENDICE C

BREVE HISTORIA DE LA BASURA Y DE LOS LUGARES DE DISPOSICION FINAL EN LA CIUDAD DE MEXICO

En nuestro país, desde la época prehispánica, el manejo de la basura, era importante. Algunas crónicas, realzan la limpieza de la gran Tenochtitlan. Fray Juan de Torquemada menciona la organización existente en el servicio de limpia, que se encargaba de barrer y regar las calles y calzadas de esta gran metrópoli (alrededor de 300 000 habitantes), quemando en braseros durante la noche la basura (Vizcaino, 1986).

La llegada de los españoles y la destrucción de la gran Tenochtitlan para dar lugar a otra ciudad, primordialmente europea, rompe la organización azteca, ocasionando con el tiempo que la Ciudad de México se convierta en una urbe sucia. En el siglo XVII, el Virrey Revillagigedo, establece un sistema de recolección de basura por medio de carros tirados por bestias, con la finalidad de evitar muladares. Luis González Obregón, en su libro *La vida de México en 1810*, nos ofrece una imagen de esta época diciendo *-Los barrios de la ciudad eran polvosos, llenos de basuras... Los perros famélicos husmeaban en los muladares poblados de asquerosas moscas....* (Vizcaino, *op. cit.*).

Durante la Reforma, la Ciudad contaba con un servicio de limpia constituido por 80 carretones tirados por animales, que costaba \$ 50 000 pesos al año. En esa época, se formó una comisión para instalar un incinerador municipal. Este proyecto, no se realizó por las emisiones contaminantes que generaría. Algunos datos de este siglo (Vizcaino, *op. cit.*) indican que el servicio de limpia estaba formado por 1 500 personas, 190 carretones de 2.5 m³ y algunos camiones. En 1938, se intenta establecer la primera planta de industrialización de basura. Dos años más tarde, se instalan tres plantas, con equipo y empleados extranjeros, en

Tetepilco, Azcapozalco y en las cercanías del aeropuerto, que fueron clausuradas en 1943.

La historia de los tiraderos de desechos sólidos, es reciente. Existe poca información antes de los años 40s. A partir de esta fecha surgen los primeros líderes que organizan el trabajo de los pepenadores y la compra y venta de los materiales rescatados de la basura. Durante el período presidencial del General Cárdenas, se constituye el Frente Unico de Trabajadores Pepenadores de los Tiraderos del Distrito Federal, apoyados por el Sindicato de Limpia y autoridades del DDF (PNUD/Bco Mundial, 1984). Se mencionan como los cinco principales tiraderos de la Ciudad: Santa María Aztahuacan, La Jarana, El Cuatro Vientos, El Dos Rios y la Magdalena.

El desarrollo urbano de la Ciudad, principalmente hacia el Este, obliga al cierre de algunos tiraderos que fueron clausurados cubriéndolos con tierra (La Viga, La Magdalena, el Peñón, entre otros). Obligando a que en el tiradero de Santa Cruz Meyehualco, que había estado funcionando desde 1924, se intensificara la disposición de basura y llegara a ser el basurero más grande del Distrito Federal (184 hectáreas) (PNUD/Bco Mundial, *op. cit.*). En 1950, se abre oficialmente, con 200 pepenadores, el tiradero de Santa Fe, que funcionaba clandestinamente desde 1957.

En los años 70s, el servicio de limpia cuenta con 8000 trabajadores y 600 vehículos recolectores, con un costo anual de 150 millones de pesos. Ciento veinte barredoras mecánicas, limpian 5 mil kilómetros de calles al día y más de 4000 barrenderos y recolectores cubren 7000 mil kilómetros para atender a la población de la Ciudad de México que genera diariamente 7000 toneladas de basura. (Vizcaino, *op. cit.*).

La Ciudad de México se dividió en 27 sectores de limpia; sin embargo, al año siguiente las Delegaciones del Distrito Federal tomaron a su cargo este servicio, en sus jurisdicciones correspondientes, aumentando a treinta los sectores de limpia.

El centralismo de la administración pública, la desmedida expansión de la Ciudad, el crecimiento de la población y una mala

planeación hacen que el actual sistema de recolección, depositación y reciclaje de residuos sólidos, no sea el más adecuado para nuestra metrópolis.

La basura como desecho de la Sociedad, aparece sin valor comercial en el ciclo de la circulación de mercancía; sin embargo, al ser beneficiada con el trabajo de los pepenadores adquiere un valor monetario, es entonces, cuando la basura en un determinado porcentaje, deja de ser un desecho para convertirse en materia prima de numerosos procesos industriales.

La basura en nuestro país ha generado poder y corrupción. Los tiraderos de basura son controlados por un grupo de líderes, a costa de familias enteras de pepenadores, que en condiciones infrahumanas, viven de la basura dedicándose al reciclaje de productos con valor comercial (vidrio, cartón, trapo, hueso, metal, etc).

En números relativos, el incremento porcentual de la basura, ha sido, en promedio, del 30 % anual durante los últimos cinco años. De 1975 a 1979, la basura tuvo un aumento del 230 % (Castillo, 1983).

D.1 Lugares de disposición final.

En nuestro país, la técnica más utilizada para la eliminación de residuos sólidos es su disposición en tiraderos a cielo abierto.

La Ciudad de México alberga, actualmente más de 19 millones de habitantes en una superficie de alrededor de tres mil kilómetros cuadrados de los cuales un poco más de la tercera parte corresponde a la zona urbana, que comprende el Distrito Federal y municipios conurbados del estado de México. La Ciudad de México presenta grandes contrastes :Una sociedad opulenta, que vive en áreas urbanizadas, que derrocha bienes de consumo, frente a zonas proletarias sobrepobladas y cinturones de miseria, sin servicios ni agua, que viven en cuevas y casas de cartón.

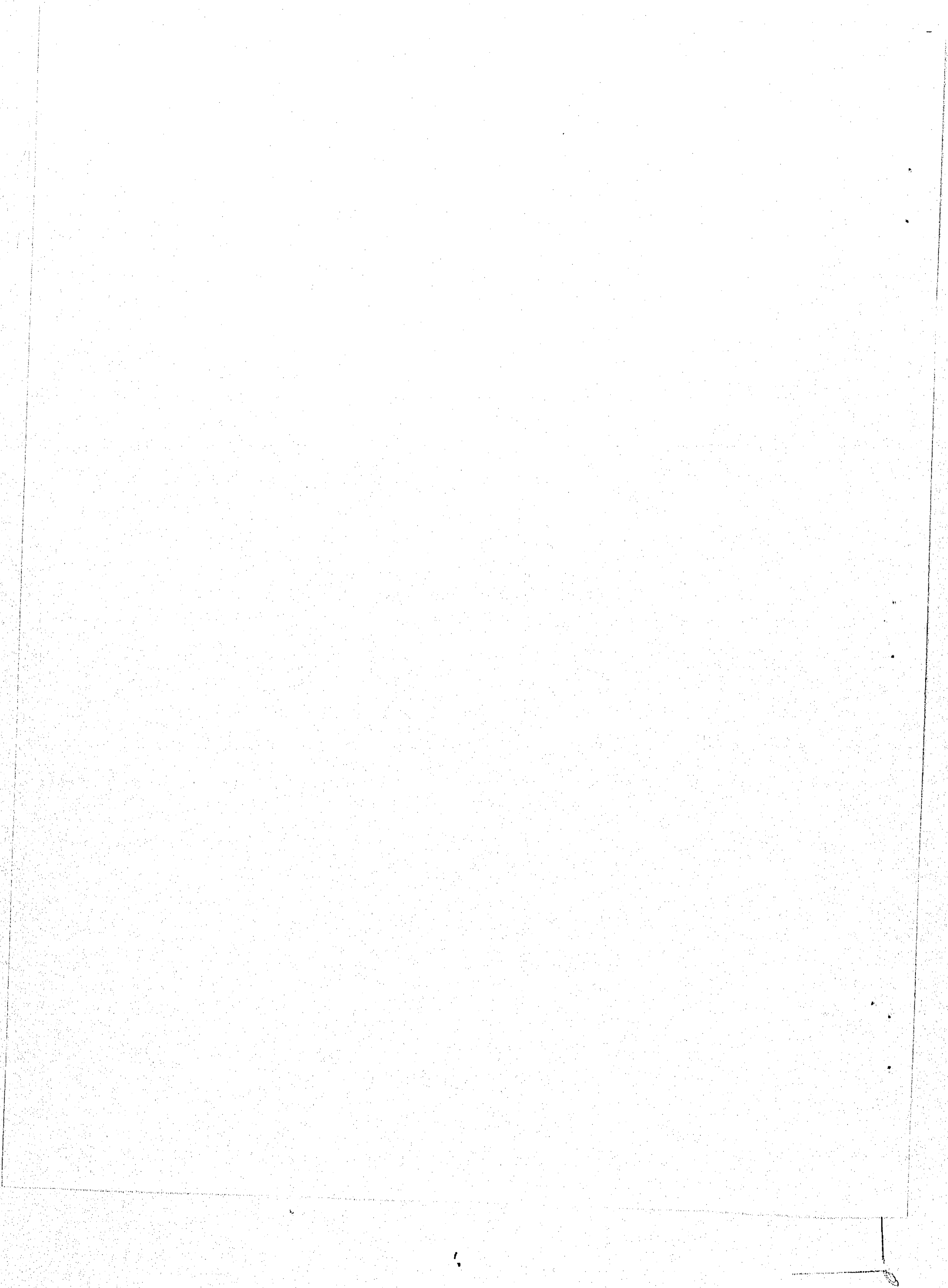
Dentro de la problemática de las grandes metrópolis, la basura parece ser haberse convertido en un asunto sin solución que ha rebasado todas las expectativas posibles. Hablar de volúmenes de basura en la Ciudad de México, es hablar de su población, del ritmo de crecimiento de la misma y de sus crecientes necesidades de consumo. Si consideramos el área metropolitana, una población de 20 millones y que cada habitante de esta gran metrópoli elimina diariamente 800 gramos de basura se están generando alrededor de 16,000 ton/día que requieren ser depositadas.

Desde hace mucho tiempo, en diversos rumbos de la Ciudad, han sido establecidos una serie de lugares de depositación de residuos sólidos (Santa Fé-Prados de la Montaña, San Lorenzo Tezonco, Santa Cruz Meyehualco, Santa Catarina, Bordo Poniente, Bordo Xochiaca, Tlahuac, Tlalpan, etc...). Algunos pequeños, clandestinos, y otros grandes tiraderos oficiales de desechos domiciliarios, hospitalarios, etc., que carecen de instalaciones adecuadas y en los cuales los residuos sólidos en la mayoría de los casos, después de la pepena son cubiertos por tierra. Su gradual transformación de tiraderos a cielo abierto a relleno sanitario reviste connotaciones técnicas y sociales: implica la selección de sitios para su localización, problemas de territorialidad entre el DDF y el Edo. de México, reubicación de pepenadores, etc...

Hoy día, algunos de estos grandes tiraderos han sido cerrados con la idea de habilitarlos como parques (Santa Cruz Meyehualco, Santa Fe). Sin embargo, existe la problemática, no resuelta, de la producción de biogas. Actualmente, en el antiguo tiradero de Santa Cruz Meyehualco se esta aprovechando el biogas para generar energía y dotar de electrificación al nuevo parque.

La recomendación a este problema, sería el cierre definitivo de tiraderos a cielo abierto, selección del tipo de residuos y la utilización de otro tipo de sistemas de disposición final de residuos sólidos (composteo, incineración, etc) y por otra parte resolver el problema social que representan este núcleo de trabajadores, tradicionalmente marginados, que producen gran cantidad de recursos con la basura.

APENDICE D
ESTUDIOS EXPERIMENTALES SOBRE LIXIVIADOS



APENDICE D

ESTUDIOS EXPERIMENTALES SOBRE LIXIVIADOS

El hecho de simular rellenos sanitarios, en columnas cilíndricas de diferentes alturas que contengan materiales similares y aproximadamente, la misma edad y condiciones de percolación, nos permite evaluar la evolución química y las características contaminantes de basureros con diferentes espesores (Syed and Buchinal, 1970).

Los estudios de lixiviados en rellenos sanitarios han determinado, que si el material de relleno está en contacto continuo o intermitente con el nivel freático puede hacer que se contamine el flujo subterráneo en la vecindad del relleno, alterando la calidad del agua para uso doméstico e irrigación. Ya en 1932, se reportaban incrementos en calcio, magnesio, sólidos totales y dióxido de carbono en un pozo alejado 150 metros de una planta de reducción de basura al quedar una parte del contenido atrapada (Syed y Burchinal, *op. cit.*).

D.1 Experimentos en la Universidad de Virginia Oeste

Aunque es difícil controlar en forma satisfactoria variables tan importantes como la cantidad de relleno, percolación, precipitación y mecanismo de lixiviación, esto es posible hacerlo controlando, entre otros factores, las características del residuo depositado y los volúmenes de agua. Un experimento así, fue realizado en la Universidad de Virginia Oeste, Estados Unidos (Syed y Burchinal, *op. cit.*): consistía en 3 cilindros de concreto de 0.9 m de diámetro montados sobre una gruesa base de concreto. Las

alturas de estos cilindros fueron de 1.2, 2.4, 3.6 m respectivamente y designados como los cilindros A, B y C. También se colocaron puertos de muestreo a intervalos de 1.2 m y termopares para medir la temperatura cada 0.6 m. Una capa de ladrillo refractario de 7.5 a 12.7 cm se colocó en el fondo de cada cilindro, para asegurar que las muestras de lixiviado se encontraran libres de agua de desagüe.

El material de llenado de los cilindros, consistía de mezclas de basura municipal obtenida, durante el verano, del relleno sanitario de Morgantown. Se eliminaron latas, botellas, piedras y pedazos de lana y la basura se compactó en los cilindros A, B y C. A intervalos de 7.6 cm se colocaron capas de tierra y al completar el contenido de los cilindros se cubrieron con una gruesa cubierta de lana (1/2 m) para evitar la precipitación natural. Volúmenes de agua equivalentes a 42.3 cm de precipitación (el volumen de agua suficiente para saturar la basura en el cilindro C), se aplicaron a todos los cilindros durante los tres días siguientes al llenado de los cilindros. Durante los períodos de prueba, se incorporó el equivalente de 7.6 cm de agua de precipitación a todos los cilindros en intervalos de 2 semanas. Al agua suministrada se le permitió percolarse permaneciendo en el fondo de los cilindros hasta el fin de la primera semana, en que se aplicó otra cantidad, al fin de la segunda semana.

Las medidas de temperatura, se iniciaron después de compactar la basura. La temperatura se elevó a su máximo dentro de un corto período y después declinó gradualmente hasta que en 2 semanas se comportó de acuerdo a las variaciones estacionales y fluctuaciones diarias en la temperatura del aire.

Los volúmenes de agua aplicada en los cilindros A y B durante el período de prueba de 163 días fue el equivalente a 116 cm de precipitación. En el cilindro C, se aplicó un volumen de 103.7 cm durante 121 días. Se retiraron de los cilindros, respectivamente, 94.8, 80.4, 51.7 cm de volúmenes equivalentes de precipitación para los lixiviados. La fracción de agua producida bioquímicamente, a través de la descomposición se despreció.

D.1.1 Características y evolución de los líquidos percolados

Después de la recolección, las muestras iniciales de lixiviado, fueron verde oscuras y pronto se hicieron más oscuras y sépticas. Contenían grandes cantidades de componentes orgánicos e inorgánico. Observándose, un incremento gradual en las concentraciones de los materiales de lixiviado y posteriormente, una prolongada declinación en las concentraciones producto de la descomposición de materiales. También, se observa un ligero incremento en el pH durante el primer mes, seguido de una rápida disminución. Un pH mínimo de 5.3 se observó a los 79, 135 y 93 días en los cilindros A, B y C respectivamente indicando acumulación de ácidos grasos (figura D.1a). La población bacteriana, se vió afectada adversamente por el cambio de pH y por la acumulación de productos finales (figura D.1b). La máxima población bacteriana en todos los cilindros corresponde, a valores máximos de pH. Después del cual las poblaciones declinan en forma constante o similar al comportamiento del pH. Decrementos de 90% y más, se observan en las poblaciones bacterianas de todos los cilindros al final del período de prueba (Syed and Burchinal, *op. cit.*)(figura D.1b).

Las muestras de lixiviado contienen altas concentraciones de materia orgánica y valores máximos de DBO, 40, 70 y 85 veces mayores, que el agua residual de origen doméstico para los tres cilindros (figura D.1c).

En el relleno, la fermentación aerobia implica un conjunto de procesos biológicos que se desarrollan en presencia de oxígeno. Esta fase se caracteriza, algunos días después del depósito, por un aumento muy fuerte de temperatura de los desechos (alrededor de 60° C) y formación de CO₂, amoníaco y agua. Estos procesos duran sólo algunas semanas, ya que la cobertura del relleno con tierra y su compactación, limitan la circulación de aire. Al faltar el oxígeno, se realiza una fermentación de tipo anaerobia caracterizada por oxidación y reducción de materia orgánica, por microorganismos especializados, en CO₂ y metano. Este proceso es dominante en el relleno sanitario.

En las muestras iniciales (Syed and Burchinal, *op. cit.*), se observan picos en nitrógeno orgánico que según transcurre el tiempo (10 semanas) se convierte en amoníaco. La concentración de sólidos totales, por pié de basura, decrece al aumentar la profundidad de llenado. Los fosfatos, juegan un rol fisiológico importante en la liberación y acumulación de energía durante el metabolismo. Los sulfatos en el lixiviado se producen de cenizas, materia inorgánica y azufre orgánico producido por descomposición microbiana de aminoácidos. Por otra parte, el alto contenido de hierro en los rellenos simulados (figura D.2a), se puede atribuir a su bajo pH. También se encontró, que las muestras eran ricas en sodio, potasio, calcio, magnesio y cloruros. Parece existir, un considerable control mecánico en el caso de iones inorgánicos como cloro y el sodio. Las curvas de concentración vs tiempo para sodio, potasio y magnesio fueron muy similares, obteniéndose un valor pico entre las 2 y 4 semanas decreciendo después, gradualmente. Las muestras iniciales de lixiviado, tienen altas concentraciones de cloruros (figura D.2b). El calcio en los tres cilindros alcanzó su máximo valor después de ocho semanas (figura D.1c).

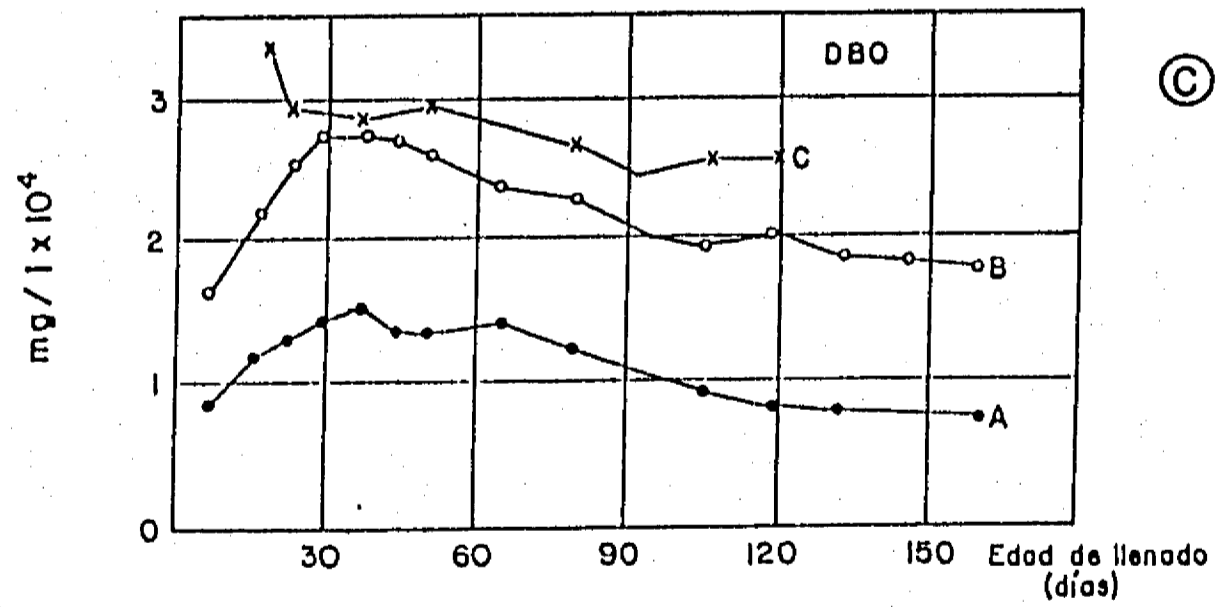
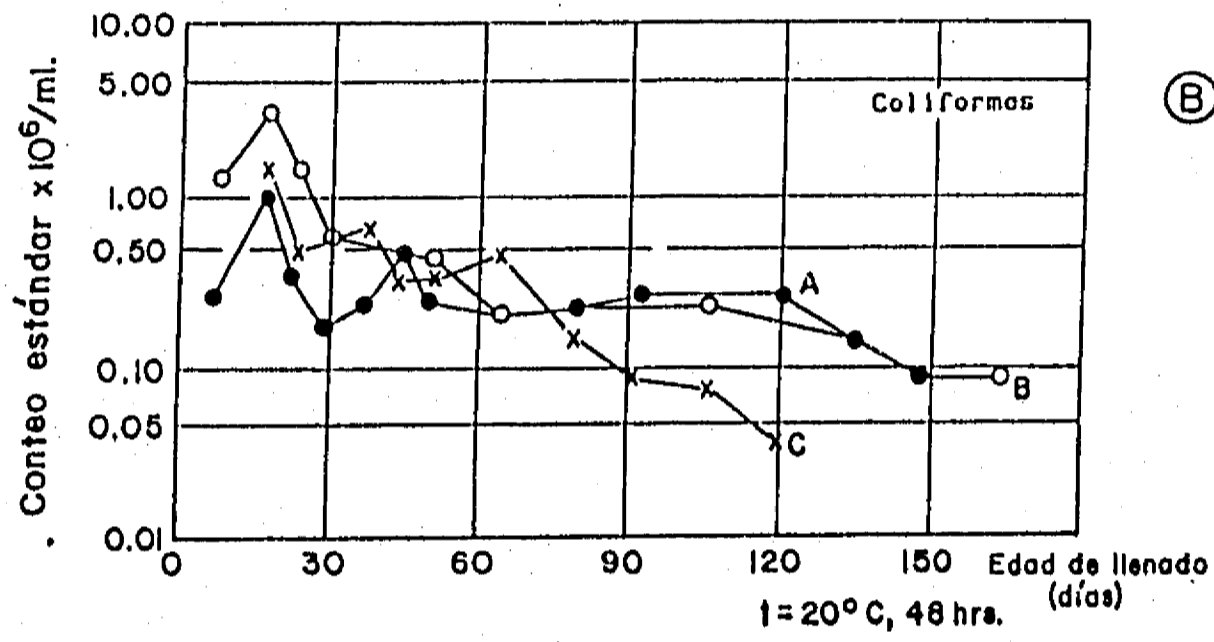
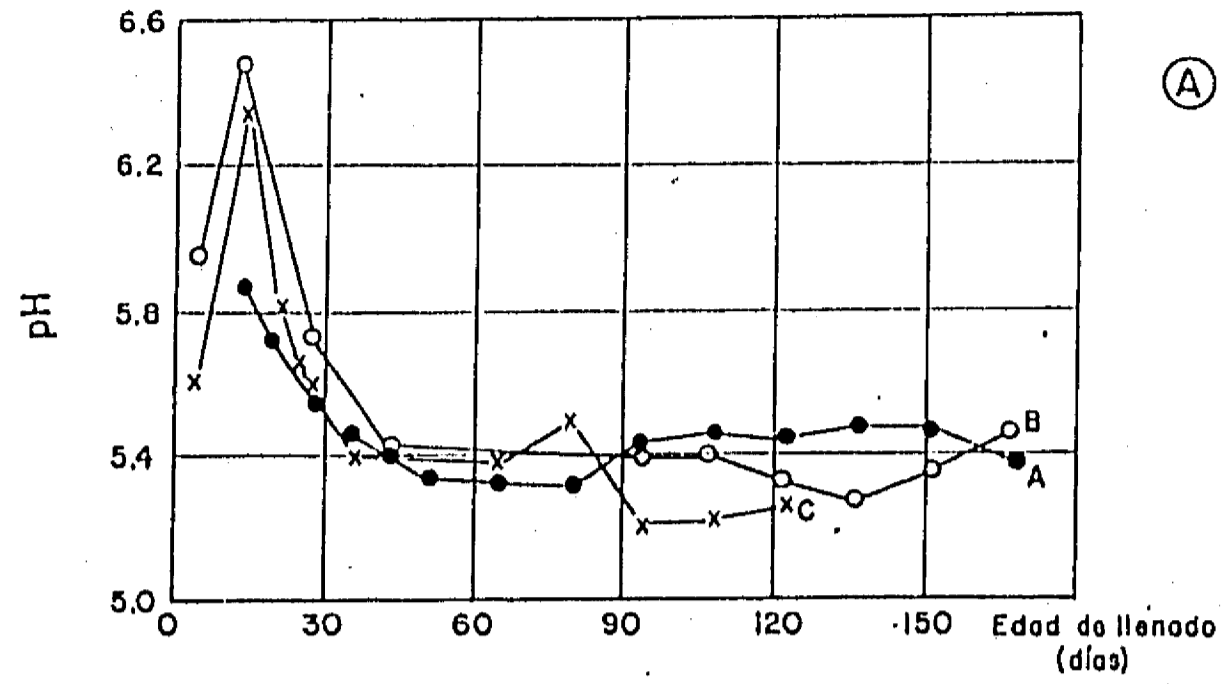


Figura D.1 - Resultados de estudios experimentales sobre lixiviados:

- a) pH
- b) Población bacteriana
- c) DBO

(Tomado de Syde and Burchinal, 1970)

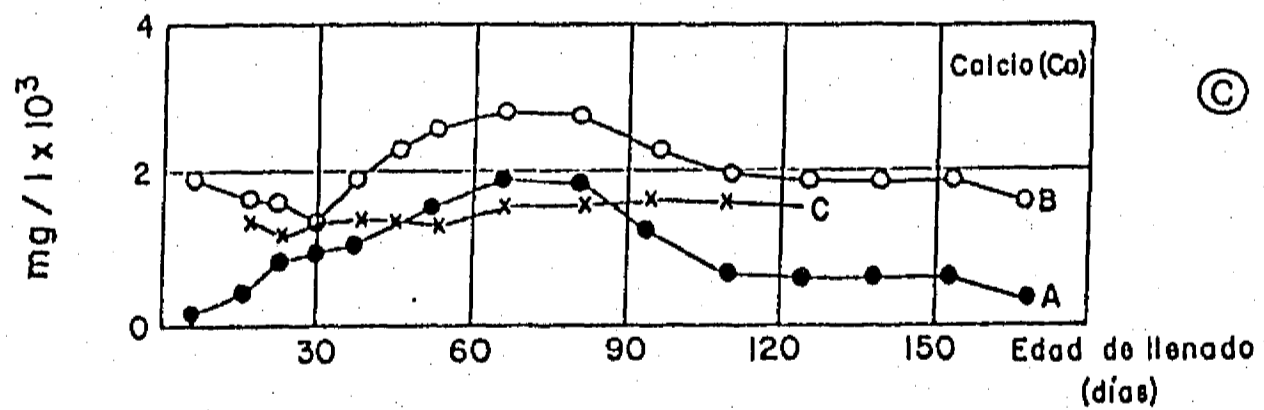
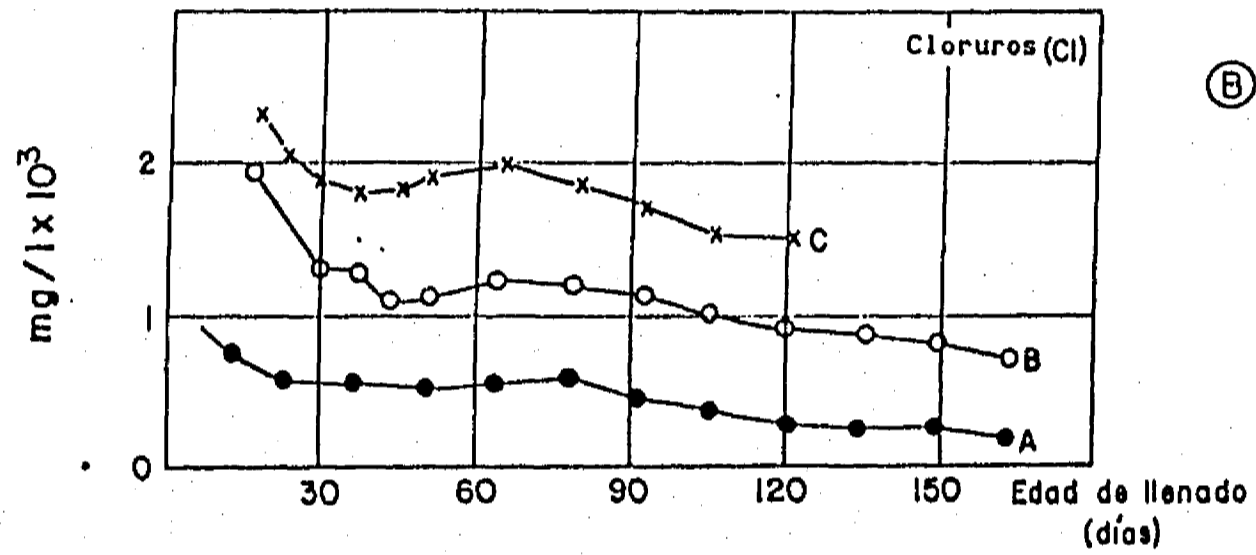
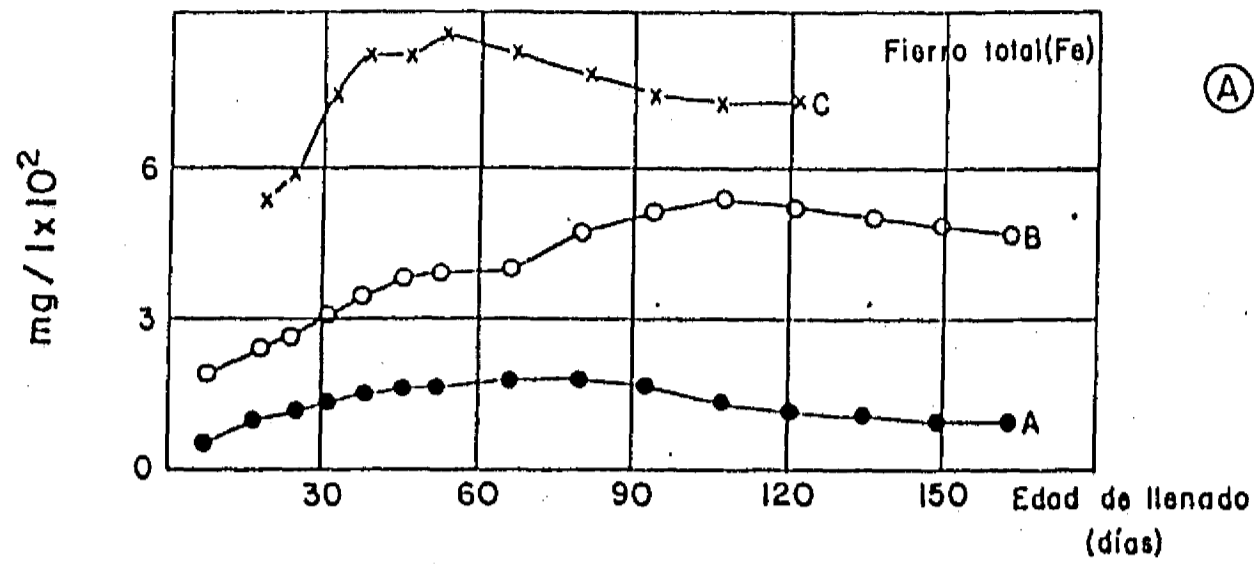
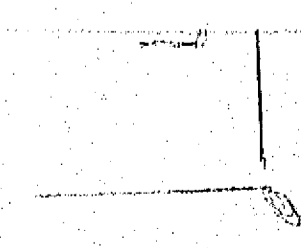
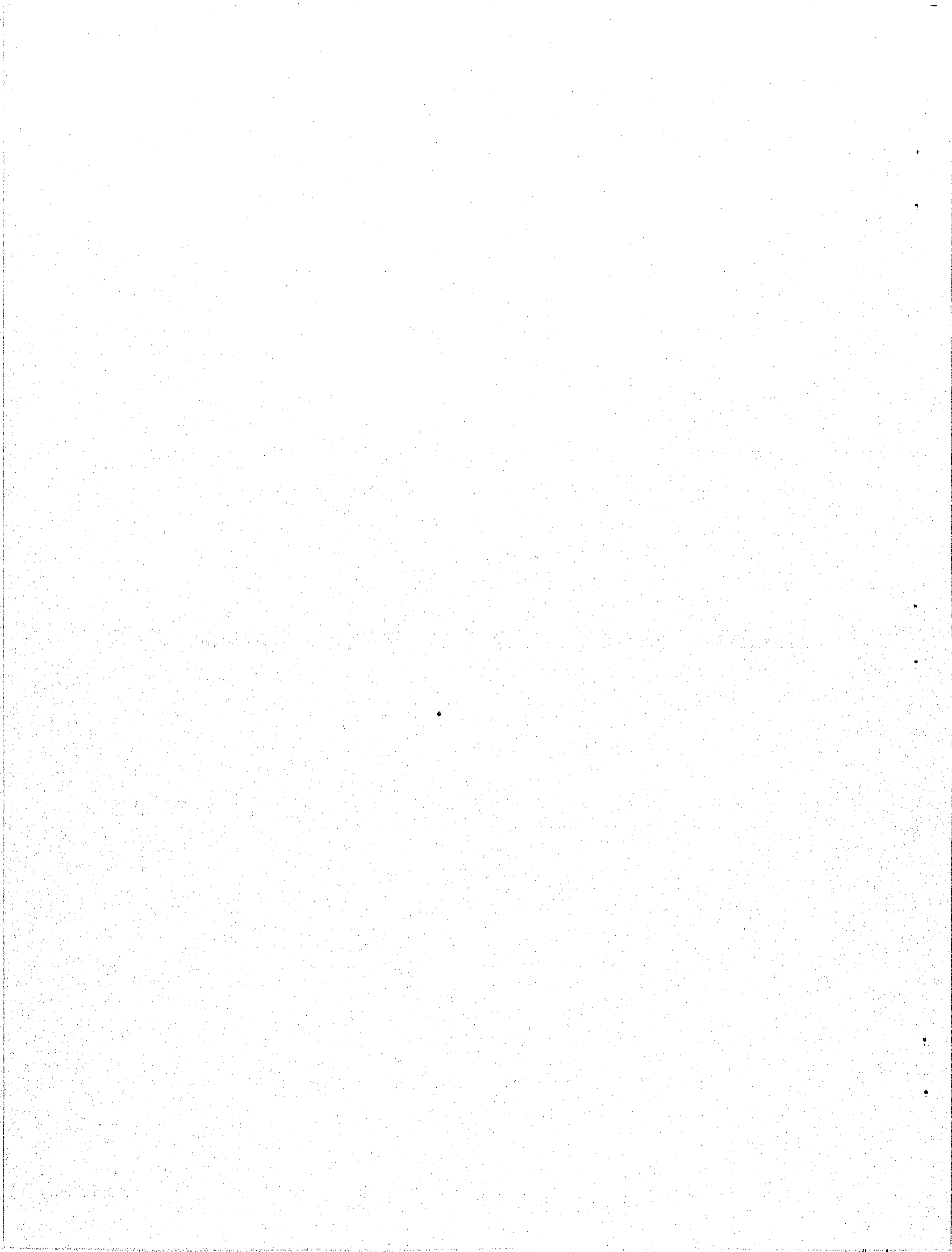


Figura D.2 - Resultados de estudios experimentales sobre lixiviados; concentración de materiales extraídos:
 a) Fierro total
 b) Cloruros
 c) Calcio
 (Tomado de Syde and Dorchinal, 1970)

APENDICE E

PRINCIPALES FORMACIONES DE LA CUENCA DE MEXICO Y AREAS ADYACENTES



APENDICE E

PRINCIPALES FORMACIONES DE LA CUENCA DE MEXICO Y AREAS ADYACENTES

La distribución de las diferentes unidades litoestratigráficas de la Cuenca de México está basada en información de sus características líticas, relaciones estratigráficas, tipo de vulcanismo, etc. Las principales formaciones de la Cuenca presentadas en la tabla 6.1 se discuten a continuación.

E.1 Basamento Precenozoico

Formación Xochicalco - Esta formación es la más antigua conocida, constituida por una secuencia de calizas, en capas delgadas, con lentes y nódulos de pedernal, con capas de lutitas interestratificadas cerca de la base

Formación Morelos^{*} - Aflora al sur de la Sierra de Chichinautzin, constituida por una estratificación de calizas y dolomitas diagenéticas concordantes a anhidritas laminares subyacentes, datadas del Albiano Medio-Cenomaniano Temprano. Presenta extensos depósitos de plataforma marina que se supone se extienden hacia el subsuelo del sector meridional de la Cuenca de México.

Formación el Doctor - Aflora entre Apaxco y Tula en el estado de Hidalgo. Se caracteriza por facies calcareas, constituidas por caliza mudstone en capas delgadas con nódulos y lentes de pedernal e intercalaciones locales de lutita.

Formación Cuautla - Aflora al sur de la Sierra Tepoztlan y al norte de Zumpango, constituida por calizas fosilíferas de estratificación gruesa en facies de banco marino, datados entre el Cenomaniano Tardío y el Turoniano Tardío. Descubierta, cerca de la zona de estudio, en el pozo Pemex Tulyehualco-1, a 2100 m de profundidad de la superficie del terreno. Es concordante con la Formación Mezcala y está cubierta en algunos lugares por productos lávicos del Terciario y Cuaternario.

Formación Mezcala - Distribuida preferentemente en zonas de sinclinales. Aflora al sur de la Sierra de Chichinautzin. Constituye una interestratificación gradual rítmica de grauvacas, limotitas y lutitas que se depositaron en aguas someras.

E.2 Secuencia Terciaria

Granito Colotepec - Intrusiva la formación Xochicalco en el núcleo del anticlinal que lleva su nombre, asignándosele una edad del Eoceno Medio.

Grupo Balsas - Comprende depósitos continentales del Eoceno Tardío al Oligoceno Temprano constituidos por conglomerados calizos, limos, arcillas y arenas, conteniendo interestratificaciones de lentes de caliza y yeso lacustres e intercalaciones lávicas y piroclastos de composición lávica. En la parte superior se presentan intercalaciones de toba riolítica que han sido descritas en el pozo Texcoco-1.

Secuencias volcánicas del Oligoceno Tardío al Mioceno Temprano - Agrupan las formaciones volcánicas que por sus características, estratigrafía y edad se diferencian de las rocas extrusivas del Grupo Balsas y del Mioceno Medio-Tardío. Su composición varía de andesítica a riolítica aunque en las últimas perforaciones

profundas se describen derrámes de composición basáltica. Constituyen sucesiones de tobas líticas, vítreas y brechas tobaceas y aglomerados. Estos depósitos están, en su parte superior, cubiertos y/o intercalados con coladas lávicas, de composición variable. El análisis petrográfico evidencia, para estas lavas una estructura holocristalina-hipidiomorfa con fenocristales de oligoclasa, andesina, cuarzo, piroxeno y anfibolas. Afloran al norte y oeste del poblado de Amecameca donde cubren en forma discordante unidades cretácicas y del grupo Balsas.

Secuencias volcánicas del Mioceno Medio y Tardío - Difieren de las anteriores, en composición litológica y posición estratigráfica. Sus afloramientos se distribuyen por toda la Cuenca. En su porción sur se encuentran en el cerro del Elefante, el Judio, y la base de la Sierra de Guadalupe y las Cruces, entre otros. Estas rocas están constituidas por secuencias de tobas, brechas volcánicas, interestratificadas con coladas de lava cuya composición, varía de andesitas a riolodacitas. Desde el punto de vista petrográfico, se presentan tipos con textura porfirítica-afanítica con constante presencia de anfibolas estables. En el subsuelo de la porción sur de la Cuenca de México, esta unidad está ampliamente distribuida cubriendo con discordancia las rocas volcánicas del Oligoceno Tardío al Mioceno Temprano o al grupo Balsas y rocas cretácicas. Por su parte, se encuentran cubiertas por las unidades pliocénicas con discordancia y en ocasiones por unidades del Cuaternario.

Depósitos volcánicos del Plioceno Temprano- Comprende rocas extrusivas que yacen en discordancia erosional a rocas volcánicas del Oligoceno-Mioceno y cubiertas de la misma forma por unidades volcánicas del Plioceno Tardío y Cuaternario. Su composición varía de andesítica a dacítica, las secuencias piroclásticas son no consolidadas; constituyen tobas cristalinas y pumíticas, cubiertas por intercalaciones de derrámes lávicos.

Formación Otomi - Agrupa los productos volcánicos emitidos durante la parte mas temprana del Plioceno Tardío en lo que se conoce como la Sierra de Monte Alto, al occidente de la Cuenca. Caracterizada por una sucesión de "surges", flujos de cenizas, en ocasiones con bloques, cubiertos por lavas y brechas. Su composición es de andesítica a dacítica.

Formación las Cruces - se distribuye en el límite sudoccidental de la Cuenca de México. Los depósitos piroclásticos de esta formación consisten en pómez pliniana, secuencias de "surges", cubiertos por cenizas vítreas. Cubre en discordancia erosional las rocas extrusivas del Mioceno Medio y Mioceno Tardío y las rocas volcánicas del Plioceno Temprano, siendo cubierta por depósitos aluviales y lacustres del Cuaternario y derrámes de las Formaciones Chichinautzin y el Pino.

Formación Zempoala - Está representada como una interestratificación de derrámes de lava, capas volcániclasticas y lahares, todos de composición andesítica, dacítica y riódacítica. Cubre discordante los depósitos volcánicos del Plioceno Tardío, las rocas extrusivas del Mioceno Medio al Mioceno Tardío e interdigitada con los productos piroclásticos y clásticos del Plioceno en el a región del Valle de Cuernavaca.

Riolita Navajas - Secuencia riolítica de derrámes lávicos con intercalaciones de brechas soldadas y no soldadas de flujo de cenizas vítreas, con fragmentos líticos, pumíticos y de obsidiana. Se encuentra en la parte nororiental de la zona.

Depósitos piroclásticos y clásticos del Plioceno * - Constituyen depósitos no diferenciados relacionados con la actividad piroclástica y fluvial del Plioceno. En la porción meridional de la Cuenca, estos depositos están constituidos por materiales piroclásticos con horizontes de conglomerados, arenas y arcillas lacustres, cubiertos en forma discordante por el aluvión del

Cuaternario y que se encuentran acumulados en fosas tectónicas (graben de Chalco) y rellenando amplios valles surcados en rocas volcánicas del Oligoceno-Mioceno.

E.3 Secuencia Cuaternaria

Formación Llano Grande * - Se denominan así a las secuencias eruptivas de composición variable de andesitas a riocitas que afloran en la base noroccidental de la Sierra Nevada. Constan de intercalaciones de pómez soldadas, "surges", flujo de cenizas y brechas, cubiertas por coladas lávicas y domos.

Formación el Pino * - Agrupa rocas, principalmente máficas, que forman los cerros de la Estrella, el Pino, Chimalhuacan, Chiconautla y otros. Se caracteriza por secuencias de composición basáltica, andesítica y traquítica, constituidas por coladas lávicas con intercalaciones de cenizas, lapilli y escoria de caída. Rocas de esta formación, afloran en la región más septentrional del área del Pino, constituyendo parte del parteaguas de la Subcuenca de Chalco. Esta formación cubre en forma discordante unidades del Oligoceno, Mioceno, Plioceno y la Formación Llano Grande, del Pleistoceno Temprano.

Formación Tlaloc * - Caracteriza sucesiones de coladas lávicas que forman parte de la Sierra de Río Frío. Su composición es, preferentemente, andesítica, latítica y dacítica y en su base, pómez de caída, "surges", flujos de ceniza, de pómez y de bloques intercalados y/o cubiertos por derrames lávicos. Las rocas atribuidas a esta formación, afloran extensamente en la porción noroccidental del área.

Formación Iztazihualtl * - Constituida por sucesiones esencialmente efusivas, caracterizadas por coladas lávicas que finalizan en

extrusiones domicas. La composición varía de andesítica-basáltica a dacítica. Las rocas atribuidas a esta formación, afloran en la porción oriental de la subcuenca, constituyendo junto con la Sierra de Río Frío el parteaguas de la Subcuenca, siguiendo el alineamiento de los grandes estratovolcanes Iztaccíhuatl y Popocatepetl.

Formación Popocatepetl * - Esta formación caracteriza las principales secuencias del estratovolcan que lleva su nombre. Constituida por piroclastos y brechas recubiertas por una alternancia de lavas y pómez plinianas, flujos de cenizas, piroclastos soldados y "surges". La composición varía de andesítico-basáltico a dacítico. Cubre en forma discordante la porción meridional de la Formación Iztaccíhuatl y problamenta se interdigita hacia el poniente con la formación Chichinautzin. El afloramiento de estas rocas, constituye la porción suroriental de la subcuenca.

Formación Chichinautzin * - Corresponde a todo el vulcanismo monogenético principalmente estromboloniano con características y edad similar en la Cuenca de México y sus alrededores. Las lavas de esta unidad son muy extensas y se encuentran alternadas con material piroclástico. La composición varía de andesítica a basáltica. Las rocas atribuidas a esta formación afloran ampliamente en la porción meridional de la Subcuenca de Chalco, en donde numerosos centros volcánicos forman el parteaguas meridional de la misma. Esta unidad cubre discordantemente casi todas las unidades cretácicas y del Terciario; en algunos sitios cubre discordante la Formación el Pino y se encuentra interdigitada con depósitos lacustres y aluviales.

Depositos aluviales * - Están constituidos por lentes locales de piroclastos, travertino, yeso, diatomitas y arcillas lacustres. Forman el relleno de depresiones tectónicas, como el graben de Chalco, y amplios valles socavados en depósitos piroclásticos.

Estos depósitos se encuentran interdigitizados con algunas formaciones volcánicas del Cuaternario. Su espesor es máximo, en el centro de las zonas de depresión, tendiendo a adelgarse hacia los márgenes de la planicie.

Depósitos lacustres * - Agrupan sedimentos clásticos y productos piroclásticos relacionados con la actividad volcánica del Popocatepetl y de la Sierra de Chichinautzin que se depositaron en un ambiente lacustre. Se encuentran arcillas alteradas, limos y arenas, con lentes locales de piroclastos, a veces cementadas, e interdigitizados con los productos de la formación Chichinautzin y con la porción superior de los depósitos aluviales. Los sedimentos lacustres afloran, en la zona central de la Cuenca formando una meseta con altura media de 2200 m. Los espesores varían entre los 30 y 300 m, adelgazándose hacia sus márgenes.