



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO**

FACULTAD DE INGENIERIA

**PROSPECCIÓN MAGNÉTICA
APLICADA A UN PROBLEMA DE
CONTAMINACIÓN POR CROMO.
TULTITLÁN, ESTADO
DE MÉXICO.**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERA GEOFÍSICA**

P R E S E N T A

ANTONIA / GAMBOA ROCHA

ASESOR: DR. TOMÁS GONZÁLEZ MORÁN

MÉXICO, D.F.

2002.



**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional
Autónoma de México



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.

PAGINACIÓN

DISCONTINUA



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCION
60-I-1297

SRITA. ANTONIA GAMBOA ROCHA
Presente

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

**PROSPECCION MAGNETICA APLICADA A UN PROBLEMA DE CONTAMINACION
POR CROMO. TULTITLAN, ESTADO DE MEXICO**

- INTRODUCCION
- I** CARACTERISTICAS DE LA ZONA DE ESTUDIO
- II** LA PLANTA CROMATOS DE MEXICO
- III** FUNDAMENTOS DE PROSPECCION MAGNETICA
- IV** PROCESAMIENTO DE DATOS
- V** INTERPRETACION
- VI** CONCLUSIONES
- BIBLIOGRAFIA

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

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

Atentamente

"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

Cd. Universitaria, D.F. a 19 de octubre de 2001

EL DIRECTOR

ING. GERARDO FERRANDO BRAVO

GFB*RLLR*gtg

**A Yusen, por su cariño y confianza.
Por los sueños que aún
nos quedan por vivir.**

AGRADECIMIENTOS

A mis queridos padres y a mis hermanos, por el gran entusiasmo con que me han acompañado y apoyado toda mi vida.

A mis grandes amigos: con los que crecí, a los que añoro y con los que seguiré construyendo mi historia.

Muy especialmente a Jenny, a Juan, y a Kim, por su invaluable calidez y su apoyo incondicional.

A aquellos que marcaron, con su enseñanza, este periodo de mi vida: Jorge Nieto, David Alatraste, Pedro Anguiano, Javier Arellano, Emiliano Campos, Carlos Schulze, Eduardo Pérez Rocha, Tomás Morales y Gaudencio Galicia.

Al Dr. Tomás González Morán, por su dirección.

A los sinodales de este trabajo: a la Dra. Georgina Fernández Villagómez, al Ing. Gerardo Cifuentes Nava, al Ing. Alejandro Arroyo Carrasco y al Ing. Enrique del Valle y Toledo. A todos ellos por su gran apoyo, confianza y por sus oportunas observaciones.

Índice

INTRODUCCIÓN	1
JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS.....	3
CAPÍTULO 1	
CARACTERÍSTICAS DE LA ZONA DE ESTUDIO	4
1.1 Localización del área de estudio.....	4
1.2 Aspectos socioeconómicos	5
1.2.1 Usos del suelo	5
1.2.2 Población	6
1.2.3 Economía	7
1.3 Aspectos Naturales	7
1.3.1 Geología y Geomorfología del Estado de México	7
1.3.2 Geología y Geomorfología circundante de Tultitlán.....	8
1.3.3 Hidrología superficial y subterránea	11
1.3.4 Clima	13
1.3.5 Edafología	13
1.3.6 Flora y Fauna	14
CAPÍTULO 2	
LA PLANTA CROMATOS DE MÉXICO.....	15
2.1 Antecedentes	15
2.2 Características del confinamiento y estudios anteriores	19
2.2.1 Dimensiones del confinamiento	19
2.2.2 Características de los materiales contenidos en el confinamiento	23
2.3 Características químicas y epidemiológicas del cromo	25
2.4 Evidencias de afectaciones por cromo	28
CAPÍTULO 3	
FUNDAMENTOS DE PROSPECCIÓN MAGNÉTICA	30
3.1 Breve historia del magnetismo y equipos de medición	32
3.2 Caracterización del campo geomagnético	37
3.3 Variaciones del magnetismo terrestre	35
3.3.1. Correcciones de datos de campo	39
CAPÍTULO 4	
PROCESAMIENTO DE DATOS	40
4.1 Levantamiento Magnético	40
4.2 Características del equipo de medición	42
4.3 Procesamiento de la información magnética obtenida	44

4.3.1 Reducción al polo magnético utilizando un algoritmo de Transformada Rápida de Fourier	45
CAPÍTULO 5	
INTERPRETACIÓN	52
5.1 Interpretación de anomalías magnéticas	52
5.2 La susceptibilidad y su importancia en la interpretación	53
5.3 Consideraciones litológicas	54
5.4 Parámetros de los modelos	60
5.5 Perfiles y modelos magnéticos obtenidos	61
5.6 Discusión de resultados	63
CAPÍTULO 6	
CONCLUSIONES.....	69
BIBLIOGRAFÍA	72
ANEXO 1.....	I
ANEXO 2.....	IV

Índice de Tablas y Figuras

Tabla 1.1. Climatología.....	13
Tabla 2.1. Dimensiones del confinamiento.....	20
Tabla 2.2. Valores de susceptibilidad medida de los residuos del confinamiento....	25
Tabla 4.1. Datos magnéticos de inclinación, declinación e intensidad total para el mes de septiembre de 1988.....	41
Tabla 5.1. Rangos de susceptibilidad magnética según el tipo de roca.....	53
Tabla 5.2. Valores de susceptibilidad considerados en la interpretación magnética.....	61
Figura 1.1. Ubicación del estado de México y el municipio de Tultitlán.....	4
Figura 1.2. Usos de suelo del municipio.....	5
Figura 1.3. Crecimiento poblacional.....	6
Figura 1.4. Corte transversal general indicando la transición entre el pedemonte y el relleno de la planicie.....	9
Figura 1.5. Topografía de la zona circundante.....	10
Figura 1.6. Red de flujo hídrico.....	12
Figura 2.1. Ubicación de la planta Cromatos de México.....	16
Figura 2.2 Fotografía de uno de los hundimientos más grandes observados en el techo del confinamiento.....	19
Figura 2.3 Fotografía desde el techo del confinamiento.....	20
Figura 2.4 Dimensiones del confinamiento.....	21
Figura 2.5. Fotografía de los muros contaminados de la planta.....	22
Figura 2.6. Fotografía de los patios de la planta.....	23
Figura 3.1. Modelo del dipolo magnético terrestre.....	30
Figura 3.2. Localización del Observatorio Magnético de Teoloyucan.....	32
Figura 3.3. Corrientes de convección en el núcleo externo de la Tierra.....	33

Figura 3.4. Influencia del viento solar en el campo magnético terrestre.....	34
Figura 3.5. Coordenadas geográficas de un punto sobre la corteza terrestre.....	35
Figura 3.6. Componentes del campo geomagnético.....	36
Figura 3.7. Intensidad total del campo magnético terrestre.....	37
Figura 3.8. Comportamiento típico de una tormenta magnética.....	38
Figura 3.9. Magnetograma correspondiente al día del levantamiento	39
Figura 4.1. Líneas del levantamiento magnético (2 de septiembre de 1988).....	41
Figura 4.2. Valores de campo magnético de intensidad total.....	42
Figura 4.3. Utilización en campo del magnetómetro de precesión protónica.....	43
Figura 4.4. Esquema simplificado de una anomalía magnética antes y después de haber sido reducida al polo.....	45
Figura 4.5. Matriz de datos tomada para la aplicación del algoritmo de Patrik Ervin.....	47
Figura 4.6. Valores de campo magnético de intensidad total (confinamiento menor).....	48
Figura 4.7 Mapa de anomalías magnéticas reducidas al polo y perfil magnético P-P' (confinamiento menor).....	49
Figura 4.8 Valores de campo magnético de intensidad total (confinamiento mayor).....	50
Figura 4.9. Mapa de anomalías magnéticas reducidas al polo y perfiles magnéticos A-A', B-B' y C-C' (confinamiento menor).....	51
Figura 5.1. Cortes litológicos de pozos del valle de Cuautitlán.....	56
Figura 5.2. Mapa geológico regional y localización de los pozos.....	57
Figura 5.3. Corte litológico del pozo "Charco 4".....	58
Figura 5.4. Modelo del perfil P-P'.....	65
Figura 5.5. Modelo del perfil A-A'.....	66
Figura 5.6. Modelo del perfil B-B'.....	67

Figura 5.7. Modelo del perfil C-C'68

Introducción

Las grandes metrópolis de fines del siglo XX se han convertido en complejas estructuras integradas por espacios y flujos poblacionales, económicos, políticos, administrativos y culturales. Constituyen no solo el hábitat o ecosistema *artificial* donde se entreteje y condensa la vida cotidiana de la sociedad, sino también el motor de la evolución económica de un país. Estas ciudades también juegan un papel central en el consumo y degradación intensiva de los recursos naturales y el ambiente biofísico, al concentrar grandes porcentajes de las actividades económicas reduciendo las áreas naturales e inhibiendo la vocación natural de los suelos.

En el caso de México, y como consecuencia del crecimiento urbano que ha surgido de la expansión del espacio construido desde el núcleo del Distrito Federal hacia unidades territoriales contiguas y distantes, se ha definido a la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM). En ella se ubica el centro industrial más importante del país, constituido, de acuerdo a los datos de INEGI (2000a), por las 16 delegaciones del Distrito Federal y 34 municipios conurbanos del Estado de México¹, resultando ser la segunda metrópoli más poblada del mundo, con una población de 16.8 millones de habitantes (SMA del GDF, 1999).

En los últimos años, los problemas de contaminación ambiental han ocupado tanto la atención de ciudadanos, como de tomadores de decisiones a nivel nacional. Se ha identificado que estos se encuentran íntimamente relacionados con el crecimiento urbano-industrial, el desarrollo tecnológico, la expansión territorial y con el mal aprovechamiento de los recursos naturales y del medio ambiente.

Como parte de esta problemática, dentro del territorio nacional, se estima que anualmente se generan alrededor de 8 millones de toneladas de residuos peligrosos de origen industrial (SEMARNAP/INE, 1996). Agudizando la situación entorno a la contaminación generada por residuos peligrosos, se considera que solo el 12% de los residuos generados en el país se controlan adecuadamente, lo cual significa que el resto de ellos, se dispone de manera inadecuada en diferentes sitios sin control (SEMARNAP/INE, *op. cit.*).

¹ Cabe señalar que la definición territorial de la ZMVM aun no ha sido debidamente consensada y el número de municipios conurbados pertenecientes a ella, no ha podido unificarse.

En la mayoría de los casos, los suelos se contaminan generando serios problemas a la población y daños al entorno, dada la transferencia de sustancias químicas a los diferentes medios (agua, suelo, aire) así como la imposibilidad de utilizar el suelo de acuerdo a los fines requeridos, al encontrarse contaminado.

A pesar de lo que el marco legal y normativo de México pueda establecer, se tiene constancia de la existencia de numerosos sitios contaminados, y para muchos de estos casos, se realizan y llevan a cabo disposiciones clandestinas de residuos peligrosos. Al respecto, los estados que presentan el mayor número de sitios contaminados reportados en la República Mexicana, son: Estado de México, Coahuila, Hidalgo, San Luis Potosí, Baja California, Chihuahua y Guerrero (Izcapa, 1998).

Además, algunos de estos sitios contaminados se encuentran abandonados, por lo que quedan excluidos de cualquier tratamiento para su recuperación ambiental por no contar con responsables legales para llevar a cabo la restauración de los mismos. Al respecto, el Estado de México, (junto con los estados de Guanajuato y San Luis Potosí) ocupa el 5º lugar a nivel nacional por número de sitios abandonados contaminados con residuos peligrosos, entre los cuales se encuentra la antigua planta industrial *Cromatos de México, S.A.* (SEMARNAT, 2000).

Dicha empresa, instalada en el año de 1958, se localiza en el municipio de Tultitlán, en el Estado de México. Se dedicaba a la producción de sales cromadas y sus procesos, altamente ineficientes, generaban grandes cantidades de residuos con un alto contenido de cromo hexavalente, por lo que se contaminó el suelo y aire de la zona, mismo que la llevó a su clausura en 1978. Actualmente se encuentra registrada como sitio abandonado y no existe responsable legal para llevar a cabo el respectivo control de la contaminación presente.

Durante el funcionamiento de esta industria, se registraron crecientes alteraciones dañinas al medio ambiente, por lo que se iniciaron investigaciones al respecto.

En el presente trabajo, se procesa la información magnética obtenida de un levantamiento realizado sobre el confinamiento de la planta de cromatos, llevado a cabo por el Departamento de Recursos Naturales del Instituto de Geofísica de la UNAM. A su vez, se analizan estudios llevados a cabo con anterioridad, sobre todo respecto a las características que guardan los residuos depositados en el confinamiento de la planta.

El problema se enmarca, dentro de un contexto cronológico. Se describen las características socioeconómicas y naturales de la zona, para resaltar la importancia de su inmediata atención por el bien de la salud humana y los recursos naturales afectados.

Previo al levantamiento magnético realizado el 2 de septiembre de 1988, se tomaron cuatro muestras de residuos del confinamiento, mismas que se diferenciaron por su color (unas café y otras amarillo intenso). Dichas muestras fueron estudiadas en el laboratorio de Paleomagnetismo del Instituto de Geofísica de la UNAM, para obtener el valor de la susceptibilidad magnética, encontrándose que los contrastes de las mismas (tabla 2.2), eran adecuados para la aplicación de un estudio de prospección magnética.

Los datos magnéticos obtenidos en campo fueron corregidos y procesados (capítulo 3 y 4), sometiéndose a la reducción al polo magnético, con ayuda de un algoritmo desarrollado por Patrik Ervin en 1976 (Anexo 1).

Los resultados e interpretación de dichos datos, pueden consultarse en el capítulo 5 mismos que se presentan como consecuencia de un profundo análisis que incluye las características y comportamientos físicos de la zona de estudio.

Justificación y Objetivos

La presencia de cromo hexavalente tanto en aguas subterráneas como en el suelo y subsuelo del área circundante a la empresa Cromatos de México, resulta alarmante. Estudios anteriores han demostrado una peligrosa migración del contaminante hacia el subsuelo y la afectación de la calidad de los cuerpos de agua de la región.

El presente trabajo tiene como objetivo aplicar un estudio de prospección magnética como metodología para la determinación de zonas con altas concentraciones de cromo en el confinamiento industrial de la planta y capas subyacentes. Con ayuda de este método, se buscará, además, emitir una evaluación sobre la migración de dicho contaminante hacia las capas inferiores al confinamiento de la planta y las consecuencias que las zonas afectadas pudieran producir a la población que habita en la zona de estudio.

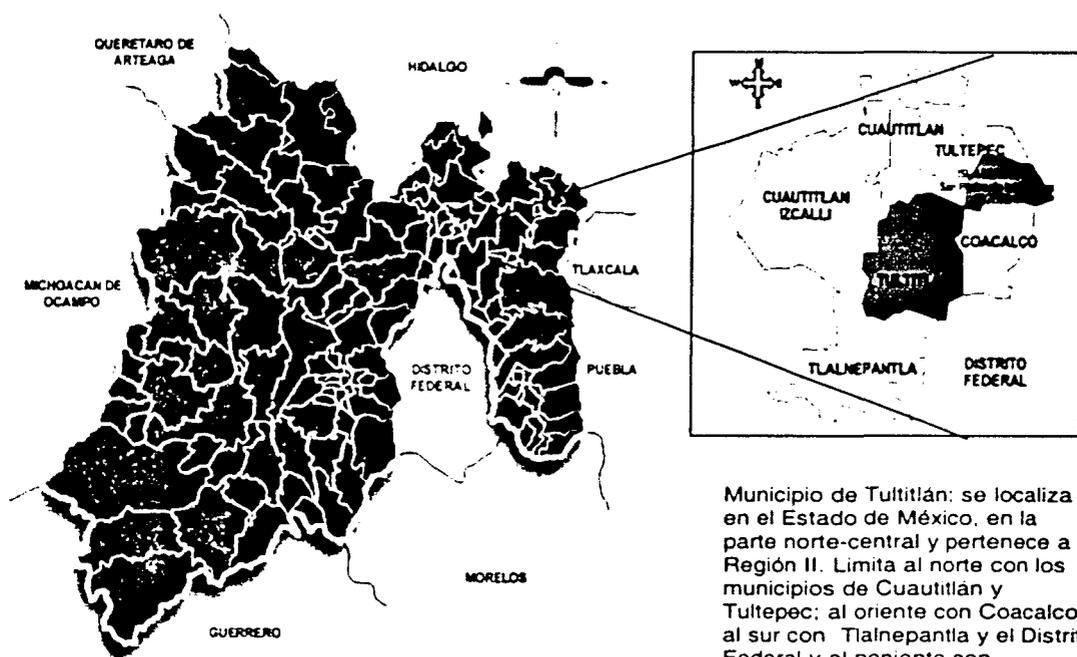
CAPÍTULO 1

Características de la Zona de Estudio

1.1. Localización del área de estudio.

El Estado de México se encuentra ubicado en la parte austral de la Altiplanicie Mexicana y en el Eje Neovolcánico; limita al Norte con Querétaro e Hidalgo, al Este con Tlaxcala y Puebla, al Oeste con Michoacán y al Sur con Guerrero, Morelos y el Distrito Federal.

Su extensión territorial se encuentra dividida en 120 municipios y 4014 localidades.



Estado de México: colindancia con los estados de Guerrero, Morelos, Puebla, Tlaxcala, Hidalgo, Michoacán y con el Distrito Federal.

Municipio de Tultitlán: se localiza en el Estado de México, en la parte norte-central y pertenece a la Región II. Limita al norte con los municipios de Cuautitlán y Tultepec; al oriente con Coacalco; al sur con Tlalnepantla y el Distrito Federal y al poniente con Cuautitlán Izcalli.

Las coordenadas geográficas en el centro de la cabecera son 19° 38' 44" de latitud Norte y 99° 10' longitud oeste.

Figura 1.1. Ubicación del Estado de México y el municipio de Tultitlán.
Modificado de: Secretaría de Ecología, 2002 e INEGI, 2000c.

Las instalaciones de la antigua planta Cromatos de México, S.A., (objeto de este estudio) se encuentran ubicadas en el municipio de Tultitlán (Figura 1.1), cuya clave municipal es la 109. Este municipio se localiza al norte de la Ciudad de México, entre las cabeceras municipales de Cuautitlán, Ciudad López Mateos y Ecatepec. Ocupa una superficie de 71.087 Km² y corresponde al noveno lugar de mayor población a nivel municipal del estado. (INEGI, 2000c).

1.2. Aspectos socioeconómicos

1.2.1 Uso del suelo

De su superficie total, la zona urbana ocupa 2,601.4 hectáreas, mismas que representan el 36.6% de la superficie total del municipio. La superficie de los distintos usos de suelo y su distribución porcentual, con respecto al total, se muestra en la siguiente gráfica:

USOS DEL SUELO EN EL MUNICIPIO DE TULTITLÁN

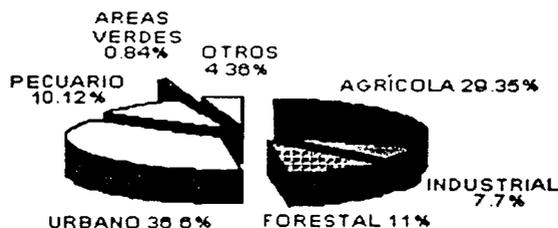


Figura 1.2. Usos del Suelo del municipio.
FUENTE: Gobierno del Estado de México, 1997.

A partir de la década de los sesenta, en este municipio comienzan a realizarse un gran número de actividades urbano-industriales. El incremento del número de industrias pasa de 22 industrias en 1969, a 93 industrias para 1978 y continuó en aumento (AURIS, 1980).

Sin duda un factor muy importante fue el aumento de infraestructura vial como lo son: la carretera a Querétaro, la carretera México-Cuautitlán, la vía ferroviaria a Pachuca y a Tula, y la vía principal que atraviesa el municipio llamada vía López Portillo. A partir de entonces, el agudo incremento poblacional (Figura 1.3) ha sido notorio: dicho incremento llegó, entre 1960-1970, a 237.98% (AURIS, *op.cit*).

En cuanto a la actividad industrial, uno de los grupos industriales de mayor importancia identificados, según el *Plan de Desarrollo Urbano del Municipio de Tultitlán*, resultó ser el de fabricación de sustancias y productos químicos (grupo en el cual se encontraba la planta Cromatos de México) junto con el de fabricación de productos metálicos, con porcentajes de 24.2% y 19.7% respectivamente del total de las industrias analizadas. Además, de las 22 plantas industriales que se establecieron en el municipio en la década de 1960-1969; 20 de ellas se localizaban en el sector 2, que comprende las localidades de Lechería e Independencia (AURIS, *op.cit*).

De acuerdo a dicho plan de desarrollo urbano, en 1978, de un total 66 industrias analizadas, 44 de ellas, (equivalente al 66.7% del total de industrias analizadas) se establecieron dentro del sector 2* (GEM, 1978), lo cual podría explicar el que muchos de los problemas de contaminación, se encuentren ubicados en las localidades de Lechería e Independencia (AURIS, 1980).

1.2.2. Población

De acuerdo al XII Censo de Población y Vivienda para el Estado de México, el municipio de Tultitlán cuenta con una población de 361,434 habitantes (INEGI, 2000a). En el siguiente cuadro se observa la tendencia del crecimiento poblacional en el municipio de Tultitlán:

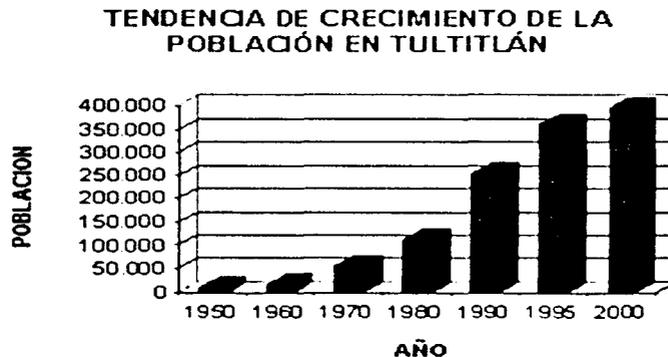


Figura 1.3. Crecimiento Poblacional .
FUENTE: INEGI, 2000a.

* el estudio del rubro industrial, se dividió en 4 sectores. La antigua planta se encuentra ubicada en la localidad de Lechería, correspondiente al sector 2.

1.2.3 Economía

El municipio se encuentra en la región socioeconómica "A" que corresponde a los salarios mínimos más altos a nivel nacional (\$30.22, para el año 2001). Este municipio cuenta con un importante número de industrias lo que permite la existencia de altos ingresos *per capita*. No obstante, existen actividades extensivas y de autoconsumo, lo que provoca la presencia de bajos ingresos en algunos sectores de la población (Secretaría de Ecología del GEM, 2002).

La distribución de la población económicamente activa (PEA) en el municipio de Tultitlán es la siguiente:

- el sector primario (agricultura, ganadería, artesanía) con el 0.98% de la PEA,
- el sector secundario (sector industrial) con 48.6% de la PEA, y
- el sector terciario (comercio y servicio) con el 50.47% de la PEA., de lo que se deduce una nula participación de la actividad agropecuaria como motor de la economía (Secretaría de Ecología del GEM, *op. cit*).

1.3 Aspectos Naturales

1.3.1 Geología y Geomorfología del Estado de México.

El Estado de México está comprendido dentro de dos provincias geológicas: el Eje Neovolcánico y la Sierra Madre del Sur.

Su geología, está constituida por afloramientos de rocas de origen ígneo, sedimentario y metamórfico, siendo las rocas ígneas extrusivas las que ocupan una mayor extensión. Las rocas metamórficas de esta entidad datan del Triásico, pero existen rocas y sedimentos formadas y depositados durante el Cuaternario: representado por rocas ígneas de composición basáltica-andesítica, así como por depósitos lacustres y aluviales (Secretaría de Ecología del GEM, 2002).

Las principales estructuras geológicas que se presentan son aparatos volcánicos, algunos de los cuales se consideran entre los más notables del país: el Popocatepetl, el Iztaccihuatl y el Nevado de Toluca (Vázquez y Jaimes, 1989). Además existen fracturas y fallas regionales, asociadas a los fenómenos de vulcanismo y mineralización. Los aspectos de geología económica más importantes están relacionados con las rocas que

por su naturaleza primaria y las estructuras que las han afectado, constituyen zonas favorables para la explotación de acuíferos, de yacimientos minerales y de bancos de materiales para la construcción (INEGI, 2000c).

Las rocas más antiguas están representadas por metamórficas del Triásico. Las formaciones cretácicas están litológicamente clasificadas como calizas y calizas interstratificadas con lutitas. Aunque no cubren mucha extensión, estas rocas afloran discordantemente cubriendo las rocas metamórficas del Triásico, en localidades como Tonatico, Ixtapan de la Sal y Zumpahuacán (INEGI, *op. cit.*).

Las rocas del Terciario son en su gran mayoría andesíticas, pero se encuentran también rocas cuaternarias de tipo basáltico, que, por sus estructuras bien conservadas, evidencian actividad volcánica reciente.

Lo más reciente está representado por depósitos aluviales que rellenan los valles de los ríos que drenan hacia la cuenca del Río Balsas. Además de las estructuras volcánicas, en esta provincia existen fallas y fracturas que aparecen mineralizadas (INEGI, *op. cit.*).

1.3.2 Geología y Geomorfología circundante de Tultitlán.

Tultitlán forma parte de una depresión relativa, de una altitud media aproximada de 2245 metros, correspondiente al Valle de Cuautitlán. Este valle pertenece a la porción septentrional de la cuenca lacustre de México, cuyo desarrollo ocurrió en el terciario tardío y cuaternario temprano, en la era cenozoica (Gutiérrez, *et. al.* 1986).

El municipio está ubicado en la provincia fisiográfica del Eje Neovolcánico. Su parte montañosa está conformada por rocas ígneas de origen extrusivo del terciario, de tres periodos sucesivos de actividad volcánica (INEGI, 2000c). Su relieve es plano y se encuentra flanqueado por la Sierra de Guadalupe al sur y por el pie de monte de la Sierra de Monte Alto y Monte Bajo al occidente. Al norte, la continuidad de la planicie se ve interrumpida por el lomerío basáltico de Tultepec, que fue probablemente una isla durante la existencia de ambientes lacustres en el pleistoceno (SEDUE, *et. al.* 1985).

Geomorfológicamente, en esta región se tienen, en la parte sur, relieves accidentados, formados en su mayor parte por la Sierra de Guadalupe, que comprende altitudes mayores de 2250 metros (INEGI, 2000c) y relieves planos con depósitos lacustres en la mayor parte del municipio (Gutiérrez, *et. al.* 1986). Tal como se muestra en la Figura 1.4,

las zonas de transición incluyen lomeríos en el occidente del municipio y el pie de monte de la Sierra de Guadalupe (INEGI, 2000c).

El relieve montañoso de la Sierra de Guadalupe, se encuentra densamente disectado por el efecto de las corrientes estacionales. Los procesos erosivos son principalmente de carácter hídrico y se han acentuado por el aumento de la deforestación. Surgida entre 12 a 14 millones de años, se formó de lomeríos y prominencias de origen ígneo, con una altura máxima de 2,700 msnm (INEGI, *op.cit*). En general, está constituida por lavas intermedias y ácidas, y sus materiales sobresalen de los sedimentos lacustres que la rodean. Las sucesivas erupciones volcánicas originaron un relieve montañoso y determinaron, en una de sus fases, el cierre de una depresión que antiguamente drenaba hacia el sur (formando dos valles), ocasionando un ambiente lagunar asociado a un vulcanismo activo. Estas condiciones dieron lugar a la acumulación de los materiales que forman el subsuelo y que alcanzan espesores considerables.

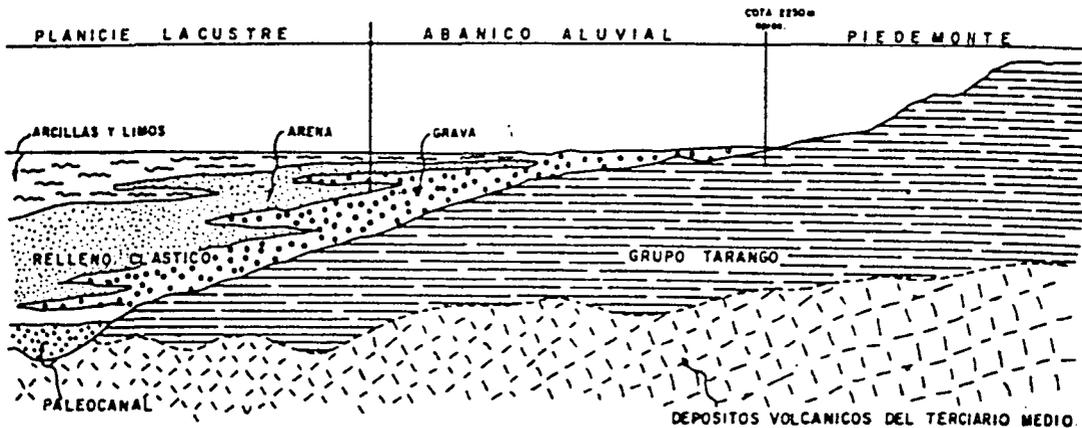


Figura 1.4. Corte transversal general indicando la transición entre el piedemonte y el relleno de la planicie
FUENTE: Gutiérrez, et al. (1986).

Los rellenos lacustres del área, se derivan de la erosión de las rocas ígneas mencionadas, depositadas como resultado de las erupciones formativas del grupo Chichinautzin. La planicie se formó principalmente por capas sedimentarias resultado del continuo deslave de las cordilleras circundantes y ha sufrido pocos cambios desde el punto de vista geomorfológico (INEGI, *op. cit*). Carece de accidentes topográficos; sin embargo, los aportes de descarga de las corrientes al pie del relieve montañoso, forman

un escaso piedemonte que tiende a extenderse debido a la pérdida de vegetación, facilitando el acarreo de sedimentos. Esta región presenta una pendiente regional de 0.5%, ligeramente inclinada de oeste a este (Gutiérrez, *et. al.* 1986). Su origen se remota a los procesos tectónicos y volcánicos que dieron lugar a la cuenca de México (Valverde, *et. al.* 1980). Estas condiciones permitieron la acumulación de varios centenares de sedimentos arcillosos lagunares interestratificados con depósitos de arenas y gravas provenientes del acarreo fluvial de las laderas vecinas, así como arenas y gravas volcánicas (SEDUE, 1985), conjuntamente con grandes cantidades de ceniza volcánica que fue arrastrada en escurrimientos y corrientes de lodos volcánicos, o lluvia de cenizas (INEGI, 2000c).

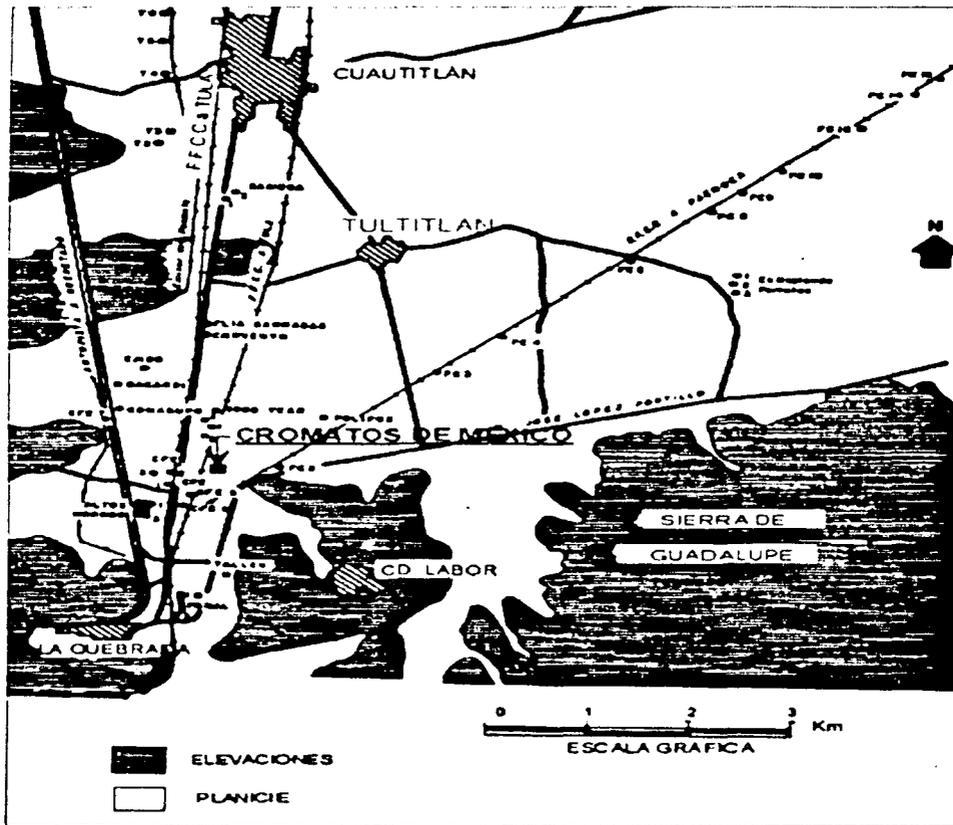


Figura 1.5. Topografía de la zona circundante.
FUENTE: Gutiérrez, *et. al.* 1986.

la Formación Tarango está constituida por tobos, aglomerados, depósitos fluviales, capas delgadas de pómez, horizontes de cenizas y arenas, e intercalaciones de lahares y brechas (INEGI, 2000c).

1.3.3 Hidrología superficial y subterránea

Tultitlán se encuentra ubicado dentro de la región hidrológica número 26 o del Alto Pánuco. Por sus dimensiones se encuentra dividida en varias subcuencas. Las subcuencas correspondientes a Tultitlán son: la "D" o del río Moctezuma, y la "P" que corresponde a la de los lagos de Texcoco y Zumpango (INEGI, 2000c). A su vez, el valle de Cuautitlán del cual forma parte el municipio, se encuentra limitado al sur por el parteaguas de la Sierra de Guadalupe y al oriente está confinado por el Gran Canal (Gutiérrez, *et. al.* 1986).

Las corrientes de agua superficial de la zona presentan escaso caudal moviéndose desde las porciones montañosas más elevadas, hacia la planicie con rumbo oeste a este y de sur a norte (Gutiérrez, *op. cit.*). Estas corrientes son estacionales, tienen sus cabeceras en las sierras vecinas y tendían a inundar la planicie lacustre, pero actualmente han sido canalizadas con fines de riego. Las corrientes superficiales más importantes son los ríos Cuautitlán y Tepetzotlán, mismos que tienen origen por las fuertes precipitaciones que ocurren en las sierras del poniente. Estos cursos de agua aportan materiales de acarreo y tienden a formar un piedemonte acumulativo, mediante abanicos aluviales que hoy sobreyacen los depósitos lacustres (Gutiérrez, *op. cit.*).

El porcentaje de escurrimiento e infiltración para la zona plana y para la zona montañosa, respectivamente es de 10% y 24% (INEGI, 2000c). Sin embargo, de acuerdo a análisis efectuados de datos de flujo de la antigua Secretaría de Recursos Hidráulicos, se sabe que se está realizando una sobreexplotación de los recursos hídricos, lo cual ha producido incluso cambios en las direcciones de algunos flujos de agua. En algunos casos, los niveles estáticos de los pozos, se han abatido más de 30m. (Gutiérrez, *et. al.* 1986).

Los flujos principales del escurrimiento subterráneo (Figura 1.6.) se producen de las zonas altas con gran captación de agua meteórica, hacia la planicie. La recarga principal se produce en las montañas del poniente y aunque la planicie es buena almacenadora de agua subterránea, la sobreexplotación a la que ha sido sometida, ha hecho disminuir tanto el nivel freático general, como los niveles estáticos (Gutiérrez, *op. cit.*).

1.3.4 Clima

De acuerdo a las cuatro estaciones meteorológicas del estado de México, se puede hacer una clasificación de tipos de climas respecto al porcentaje territorial que ocupan en él, tal como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 1.1. Climatología.

Tipo o subtipo	% de la superficie estatal
Cálido subhúmedo con lluvias en verano	11.46
Semicálido subhúmedo con lluvias en verano	10.42
Templado subhúmedo con lluvias en verano	61.03
Semifrio húmedo con abundantes lluvias en verano	0.58
Semifrio subhúmedo con lluvias en verano	11.02
Semiseco templado	5.28
Frio	0.21

FUENTE: INEGI (2000b), Carta de Climas.

El clima predominante es el templado (o mesotérmico). De acuerdo a la carta de Climas se puede afirmar que el clima predominante para Tultitlán y el área circundante, es templado subhúmedo con lluvias en verano (INEGI, 2000c). Las temperaturas máximas se presentan en los meses de abril y mayo. La temperatura media anual es de 20° a 22° C., mientras que los promedios de las temperaturas máxima y mínima son, respectivamente: 23.8° C y 15.9° C. Las temperaturas más elevadas se presentan en los meses de abril y mayo mientras que las más bajas se presentan en el mes de enero (INEGI, *op. cit*).

De datos obtenidos entre 1920 y 1958, se tiene que la precipitación total anual es de 727.1 mm, siendo el mes más lluvioso el de agosto con 140 mm y el más seco el de febrero con 4.4 mm. Para la planicie, se estiman 677 mm de precipitación (que equivale a un volumen medio anual de 211 millones de m³), mientras que para la zona montañosa se considera de 812 mm (equivalente a 581 millones de m³) aproximadamente (Gutiérrez, et. al 1986).

1.3.5 Edafología

La evolución y procesos geomorfológicos ya descritos, aunado a la posición topográfica y al tipo de clima, dan como resultado la presencia de dos clases de suelos, ambos vinculados genéticamente con los lagos cuaternarios (SEDUE, 1985). Dominan los

vertisoles y, en pequeñas cantidades, los solonchak. Ambos tipos son básicos, de textura fina. Los vertisoles se extienden por toda la planicie y aunque son apropiados para la agricultura, presentan salinidad y alteraciones, especialmente en las cercanías de las plantas industriales y de los canales de drenaje que transportan aguas residuales (INEGI, 2000c).

1.3.6 Flora y Fauna

En cuanto a la vegetación natural, esta ha sido reemplazada por campos de cultivo y actualmente, por el proceso urbano industrial. Únicamente quedan como resabios algunas especies arbóreas y maleza (INEGI, 2000c).

Los organismos del estrato arbóreo más representativos, son los siguientes: pirúl *Schinus molle*, jacaranda *Jacaranda acutifolia*, casuarina *Casuarina equisetifolia*, cedro *Cupressus lindleyi*, colorín *Erythrina americana*, tepozán *Buddleia cordata*, alcanfor *Eucalyptus globulus*, fresno *Fraxinus udhei*, trueno *Ligustrum japonicum*, capulín *Prunus capuli*, durazno *Prunus persica*, álamo plateado *Populus alba*, álamo temblón *Populus tremuloides*, álamo canadiense *Populus deltoides*, ahuejote *Salix bonplandiana*, entre otras.

La vegetación arbórea se localiza en pequeñas zonas al sureste dentro del municipio y en partes más altas de la Sierra de Guadalupe mismas que se encuentran cubiertas por matorral crasicaule, esto es especies espinosas con tallos suculentos, como biznagas. Sin embargo, parte de esta sierra ha sido plantada con fines de reforestación, especialmente eucalipto *Eucalyptus sp.* y cedro *Cupressus lindleyi* (INEGI, *op. cit.*).

La maleza (formaciones de hierbas invasoras agrupadas sin valor económico) se encuentra en áreas de disturbio ecológico como son las áreas de reforestación (INEGI, *op. cit.*).

Entre los animales, las aves representan el grupo que predomina en diversidad y se conocen las siguientes: tórtola *Columbina inca*, colibrí de diferentes géneros y especies, zenzontle *Mimus poliglottos*, cuilacoche *Toxostoma curvirostre*, gorrión mexicano *Carpodacus mexicanus*, gorrión común *Passer domesticus* (INEGI, *op. cit.*).

Los mamíferos más comunes de esta zona son el conejo *Silvilagus floridanus*, tuza *Pappogeomys merriam* y diversos géneros y especies de ratones (INEGI, *op. cit.*).

CAPÍTULO 2

La Planta de Cromatos de México

2.1 Antecedentes

En el año de 1958, se estableció en la colonia Lechería (calle Francisco I. Madero #30), perteneciente al municipio de Tultitlán, Estado de México, la empresa CROMATOS DE MÉXICO, S.A. (Figura 2.1). Dedicada a producir compuestos de cromo. Su producción principal era de doce toneladas diarias de cromato de sodio, 1 tonelada diaria de cromato de potasio, 8 toneladas diarias de sulfato de sodio y 6 toneladas al día de hidróxido de aluminio (Del Moral, 1991).

En sus inicios, la colonia Lechería fue una antigua estación de ferrocarril que posteriormente se convirtió en una zona con características urbanas y con una actividad industrial importante.

El proceso de producción de la planta se realizaba a cielo abierto, sin existir controles sobre las emisiones de polvos, descargas de aguas residuales y manejo de los residuos. Los residuos solubles provenientes de las tinas de lavado, de coloración amarilla y aspecto salino, fueron depositados desordenadamente en los patios de la antigua planta; después de algún tiempo, los residuos comenzaron a ofrecerse como material de relleno para pavimento y fueron utilizados como tal en las calles de las colonias Lechería y Recursos Hidráulicos, en la Vía López Portillo, en la carretera México-Cuautitlán y en las vías del ferrocarril a Pachuca (Del Moral, *op. cit.*).

Bajo estas circunstancias, los habitantes de la zona detectaron una coloración amarillenta en el agua doméstica con lo cual, las sospechas de contaminación en agua y medio ambiente, comenzaban a ser un hecho.

A su vez, fueron reportadas irritaciones y enfermedades respiratorias en los habitantes de los alrededores que incluso llegaban a condiciones críticas de perforaciones en los ductos nasales. Dados así los acontecimientos, los padres de familia de la escuela Reforma (que colindaba con un extremo de la planta) solicitaron la intervención de las autoridades competentes. Para 1975, el problema se vuelve de conocimiento público cuando el periódico Excélsior publica los resultados de los estudios realizados por la

UNAM junto con el diagnóstico que establece un elevado nivel de contaminación y evidentes riesgos para la salud de los habitantes del área circundante (SEDUE, 1985).

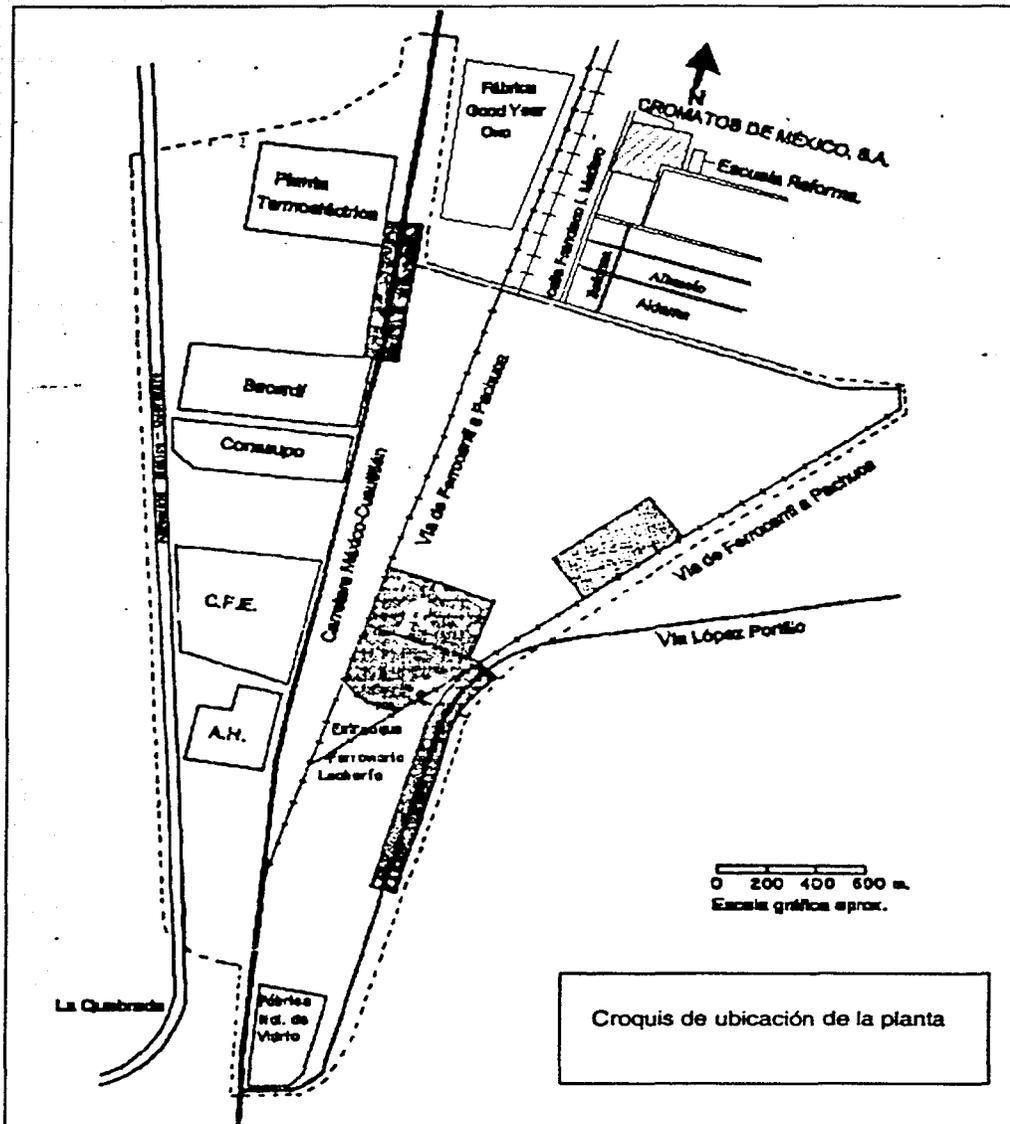


Figura 2.1. Ubicación de la Planta Cromatos de México, S.A..
Modificado de: Gutiérrez, et. al. 1986.

Después de un largo proceso y 20 años después de haber sido inaugurada la planta, en el año de 1978, se determinó la clausura definitiva de la fábrica y el traslado a los

terrenos de la planta de parte del relleno utilizado en la nivelación de calles. No es sino hasta 1981 que el predio que ocupaba la planta, embargado por las autoridades, fue rematado a sus actuales propietarios en \$2,070,000, cantidad que sirvió para el pago de indemnizaciones a los empleados que desde hacía tres años se habían quedado sin empleo (Miyasako, 1989).

Como parte de las posibles alternativas de solución para el tratamiento de los residuos de la planta, se consideraron las siguientes:

- 1°. Extraer los residuos y depositarlos en una barranca cercana al predio (Lomas de Cartagena). Esta opción que fue descartada por el riesgo en el traslado de los residuos y de contaminación de la nueva zona de depósito.
- 2°. Abrir una caja en un predio vecino, impermeabilizar con una capa de arcilla y depositar los residuos en la caja, cubriendo con material impermeable y una capa de asfalto. También fue descartada por el manejo de los residuos.
- 3°. Confinar los residuos *in-situ*, con muros de concreto, impermeabilizar con arcilla y pavimento.
- 4°. Con la última opción, se pretendía brindarle un tratamiento a los residuos y una reutilización industrial a los que ahora entran dentro de la clasificación hecha por la Procuraduría Federal para la Protección Ambiental (PROFEPA) como residuos industriales peligrosos dado el contenido de cromo hexavalente. Esta propuesta fue formulada por la Dirección de Obras del Estado de México y fue descartada por razones económicas (Del Moral, 1991).

En 1980 se aprueba la construcción de un "confinamiento" industrial, misma que inicia en 1983 (Miyasako, 1989). Se almacenaron, según algunas fuentes, 75 000 toneladas de residuos dispuestos a cielo abierto (Del Moral, 1991).

El confinamiento fue construido con muros de concreto reforzado, no se aplicó una base aislante en el subsuelo y no se contempló ningún mecanismo para recuperar los lixiviados. El material depositado fue colocado desordenadamente y mezclado con material de un banco de tepetate de la región y sobre ello se tendió una carpeta asfáltica de 10 cm de espesor (SEDUE, 1985).

A partir de entonces, se han realizado estudios para evaluar el grado de contaminación producida por la planta. La UNAM (a través de la Facultad de Química, el Instituto de

Geografía, y el Instituto de Geofísica), encabeza los estudios de evaluación del grado de contaminación de la región (SEDUE, 1985, Gutiérrez, et. al. 1986 y Miyasako, 1989).

Con el fin de definir la magnitud del impacto de la contaminación por cromo en suelos y aguas de la zona de Lechería, la Dirección General de Prevención y Control de la Contaminación de la antigua Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología (SEDUE), en 1984, solicitó al Instituto de Geografía y a la Facultad de Química de la UNAM, realizar investigaciones que permitieran determinar los niveles de cromo en suelo y agua, así como la dispersión que ha tenido el mismo en estos medios y una aproximación de las áreas afectadas por este contaminante. Estudios que finalizaron en 1985 y en 1987.

A la fecha, no se cuenta con un esquema metodológico para determinar el potencial de afectación y evaluar los riesgos a la salud y al ambiente asociados a los problemas derivados del manejo inadecuado de los residuos industriales generados por la planta, pero, más preocupante aún, resulta encontrar que a 24 años de haber sido clausurada, la planta se encuentra registrada como un sitio abandonado (SEMARNAP-INE, 1996), el responsable de la contaminación no ha aparecido y la restauración del sitio no se ha llevado a cabo .

Una conclusión generalizada en todos los estudios posteriores a la construcción del confinamiento, concuerdan en que las características de construcción que finalmente se llevaron a cabo, no cumplieron con las características técnicas adecuadas que hubieran impedido la infiltración del cromo VI hacia el subsuelo y las aguas subterráneas.

Empeorando el escenario, no se tomó en cuenta la elevada humedad que presentaban los residuos. Estos se depositaron tal cual sin la debida compactación, por lo cual, los efectos de la lixiviación condujeron a posteriores pérdidas de volumen de los residuos, provocando hundimientos y fracturas del asfalto que lo cubrió.

Actualmente, estas son las condiciones que prevalecen en el confinamiento de residuos de la planta de cromatos: tanto los hundimientos, como la ruptura del material con que se construyó la parte superior del confinamiento ("tapa"), permiten el paso de agua pluvial, incrementando la movilidad de la contaminación por cromo VI hacia las capas inferiores del terreno.

* Uno de los elementos de la política ambiental en México se rige por el principio del que contamina paga, el cual atribuye la responsabilidad de restauración de los sitios contaminados a quien ocasione tales daños.



Figura 2.2. Fotografía de uno de los hundimientos más grandes observados en el techo del confinamiento (con una dirección EW). Vista al fondo de la escuela Reforma. Agosto del 2000.

2.2 Características del confinamiento y estudios anteriores.

2.2.1 Dimensiones del confinamiento

El confinamiento de residuos provenientes de la planta, consta de dos cajones de distintos tamaños contiguos entre sí. A estos los separa una rampa que va a lo largo del contacto entre ambas cámaras. Las paredes son de concreto reforzado de 25 centímetros de ancho. Entre los muros y el material contaminante, se colocaron cuñas de tepetate. La parte superior se encuentra "sellada" con una capa asfalto semi-impermeable: compactado al 90% Proctor, de aproximadamente 10 cm de espesor, que no asegura impermeabilidad (estudios no publicados, 1983).

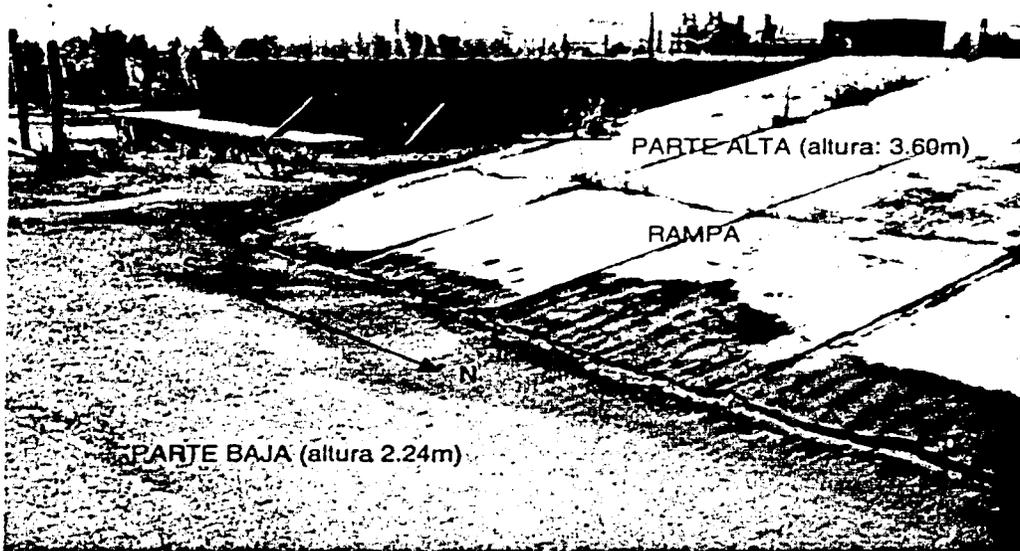


Figura 2.3. Fotografía desde el techo del confinamiento. Vista al fondo de la Sierra de Guadalupe. Agosto del 2000.

Las dimensiones del confinamiento, se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 2.1. Dimensiones del confinamiento.

Confinamiento	lado mayor: E-W (m)	lado menor: N-S (m)	Altura (m)
Parte baja	121.66	110.18	2.24
Parte alta	71.50	39.06	3.60

De las medidas obtenidas se puede calcular que el confinamiento de menor altura cuenta con una superficie aproximada de 12,415.12 m², mientras que el más alto cuenta con un área de 2,660 m² (Figura 2.4).

* Las áreas y perímetros son aproximados dado que las partes del confinamiento no son polígonos regulares.

Dado que no cuenta con ningún tipo de material que lo aisle en su parte inferior con el terreno, desde los primeros estudios realizados y hasta la fecha, se ha encontrado que la capa asfáltica de la parte superior del confinamiento presenta fisuras, irregularidades y grandes hundimientos, como consecuencia de la pérdida de volumen del material y de la lixiviación, factores que contribuyen a la rápida movilización del Cr VI hacia el subsuelo.

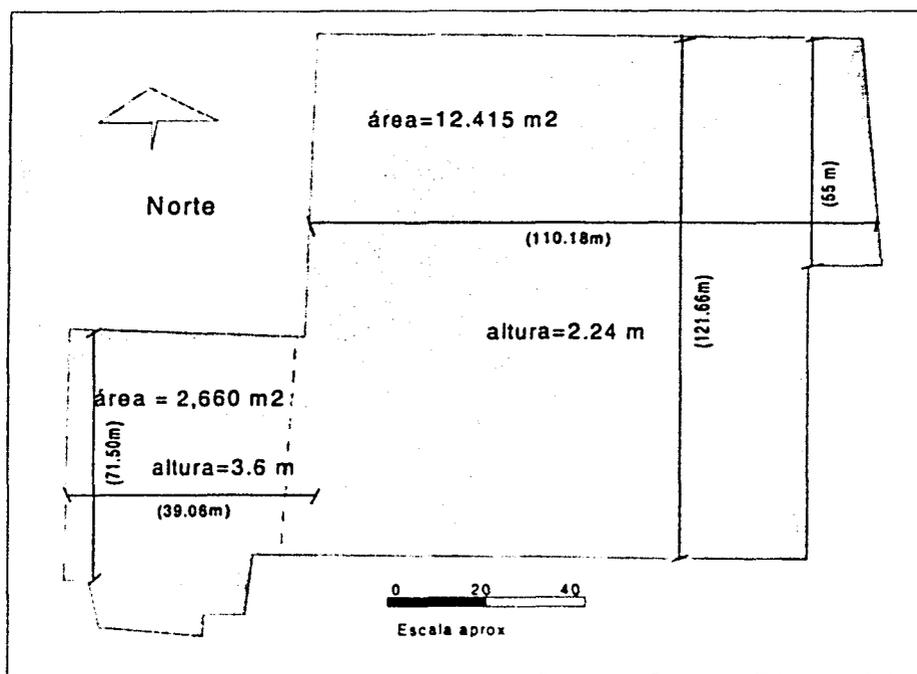


Figura 2.4. Dimensiones del confinamiento

En el mes de agosto del 2000, se logró hacer una visita a la planta y se observó que los hundimientos han aumentado (a decir de fotografías de estudios anteriores); la contaminación es notoria y muy grave (ver fotografías 2.5 y 2.6). En todos los muros de las instalaciones de la planta abandonada, se observa la corrosión del contaminante. A 24 años de la clausura de la planta, el problema sigue sin resolverse.

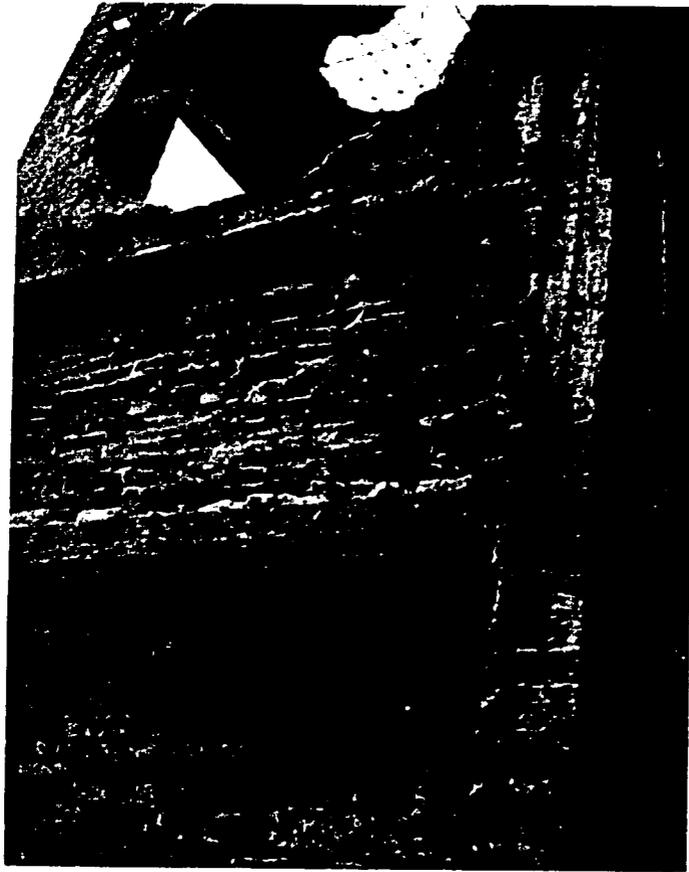


Figura 2.5. Fotografía de los muros contaminados de la planta.
Agosto del 2000.

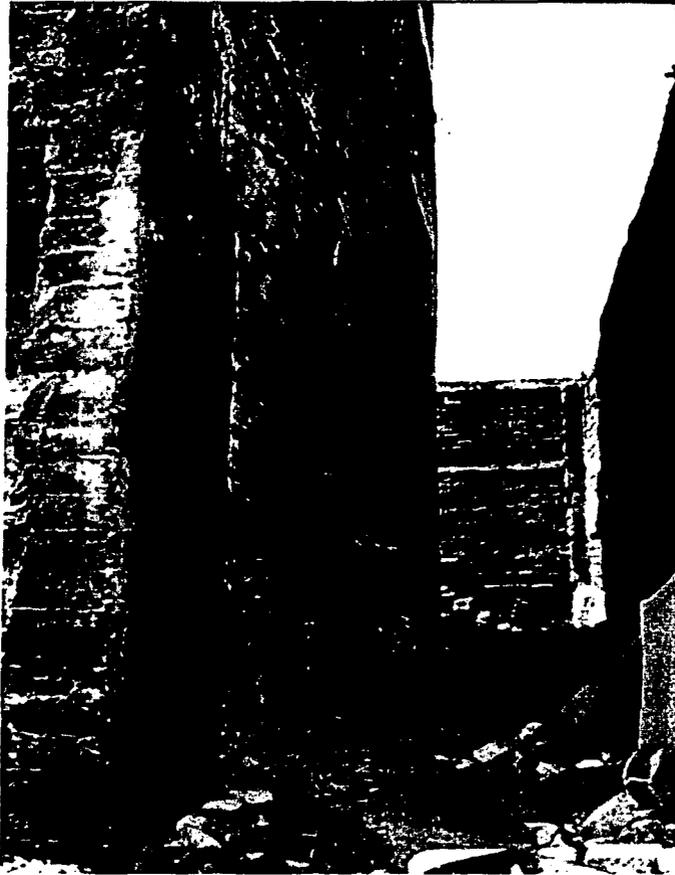


Figura 2.6. Fotografía de los patios de la planta,
Agosto del 2000.

2.2.2 Características de los materiales contenidos en el confinamiento

En cuanto a la información referente a la composición de los materiales del confinamiento, se tiene que los residuos salinos provenientes de las tinas de lavado y de los procesos de cristalización de la empresa, fueron depositados en la parte alta (y menor superficie) del confinamiento. La parte baja del confinamiento, (de mayor extensión) se construyó después de haber sido clausurada la planta y contiene básicamente los residuos de material que estaban dispersos o depositados en los patios de la fábrica (Del Moral, 1991).

Si bien los residuos que contiene el confinamiento de los residuos de la planta de Cromatos de México fueron depositados arbitrariamente, a partir de muestreos y análisis químicos solicitados por la SEDUE al Instituto de Geografía y la Facultad de Química de la UNAM, (SEDUE, 1988) se concluyó que:

- Para la parte alta del confinamiento, se encontraron residuos de aspecto salino provenientes de las tinas de lavado. Entre los compuestos identificados se encuentran: cromo y azufre, así como potasio, calcio, titanio, silicio, aluminio y hierro (SEDUE, *op. cit.*).
- Para la parte baja del confinamiento, también están presentes el cromo y el hierro. Muchos de los residuos tienen aspecto de grava y contienen sílice, óxido de hierro, carbonatos de calcio y magnesio, cantidades variables de compuestos insolubles de níquel, estroncio, magnesio, fósforo y potasio, así como pequeñas cantidades de sulfatos, cloruros y cationes solubles (SEDUE, *op. cit.*).

De los materiales mencionados, pueden identificarse como de baja movilidad (provocada principalmente por el acceso de humedad en el confinamiento), los compuestos insolubles de níquel, estroncio y fósforo, así como los minerales metálicos entre los que se encuentran el aluminio y los óxidos de hierro. Estos deben ser los que aportan una susceptibilidad magnética mayor.

Los minerales presentes, de mayor disolución, son: cromo, sodio, potasio, magnesio, cloruros y sulfatos. Estos elementos pueden estar asociados entre sí y migrar hacia las capas subyacentes al terreno sobre el cual se construyó el confinamiento. Todos ellos, presentan susceptibilidades bajas en contraste con los minerales mencionados en el párrafo anterior¹.

Como se mencionó anteriormente, se tomaron muestras de los residuos del confinamiento para su análisis. Posteriormente, se obtuvieron los valores de susceptibilidad magnética de las muestras cafés y amarillas. En la tabla 2.2 se presentan

¹ Asociado a la investigación de las propiedades físicas del **cromo**, se estudiaron las sustancias paramagnéticas, como el magnesio, y en general, algunas sales solubles. El valor de susceptibilidad de estas sustancias varía en unidades del orden de magnitud 10^{-4} cgs a 10^{-6} cgs (Logachev, 1978).

los resultados de los análisis realizados en el Laboratorio de Paleomagnetismo del Instituto de Geofísica de la UNAM.

Tabla 2.2. Valores de susceptibilidad medida de los residuos del confinamiento.

<i>Susceptibilidad de los residuos de la planta</i>		
	Unidades en cgs $\times 10^{-6}$	Unidades en SI $\times 10^{-5}$
Muestra amarilla	1 ^{er} caso: 14.5 2 ^o caso: 24.7	0.1154 0.1965
Muestra café	1 ^{er} caso: 381 2 ^o caso: 333	3.03 2.65

Con esto, se puede tener un conocimiento *a priori* de las características de los residuos del confinamiento.

2.3 Características químicas y epidemiológicas del cromo

En esta sección se incluyen las características principales del cromo por ser el contaminante más importante desde el punto de vista de daños a la población civil.

El cromo puede presentar estados de oxidación del 0 al VI. Los más comunes son el 0, III y VI, siendo el III es el más estable. Otro estado de oxidación importante es el VI, en donde el cromo pierde todos los electrones de valencia por lo que es un fuerte agente oxidante y menos estable que el III (Del Moral, 1991). Dentro de los compuestos oxidantes que puede formar se encuentran la cromita (CrO_4^{2-}), la hidrocromita (HCrO_4) y la dicromita ($\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$). En soluciones acuosas ácidas, es decir a pH menores de 7 (específicamente por debajo de 6 ó 6.2), la hidrocromita aumenta y para pH muy bajos, las especies de dicromita aumentan. (U.S.EPA, 1984).

Cuando el cromo forma compuestos con el hierro (Fe), la relación Fe/Cr es muy variable ya que el Fe, puede ser sustituido por magnesio y el Cr, por Fe III o por aluminio. De ahí que existen tres tipos de minerales de cromita: cromita con alto contenido de cromo, cromita alta en hierro y cromita abundante en aluminio (Del Moral, 1991).

Se ha demostrado que el cromo se encuentra en el medio ambiente aunque no existan fuentes antropogénicas. Existe información acerca de la entrada de algunos metales pesados a la atmósfera provenientes del espacio interplanetario, que se consideran desechos espaciales de asteroides, cometas y meteoritos (Rosas, 1984). Sin embargo, las concentraciones en el aire, agua y suelo pueden aumentar debido a la presencia de actividades industriales.

Debido a las propiedades oxidantes y su alta movilidad, el cromo VI es la forma más tóxica y representa un peligro para los organismos vivos, aun en niveles muy bajos de concentración. Por otro lado, los compuestos de cromo III pueden no ser peligrosos si se encuentran a las concentraciones y pH que normalmente se encuentran en la naturaleza y en el ambiente en donde son poco solubles (a pH mayores de 4). Se sabe que en estas condiciones su permeabilidad en las membranas celulares es muy baja. Sin embargo, para casos de contaminación en que se han alterado las condiciones físicas normales (especialmente el pH), el cromo III, en solución, puede causar toxicidad ya que forma compuestos hexacoordinados con grupos carboxílicos de proteínas o metabolitos más pequeños, con ciertos aminoácidos ácidos nucleicos y nucleoproteínas. Además es capaz de formar enlaces sumamente estables con el ADN y ARN, pudiendo producir efectos cancerígenos o mutagénicos (SEDUE, 1988 y U.S.EPA, 1979).

En la industria química, los cromatos y dicromatos de sodio son obtenidos directamente de la cromita y constituyen la materia prima para la producción de otros compuestos de importancia en la producción. El proceso básico para la elaboración de cromatos es el mismo para todas las fábricas y consiste en la calcinación de la cromita previamente molida con carbonato de sodio y cal. Se forma el cromato de sodio, que a su vez, es convertido a dicromato de sodio cristalino (Del Moral, 1991).

En las industrias químicas dedicadas a la producción de cromatos, se han realizado mediciones de las concentraciones de cromo para muestras de aire en las salidas de extractores, y se han registrado altas concentraciones de estos compuestos (Del Moral, *op.cif*).

Las concentraciones a las cuales una sustancia empieza a dañar a un organismo, está en función de las características del individuo y de las de la especie, así como de los comportamientos del elemento a dichas concentraciones. Los valores establecidos como niveles máximos permisibles para una sustancia, siempre se basan en profundos estudios epidemiológicos y de laboratorio (SEDUE, 1988).

Para el hombre, comúnmente las repercusiones de toxicidad más agudas se presentan en sujetos que han estado expuestos a concentraciones muy altas de este elemento (Del Moral, 1991). La cantidad de cromo que puede ser absorbido por medio de las vías respiratorias depende del tamaño, del estado de oxidación y solubilidad de las partículas del cromo (U.S. EPA, 1998).

Los compuestos hexavalentes son más rápidamente absorbidos y depositados en el pulmón que los trivalentes. En el humano, al igual que otros organismos que ya han estado a pruebas experimentales, al inhalar polvos de cromo hexavalente, presentan ulceraciones en el septo nasal y puede provocar laringitis, bronquitis crónica, fibrosis pulmonar y cáncer pulmonar (Del Moral, 1991).

El aspecto clínico de la intoxicación por cromo tiene su mayor importancia en las exposiciones ocupacionales causadas por el contacto directo de cromo a que se encuentran expuestos los trabajadores de la industria del cromo (tanto la forma trivalente como la hexavalente). Estos pueden entrar al organismo a través de la piel, por inhalación o por ingestión. La presencia del compuesto ha sido evaluada con ayuda de análisis de orina y cabello de trabajadores de estas industrias. (U.S. EPA, 1998).

La piel, al contacto con el cromo hexavalente o trivalente, genera en ésta, al igual que en las mucosas oculares y nasofaríngeas, procesos irritativos crónicos intensivos (Del Moral, 1991). La ingestión del cromo hexavalente puede producir diarrea, dolor abdominal, vómito, leucocitosis, irritación gastrointestinal, úlcera gastroduodenal, hepatitis y nefritis (U.S. EPA, 1998).

En cuanto a las afecciones al entorno, el cromo hexavalente persiste como un soluble complejo de aniones. Al ser un agente fuertemente oxidante, reaccionará con la materia orgánica o con otros agentes reductores para formar cromo trivalente, por lo que en agua con alto contenido de materia orgánica, el cromo hexavalente presenta una permanencia mucho menor. Siendo soluble, puede viajar por el suelo hacia las plantas, alterando las propiedades naturales del mismo, disminuyendo la presencia de bacterias nitrificantes e incluso, provocando mutaciones en ellas (U.S. EPA, *op.cit*).

Por ello, aunque el cromo es vital para algunas funciones metabólicas del organismo humano, como la interacción con biomoléculas que regulan patrones metabólicos, la estabilización de la estructura terciaria de los ácidos nucleicos y de algunas proteínas, así

como la asimilación de la glucosa, la exposición del organismo a este compuesto en altas concentraciones, puede producirle daños irreversibles (Del Moral, 1991).

2.4 Evidencias de afectaciones por cromo

Actualmente, en el predio quedan algunas instalaciones de la antigua planta, y un confinamiento dentro del cual reposan directamente sobre el suelo natural los desechos de la planta. Las emisiones de polvos al ambiente se efectuaban por una chimenea ubicada a 15 metros de altura (Del Moral, 1991).

En 1977 se tomaron muestras de orina a 19 empleados administrativos y a 140 obreros de la planta Cromatos de México, así como a 980 personas residentes del área cercana. Los resultados obtenidos en esta fecha son alarmantes: el 46.4% de los obreros y el 15.8% de los empleados administrativos padecían de perforación del tabique nasal. El 22.9% de los obreros y 21% de los administrativos, presentaban conjuntivitis crónica (Tristán, 1984).

Además, se estudió a 32 viviendas ubicadas en la zona industrial, tomando 163 muestras de orina y 91 de cabello. Se tomó un área testigo con 50 viviendas de las cuales se analizaron 87 muestras de orina y algunas de cabello. Para el caso de la orina, se encontraron niveles de 21.4 a 172 ng/ml para personas de la zona industrial contra 7.1 a 9.6 para la zona testigo. De las muestras de cabello analizadas, se encontraron 5.1 mg/g en personas de la zona industrial y 0.68 mg/g en la zona testigo (Rosas, 1984).

Durante varios años se realizaron pruebas de concentraciones de cromo en agua de lluvia y en pozos de agua cercanos.

Para los depósitos de agua de lluvia, se obtuvieron concentraciones de 0.11mg/lt mientras que para bebederos de la escuela Reforma se registró un promedio de 2.8 mg/lt cuando el límite permisible, de acuerdo a la normatividad, es de 0.05 mg/L (Tristán, 1984).

En junio de 1978, el Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM demostró que tanto la población humana como los vegetales, habían acumulado cromo por encima de los niveles normales (Del Moral, 1991).

Entre 1985 y 1988, con el objetivo de analizar las concentraciones de cromo en suelo y agua de las zonas aledañas a la planta, la SEDUE, como parte de un estudio, diseñó un muestreo, tomando en cuenta la distancia al confinamiento, el tipo de suelo y la orientación de los flujos principales de escurrimiento subterráneo. El total de pozos muestreados, ubicados en la zona circundante a la antigua empresa, fue de 35, mismos que en su mayoría fueron estudiados durante un año. De ellos, se encontró que 10 contenían concentraciones mayores al límite permisible de cromo hexavalente, es decir, valores mayores a 0.05 ppm. Como parte de los resultados finales de este estudio (que incluyó también análisis de muestras de suelo), se estimó una superficie contaminada de 35 hectáreas aproximadamente, dentro de la cual, la parte más contaminada correspondía a un semicírculo con radio máximo de 1,300m a partir del confinamiento. (Del Moral, 1991; SEDUE, 1988; Gutiérrez *et.al.*, 1986).

CAPÍTULO 3

Fundamentos de Prospección Magnética

3.1. Breve historia del magnetismo y equipos de medición

El término magnetismo proviene de una región del Asia Menor que en la época de los filósofos griegos recibía el nombre de Magnesia. En ella, abundaba una piedra negra o piedra-imán capaz de atraer objetos de hierro y de comunicarles por contacto un "poder" similar. A pesar de que ya en el siglo VI A. de C. se conocían algunos fenómenos magnéticos, el magnetismo como disciplina no comienza a desarrollarse sino hasta más de veinte siglos después, cuando la experimentación se convierte en una herramienta esencial para el desarrollo del conocimiento científico. Gilbert (1544-1603), Ampere (1775-1836), Oersted (1777-1851), Faraday (1791-1867) y Maxwell (1831-1879), investigaron científicamente sobre las características de los fenómenos magnéticos.

William Gilbert, a mediados del siglo XVI, publicó el libro "De Magnete", una compilación de los conocimientos existentes hasta el siglo XVI. Fue el primero en realizar un estudio magnético con el cual concluyó que el campo magnético terrestre puede ser representado por un dipolo norte-sur con dirección aproximada al eje de rotación de la Tierra (Telford, 1996).

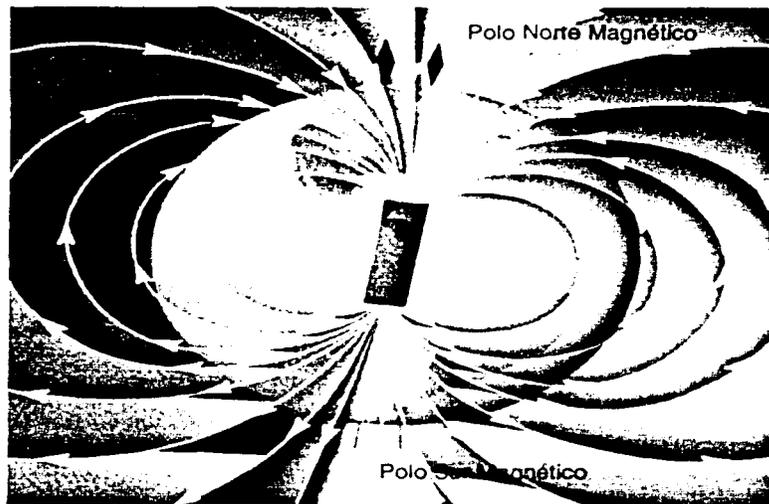


Figura 3.1. Modelo del dipolo magnetico terrestre.
FUENTE : Instituto de Geofísica,1999

A fines entonces, la observación de anomalías locales en la orientación del campo geomagnético fue conocida y empleada en la prospección de minerales férricos (Griem-Klee, 2000).

En 1870, Thalen y Tiberg construyeron un magnetómetro para determinaciones relativas, rápidas y exactas de las intensidades horizontal y vertical de la declinación por medio de las funciones seno y tangente (Griem-Klee, 2000). Durante mediados de 1900, la teoría dínamo fue propuesta por el físico americano de origen alemán Elsasser y el geofísico británico Bullard. Aunque se propusieron otros mecanismos para la generación del campo magnético, sólo el concepto dínamo se considera seriamente hoy (Dobrin, 1981).

Sin embargo, los métodos geofísicos empleados para la localización de minerales se utilizaron hasta 1915, cuando se introducen los primeros instrumentos magnéticos, como la brújula de declinación y el magnetómetro o balanza de precesión vertical tipo Schmith. Dichos instrumentos han sufrido modificaciones, pero se siguen basando en los mismos principios físicos. La balanza vertical se conforma de una aguja magnética orientada horizontalmente en la dirección Este-Oeste y oscilante sobre cuchillas de ágata o de cuarzo. Este variómetro permite la medición del campo vertical con variaciones en el rango de 1 gamma; por lo que es suficientemente preciso para ser empleado en las exploraciones mineras (Van Blaricom, 1980).

En el siglo XX, la Segunda Guerra Mundial empujó el desarrollo de los magnetómetros aerotransportados basándose en el principio electromagnético, puesto que los utilizaron para la detección de submarinos. Después de la guerra los magnetómetros aerotransportados estuvieron disponibles para la exploración. El magnetómetro de precesión nuclear apareció en 1955, el magnetómetro de absorción atómica (con vapor de cesio y rubidio) en 1961 y entre 1960 y 1970 el gradiómetro magnético aerotransportado (Van Blaricom, *op. cit.*).

Asimismo, se encontró que en el pasado, el campo magnético de la Tierra había tenido orientaciones distintas a la actual. Dicha conclusión se obtuvo gracias al desarrollo de estudios de paleomagnetismo, por medio de los cuales pudo establecerse la dirección del campo magnético correspondiente al momento de formación de las rocas (Greffiths, 1972). Hoy en día, la prospección magnética ha cobrado importancia para estudios de interés mineral y en la exploración petrolífera, cuando existen los contrastes de susceptibilidad magnética suficientes como para ser aplicada. Si lo anterior se cumple, entonces será posible llegar a establecer un modelo adecuado que explique el

comportamiento de los materiales estudiados, a partir de las anomalías magnéticas registradas.

En nuestro país, el primer observatorio magnético se instaló en 1903 en el entonces llamado pueblo de Cuajimalpa. Sin embargo, en 1911 al prolongarse la línea de tranvía cerca del observatorio, provocó que este se trasladara una vez más. El nuevo observatorio se instaló junto al Palacio Municipal del Pueblo de Teoloyucan, en el Estado de México (Instituto de Geofísica- UNAM, 2002).

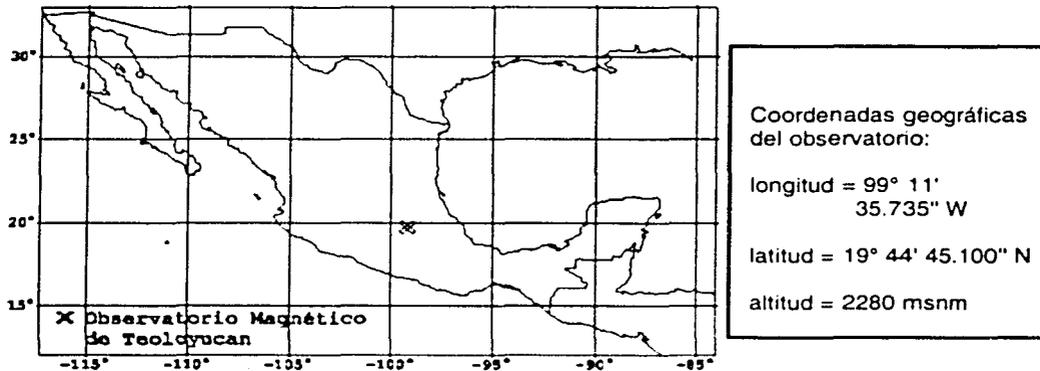


Figura 3.2. Localización del Observatorio Magnético de Teoloyucan.
FUENTE: Instituto de Geofísica, 2002.

Debido a que se registraba ruido magnético, en 1978, fue trasladado una vez más, ubicándose finalmente a 800 metros al SW del predio anterior y a una distancia de 36 kilómetros al norte de la ciudad de México, operando con el mismo equipo clásico de registro continuo, magnetómetros QHM, de precesión protónica Geometrics y RUSKA, los cuales se encuentran funcionando hasta la fecha (Instituto de Geofísica, 2002).

3.2 Caracterización del campo geomagnético

El campo geomagnético se describe como una aproximación de un dipolo magnético ubicado en el centro de la tierra, cuyo eje está inclinado 11.5° con respecto al eje de rotación de la misma, donde, por convención, al polo magnético ubicado cerca del polo norte geográfico, se le denomina Polo Norte Magnético y al polo magnético situado cerca del polo sur geográfico, Polo Sur Magnético (Figura 3.1).

El campo magnético observado en la Tierra cambia constantemente. Medido en cualquier punto sobre la superficie terrestre, es una combinación de varios campos magnéticos

generados por distintas fuentes. Estos campos se superponen e interactúan entre sí. Más del 90% del campo medido es de origen interno. Este se produce en el centro de la Tierra (principalmente en el núcleo externo por corrientes de convección) y por las anomalías magnéticas regionales (Figura 3.3). Esta porción del campo geomagnético varía lentamente en el tiempo y se puede describir con Modelos Matemáticos como el Campo de Referencia Geomagnético Internacional (International Geomagnetic Reference Field: IGRF) o con el Modelo Magnético Mundial (World Magnetic Model: WMM).

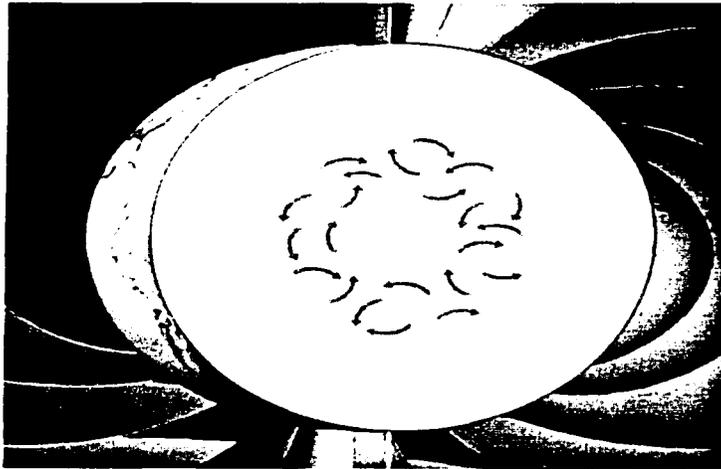


Figura 3.3. Corrientes de convección en el núcleo externo de la Tierra
FUENTE: Instituto de Geofísica, 1999.

Por otra parte, el flujo diferencial de iones y electrones dentro de la magnetosfera y en la ionosfera, forma sistemas de corrientes eléctricas que producen variaciones en la intensidad del campo magnético terrestre. Estas corrientes externas, se generan en la atmósfera superior ionizada y en la magnetósfera, varían en una escala de tiempo mucho más corta que la del campo interno y pueden crear campos magnéticos importantes (Figura 3.4).



Figura 3.4 Influencia del viento solar en el campo magnético terrestre.

FUENTE: Stern, 2000.

Otras fuentes de influencia son los campos que provienen de corrientes eléctricas que fluyen en la atmósfera superior ionizada y los campos inducidos por corrientes que fluyen dentro de la corteza terrestre.

Además, de las fuentes internas de la Tierra situadas en el centro de ella que producen magnetismo, en las mediciones del campo magnético también son importantes las anomalías que se manifiestan como desviaciones muy localizadas del campo magnético respecto a la distribución que habría en el supuesto de que el campo magnético terrestre fuese originado por un solo imán orientado según el eje magnético (Barreto, 1997).

Al realizar el análisis del campo geomagnético, suele existir la necesidad de separar los valores medidos en la superficie de la Tierra de las partes que se originan en el exterior de la tierra y las partes que tienen su origen en el espacio exterior. De una manera simplificada, es posible escribir la siguiente expresión:

$$\mathbf{B} = \mathbf{B}_0 + \mathbf{B}_r + \mathbf{B}_c + \mathbf{B}_t$$

Donde:

B es el valor del campo geomagnético medido en la superficie de la Tierra

B_0 es el valor de un campo magnético teórico producido por un dipolo magnético que tiene su eje inclinado un ángulo de aproximadamente 11.5° en relación con el eje de rotación de la Tierra y que no pasa exactamente por su centro. Su valor es mayor al 90% del valor medido B .

B_r es el llamado *campo residual* que puede ser asociado con varios dipolos más pequeños que el dipolo cuasi central, que se localizan más superficialmente, en el manto terrestre, en diferentes regiones del planeta.

B_c es llamado *campo cortical* y tiene su origen en la corteza terrestre en regiones más pequeñas. Sus efectos son localizados y es usualmente conocido como campo de anomalías.

B_t es la parte del campo medido en la superficie terrestre que varía con el tiempo de manera mucho más sensible que los otros términos. Este campo se origina fuera de la tierra, es decir, es un campo externo (Barreto, 1997).

En el sentido estricto, el campo geomagnético varía no solo con la posición en la superficie de la Tierra, sino es también con el tiempo. Estas dos condiciones de variabilidad pueden ser definidas en la siguiente fórmula:

$$B = B(\varphi, \lambda, R, t)$$

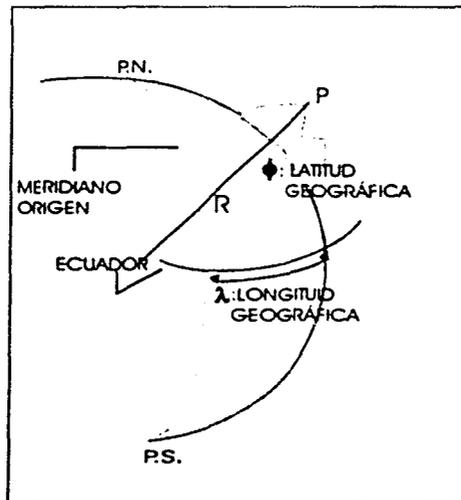


Figura 3.5. Coordenadas geográficas de un punto sobre la corteza terrestre.

Lo que significa que el campo geomagnético depende de la latitud ϕ , de la longitud λ , de la distancia al centro de la Tierra R , y del tiempo t (Barreto, *op. cit.*).

Si consideramos un punto en la superficie, los valores de la latitud, longitud y la distancia al centro de la Tierra serán constantes, así que, de manera general, podemos decir que el objetivo de un observatorio magnético es el de medir las variaciones temporales del campo geomagnético en un punto de la superficie terrestre.

Para definir el campo magnético en un punto de la tierra, se deben obtener 5 parámetros: declinación (**D**), inclinación (**I**), intensidad horizontal (**H**), intensidad vertical (**Z**) e intensidad total (**F**), donde **F** se obtiene calculando: $F = \sqrt{H^2 + Z^2}$.

Así pues, tenemos que:

H: es la componente horizontal del campo: la proyección del vector total **F** sobre el plano horizontal

Z: es la componente vertical del campo: la proyección del vector total **B** sobre el plano vertical

D: (declinación) es el ángulo que forma el vector **H** con la dirección norte

I: (inclinación) es el ángulo que forma el vector de campo geomagnético con el plano horizontal.

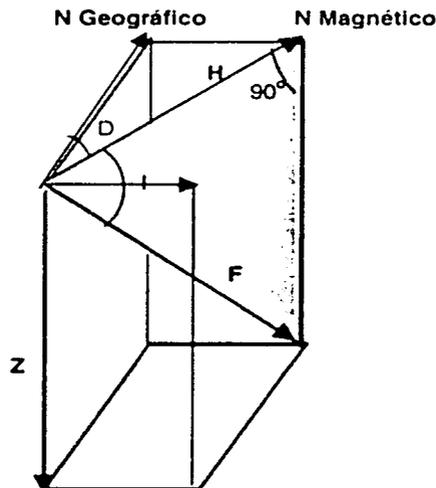


Figura 3.6. Componentes del campo geomagnético.

Por convención, la declinación se considera positiva cuando se mide hacia el este y la inclinación e intensidad vertical, positivas al apuntar hacia dentro de la Tierra.

El plano vertical que pasa por **F** y **H** es el *meridiano magnético local*.

Si se hacen observaciones con una aguja magnética en varios puntos sobre la Tierra, se encuentra que en gran parte del hemisferio norte el extremo N de la aguja se inclina hacia abajo, mientras que en gran parte del hemisferio sur el extremo S de la aguja adopta análoga posición. En cada meridiano, habrá un punto donde la aguja quedará horizontal (esto implica una inclinación de cero); la línea que une a todos los puntos donde la inclinación de la aguja magnética es cero, es el ecuador magnético que tiene una forma irregular y no coincide exactamente con el ecuador geográfico (Dobrin, 1981).

3.3 Variaciones del magnetismo terrestre

Las intensidades promedio del campo magnético terrestre incluye rangos desde los 25000, hasta las 70000 gammas. La siguiente figura, muestra que en la República Mexicana se tiene un rango entre los 35000 gammas (en la parte sur del país) hasta poco menos de 50000 gammas¹ (para los estados del norte).

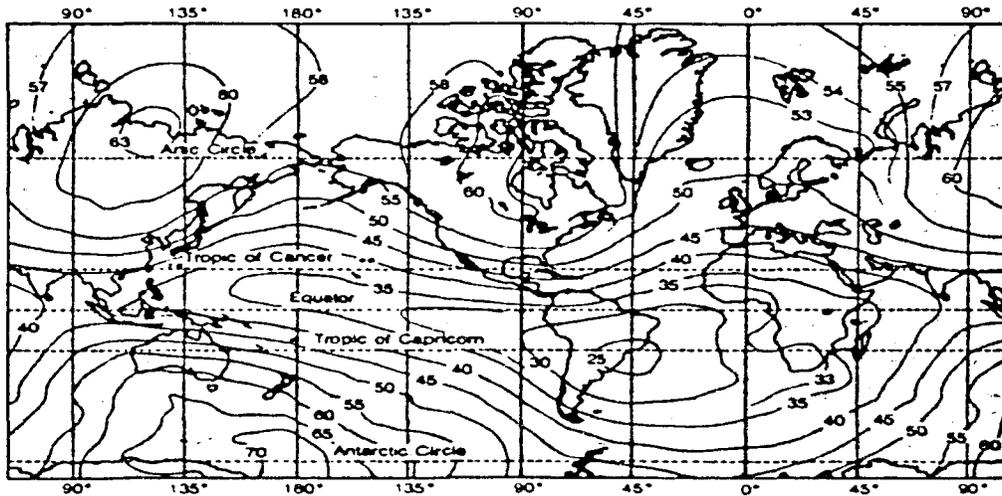


Figura: 3.7. Intensidad Total del Campo Magnético Terrestre (medida en kilo-gammas)
FUENTE: Van Blaricom (1980)

¹ 1 gamma = 1 nanotesla (ηT)

Sin embargo, como ya se ha mencionado, el campo magnético terrestre, varía constantemente en el tiempo. A aquellas variaciones, con cierta periodicidad, cuya amplitud es de hasta 35 o 40 gammas, atribuidas a la actividad solar que genera distorsiones en la atmósfera terrestre, se les llama *variaciones diurnas*. Estas tienen mayor amplitud durante el día que durante la noche y durante el verano que durante el invierno, por lo que se entiende que la intensidad de variación es directamente proporcional a la duración de la iluminación solar en la zona de observación (Van Blaricom, 1980).

Así como se tiene registro de las variaciones periódicas a través del tiempo, de igual manera se tiene evidencia de la existencia de variaciones aperiódicas. Estas se manifiestan como bruscas perturbaciones de duración e intensidad muy variable y su amplitud es mayor a la de las variaciones diurnas. Su presencia es mucho más frecuente en latitudes mayores, principalmente en las regiones polares. Estas variaciones impredecibles, reciben el nombre de *tormentas magnéticas* y se asocian también con la actividad solar, específicamente con las manchas solares y las erupciones cromosféricas.

Cuando estos repentinos cambios ocurren durante el levantamiento magnético, lo más adecuado es suspender las mediciones pues no existe manera de corregir los datos magnéticos por los efectos de las tormentas magnéticas. (Van Blaricom, *op. cit.*).

El comportamiento típico de una tormenta magnética puede apreciarse en la siguiente figura:

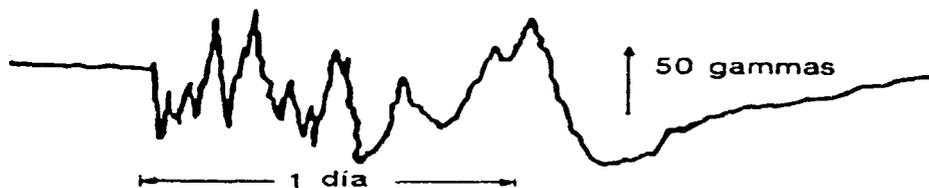


Figura 3.8. Comportamiento típico de una tormenta magnética.
FUENTE: Van Blaricom (1980).

3.3.1 Correcciones de datos de campo.

Descritas ya las distintas fuentes que pueden producir cambios en los registros magnéticos, al aplicarse un levantamiento magnético únicamente hay que cerciorarse de que los datos de campo no han sido influenciados por cambios repentinos (tormentas magnéticas) en los días en que se lleven a cabo los registros de campo.

El magnetograma del observatorio más cercano a la zona de estudio (Teoloyucan), Figura 3.9, correspondiente al día del levantamiento magnético (2 de septiembre de 1988), así como los datos obtenidos en la estación base, permitieron considerar que se trataba de un día adecuado para llevar a cabo el levantamiento magnético, por lo que los datos se corrigieron por variación diurna².

Además, por la cercanía al Observatorio Magnético de Teoloyucan, se decidió utilizar los datos brindados por este para el promedio del mes y para los parámetros de campo total, (declinación, inclinación e intensidad total del campo geomagnético) para llevar a cabo el procesamiento de datos y para el desarrollo de los modelos magnéticos.

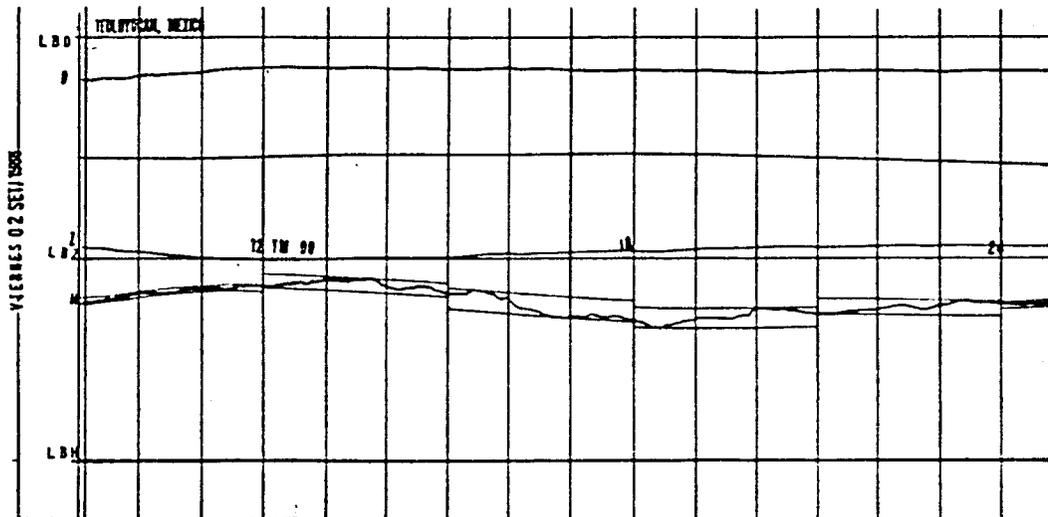


Figura 3.9. Magnetograma correspondiente al día del levantamiento.

² NOTA: La corrección diurna se obtiene al comparar el valor de la línea base: F_0 (obtenida a partir de los datos del observatorio de Teoloyucan), con los datos de campo obtenidos.

CAPÍTULO 4

Procesamiento de Datos

4.1 Levantamiento Magnético

Con el fin de obtener los datos magnéticos necesarios para la posterior interpretación magnética e inferir conclusiones respecto a la distribución del cromo dentro de los confinamientos que "resguardan" los residuos de la antigua planta, se diseñó el levantamiento de manera que este cubriera la totalidad de ambos. Personal del Instituto de Geofísica, llevó a cabo en 1988, un levantamiento topográfico con teodolito para definir los puntos de medición sobre el techo del confinamiento, lo cual permitió realizar el levantamiento magnético el día 2 de septiembre del mismo año.

Las líneas trazadas para el registro magnético se ubicaron, en general, con dirección nort-sur y con separación de 10 metros entre sí. La separación de las líneas cercanas a los bordes de los confinamientos y de la rampa no guardaron tal relación por la irregularidades geométricas de las dimensiones de los confinamientos. Las líneas sobre las que se realizaron los registros magnéticos suman un total de 19, y el número de datos tomados en campo suman un total de 222 (Figura 4.1).

La separación entre los puntos de medición, fue también de 10 metros de distancia (con las excepciones correspondientes a las irregularidades mencionadas). El croquis de la ubicación de las cámaras, la rampa y las líneas de levantamiento, puede observarse en la Figura 4.1.

Una vez realizado el trazado de líneas N-S y ubicados los puntos de muestreo (a cada 10 metros de distancia), se tomaron los valores del campo magnético total. El levantamiento magnético fue realizado utilizando un magnetómetro de precesión protónica marca Geometrics, modelo G-816.

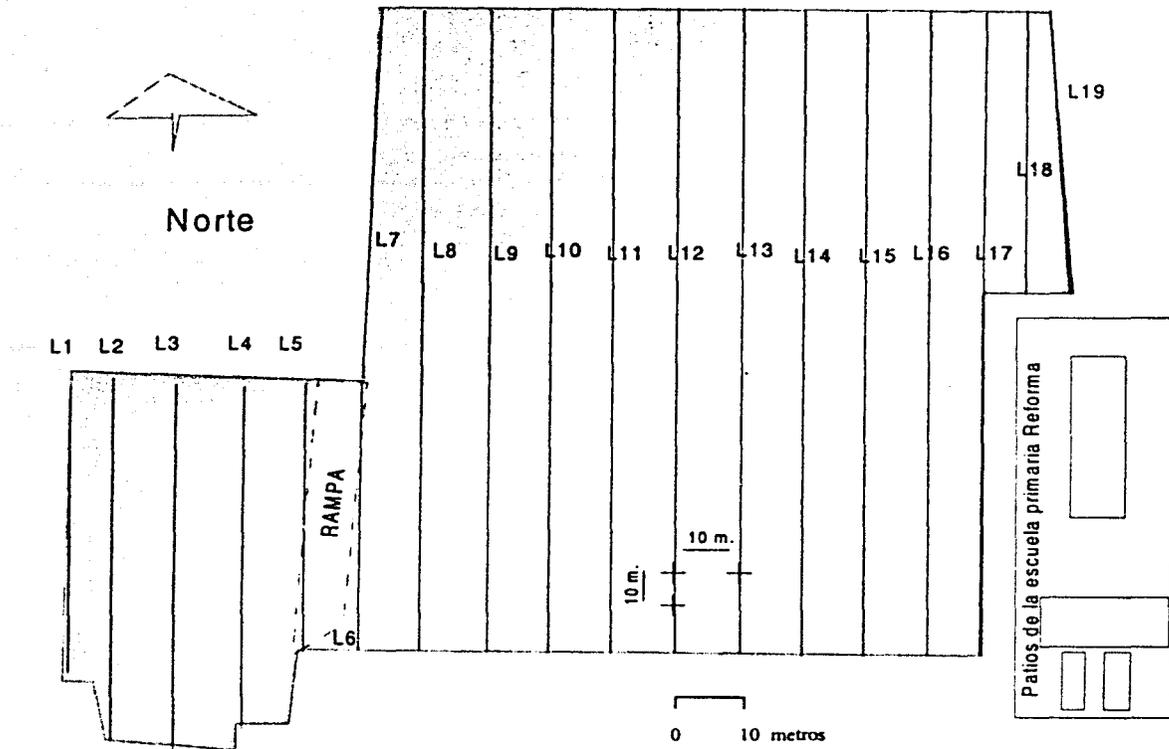


Figura 4.1. Líneas del levantamiento magnético (2 de septiembre de 1988).

Tabla 4.1. Datos magnéticos de inclinación, declinación e intensidad total para el mes de septiembre de 1988.

Parámetro	Valor
Inclinación (I)	47° 30.8'
Declinación (D)	7° 19.3'
Campo Magnético Total (F)	42 784 ηT^1

FUENTE: Instituto de Geofísica, 1996.

¹ 1 ηT = 1 gamma

Con los valores de campo corregidos, se realizaron los mapas de anomalías magnéticas de intensidad total para cada uno de los confinamientos ubicados en los patios de la empresa Cromatos de México. Los valores varían de 42000 η T a 43680 η T (Figura 4.2).

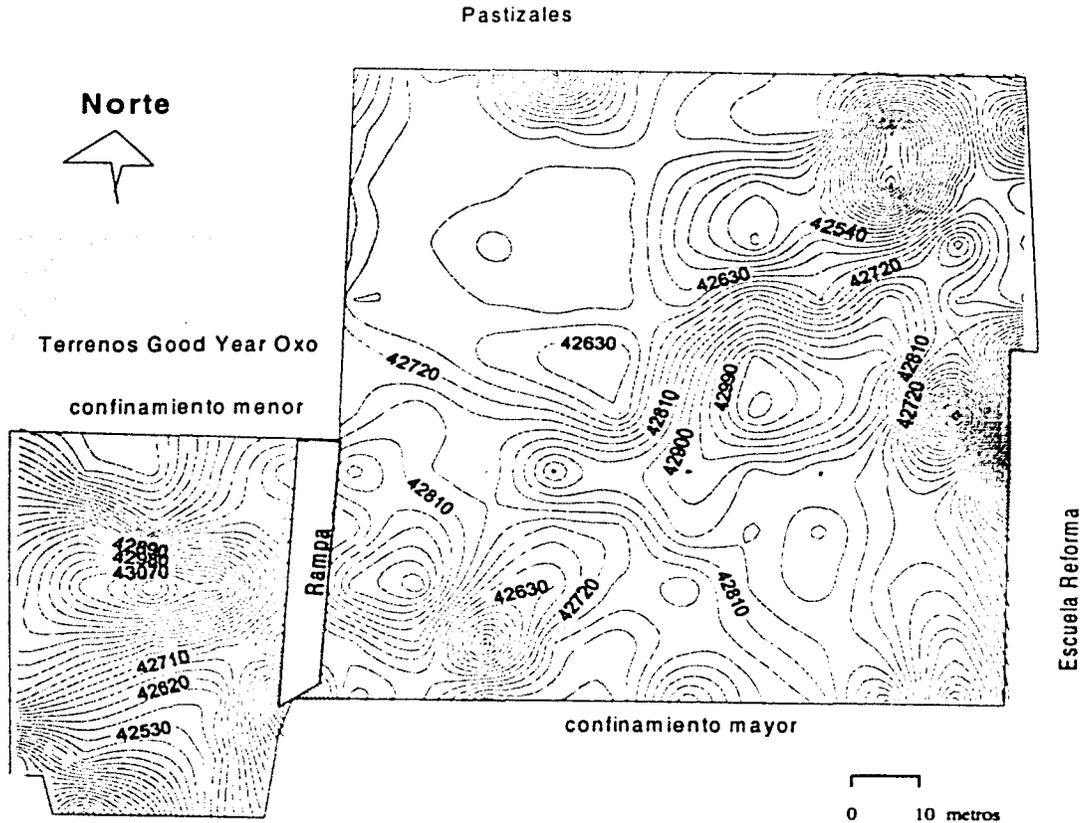


Figura 4.2. Valores de campo magnético de intensidad total. Isolíneas cada 30 η T.

4.2 Características del equipo de medición

Como ya se mencionó con anterioridad, el magnetómetro utilizado en el estudio es el de precesión protónica, también llamado magnetómetro de protones, utilizado para medir la intensidad magnética total. Consta de un sensor lleno de un líquido con átomos de hidrógeno, Kerosen u otro hidrocarburo, que son excitados por un campo magnético artificial producido por una bobina externa al recipiente. Al cesar la corriente excitadora en la bobina, ocurre una interacción entre los campos atómicos y el campo geomagnético local,

produciéndose en los ejes de giro atómico la llamada "precesión de Larmor". Esta interacción puede ser detectada y de esta manera, se puede conocer la intensidad total F del campo geomagnético local.

El registro lo puede realizar fácilmente una o dos personas colocándose sobre los puntos de registro de interés, como se muestra en la Figura 4.3.

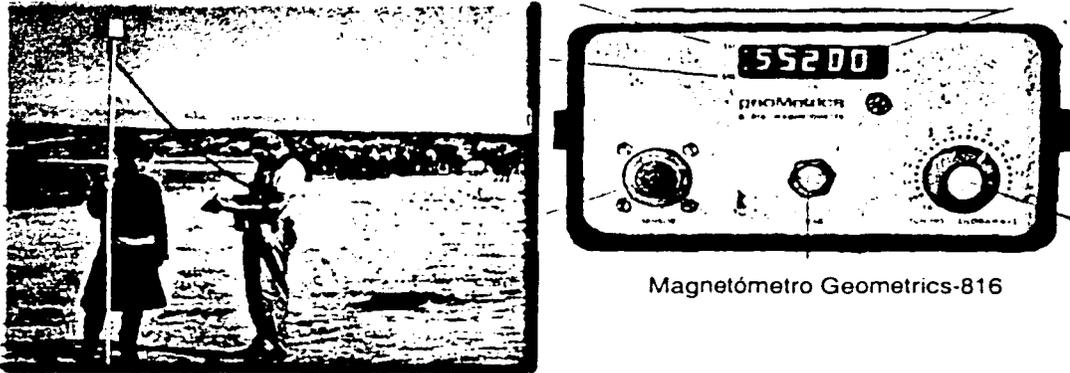


Figura 4.3. utilización en campo del Magnetómetro de precesión protónica.
FUENTE: Geometrics, 2002.

Las características del magnetómetro utilizado para las mediciones son las siguientes (Geometrics, 1973):

modelo:	magnetómetro de protones portátil G-816/826
sensibilidad:	1 gamma (sistema de unidades <u>cgs</u>).
rango:	20 000 a 90 000 gammas (equivalente al mismo valor en ηT)
Sintonización:	interruptor de multiposición con indicador de amplitud de la señal.
Gradiente (tolerancia)	excede los 800 gammas/ft
Muestreo índice:	botón de encendido manual, una lectura cada 6 segundos.
Salida:	5 dígitos numéricos con lectura en gammas
Precesión (campo total)	+ - 1 gamma para 0° a $+50^{\circ}$ C de rango de temperatura. El magnetómetro de protones portátil modelo

G-816/826 es un sistema diseñado para la obtención de lecturas de la intensidad del campo magnético total de la Tierra y la precisión de cada medida no es afectada por la orientación del sensor.

4.3 Procesamiento de la información magnética obtenida

La interpretación de las anomalías magnéticas es complicada debido a tres factores principales:

- El primero, es que el campo magnético presenta tanto fuerzas de repulsión como de atracción, complicando su interpretación, lo cual no ocurre con las anomalías gravimétricas, donde la fuerza existente es siempre de atracción.
- Las anomalías magnéticas pueden ser generadas tanto por inducción en la dirección del campo magnético terrestre, como por magnetismo remanente; muchos autores han demostrado que el magnetismo remanente puede ser importante en la contribución del campo anómalo. Sin embargo, generalmente se asume que las anomalías son causadas por inducción, lo cual implica que el vector de magnetización y el campo geomagnético serán paralelos.
- Por último, debido a que el vector del campo geomagnético y el vector de magnetización del cuerpo anómalo no se encuentran verticalmente dirigidos hacia el centro de la Tierra, ocurren distorsiones en que se traducen en anomalías magnéticas asimétricas que complican la modelación e interpretación magnéticas (Figura 4.4.) y que se deben, fundamentalmente, (siendo las anomalías función de la inclinación y la declinación del campo inductor y de la dirección de la magnetización y de los campos magnéticos de los cuerpos anómalos presentes en el subsuelo) a que la inclinación del vector geomagnético y la inclinación del vector de magnetización, se encuentran formando un ángulo (distinto de 90) respecto a la horizontal, por lo que las anomalías presentan un corrimiento respecto a la ubicación del cuerpo (Suro, 1980).

Por ello, para eliminar esta dificultad y facilitar la interpretación de las anomalías magnéticas, resulta importante transformar la señal magnética original, a una anomalía conocida como reducción al polo.

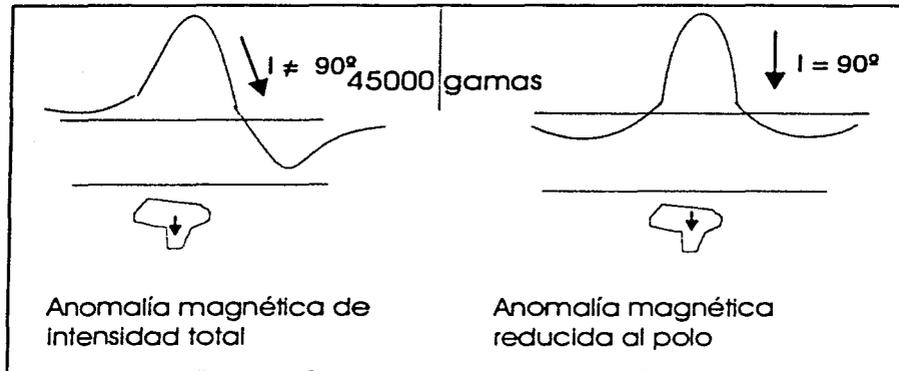


Figura 4.4. Esquema simplificado de una anomalía magnética antes y después de haber sido reducida al polo.

4.3.1 Reducción al polo magnético utilizando un algoritmo de Transformada Rápida de Fourier.

Con la finalidad de facilitar la interpretación de las anomalías magnéticas obtenidas, se decidió transformar la señal utilizando el algoritmo bidimensional desarrollado por Patrik Ervin en 1976 (Anexo 1), para realizar la reducción al polo de la señal utilizando una doble transformada rápida de Fourier.

La Transformada Rápida de Fourier, FFT (Fast Fourier Transform), es un algoritmo que permite calcular la Transformada de Fourier Discreta DFT (Discret Fourier Transform) con más rapidez que los algoritmos convencionales. Se utiliza con mucha frecuencia ya que reduce el número de adiciones y multiplicaciones requeridas para su cálculo, disminuyendo así mismo, los tiempos requeridos para ello. Utiliza ecuaciones recursivas que reciben dicho nombre ya que las posteriores se generan siempre en función de la anterior.

Anteriormente, Baranov y Naudy (1964), habían propuesto una metodología con la finalidad de superar la distorsión de las anomalías magnéticas. Dichos autores desarrollaron un procedimiento matemático para transformar la señal la intensidad de campo total en un campo magnético vertical equivalente (Ervin, 1976) produciendo una anomalía que se observaría en caso de que el cuerpo anómalo fuera físicamente desplazado y medido en el polo magnético.

Sin embargo, y aunque el procedimiento de Baranov fue decisivo, se encontraron inconvenientes prácticos para el cálculo aplicando este método ya que los datos registrados deben formar espacialmente una inusual malla triangular con uno de sus ejes orientado hacia el norte magnético, complicando de esta forma, el manejo de los datos. Además, requiere excesivas evaluaciones numéricas de integrales dobles con las consecuentes pérdidas de exactitud. También se suman otros inconvenientes, como es el no poder utilizar este método para datos tomados en latitudes pequeñas y no poder compensar el efecto de magnetismo remanente para aquellos casos en que la orientación de este último es conocido (Ervin, *op. cit.*).

Battacharyya (1965), propone una alternativa que elimina muchas de las restricciones del método de Baranov. Expresa el campo de intensidad total en función de dobles series de Fourier, en una malla rectangular, facilitando la solución analítica de la doble integral. Además, el método puede aplicarse a datos de cualquier valor de latitud y si el magnetismo remanente es conocido, puede considerarse en los cálculos (Battacharyya, 1965).

Sin embargo, aunque el algoritmo propuesto por Battacharyya resuelve muchos de los problemas asociados a la técnica de Baranov, existen inconvenientes adicionales para el cálculo de los coeficientes de la doble serie de Fourier y de los valores del campo reducido, al requerir de numerosos cálculos trigonométricos (Ervin, 1976).

En 1976, Ervin plantea una alternativa con un algoritmo computacional basado en el de Battacharyya. Utiliza también transformaciones con dobles series de Fourier pero presentando un algoritmo más simple que reduce sustancialmente el tiempo requerido para calcular el campo magnético reducido al polo. Es necesaria una matriz de datos equiespaciados y, dado que utiliza la Transformada de Fourier, requiere que el número de

columnas y renglones cumplan la condición de ser múltiplos de 4 (Ervin, *op. cit.*). Los datos magnéticos tomados para formar dichas matrices se muestran en la Figura 4.5.

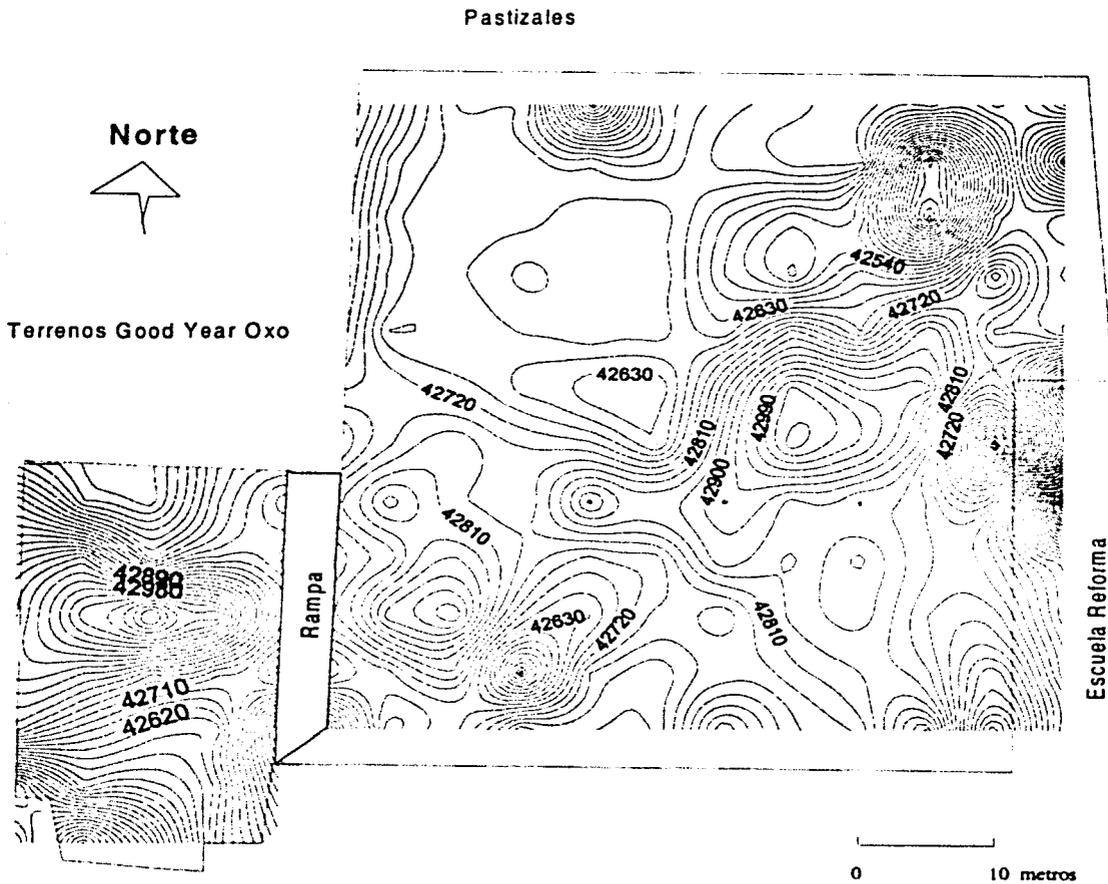


Figura 4.5 Matriz de datos tomada para la aplicación del algoritmo de Patrik Ervin.

Las figuras 4.6, 4.7, 4.8 y 4.9 corresponden a los mapas de anomalías magnéticas de los datos originales y los reducidos al polo. Para el confinamiento pequeño se trazó el perfil P-P' y para el confinamiento mayor, los perfiles A-A', B-B', C-C'.

Figura 4.7. Mapa de anomalías magnéticas reducidas al polo y perfil magnético P-P' (confinamiento menor). Isolíneas cada 20 ηT .

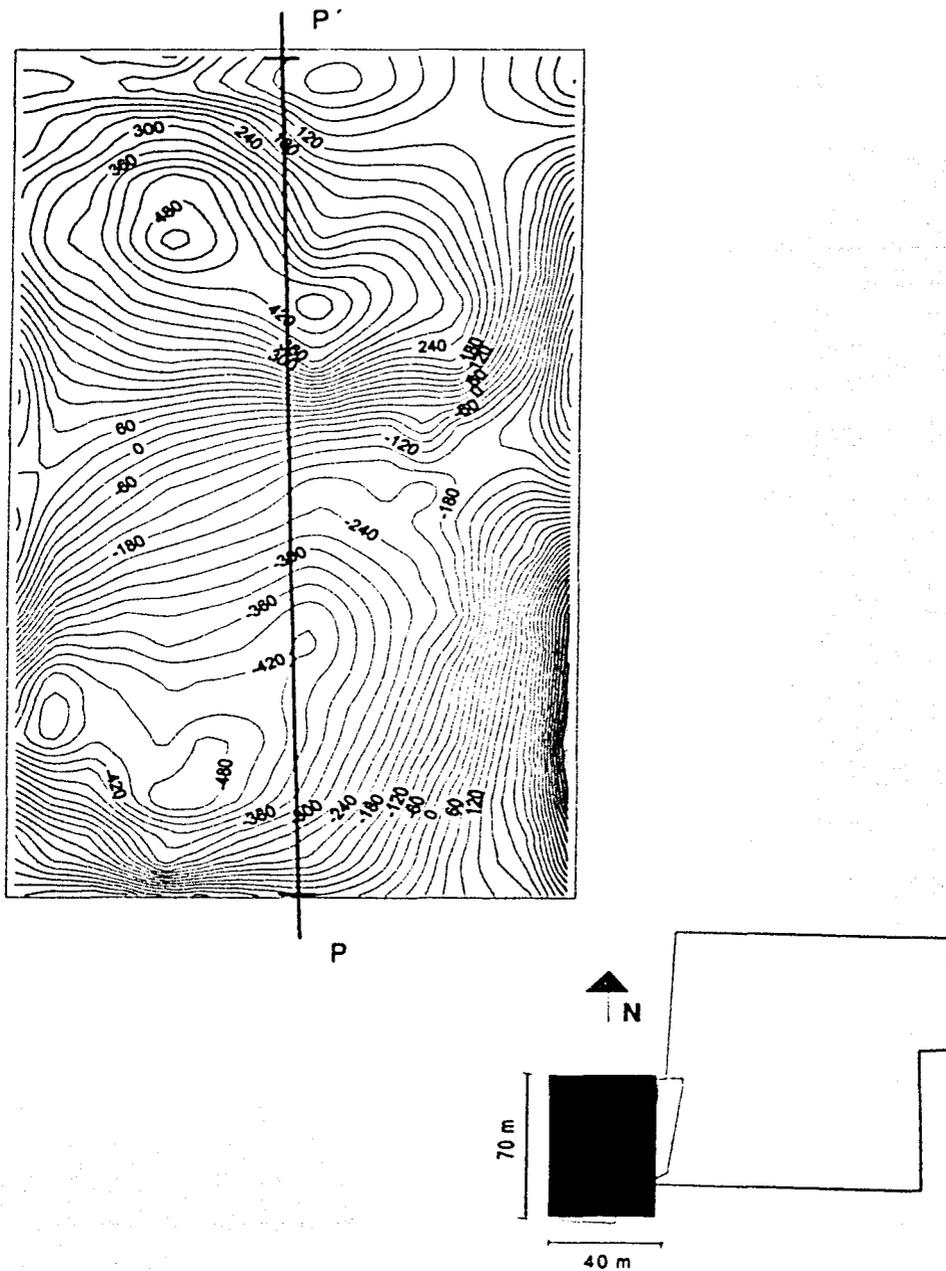


Figura 4.8. Valores de campo magnético de intensidad total (confinamiento mayor).
Isolíneas cada 30 η T.

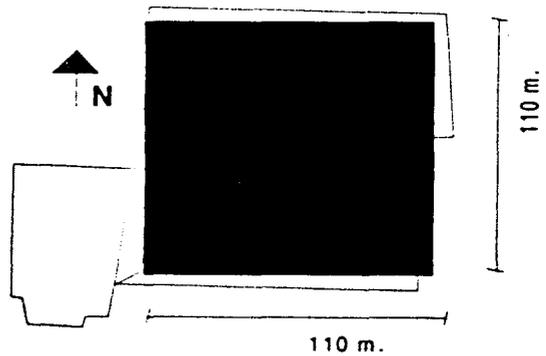
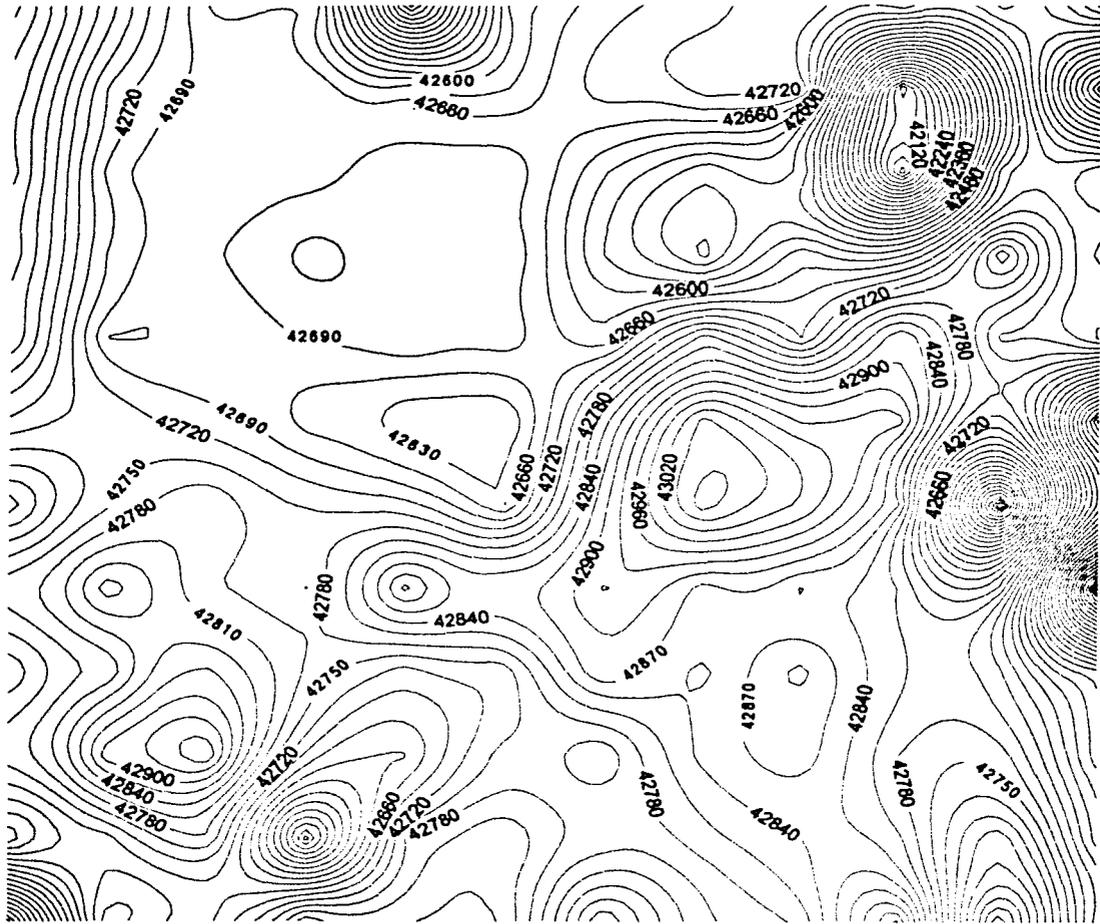
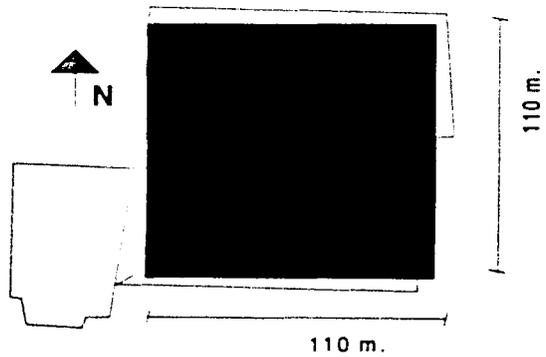
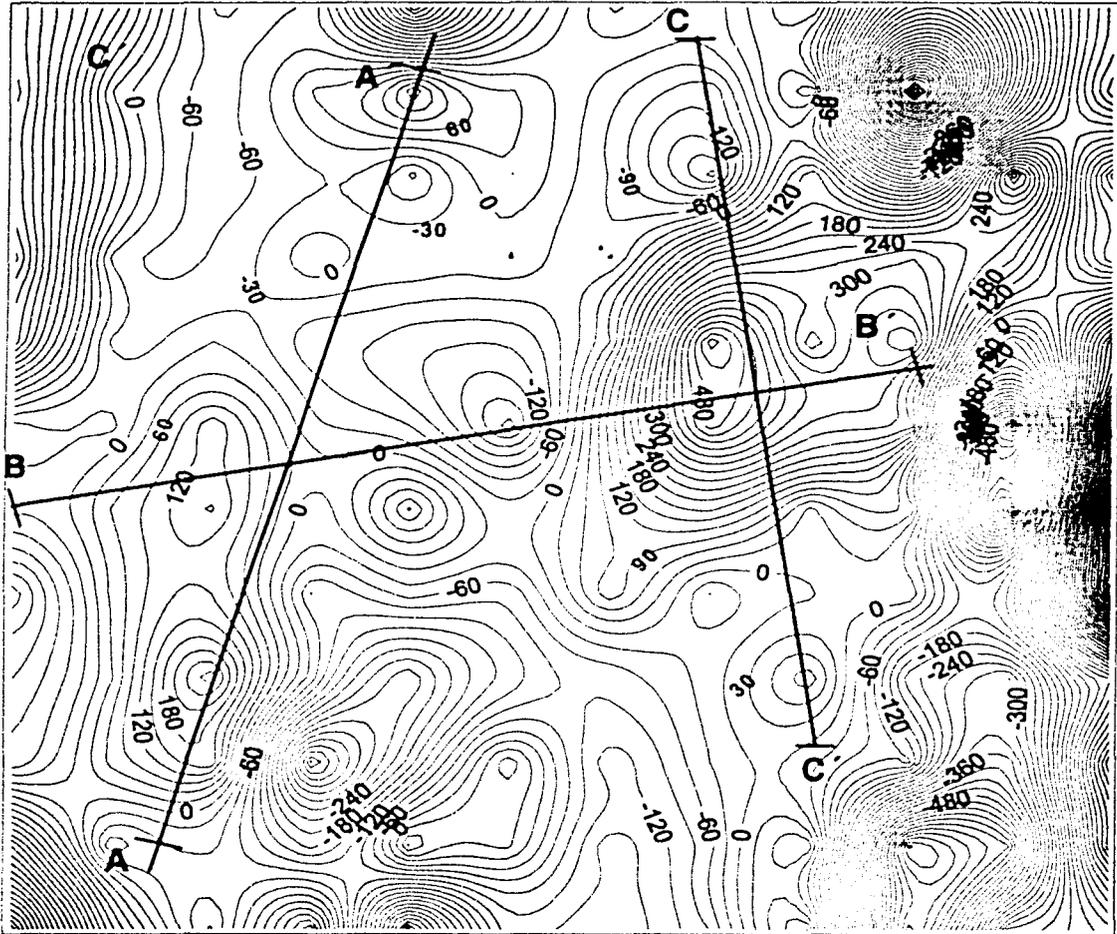


Figura 4.9. Mapa de anomalías magnéticas reducidas al polo y perfiles magnéticos A-A', B-B' y C-C' (confinamiento mayor). Isolíneas cada 30 η T.



CAPÍTULO 5

Interpretación

Existen diversas metodologías interpretativas que pueden ser utilizadas para el análisis en estudios magnéticos. Estos abarcan desde análisis cualitativos y análisis de configuraciones, hasta análisis de perfiles utilizando modelos matemáticos. Las técnicas mayormente utilizadas son el análisis de perfiles y las de configuraciones (Del Castillo, 1987). En este caso, el análisis se llevó a cabo mediante la interpretación de perfiles magnéticos utilizando un método iterativo que busca, por medio de una serie de polígonos que simulan a los cuerpos anómalos, ajustar la curva-respuesta del modelo, con la correspondiente anomalía observada, obtenida a partir de los datos de campo.

5.1 Interpretación de anomalías magnéticas

La forma de las anomalías, depende tanto de la profundidad donde se encuentren los cuerpos o formaciones geológicas que las producen, como de la forma y sus propiedades magnéticas. Como podrá observarse durante el desarrollo del presente capítulo, las anomalías magnéticas serán atribuidas a las formaciones geológicas y a cuerpos anómalos identificados atribuyéndoseles, forma, tamaño, así como propiedades magnéticas, para reproducir una anomalía seleccionada. Sin embargo, hay que tener en cuenta que una anomalía magnética está siempre limitada por la carencia de una solución única, ya que en principio, existe un rango muy amplio de formas y valores de susceptibilidad de las rocas del subsuelo, aunado a que la magnetización no siempre está orientada en la dirección del campo magnético.

Por tal motivo, una parte crucial del procedimiento interpretativo, consiste en asignar una geometría al modelo magnético utilizando la mayor información geológica de la zona y establecer las propiedades magnéticas de los cuerpos presentes en el subsuelo.

5.2 La susceptibilidad magnética y su importancia en la interpretación:

La susceptibilidad de las rocas depende de la naturaleza y cantidad de los minerales magnéticos que éstas contengan. Generalmente, el porcentaje de minerales magnéticos contenidos en las rocas varía ampliamente incluso dentro de las rocas del mismo grupo. La susceptibilidad magnética de una roca aumenta con el contenido de magnetita e ilmenita. Se ha encontrado que las rocas sedimentarias contienen un promedio total de 0.09% (en peso) de estos minerales, en tanto que el granito contiene 2.03% y el basalto 6.53% (Lasfrargues, 1995).

Las rocas sedimentarias tienen una susceptibilidad menor en relación a las rocas eruptivas o metamórficas, sin embargo, dentro de estas mismas, dependiendo de su origen y de su ambiente de depósito, la susceptibilidad de las rocas sedimentarias puede variar mucho desde los rangos más bajos, para rocas carbonatadas, hasta valores mayores cuando las rocas que le dieron origen fueron rocas básicas con altos contenidos de minerales ferromagnesianos.

En la tabla 5.1, se ha realizado una selección de los valores de susceptibilidad más representativos para diferentes tipos de roca:

Tabla 5.1. Rangos de susceptibilidad magnética según el tipo de roca.

Tipo de roca	Susceptibilidad magnética (cgs x 10 ⁻⁶)	Susceptibilidad magnética (SI ¹ x 10 ⁻⁵)
a) Rocas eruptivas		
Rocas básicas	3 000 a 8 000	2.39 a 6.37
Rocas ácidas	0 a 1 500	0 a 11.94
c) Rocas sedimentarias		
Arcilla ferruginosa	200 a 300	1.59 a 2.39
Areniscas	0 a 200	0 a 1.59
Dolomitas	10 a 15	0.0795 a 0.12
Anhidrita y yeso	1 a 10	0.008 a 0.0795
Rocas carbonatadas ordinarias	0 a 10	0 a 0.0795

FUENTE: modificada de Lasfrargues, 1995.

¹ Sistema Internacional de Unidades.

La conversión de unidades para el valor de susceptibilidad es, en cgs: 1 (SI) = 1/4π (cgs)

En caso de sedimentos sueltos, la susceptibilidad magnética depende también del contenido de minerales ferromagnéticos, especialmente magnetita y titanomagnetita (Thompson, 1986). Sin embargo, dado que la susceptibilidad puede asociarse al contenido de estos minerales en un determinado volumen o densidad y a que todavía se discute acerca de la influencia que ejerce en el valor de su susceptibilidad la redondez o el tamaño de los granos, es más compleja la determinación de ésta, ya que los sedimentos sueltos involucran procesos como el acarreo, compactación, erosión e incluso disolución de algunos minerales.

5.3 Consideraciones litológicas

Como producto de la investigación bibliográfica llevada a cabo para el desarrollo de este trabajo, se encontró que, regionalmente, en la zona se presentan sedimentos superficiales que corresponden a materiales clásticos fluviales acumulados contemporáneamente con sedimentos lacustres y depósitos volcánicos del Pleistoceno-Holoceno que afloran formando llanuras aluviales ("Qal"). Estos materiales afloran desde el Lago de Zumpango (ubicado al norte del municipio de Tultitlán), extendiéndose al oriente del mismo, y hasta el Gran Canal de Desagüe (Vázquez y Jaimes, 1989) (Figura 5.2.).

Estas llanuras aluviales se encuentran extensamente distribuidas rellenoando amplios valles con depósitos piroclásticos y clásticos del Plioceno, así como depresiones tectónicas (como el antiguo graben de Chalco). Los espesores mayores se encuentran en los centros de las planicies y se adelgazan hacia los márgenes de la llanura (Vázquez y Jaimes, *op. cit.*).

Con la finalidad de conocer con mayor precisión la información geológica a profundidad, se analizó la información de columnas litológicas de pozos de abastecimiento de agua potable de la CFE (Pozo 1) y pozos exploratorios de la SARH* (pozos 3 y 4), (Figura 5.2).

De acuerdo a la información que brinda la descripción litológica del pozo 1 (Figura 5.1), en el área de estudio se tienen sedimentos de origen lacustre, encontrándose materiales arcillosos con algunos horizontes de cenizas e intercalaciones de lentes de arenas y gravas provenientes de acarreos fluviales. Asimismo, se presentan cuerpos de lavas y

* Columnas geológicas de pozos exploratorios de la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH).

brechas tanto andesíticas como basálticas como producto de las erupciones volcánicas del cuaternario y del terciario superior, que presentan fracturamiento y alteraciones acentuadas (Gutiérrez, et al.,1986).

Dado que no fue posible encontrar una descripción más detallada en cuanto a los espesores y composición de los sedimentos y rocas ígneas ubicadas a mayor profundidad para la zona de el municipio de Tultitlán, se realizó un análisis comparativo entre el pozo 1 de la CFE (localizado en el municipio donde se ubica la planta) y el pozo: "Charco 4" de la DGCOH, localizado sobre el bordo izquierdo del Gran Canal de Desagüe, frente al Fraccionamiento Jardines de Ecatepec, Municipio de Ecatepec (Figura 5.3), considerando un ambiente geológico y procesos de sedimentación parecidos y contemporáneos para ambas zonas.

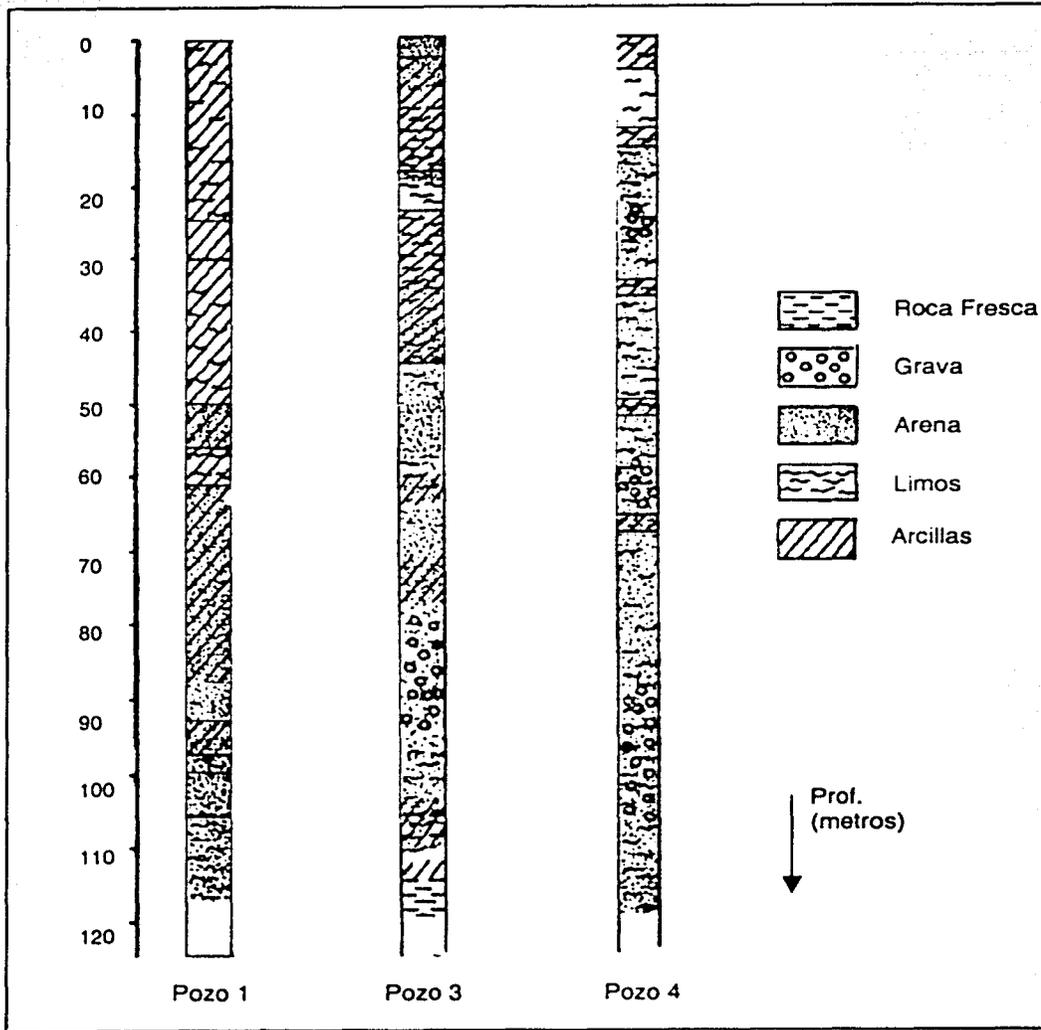


Figura 5.1. Cortes litológicos de pozos del valle de Cuautitlán.
 El Pozo 1 se encuentra en el municipio donde se ubica
 la planta industrial objeto de este estudio.
 FUENTE: SRH, 1961.

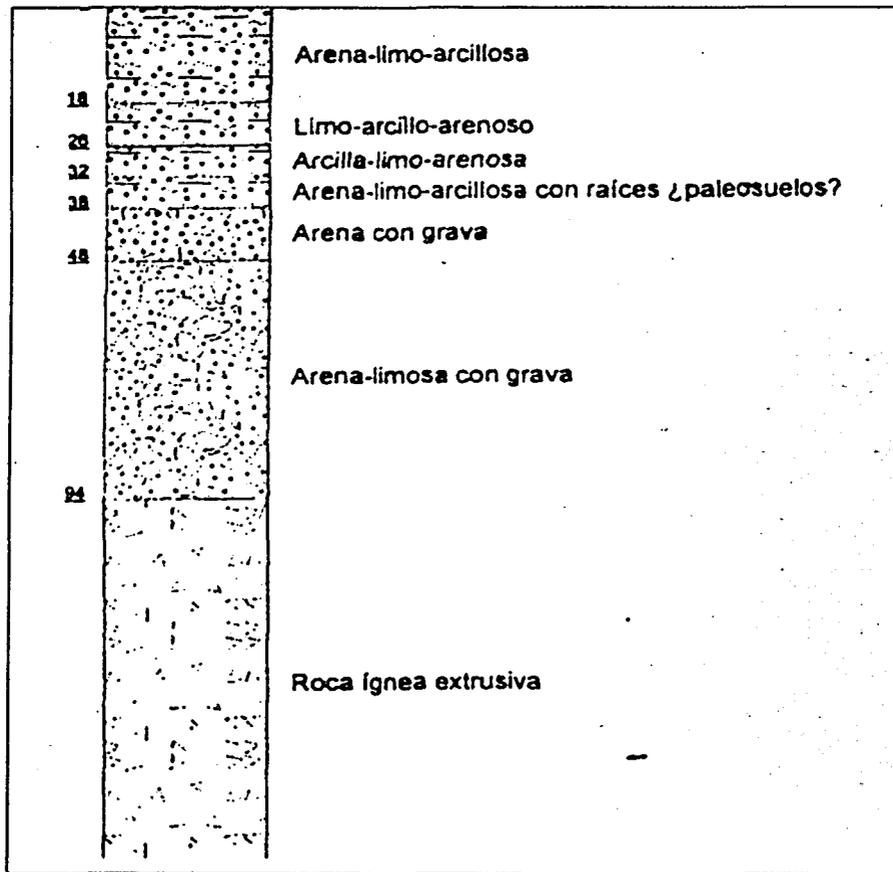


Figura 5.3. Corte litológico del pozo "Charco 4"
FUENTE: DGCOH, 2000.

Por otro lado, tomando en consideración la descripción encontrada para el corte litológico del pozo el Charco 4, (Figura 5.3), se tiene, para el primer paquete (de 38 metros), una secuencia con predominio de materiales finos con intercalaciones de arcillas, limos y arenas de coloración variable desde negro, gris oscuro, hasta olivo, con granos bien redondeados (se considera que el material se depositó en un medio lacustre de poca profundidad). Dentro de este paquete, se intercalan cenizas gruesas a muy finas depositadas en un ambiente lacustre durante diversas erupciones volcánicas (DGCOH, 2000).

A partir de los 38 metros de profundidad, las gravas comienzan a hacerse presentes. Este paquete se presenta, de 46 metros de espesor, está asociado a un ambiente de depósito de tipo aluvial. La coloración varía de gris rosado a amarillo rojizo (DGCOH, *op. cit.*).

En la misma descripción litológica del pozo "Charco 4", se tiene que a partir de los 98 metros, se presentan flujos de lava de diferente composición y espesor provenientes de la Sierra de Guadalupe que se emplazaron formando un gran paquete (hasta los 166 metros). La descripción de este paquete se puede dividir en tres (DGCOH, *op. cit.*):

Los primeros metros de este estrato (6 metros) corresponden a un flujo de lava brechoide, de fábrica afanítica, que presenta pequeños cristales de minerales ferromagnesianos; la matriz es vidrio de color negro coloreado por pequeños grumos de magnetita. Dada la composición de esta brecha de 6 metros, se determina que corresponde a andesitas y dacitas.

Dentro de este mismo paquete y entre los 102 y 120 metros, se encuentran flujos de lava de composición andesítica, de color gris claro, de textura microlítica, ligeramente fluidal, formada por agujas de feldespatos y gránulos de minerales ferromagnesianos. La matriz es de vidrio de color negro a gris, debido a la abundancia de grumos de magnetita.

Finalmente, la última secuencia, para profundidades mayores a los 122 metros, se encuentra un depósito piroclástico; se trata de una brecha volcánica de composición andesítica, con abundantes clastos de andesita básica, con algunos minerales ferromagnesianos, como ilmenita y magnetita.

5.4. Parámetros de los modelos

Dada la información geológica del Pozo el Charco No.4 y la información del Pozo 1 de la CFE ubicado en el municipio de Tultitlán, se consideró un modelo geológico compuesto de 3 paquetes bien definidos.

- Para los primeros 50 metros de profundidad, materiales finos constituidos por una secuencia de arcillas y limos que presentan un considerable contenido de minerales ferromangésicos y ceniza volcánica (tal como se mencionó en el primer capítulo).
- De los 50 a 150 metros de profundidad, material fino combinado con material grueso (arenas de origen volcánico, y tobas).
- Finalmente, de los 150 metros a profundidades mayores, materiales piroclásticos e intrusiones de rocas ígneas eruptivas de composición andesítica y basáltica.

Cabe señalar que los espesores de los tres paquetes geológicos considerados en el modelo, fueron tomados principalmente de los espesores que pueden observarse en la figura 5.1 para el pozo No. 1, ubicado en el municipio de Tultitlán.

Una vez establecido el modelo geológico de la zona de estudio, se consideraron los parámetros de susceptibilidad magnética basados esencialmente en fuentes bibliográficas ya que no se contaba con muestras que arrojaran el valor de la susceptibilidad para cada paquete considerado.

En las tablas 5.2 y 5.3, se detalla la información recapitulada y los datos de susceptibilidad considerados para los modelos magnéticos.

Recordemos que los residuos del confinamiento industrial fueron estudiados por el Instituto de Geofísica, pudiendo establecer una clara diferenciación respecto a coloración y susceptibilidad de los residuos. Unos presentaban color amarillo (presumiblemente con mayores concentraciones de cromo) y los otros color café (posiblemente con alto contenido de elementos ferromagnéticos).

Tabla 5.2. Valores de susceptibilidad considerada en la interpretación magnética.

MATERIALES DEL MODELO GEOLÓGICO	MATERIALES GEOLÓGICOS PRESENTES	FUENTE	SUSCEPTIBILIDAD CONSIDERADA EN LOS MODELOS		
			Nomenclatura	(cgs x 10 ⁻⁶)	(SI x 10 ⁻⁵)
1 ^{er} paquete: (0-50m)	Grandes contenidos de cenizas volcánicas con intercalaciones de arcillas y limos.	Lasfrargues, 1995; Caballero y Ortega, 1996.	σ_1	400	3.18
Zona de mezcla	Altos contenidos de cromo en el primer paquete		σ_1^*	100	0.795
2 ^o paquete: (50-150m)	Intercalaciones de gravas, arenas, limos y sedimentos volcanoclásticos.	Gay, <i>et. al.</i> 1991.	σ_2	200	1.59
3 ^{er} paquete: (150-300m)	Coladas de rocas eruptivas básicas	Lasfrargues, 1995	σ_3	6,000	47.7

5.5 Perfiles y modelos magnéticos obtenidos

Una vez obtenidos los mapas de anomalías reducidas al polo y analizadas las anomalías más interesantes, se procedió a la selección de los perfiles ubicados en ambas partes del confinamiento (mismos que aparecen en las figuras 4.7. y 4.9).

Es importante señalar que, se entiende que en el confinamiento existen algunos materiales que fueron empleados para su construcción, (como varillas utilizadas para los muros) y que en los mapas de anomalías se observaron sus efectos, principalmente en

los perímetros del confinamiento. Por esta razón, se procuró que los perfiles magnéticos no llegaran hasta el perímetro del confinamiento, donde se ubican los muros de este.

Como parte de la descripción de los perfiles seleccionados, se tiene lo siguiente:

El perfil P-P', se seleccionó del confinamiento menor. Presenta una dirección preferencial de Sur-Norte, observándose dos grandes anomalías: un gran mínimo relativo de alrededor de $480 \eta T$ en la parte sur, que se incrementa hacia la parte norte, convirtiéndose en un máximo relativo del mismo valor absoluto (Figura 4.7).

En el mapa de anomalías magnéticas reducidas al polo del confinamiento mayor, se observó una mayor cantidad de máximos y mínimos relativos. La mayoría de ellos, presentan amplitudes menores a las contenidas en el confinamiento pequeño (Figura 4.9). De esta parte del confinamiento, se seleccionaron 3 perfiles.

El perfil A-A', presenta una dirección N 17° E, presentando una anomalía positiva que se alarga en dirección norte. El perfil corta zonas de baja magnetización conforme se aproxima a su extremo superior.

El perfil B-B' atraviesa de manera transversal al confinamiento y corta las dos anomalías principales, que alcanzan las $500 \eta T$ en la parte E. En la parte central, se observa la presencia de un mínimo relativo que alcanza los $150 \eta T$.

Por último, se trazó el perfil C-C', mismo que atraviesa esta parte del confinamiento de SE-NW y cruza transversalmente el máximo relativo más importante del confinamiento mayor.

Por otro lado, de cada perfil seleccionado, se propusieron diferentes modelos geológicos. Se utilizó el algoritmo de Talwani (ANEXO 2) donde el modelo propuesto es poligonizado y modificado a base de prueba y error, ajustando la anomalía observada y la calculada. Cabe mencionar que el objetivo principal para su obtención, fue fundamentalmente el establecer distribuciones espaciales con mayor presencia del contaminante de interés (cromo hexavalente), por sus características físicas, químicas y magnéticas.

Dada la gran movilidad de este contaminante, se estableció una zona de mezcla que simulara áreas de máxima concentración de cromo en los modelos.

La interpretación se resolvió asignando una geometría y valores de susceptibilidad para cada material considerado en los modelos, concordante con la información geológica del área. Ello permitió la elección de los parámetros físicos que constituyen modelo, de manera que el perfil calculado y el observado, tuvieran una tendencia similar.

Es necesario recordar que los modelos aquí desarrollados pretenden establecer una distribución espacial y simular el comportamiento de los materiales en el subsuelo, aunque sabemos que la naturaleza del mismo no suele comportarse de manera homogénea. Sin embargo, con la finalidad de facilitar la interpretación de los perfiles magnéticos, se consideraron propiedades físicas uniformes para cada paquete geológico.

Hay que resaltar el hecho de que la ambigüedad existente en los modelos propuestos, fue reducida considerando el buen conocimiento geológico del área de estudio.

5.6. Discusión de Resultados

En las figuras 5.8 a la 5.11, se presentan los modelos geológicos estructurales propuestos y los ajustes entre las anomalías observadas y calculadas, obtenidos al emplear el algoritmo de Talwani (Anexo 2). Con la finalidad de reducir los efectos de borde, los modelos se extendieron lateralmente.

En general, se ha conseguido un buen ajuste entre las anomalías. Las diferencias máximas que presenta la curva de la anomalía calculada respecto a la anomalía observada, para algunos puntos, es de 60 η T (Figuras 5.8 a 5.11).

Como se comentó anteriormente, se ha utilizado como base un modelo de 3 capas, basado en los estudios geológicos, donde:

- La primera capa simula el comportamiento de materiales compuestos principalmente de intercalaciones de cenizas volcánicas, con limos y materiales arcillosos.

- La segunda contempla la presencia de sedimentos volcanoclásticos más gruesos con intercalaciones de arenas, gravas y materiales finos.
- El último paquete, contempla materiales volcánicos consolidados. Los cortes litológicos de los pozos estudiados dan evidencia de la presencia de estos paquetes lávicos.

Ya en otros estudios (González y Rodríguez, 1989) se había indicado la carencia de protección en la parte inferior de los confinamientos y la presencia de capas superficiales con alto contenido de cromo, así como de agua contaminada por estos residuos.

Hay que resaltar el hecho de que, tanto la presencia de residuos con altos contenidos de cromo hexavalente (cuyas características se han discutido en el capítulo 2), su gran movilidad y la incorporación paulatina de lluvia al confinamiento, han favorecido la distribución de este compuesto en el subsuelo. Por esta razón, a los modelos se les ha incorporado el efecto del contaminante en estudio, reduciendo la susceptibilidad de la primera capa (σ_1^* , zona de mezcla del paquete uno).

PERFIL P-P'

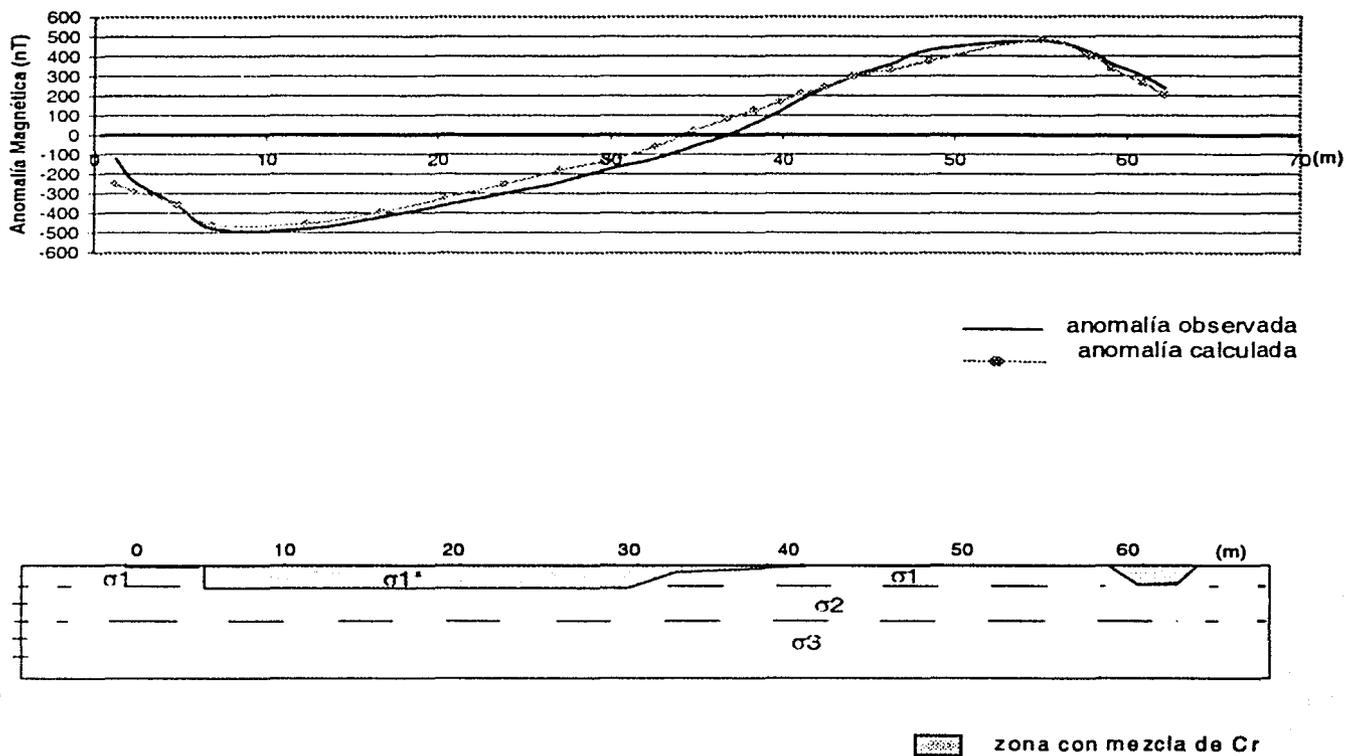


Figura 5.8. Modelo del Perfil P-P'

NOTA: Los Valores de susceptibilidad magnética aparecen en la tabla 5.2

PERFIL A-A'

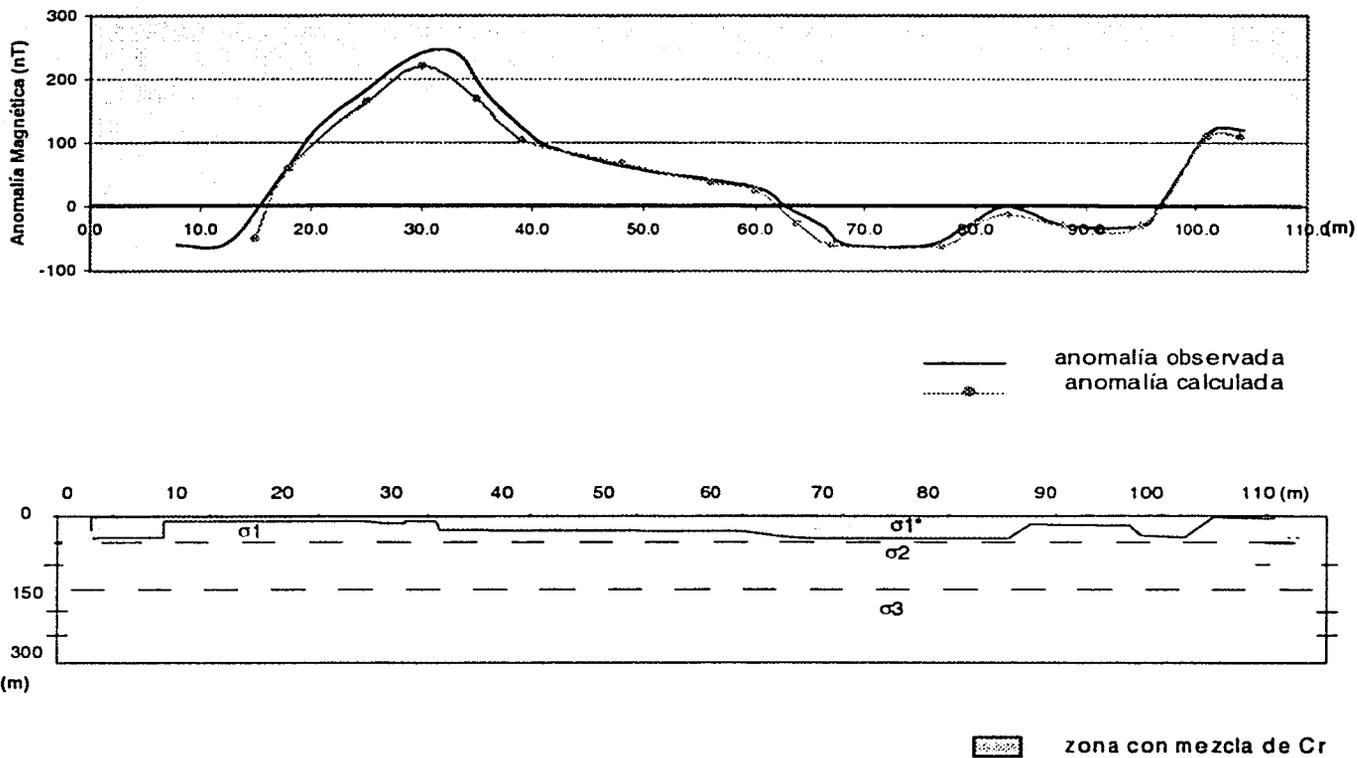
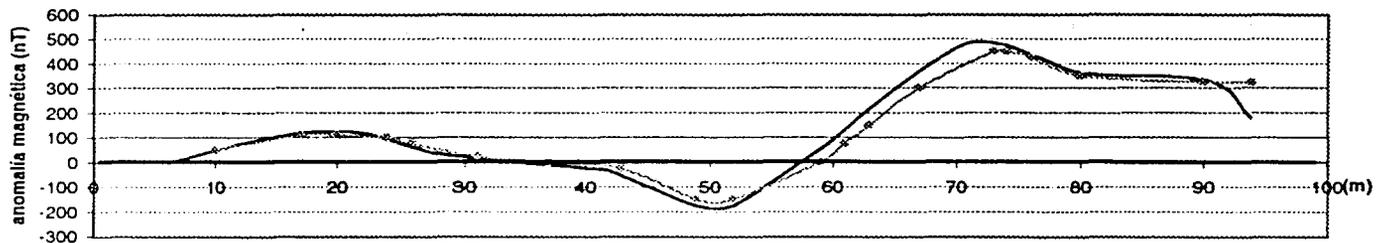


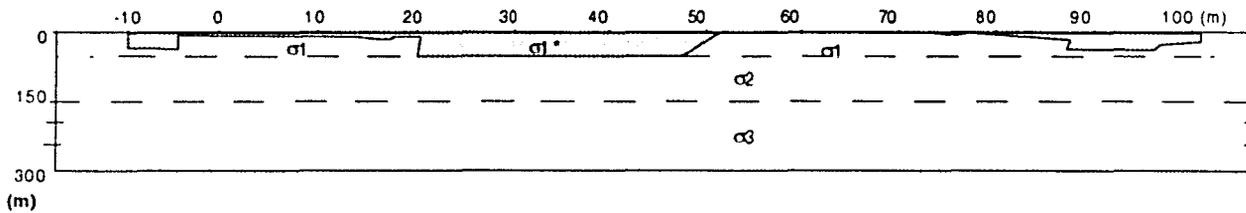
Figura 5.9. Modelo del Perfil A-A'

NOTA: Los Valores de susceptibilidad magnética aparecen en la tabla 5.2

PERFIL B-B'



— anomalía observada
 -•- anomalía calculada

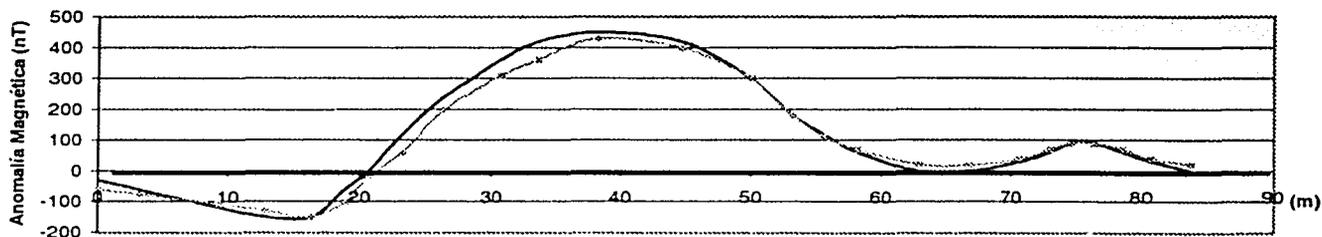


▨ zona con mezcla de Cr

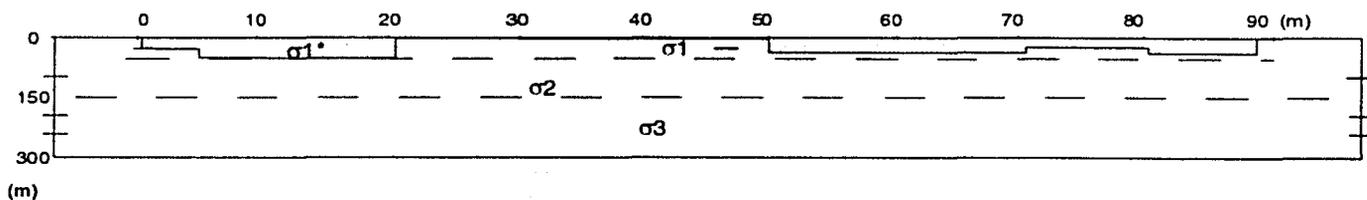
Figura 5.10. Modelo del Perfil B-B'

NOTA: Los Valores de susceptibilidad magnética aparecen en la tabla 5.2

PERFIL C-C'



— anomalía observada
 -♦- anomalía calculada



▨ zona con mezcla de Cr

Figura 5.11. Modelo del Perfil C-C'

NOTA: Los Valores de susceptibilidad magnética aparecen en la tabla 5.2

CAPÍTULO 6

6.1 Conclusiones

La antigua industria Cromatos de México S.A., ubicada en el municipio de Tultitlán, estado de México, es un buen ejemplo de uno de tantos sitios, existentes en el territorio nacional, registrados como abandonados y que en el pasado generaron sin ningún control ambiental, considerables cantidades de residuos peligrosos. El escaso control sobre los residuos producidos por la planta (con altos contenidos de cromo hexavalente), así como el diseño y construcción del confinamiento de la misma, tuvieron un resultado poco afortunado, principalmente provocado por el desconocimiento del comportamiento químico de este residuo que contaminó suelo y agua de la zona. El cromo hexavalente depositado en el confinamiento, y presente en zonas aledañas de la planta, representa una amenaza ambiental permanente. En el capítulo 2, se ha presentado una disertación respecto a los riesgos potenciales de este contaminante para la población civil y el medio ambiente.

Mediante el tratamiento y procesamiento de la información magnética obtenida de los confinamientos de Cromatos de México, el conocimiento de las características fisicoquímicas, toxicológicas y de los contrastes de susceptibilidad magnética de los residuos, así como la geología de la zona de estudio, permitieron proponer modelos relacionados con la distribución y migración del cromo hexavalente. A partir de la selección de los perfiles más interesantes y del proceso de reducción al polo (que facilitó la interpretación de las señales magnéticas), se utilizó el algoritmo de Talwani para establecer estos modelos geológicos-estructurales que se presentan en el capítulo anterior.

En las figuras 4.7 y 4.9, se observaron diferencias entre las respuestas magnéticas reducidas al polo de los confinamientos menor y mayor. Para el primero, puede establecerse que existe mayor uniformidad en la distribución de los materiales dispuestos, a diferencia del confinamiento mayor, que presenta una heterogeneidad mayor entre los materiales dispuestos, presentando diversas anomalías magnéticas. Recordemos que el confinamiento menor (el primero en ser construido) fue rellenado principalmente con residuos provenientes de las áreas de las tinas de lavado, a diferencia del confinamiento mayor, construido posteriormente, donde se colocaron todos los residuos restantes.

En este trabajo, se han presentado 4 modelos geológicos, pretendiendo considerar la migración del cromo hexavalente hacia el subsuelo, atribuible a la distribución que tomaron los residuos que contienen mayores concentraciones del compuesto, estableciendo varias zonas de mezcla, a las que se les asignó la susceptibilidad de σ^1 . El proceso migratorio de este contaminante, fue favorecido por la falta de protección al suelo natural con la parte inferior del confinamiento, por las características fisicoquímicas de los materiales depositados y por el tipo de cubierta de los confinamientos, que provocaron hundimientos en su techo. Esto permitió la incorporación de lluvia y el movimiento del contaminante verticalmente. En los modelos se considera que el contaminante pudo haber alcanzado los primeros 50 metros de profundidad, con ayuda de algunas evidencias (SEDUE, 1985 y Gutiérrez, *et. al*, 1986).

No hay que olvidar que este problema, continúa vigente. Recientemente, en los diarios nacionales (El Universal, 2002) se sigue mencionando el caso de Cromatos de México. Se tienen más de 20 años de funcionamiento de una planta productora de compuestos de cromo, con procesos altamente ineficientes, que generaron grandes volúmenes de residuos tóxicos, estimados entre 75,000 y 120,000 ton (SEDUE, 1985 y Del Moral, 1991**), que han contaminado el aire, suelo y agua de la zona. Casi 30 años han pasado desde que se decidió su clausura, y es evidente que el problema nunca ha sido resuelto.

Considerando que se han identificado zonas con mayores concentraciones del contaminante, los resultados obtenidos del el presente estudio, pueden ser de utilidad para el caso en que, en un futuro, realizando algunas perforaciones para recalibrar los modelos, se pudiera llevar a cabo un tratamiento ambientalmente adecuado de los residuos con la finalidad de lograr su estabilización.

6.2 Recomendaciones.

Realizar algunas perforaciones en los confinamientos, con la finalidad de obtener muestras y con esto, mayor información respecto a las propiedades magnéticas de los materiales considerados, para afinar los modelos propuestos.

* Datos obtenidos del discurso de inauguración del cementero. SEDUE, 1985

** Datos obtenidos de los periódicos Novedades y Uno Mas Uno. Del Moral, 1991.

Bibliografía

- Acción Urbana e Integración Social: AURIS, e Instituto de Geografía-UNAM, (1980). *Geografía Urbana del Municipio de Tultitlán, Estado de México*, Pp. 17-20.
- Baranov. V y Naudy H. (1964) "Numerical calculation of the formula of reduction to the magnetic pole", *Geophysycs*, Vol. 29, num. 1. Pp. 67-79.
- Barreto-Muñiz, L. (1997), *El geomagnetismo*. Cuadernos del Instituto de Geofísica, UNAM, México. Pp. 25-29.
- Bhattacharyya B.K. (1965), "Two-dimensional harmonic analysis as a tool for magnetic interpretation", *Geophysics*, Vol. 30, num. 5. Pp 829-857.
- Caballero-Miranda, M. y Ortega-Guerrero, B. (1998) "Lake levels since about 40,000 years ago at lake Chalco, near México City", *Cuaternary Research*, num. 50. Pp. 69-79.
- Del Castillo-García, L. (1987), *Magnetismo aplicado a la búsqueda de minerales y energéticos*. IPN, México. Pp. 25-29.
- Del Moral-Palacios, L. E. (1991), *Diseño de una planta piloto para procesar residuos de la planta Cromatos de México* (Tesis de Ingeniero Químico), FQ-UNAM, México. Pp. 1, 2, 9-17.
- DGCOH, Instituto de Geología UNAM (2000). *Estudios, análisis sedimentológicos, determinaciones petrográficas y análisis de difracción de rayos X; así como la descripción litológica de las formaciones atravesadas en los perfiles de 12 pozos de reposición de la DGCOH, Informe Final*. Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica, Gobierno del Distrito Federal, No. De Contrato: 0-07-CO-04-1-1243/2. Pp. 55-65.
- Dobrin, M. B. (1981), *Introducción a la prospección geofísica*, Omega, 2ª edición, España. Pp. 25-30.
- El Universal, 11 de mayo de 2002. "Temen fuga de residuos tóxicos". Juan Manuel Barrera Aguirre. Sección Ciudad, México, D.F.
- Ervin, P. (1976). *Reduction to the magnetic pole using a fast fourier series algorithm*, *Computers and Geoscience* Vol. 2, num. 2. Pp. 211-217.
- Geometrics, 1973. Operating Manual Model G-816, Portable Proton Magnetometer.
- Geometrics, (2002). Portable magnetometers, product description. (<http://www.geometrics.com/magnetometers/land/856/856.html>).
- Gobierno del Estado de México: GEM (1978), *Plan de Desarrollo Urbano del Municipio de Tultitlán*, Convenio para el Instituto de Acción Urbana e Integración Social (AURIS), México. Pp. 30-42.
- Gobierno del Estado de México (1997), *Cédula de Información Ambiental Municipal*, H. Ayuntamiento, México. Pp. 51-57.

- González-Morán, T. (1974), *Análisis de datos sísmicos y magnéticos, línea 17, proyecto CICAR* Tesis de licenciatura, Facultad de Ciencias-UNAM. Pp. 20-23.
- González-Morán, T. y Rodríguez García, R. (1989). "Monitoreo geofísico en el entorno de un basurero industrial de desechos de cromo". *Geofísica Internacional*, Vol. 28, núm 2. Pp. 410-416.
- Gay, S. Parker, Jr. and Hawley, B. W. (1991), *Syngenic magnetic anomaly sources: Three examples: Geophysics*, Vol. 56, pp. 902-913.
- Greffiths F. y Donald H. (1972), *Geofísica aplicada para ingenieros y geólogos* (traducida de Applied Geophysics for Engineers and Geologists). Paraninfo, Madrid. Pp. 201-206.
- Griem-Klee, S. (2000). *Fundamentos teóricos del método magnético*. Exploraciones Mineras, Universidad de Atacama, Chile
(<http://plata.uda.cl/minas/apuntes/Geologia/EXPLORAC/TEXT/05001magnet.html>)
- Gutiérrez-Ruiz, M.E., Bocco-Verdineli, G. y Castillo-Blum, S. (1986), "Contaminación por cromo en el norte de la ciudad de México. Un enfoque interdisciplinario", *Boletín del Instituto de Geografía*, num. 16. Pp. 77-125.
- Instituto de Geofísica-UNAM (1999). *Magnetismo de la Tierra*.
(<http://tlacaelel.igeofcu.unam.mx/~GeoD/estudiantes/luisfern/magneto.html>).
- Instituto de Geofísica-UNAM (1996). *Reportes internos, valores magnéticos en el Observatorio de Teoloyucan, 1988*. IG-UNAM, México. Pp. 42.
- Instituto de Geofísica- UNAM (2002). *Observatorio de Teoloyucan*
(<http://www.igeofcu.unam.mx/geomagne/omt/omt.html>)
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (2000a), *Resultados del XII Censo de Población y Vivienda, 2000*. INEGI, México. 20-25.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (2000b). *Carta de Climas, 1:1 000 000*.
- INEGI: Información por Entidad Federativa Estadísticas e Información, (2000c).
<http://www.inegi.gob.mx/entidades/espanol/fentidades.html>
- Izcapa-Treviño, C. (1999), *Lineamientos generales para la evaluación de sitios contaminados y propuestas de acciones para su restauración*. Tesis de maestría, DEPI-UNAM, México. Pp. 2.
- Lasfarges, P. (1995), *Magnetismo en geología y prospección magnética terrestre* (traducción: Oscar Campos). IPN, México. Pp. 54-56.
- Logachev A. y Zajarov V. (1978), *Exploración magnética*. Versión española Juan González Montero. Reverté, S.A., Barcelona. Pp. 23-37 y 340-342.

- Miyasako-Kobashi, E.E. (1989), *Solución a un problema de contaminación causado por los desechos confinados de una planta productora de cromatos*. Tesis de Maestría, División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería-UNAM. Pp. 1-6, 35 y 36.
- Robinson, S. (1988) *Basic Exploration Geophysics*, J. Wiley, New York, USA. Pp. 82-90.
- Rosas-Islas, A. (1984). Aspectos ecotoxicológicos del cromo en una zona industrial del Estado de México, UNAM. Tesis Doctoral, México. Pp.12.
- Secretaría de Ecología del Gobierno del Estado de México (2002), Información para la Gestión Ambiental, Municipio de Tultitlán. <http://www.edomex.gob.mx/Se/Default01.htm>.
- Secretaría de Recursos Hidráulicos, Comisión Hidrológica de la Cuenca del Valle de México, 1961. *Estudio geoquímico de las aguas subterráneas en el valle de Cuautitlán*. México. Pp. 23-27.
- Secretaría del Medio Ambiente (SMA), Gobierno del Distrito Federal, INEGI (1999), *Estadísticas del Medio Ambiente del Distrito Federal y Zona Metropolitana*, Secretaría del Medio Ambiente, Gobierno del Distrito Federal, México. Pp. 1-17.
- SEDUE-Dirección General de Prevención y Control de la Contaminación, Instituto de Geografía y Facultad de Química-UNAM (1985), *Estudio, monitoreo y evaluación del cementerio industrial de Cromatos S.A. en Tultitlán, Estado de México (primera etapa)*, Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología (SEDUE), México. Pp. 10-21 y 86-97.
- SEDUE-Dirección General de Prevención y Control de la Contaminación, Instituto de Geografía y Facultad de Química-UNAM, (1988). *Estudio, monitoreo y evaluación del cementerio industrial Cormatos S.A., en Tultitlán Estado de México (segunda etapa)*, Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología (SEDUE), México. Pp. 4-9 y I-XIV.
- SEMARNAP, INE (1996). *Programa para la minimización y manejo integral de residuos industriales peligrosos en México*, Secretaría del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca, México. Pp. 82-85.
- SEMARNAT (2000). *Segundo informe nacional de emisiones y transferencia de contaminantes*, Secretaría del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca, México. Pp. 75-78.
- Servicios Geofísicos (1966). *Estudio hidrológico y geofísico de la zona de Cuautitlán*. México. Pp. 21.
- Stern, D. (2000). La exploración de la magnetósfera terrestre (versión en español) <http://www-spf.gsfc.nasa.gov/Education/MIntro.html>.
- Suro Pérez, V. (1980), Aplicaciones de la transformada de Hilbert a señales magnéticas (Tesis de Ingeniero Geofísico), FI-UNAM. Pp. 7, 8 y 48.
- Talwani M., Worzel J.L. y Landisman M., (1959). "Rapid gravity computations for two-dimensional bodies with application to the Menocino Submarine Fracture Zone". *Journal Of Geophysical Research*, Vol. 64, No.1, p. 49-59.

- Talwani, M., y Heirtzler, J.R. (1965), "Computation of magnetic anomalies caused by two dimensional structures of arbitrary shape". *Geological Science*, Vol. 9, No 1, p. 464-480.
- Telford, M. (1996), *Applied geophysics*. 2ª edición. Universidad de Cambridge, E.U. Pp. 7-11
- Thompson R. Y Oldfield F. (1986), *Environmental Magnetism*, Allen & Unwin, Australia. Pp. 13-20.
- Trisitán López, A. (1984). *Estudio general del proyecto sulfato de aluminio*, CINADI México. Pp. 23.
- U.S. EPA (1979). *Chromium ambient water quality criteria*. Criteria and standard Division Office of Water Planning and Standard, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C. Pp. 7 y 8.
- U.S. EPA (1984) *Health assessment document for chromium*. U.S. Environmental Criteria and Assessment Office, Springfield. Pp. 7-9.
- U.S. EPA (1998). *Toxicological Review of Hexavalent Chromium* U.S. Environmental Protection Agency, Washington D.C. Pp. 2-6.
- Valverde C., Aguilar G. y García, M.L. (1980), *Geografía urbana del municipio de Tultitlán, Estado de México*. Pp. 8 y 11.
- Van Blaricom, R. (1980), *Practical Geophysics for the exploration geologist*, EE.UU. pp. 205-217.
- Vázquez-Sánchez, E. y Jaimes-Palomera, R. (1989). "Geología de la Cuenca de México". *Geofísica Internacional*. Vol. 28, num.2. 133-190.

Donde:

$$P_{mn} = \left\{ 1 / (G_{mn}^2 + Y_3^2)^2 \right\} \left\{ (G_{mn}^2 - Y_3^2)(A_{mn} - D_{mn}) + 2G_{mn}Y_3(B_{mn} + C_{mn}) \right\}$$

$$Q_{mn} = \left\{ 1 / (G_{mn}^2 + Y_3^2)^2 \right\} \left\{ -2G_{mn}Y_3(A_{mn} - D_{mn}) + (G_{mn}^2 - Y_3^2)(B_{mn} + C_{mn}) \right\}$$

$$R_{mn} = \left\{ 1 / (G_{mn}^2 + Y_4^2)^2 \right\} \left\{ (G_{mn}^2 - Y_4^2)(A_{mn} + D_{mn}) + 2G_{mn}Y_4(B_{mn} - C_{mn}) \right\}$$

$$S_{mn} = \left\{ 1 / (G_{mn}^2 + Y_4^2)^2 \right\} \left\{ -2G_{mn}Y_4(A_{mn}D_{mn}) + (G_{mn}^2 - Y_4^2)(B_{mn} - C_{mn}) \right\}$$

$$G_{mn} = K_m^2 + K_n^2$$

$$Y_3 = cm\theta(K_m \cos\phi + K_n \sin\phi)$$

$$Y_4 = cm\theta(K_m \cos\phi - K_n \sin\phi)$$

ϕ = declinación del campo inducido

θ = inclinación del campo inducido (3A)

El cálculo del campo reducido al polo requiere de la suma de la ecuación (2) para todos los armónicos.

Consideraciones del algoritmo:

El algoritmo empleado, programado en Fortran, requiere que los valores de K y L sean valores enteros, con la finalidad de simplificar los cálculos de los índices harmónicos más altos. El argumento de las funciones trigonométricas asociadas con el eje "i" en las ecuaciones (2) y (3), es $((2\pi ni / K))$, donde $m = 0, 1, \dots, (K / 2)$ y $i = 0, 1, \dots, (K - 1)$.

ANEXO 2

Modelos magnéticos. Algoritmo de Talwani.

El método de Talwani ha sido utilizado, tanto para el desarrollo de modelos bidimensionales como tridimensionales (Talwani, 1965 y Talwani, et al. 1959). En este caso, se trabajó con modelos bidimensionales en el plano XY.

Fundamentalmente, se considera una sección perpendicular al eje Z (con $z=\text{constante}$), de un cuerpo de tres dimensiones como se muestra a continuación (Figura 5.1):

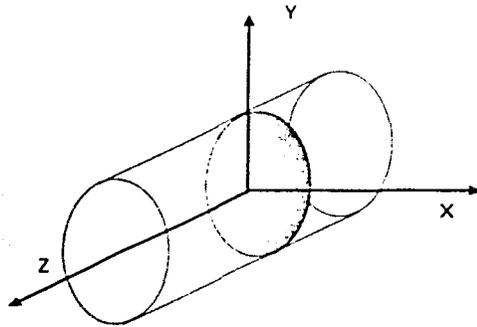


Figura 5.1. sección normal al eje Z de un cuerpo tridimensional.

Se llamará \bar{M} a la magnetización, misma que se considerará constante en todo el cuerpo.

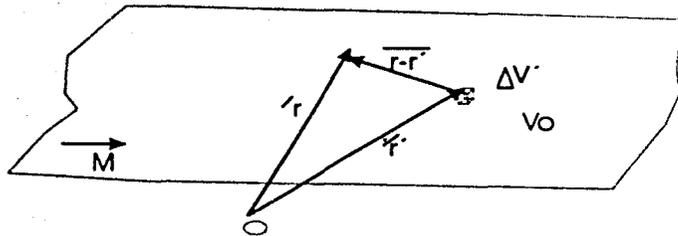


Figura 5.2. Magnetización \bar{M} constante.

La ecuación para obtener el potencial escalar magnético, según Reitz (1967), es:

$$U(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi} \int_{VOL} \vec{M}(\vec{r}') \cdot \frac{\vec{r} - \vec{r}'}{|\vec{r} - \vec{r}'|^3} dV' \dots\dots\dots(1)$$

pero

$$\vec{M} \cdot \frac{\vec{r} - \vec{r}'}{|\vec{r} - \vec{r}'|^3} = \vec{M} \cdot \nabla \frac{1}{|\vec{r} - \vec{r}'|} \dots\dots\dots(2)$$

entonces

$$U(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi} \int_{VOL} \vec{M} \cdot \nabla \frac{1}{|\vec{r} - \vec{r}'|} dV' \dots\dots\dots(3)$$

Aplicando la expresión del teorema de Gauss, y considerando que \vec{M} se mantiene constante, se tiene:

$$\bar{U}(\vec{r}) = \int_{SUP} \frac{\vec{M}}{|\vec{r} - \vec{r}'|} \cdot \vec{n} ds \dots\dots\dots(4)$$

Donde:

\vec{n} es un vector unitario normal al elemento diferencial de superficie (Figura 5.3)

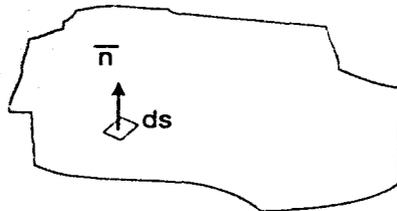


Figura 5.3. Vector normal al elemento diferencial de superficie

Sea \vec{H} la intensidad magnética tal que:

$$\vec{H} = \nabla U(\vec{r}) \dots\dots\dots(5)$$

y denotando u, v, w a las coordenadas del elemento de volumen, se tiene:

$$|\vec{r} - \vec{r}'| = [(x - u)^2 + (y - v)^2 + (z - w)^2]^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots(6)$$

$$H_x = \int_{SUP} \frac{(x-u)\overline{M} \cdot \overline{n}}{|\overline{r}-\overline{r}'|^3} ds \dots \dots \dots (7a)$$

$$H_y = \int_{SUP} \frac{(y-v)\overline{M} \cdot \overline{n}}{|\overline{r}-\overline{r}'|^3} ds \dots \dots \dots (7b)$$

Integrando de $-\infty$ a $+\infty$, se obtendrá en el punto $x=0, y=0, z=0$:

$$H_x = -2 \int \frac{u\overline{M} \cdot \overline{n}}{u^2 + v^2} dl \dots \dots \dots (8a)$$

$$H_y = -2 \int \frac{v\overline{M} \cdot \overline{n}}{u^2 + v^2} dl \dots \dots \dots (8b)$$

Donde:

dl es el elemento diferencial de longitud obtenido en el plano $z=\text{constante}$.

La sección del modelo contenida en el plano $z = \text{constante}$, se aproxima gráficamente por medio de una poligonal de n lados (Figura 5.4) donde φ es el ángulo formado entre el eje "Y" y el radio vector \overline{r} que va de cualquier vértice de la poligonal, mientras que θ es el ángulo formado por un lado cualquiera del polígono, con la dirección horizontal.

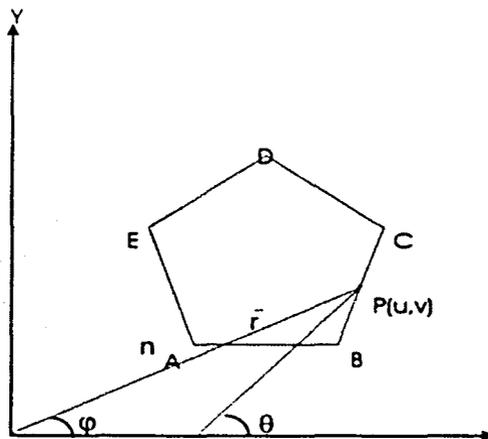


Figura 5.4. Aproximación de la sección $z = \text{constante}$, por una poligonal de n lados

Se considerará un campo complejo de la forma:

$$\overline{Hc} = Hx + iHy \dots \dots \dots (9)$$

Con ayuda de la Figura 5.4 y a partir de la expresión (9), se tiene (González, 1974):

$$\overline{Hc} = -2\overline{M} \cdot \overline{n} \int \frac{\cos \varphi - i \operatorname{sen} \varphi}{r} dl \dots \dots \dots (10)$$

Obsérvese que en el campo complejo $z = re^{i\varphi}$ y $dz = e^{i\varphi} dl$. Integrando, se tiene (González, op.cit):

$$\overline{Hc} = -\overline{M} \cdot \overline{n} e^{-i\theta} [\log \frac{r_{i+1}^2}{r_i^2} + 2i(\varphi_{i+1} - \varphi_i)] \dots \dots \dots (11)$$

Obteniendo: $\overline{M} \cdot \overline{n} = M(l \operatorname{sen} \theta_i - m \cos \theta_i)$,

considerando que $\overline{n} = -ie^{-i\theta}$ y $\overline{M} = M(mi - l)$

y haciendo $R_i = r_i^2$ se obtiene la siguiente expresión para el campo complejo:

$$\overline{Hc} = -2M \sum_{i=1}^n (l \operatorname{sen} \theta_i - m \cos \theta_i) (\cos \theta_i - i \operatorname{sen} \theta_i) \left\{ \frac{1}{2} \log \frac{R_{i+1}}{R_i} + i \left[\tan^{-1} \left(\frac{v_{i+1}}{u_{i+1}} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{v_i}{u_i} \right) \right] \right\} \dots (12)$$

Definiendo:

$$B_i = v_{i+1} - v_i \dots \dots \dots (13a)$$

$$A_i = u_{i+1} - u_i \dots \dots \dots (13b)$$

$$U_i = (u_{i+1} - u_i)^2 + (v_{i+1} - v_i)^2 \dots \dots \dots (13c)$$

$$\operatorname{sen} \theta_i = \frac{B_i}{U_i^{1/2}} \dots \dots \dots (13d)$$

$$\cos \theta_i = \frac{A_i}{U_i^{1/2}} \dots \dots \dots (13e)$$

$$V_i = \log \frac{R_{i+1}}{R_i} \dots\dots\dots(13f)$$

$$W_i = \tan^{-1} \left(\frac{v_{i+1}}{u_{i+1}} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{v_i}{u_i} \right) \dots\dots\dots(13g)$$

Separando las componentes del campo, se tienen las siguientes expresiones finales para Hx y Hy (González, 1974):

$$H_x = +2M \sum_{i=1}^n B_i V_i \frac{(lB_i - mA_i)}{U_i} (W_i A_i - B_i V_i) \dots\dots\dots(14)$$

$$H_y = -2M \sum_{i=1}^n \frac{(lB_i - mA_i)}{U_i} (V_i A_i + W_i B_i) \dots\dots\dots(15)$$