

03095
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MEXICO 7

**INSTITUTO DE GEOLOGÍA
PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA**

**INVESTIGACIÓN GEOLÓGICA Y AMBIENTAL APLICADA A
ZONAS DE DUCTOS DE HIDROCARBUROS EN LA CUENCA
DE MÉXICO"**

T E S I S:

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
DOCTOR EN CIENCIAS (GEOLOGÍA AMBIENTAL)**

**PRE S E N T A:
SALVADOR/MARÍN CÓRDOVA**

**TUTOR:
DR. JOSÉ I. LUGO HUBP**



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

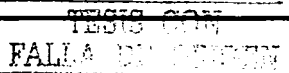
Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

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

**TESIS
CON
FALLA DE
ORIGEN**

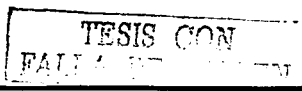
CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	vii
RESUMEN	9
ABSTRACT	11
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	15
I.1. TEMA DE INVESTIGACIÓN	15
I.2. ANTECEDENTES EN MÉXICO	17
I.3. OBJETIVOS	18
I.4. METAS	19
CAPÍTULO II. METODOLOGÍA	23
II.1. INVESTIGACIÓN BIBLIOGRÁFICA	24
II.2. INVESTIGACIÓN TEÓRICA	24
II.3. TRABAJO DE CAMPO	26
II.4. ANÁLISIS INTERPRETATIVO	27
CAPÍTULO III. FACTORES INVESTIGADOS	31
III.1. FACTORES GEOLÓGICOS	32
III.2. FACTORES HIDROLÓGICOS	33
III.3. FACTORES HIDROGEOLÓGICOS	34
III.4. FACTORES GEOTÉCNICOS	35
CAPÍTULO IV. DATOS GENERALES DEL ÁREA INVESTIGADA	39
IV.1. LOCALIZACIÓN DE LOS PRINCIPALES CORREDORES DE DUCTOS	39
IV.2. MARCO GEOLÓGICO REGIONAL	41
IV.2.1. LITOESTRATIGRAFÍA	41
IV.2.1.1. SISTEMA TERCIARIO	42
IV.2.1.2. ROCAS VOLCÁNICAS PLIOCÉNICAS Y CUATERNARIAS	46
IV.2.2. ESTRUCTURAS GEOLÓGICAS Y ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS MODELOS ESTRUCTURALES CONCEPTUALES	47
IV.3. MARCO HIDROGEOLÓGICO REGIONAL	54
IV.4. MARCO GEOGRÁFICO Y GEOLÓGICO DE LOS PRINCIPALES CORREDORES DE DUCTOS	59
IV.4.1. DERECHO DE VÍA AJUSCO-TECOCOMULCO (A-A')	59
IV.4.2. DERECHO DE VÍA LAS CRUCES-PACHUCA (B-B')	59
IV.4.3. DERECHO DE VÍA HUEHUETOCA-TIZAYUCA-CALPULALPAN (C-C')	60
IV.4.4. DERECHO DE VÍA HUEHUETOCA-COYOTEPEC-SANTA CRUZ MOXOLAGUA (D-D')	60



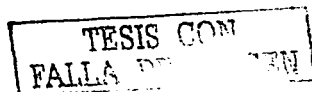
IV.5. MARCO HIDROGEOLÓGICO DE LOS PRINCIPALES CORREDORES DE DUCTOS	61
IV.5.1. DERECHO DE VÍA AJUSCO-TECOCOMULCO (A-A')	61
IV.5.2. DERECHO DE VÍA LAS CRUCES- PACHUCA (B-B')	62
IV.5.3. DERECHO DE VÍA HUEHUETOCA-TIZAYUCA-CALPULALPAN (C-C')	63
IV.5.4. DERECHO DE VÍA HUEHUETOCA-COYOTEPEC-SANTA CRUZ MOXOLAGUA (D-D')	64
IV.6. SELECCIÓN DE LOS DISTINTOS TRAMOS DE DUCTOS EN DONDE SE REALIZARON INVESTIGACIONES DE DETALLE	64
IV.6.1. PLANICIE (1)	64
IV.6.2. PIEDEMONTES (2)	65
IV.6.3. MONTAÑA (3)	67
CAPÍTULO V. CRITERIOS DE ANÁLISIS CIENTÍFICOS Y TÉCNICOS DE PELIGROS GEOLÓGICOS Y AMBIENTALES POTENCIALES	71
V.1. GEOLÓGICOS	72
V.2. GEOFÍSICOS	75
V.3. HIDROLÓGICOS	78
V.4. HIDROGEOLÓGICOS	81
V.5. GEOTÉCNICOS	82
CAPÍTULO VI. INVESTIGACIONES LOCALES ESPECÍFICAS	89
VI.1. PLANICIE	89
VI.1.1. MARCO GEOGRÁFICO Y GEOLÓGICO	90
VI.1.2. IDENTIFICACIÓN E IMPLICACIÓN DE LOS PELIGROS	97
VI.1.3. FACTORES POR IDENTIFICAR EN LA PLANICIE	97
VI.2. PIEDEMONTES	98
VI.2.1. MARCO GEOGRÁFICO Y GEOLÓGICO	99
VI.2.2. IDENTIFICACIÓN E IMPLICACIÓN DE LOS PELIGROS	101
VI.2.3. FACTORES POR IDENTIFICAR EN EL PIEDEMONTES	101
VI.3. MONTAÑA	102
VI.3.1. MARCO GEOGRÁFICO Y GEOLÓGICO	102
VI.3.2. IDENTIFICACIÓN E IMPLICACIÓN DE LOS PELIGROS	104
VI.3.3. FACTORES POR IDENTIFICAR EN LA MONTAÑA	104
CAPÍTULO VII. PELIGRO GEOLÓGICO Y AMBIENTAL EN LAS ÁREAS ESPECÍFICAS	109
VII.1. PLANICIE	109
VII.1.1. SUBSIDENCIA	109
VII.1.2. NEOTECTONISMO	112
VII.1.3. EROSIÓN (IMPACTO HIDRÁULICO)	116

VII.1.4. CONTAMINACIÓN DEL ACUÍFERO LOCAL	119
VII.1.5. INFILTRACIÓN DE HIDROCARBUROS A DUCTOS URBANOS	123
VII.1.6. NIVEL DE SUSCEPTIBILIDAD EN LA PLANICIE	124
VII.2. PIEDEMONTE	126
VII.2.1. EROSIÓN (IMPACTO HIDRÁULICO)	127
VII.2.1.1. ARROYO EL MUERTO	127
VII.2.1.2. ARROYO GUADALUPE	131
VII.2.1.3. RÍO DE LAS AVENIDAS	133
VII.2.2. DESLIZAMIENTO EN LADERAS	136
VII.2.3. NEOTECTONISMO	137
VII.2.4. CONTAMINACIÓN DEL ACUÍFERO	138
VII.2.5. NIVEL DE SUSCEPTIBILIDAD EN EL PIEDEMONTE	139
VII.3. MONTAÑA	141
VII.3.1. EROSIÓN (IMPACTO HIDRÁULICO)	142
VII.3.2. DESLIZAMIENTO EN LADERAS	145
VII.3.3. NEOTECTONISMO	153
VII.3.4. HUNDIMIENTO POR COLAPSO DE OBRAS MINERAS	154
VII.3.5. CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS Y EMBALSES	159
VII.3.6. NIVEL DE SUSCEPTIBILIDAD EN LA MONTAÑA	159
CAPÍTULO VIII. CONCLUSIONES	163
VIII.1. CONCLUSIONES DE LAS ÁREAS ESPECÍFICAS	163
VIII.1.1. PLANICIE	163
VIII.1.2. PIEDEMONTE	164
VIII.1.3. MONTAÑA	164
VIII.2. ACCIONES RECOMENDABLES	164
VIII.2.1. ANÁLISIS DEL ENTORNO REGIONAL Y LOCAL	164
VIII.2.2. DETERMINACIÓN DE LOS POSIBLES PELIGROS	165
VIII.2.3. ESTABLECIMIENTO DE PROGRAMAS DE MONITOREO	165
VIII.2.4. AMPLIACIÓN DEL PROGRAMA DE INVESTIGACIÓN	166
VIII.2.5. PREPARACIÓN DE INVESTIGADORES Y TÉCNICOS	167
VIII.3. MEDIDAS DE PREVENCIÓN Y/O MITIGACIÓN EN LA CUENCA DE MÉXICO	167
VIII.3.1. SUBSIDENCIA Y NEOTECTONISMO	167
VIII.3.2. EROSIÓN (IMPACTO HIDRÁULICO)	168
VIII.3.3. INESTABILIDAD DE LADERAS	168
VIII.3.4. CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS	169
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	171



RELACION DE FIGURAS

- FIGURA IV.1.1 LOCALIZACIÓN DE LOS PRINCIPALES DERECHOS DE VÍA
- FIGURA IV.2.1.1 TABLA DE CORRELACIÓN ESTRATIGRÁFICA
- FIGURA IV.2.2.1 MODELOS ESTRUCTURALES INTEGRADOS
- FIGURA IV.2.2.2 TECTÓNICA DE LA CUENCA DE MÉXICO (AGUAYO, 1987)
- FIGURA IV.2.2.3 ÁREA DEL EX-LAGO DE TEXCOCO
- FIGURA IV.2.2.4 ESTRUCTURAS GEOLÓGICAS MAYORES Y SU RELACIÓN CON LOS DUCTOS
- FIGURA IV.3.1 UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS
- FIGURA IV.6.2.1 LOCALIZACIÓN DE SITIOS PARA INVESTIGACIÓN DE DETALLE
- FIGURA V.1.1 TECTÓNICA DE LA CUENCA DE MÉXICO (MOOSER, 1963)
- FIGURA V.2.1 EPICENTROS DE SISMOS EN EL ÁREA METROPOLITANA
- FIGURA V.3.1 HIDROGRAFÍA DE LA CUENCA DE MÉXICO
- FIGURA VI.1.1 ÁREA DE PLANICIE (1971)
- FIGURA VI.1.1-A ÁREA DE PLANICIE (1994)
- FIGURA VI.1.1.1 SECUENCIA ESTRATIGRÁFICA EN LA PLANICIE
- FIGURA VI.2.1.1 ÁREA DE PIEDEMONTE
- FIGURA VI.3.1 ÁREA DE MONTAÑA
- FIGURA VII.1.1 PELIGRO GEOLÓGICO Y AMBIENTAL (ÁREA DE PLANICIE)
- FIGURA VII.1.2.1 NEOTECTONISMO EN LA CUENCA DE MÉXICO
- FIGURA VII.1.4.1 SECCIÓN GEOLÓGICA (ÁREA DE PLANICIE)
- FIGURA VII.2.1.1 PELIGRO GEOLÓGICO Y AMBIENTAL (ÁREA DE PIEDEMONTE)
- FIGURA VII.2.2.1 SECCIÓN GEOLÓGICA (ÁREA DE PIEDEMONTE)
- FIGURA VII.2.3.1 SECCIÓN HIDROGEOLÓGICA TIZAYUCA-PACHUCA
- FIGURA VII.3.1 PELIGRO GEOLÓGICO Y AMBIENTAL (ÁREA DE MONTAÑA)
- FIGURA VII.3.1.1 GEOLOGÍA SUPERFICIAL (ÁREA DE MONTAÑA)
- FIGURA VII.3.2.1 SECCIÓN GEOLÓGICA (ÁREA DE MONTAÑA)
- FIGURA VII.3.4.1 VETAS MINERAS QUE CRUZAN AL DERECHO DE VÍA (ÁREA DE MONTAÑA)



AGRADECIMIENTO

Deseo manifestar sinceramente mi agradecimiento a las autoridades del Instituto Mexicano del Petróleo por el apoyo que me brindaron para llevar a cabo esta meta, especialmente al Dr. Francisco Guzmán López Figueroa y al Ing. Carlos F. Valdés Olmedo.

A mi comité tutorial integrado por los doctores: José I. Lugo Hubp, J. Abraham Díaz Rodríguez y Rafael Huizar Álvarez; así como al Dr. Mario Alberto Guzmán Vega, asesor interno del Instituto Mexicano del Petróleo, por sus orientaciones y consejos.

Asimismo, a la UNAM; particularmente a mis colegas de los Posgrados de Ciencias de la Tierra y de la Facultad de Ingeniería.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

INVESTIGACIÓN GEOLÓGICA Y AMBIENTAL APLICADA A ZONAS DE DUCTOS DE HIDROCARBUROS EN LA CUENCA DE MÉXICO

RESUMEN

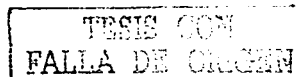
La evolución de la humanidad se asocia en gran medida en el último siglo, al desarrollo de la industria petrolera; sin la cual, a la fecha, no sería factible comprender su avance, tanto en los medios de transporte como en la gran mayoría de sus insumos.

Sin embargo, esta industria afronta, tanto a nivel mundial como nacional, una amplia variedad de problemas y entre ellos el ambiental, que incide en todas sus etapas de desarrollo; desde la exploración hasta la extracción, refinación, almacenamiento y distribución, en cualquiera de sus áreas específicas, tales como: campos petroleros (continentales y marinos), refinerías, terminales de almacenamiento, estaciones de servicio y ductos, tanto terrestres como marinos.

En cualquiera de las etapas mencionadas pueden ocurrir fugas de los hidrocarburos, con un costo no pocas veces elevado, para su detección, evaluación y remediación en el suelo, subsuelo y cuerpos de agua (superficial y/o subterránea), aunado al riesgo de pérdidas humanas.

La gran dimensión de esta problemática ocasionó que como idea fundamental, se seleccionara una parte de su complejidad, que es la de los ductos que conducen hidrocarburos, los cuales constituyen a nivel mundial el medio de su transporte masivo; acotando además, y con base en la gran diversidad de terrenos geológicos e hidrogeológicos que caracterizan a la República Mexicana, una región factible de analizar en un proyecto de investigación doctoral, como es la Cuenca de México, con una superficie de 9,600 km².

Los componentes fundamentales para seleccionar la investigación en este sitio, corresponden a la gran densidad poblacional de la Cuenca de México, así como lo importante de la vulnerabilidad de sus recursos hidráulicos que afrontan ya de por sí, una problemática vital debida a la gran longitud de *derechos de vía* donde se ubican los ductos, incidiendo en la cuenca en unos 500 kilómetros de tendido lineal.



Dentro de los objetivos fundamentales en este proyecto de investigación, se consideró establecer criterios preventivos, antes de que ocurran los derrames, detectando el peligro que los procesos naturales geológicos pudieran representar para una operación adecuada de los ductos con la posibilidad de evitar la contaminación de los cuerpos de agua, tanto superficiales como subterráneos que indiscutiblemente son vitales para la supervivencia de las poblaciones y de los sistemas ecológicos asociados.

Como aportación al conocimiento científico universal, los componentes que apoyan a esta investigación incluyen en forma integral, principalmente los criterios geológicos, geofísicos, hidrogeológicos, geomorfológicos, geotécnicos, de mecánica de suelos, de mecánica de rocas y ecológicos.

Fue de gran relevancia además, el hecho de que con la investigación a nivel regional en los 9,600 km² de la Cuenca de México y 500 km de *derecho de vía*, se hayan seleccionado tres áreas con diferente tipo de relieve en las que se infirieron los peligros geológicos a los ductos, y que con la investigación detallada, en solamente 16 km de los *derechos de vía*, se confirmara en la mayoría de los casos ese supuesto.

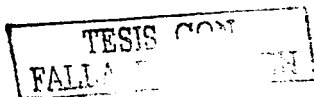
En la determinación de los peligros geológicos, fueron utilizados tres niveles de susceptibilidad: baja, media y alta, con base en sus características de sismicidad, su cercanía a fallas activas, pendiente del terreno, presencia de acuíferos y cuerpos de agua y antecedentes de efectos negativos en obras de diversa índole.

Para el área situada en la *planicie* los cinco peligros analizados fueron calificados con un valor alto.

En el área correspondiente al *pedemonte*, de los cuatro posibles peligros considerados, solamente uno se presenta con valor alto.

Por lo que respecta al área de *montaña*, cuatro de los cinco peligros analizados alcanzaron el nivel alto.

Finalmente, tomando como base los resultados obtenidos, se definieron las conclusiones de las áreas específicas y generales, así como diversas alternativas de prevención o mitigación aplicables, para evitar impactos negativos al ambiente en suelo, subsuelo y agua subterránea en la Cuenca de México.



GEOLOGICAL AND ENVIRONMENTAL RESEARCH APPLIED TO HYDROCARBON PIPELINE ZONES IN THE CUENCA DE MÉXICO

ABSTRACT

The human social evolution is associated with great extent, in the last century, with the development of the oil industry; without it, nowadays, it couldn't be possible to understand its advance in both means of transportation and in the majority of its commodities.

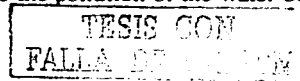
However, this industry has in a national and international level, several problems and one of them is the environmental, that has the effect in all development stages; from exploration to extraction, refinement, storage and distribution, in any of its specific areas, like: petroleum fields (continentals and offshores), refineries, big depot storage, service stations and continental and offshore pipelines.

In any of the mentioned stages, hydrocarbons leaks can occur, with many times a high cost for its detection, evaluation and solution in soil, subsoil and water bodies (superficial and/or underground), joined to the risk of human losses.

The importance of this problem caused that like a fundamental idea, a part of its complexity was selected which is about the pipelines to carry away hydrocarbon, which constitute in an international level a massive means of transport; enclosing furthermore, with the great diversity of geological and hydrogeological terrains that is a characteristic of *República Mexicana*, a feasible region to analyze in a research doctoral project, like the *Cuenca de México* is, with a surface of 9,600 km².

The fundamental components to select the research in this site, correspond to the high density of inhabitants of the *Cuenca de México*, as well as the importance of the vulnerability of its hydraulic resources that confront already a vital problem caused by a big longitude of right of way where the pipelines are, affecting in the basin around 500 km in lineal laying.

In this research project, the fundamental objective consisted in establishing some precautionary criteria, before spills occurre, detecting the risk that natural geologic phenomena could represent by a right operations in the pipelines with the possibility to reduce the pollution of the water body, both superficial



as underground that unquestionable are fundamental to the survival of the communities and ecological systems associated.

As a contribution to the scientific and universal knowledge, the components that support in this research include in an integral way mainly the geological, geophysical, hydrogeological, geomorphological, geotechnical, soil mechanics, rock mechanics and ecological criterions.

It was really important, furthermore, the fact that with the investigation in a regional level in the 9,600 km², in the *Cuenca de México* and in the 500 km of the right of way there were selected only three areas with different relief types, in which we refer to the geologic risks to the pipelines and that with the detailed research, in only 16 km of the right of way it was confirmed that almost in all cases that supposition occurs.

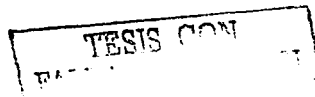
To determine the geological risks, three susceptibility levels were used, low, middle and high, with basis of sismicity characteristics, close active faults, the gradient of the soil, groundwater, water bodies and antecedents of negative effects in several kinds of constructions.

In the plain zone, the five risk analyzed were described with a high value.

In the piedmont area, only one of the four risks has a high value.

By the mountain zone concerns, four of the five analyzed risks obtained the highest level.

Finally, taking as a base the obtained results, the conclusions were defined for the general and specific areas, as well as different alternatives for prevention or reduce applicable to avoid negative environmental impacts in the soil, subsoil and underground water in the *Cuenca de México*.



DE

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN

Las poblaciones asentadas en la Cuenca de México han sufrido los efectos de fuerzas naturales de origen sísmico, hidrometeorológico y volcánico, que se han visto incrementados en razón directa con el crecimiento de ellas, provocando desastres mayores.

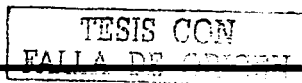
Los riesgos también se han incrementado por los efectos antropogénicos, que las instalaciones urbanas e industriales de los diversos núcleos humanos generan; sobre todo si estas obras, dentro de las que se encuentran los sistemas de drenaje (incluido el drenaje profundo), y los ductos que conducen hidrocarburos, están expuestos a sufrir fracturas, debido a los procesos naturales tales, como la subsidencia regional, la erosión fluvial y la influencia de fallas activas, con el consecuente impacto ambiental al agua subterránea, de donde se abastecen prioritariamente, de agua potable, las diversas poblaciones.

I.1. TEMA DE INVESTIGACIÓN

El tema de investigación que aquí se presenta corresponde a un campo de las ciencias de la tierra, incipientemente desarrollado en nuestro país, por lo que se encuentra en etapa inicial de desarrollo, considerado como estratégico en los últimos años.

No obstante que a toda la *geología* se le puede considerar como *geología ambiental* en virtud de que los procesos que intervienen en ella, son básicos para el ambiente físico, el término específico se ha reservado principalmente para su relación con las personas y el ambiente físico.

La definición semántica del término *Geología Ambiental* se debe a Robert Legget (1971), quien mencionó que nació como un requerimiento de comunicación de los científicos con el público en general; siendo esta una necesidad de servicio a la sociedad. Impulsó así la vinculación del desarrollo de la humanidad con la conservación de los ambientes naturales. En la década de los años setenta, se empezó a reconocer la importancia de la Geología Ambiental o Ecogeología en los países del primer mundo (Flawn, 1970 y 1975), con base en los avances que se tuvieron con el desarrollo de la Geología Urbana, que incide en la calidad de la infraestructura industrial y urbana.



En la última década, se han tenido avances importantes en los diversos campos de la ciencia que se relacionan con los peligros naturales y con la contaminación que las actividades antropogénicas pueden producir al ambiente.

Las investigaciones en las diversas ramas de las ciencias de la tierra han sido numerosas y de alta calidad, por lo que son necesarias para la solución inmediata de problemas operativos, interactuando además con otras disciplinas de la ingeniería como: la Geotecnia, Ingeniería Sísmica e Ingeniería Estructural, entre otras.

Por lo que respecta a la definición de *riesgo*, se puede mencionar que a la fecha aún existen discrepancias y confusiones entre los diversos grupos profesionales, según sea su vocación, con respecto a este y a otros términos tales como: *peligro*, *vulnerabilidad* y *desastre*.

El significado más general aceptado de riesgo, se define como *contingencia o proximidad de un daño*.

De acuerdo con el Glosario de Protección Civil (Secretaría de Gobernación, 1996), la UNESCO conceptualiza el *riesgo*, como la posibilidad de pérdida tanto en vidas humanas como en bienes o en capacidad de producción.

Esta definición involucra tres aspectos relacionados por la fórmula:

$$\text{Riesgo} = \text{vulnerabilidad} \times \text{valor} \times \text{peligro}.$$

En donde la *vulnerabilidad* es una medida del porcentaje del valor que puede ser perdido en el caso de que ocurra un evento destructivo determinado.

El *valor* se refiere al número de vidas humanas amenazadas o en general, a cualquiera de los elementos económicos de capital: inversión y capacidad productiva, entre otros.

El *peligro* o la *peligrosidad*, es la probabilidad de que un área en particular sea afectada por alguna de las manifestaciones destructivas de la calamidad.

Establecido el significado de *riesgo* y lo que esto involucra, y al asociarlo con el término *geológico*, se establece el de *riesgo geológico*, como la vulnerabilidad a que está sujeto el ser vivo y sus propiedades, ante fenómenos naturales que pueden repercutir a corto, mediano y largo plazo.

Por otra parte Wilson (1991) considera que usualmente la frase *riesgo ambiental*, es usada para referirse a una substancia específica como es el caso de los asbestos, los PCBs y el plomo, que son el origen del riesgo, pero que en realidad el problema es más complejo y, que para ser evaluado debe tomarse en cuenta el punto de vista del valor; por lo que no debe ser visualizado únicamente como una substancia, sino como un sistema de componentes que gobiernan al riesgo.

Por lo tanto, el *riesgo ambiental* se define como *la determinación de la naturaleza, magnitud y probabilidad de efectos ecológicos adversos, debidos a algún agente perturbador* (Secretaría de Gobernación, 1996).

En el mismo Glosario de Protección Civil se define al *Agente perturbador*, como un acontecimiento que puede impactar a un sistema afectable (población y entorno) y transformar su estado normal en un estado de daños, que pueden llegar al grado de *desastre*, definido como un *evento concentrado en el tiempo y espacio*, durante el cual la sociedad o un parte de ella, sufre un daño severo con pérdidas humanas, de tal manera que la estructura social se desajusta, afectando el funcionamiento vital de la misma.

Establecidos los significados de los términos, se hace necesario precisar los eventos de carácter natural que pudieran originar un riesgo para la humanidad y sus bienes.

Por lo que respecta a los *agentes perturbadores de origen geológico*, en el Glosario de Protección Civil de la Secretaría de Gobernación (*op. cit.*), se encuentra definido como *la calamidad que tiene como causa, las acciones y movimientos violentos de la corteza terrestre*.

A esta categoría pertenecen los sismos o los terremotos (neotectonismo) que afectan a los núcleos sociales y la inestabilidad de los suelos, también conocidos como movimientos de tierra, generalmente activados por las lluvias y por las fuertes pendientes topográficas.

1.2. ANTECEDENTES EN MÉXICO

En nuestro país los aspectos relacionados con estos temas dentro de la industria petrolera, se iniciaron hacia los años ochenta a partir del accidente en la zona marina de Campeche del pozo Iztoc, (3 de junio de 1979) y de la explosión de hidrocarburos contenidos en el subsuelo (acuífero y drenajes) debido a fugas, en la ciudad de Guadalajara en 1992 (Marín-Córdova y Quiroz, 1992(b)). Estos dos acontecimientos dieron motivo para que en la industria petrolera nacional se efectuaran diversos estudios de carácter ecológico y de análisis de riesgo para garantizar la seguridad en instalaciones petroleras, entre

los que se encuentran en forma prioritaria, los estudios geológicos ambientales en la superficie, el subsuelo y los mantos acuíferos.

A partir de esos sucesos, se han identificado a nivel nacional múltiples sitios contaminados por hidrocarburos y diversos residuos, estableciéndose tecnologías para su detección, evaluación y saneamiento (Iturbe-Argüelles *et al.*, 1998), siendo el costo de estas actividades mucho más elevado que si se realiza en forma preventiva.

Es en el año de 1999 cuando se instala en el Instituto Mexicano del Petróleo (IMP), el *Programa Institucional de Investigación y Desarrollo en Medio Ambiente y Seguridad (PIMAS)*, impulsando la investigación y el desarrollo tecnológico en Medio Ambiente y Seguridad, en su acepción más general, teniendo como líneas directrices: la prevención, el control y la remediación del ambiente, contribuyendo así a la mejora de la capacidad instalada en PEMEX.

Dentro del gran número de plataformas tecnológicas en las que se agruparon las necesidades de la empresa, se encuentran las *Ciencias del Ambiente* y los *Ductos*.

1.3. OBJETIVOS

Evaluar el peligro geológico en ductos, relacionando confiabilidad con consecuencias (económicas, sociales y ambientales) de posibles fallas, para enfrentar decisiones de diseño, inspección, mantenimiento y operación de líneas de PEMEX.

Para la realización de esta investigación se establecieron los siguientes objetivos específicos:

- Aplicar los métodos más convenientes para investigar la detección y evaluación de los peligros geológicos y ambientales, que afecten el funcionamiento operativo de los ductos petroleros.
- Definir las bases metodológicas para la realización de estos estudios en forma preventiva, en los diversos tipos de relieve en la Cuenca de México: *planicie, piedemonte y montaña*.
- Investigar el peligro geológico y ambiental, que pudiera presentarse en tres sitios específicos, correspondientes a cada uno de los relieves mencionados, de los principales *derechos de vía*, donde se encuentran instalados los ductos que conducen hidrocarburos en la Cuenca de México, definiendo su posible grado de afectación al entorno, presentando alternativas de solución.

- Proponer alternativas de investigación detallada o de solución de las posibles afectaciones en los tres sitios particulares correspondientes a cada una de las tres áreas mencionadas.

I.4. METAS

Mediante esta investigación se definen las bases geológicas para la adecuada detección y evaluación en etapa preventiva, de los posibles peligros naturales que pudieran afectar a los ductos que conducen hidrocarburos en la Cuenca de México y consecuentemente, su impacto al suelo, subsuelo y agua superficial y subterránea

De manera específica, se detectaron y evaluaron los peligros geológicos y ambientales en tres sitios donde previamente se interpretaron las posibilidades de que se presentaran dichos peligros, correspondiendo particularmente cada uno de ellos a las tres áreas de la cuenca caracterizadas por sus rasgos geográficos y geológicos:

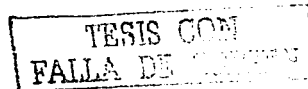
- Planicie
- Piedemonte
- Montaña

Con las metas enunciadas se pretenden los siguientes beneficios para la sociedad:

- Mayor participación de la comunidad científica en la detección y evaluación de los posibles peligros y riesgos que los fenómenos naturales, específicamente los geológicos, que puedan afectar a los ductos petroleros, concientizando a los funcionarios que administran estos recursos y a la población en general.

Con la mayor participación de los investigadores y la interacción de las ciencias básicas y aplicadas en estas áreas, se podrán mejorar desde la normatividad para la instalación y operación de los ductos que conducen hidrocarburos hasta la evaluación detallada de los riesgos inherentes.

- Mediante el análisis de diversas herramientas de las ciencias de la tierra que han alcanzado una gran evolución, definir para estos casos específicos, cuales son las que pueden ser aplicadas en forma más eficiente.



- Establecer una metodología para la identificación en la etapa preventiva, de posibles accidentes a los ductos, para elaborar recomendaciones que las eviten, minimicen o detecten en etapa temprana, antes de que afecten en forma irreversible al entorno y específicamente a los mantos acuíferos, que constituyen un recurso vital para la humanidad.
- Identificación de los peligros geológicos que podrían afectar la adecuada operación de los ductos que transportan hidrocarburos en la Cuenca de México, generándose así nuevos conocimientos al respecto.
- Evaluar el peligro que una contingencia en ellos pudiera ocasionar, determinando su naturaleza, magnitud y probabilidad de efectos ecológicos adversos.

TESIS CON
FALLA DE []

DE

CAPÍTULO II
METODOLOGÍA

TESIS CON
FALLA DE CENGEN

CAPÍTULO II METODOLOGÍA

Para la evaluación del peligro geológico que se pudiera presentar en los ductos de hidrocarburos en la Cuenca de México, se identificaron y caracterizaron los diversos procesos naturales que inciden en ella.

Se tomaron en cuenta también, en relación a las fallas en las tuberías de conducción de PEMEX, los criterios acerca del origen y las estadísticas que la empresa tiene con respecto a ellas (Instituto Mexicano del Petróleo, 1999), los que se presentan en las tablas II.1. y II.2.

TABLA II.1.

ORIGEN DE FALLAS EN LOS DUCTOS (CRITERIOS DE PEMEX)	
INTERNOS	EXTERNOS
Defectos de fabricación propios del material	Abolladuras por golpes
Anomalías en las soldaduras	Deformación por movimientos del suelo
Defectos geométricos	Tomas clandestinas

Instituto Mexicano del Petróleo (1999).

TABLA II.2.

TIPO DE FALLA	PORCENTAJE
Corrosión	41 %
Falla de material	25 %
Golpes de maquinaria	13 %
Toma clandestina	4.5%
Fisura en soldaduras	3.0%
Otras causas	13.5%

Instituto Mexicano del Petróleo (1999).

Adicionalmente se estimaron las posibles consecuencias que se puedan tener, en las que se incluyen: costos ambientales, sociales, políticos y económicos, entre otros.

Estos aspectos adquieren mayor relevancia, si tomamos en cuenta que en gran parte del área estudiada existen importantes núcleos de población establecidos y la presencia de recursos hidráulicos subterráneos, para satisfacer sus necesidades vitales.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

II.1. INVESTIGACIÓN BIBLIOGRÁFICA

Esta tarea es de gran relevancia y da las bases del marco teórico en el que se desarrolló la investigación, evitando repetición de actividades y costos innecesarios; especialmente si la misma se enfoca a aspectos aplicados en donde los errores conducen a interpretaciones equivocadas, con posibilidades de que ocurran grandes desastres, por lo que se requiere de amplia experiencia y de un conocimiento profundo de la región y de los temas que se deben involucrar.

En esta etapa se recopiló, seleccionó y analizó la información bibliográfica que al respecto se tiene de la Cuenca de México. Se consultaron las investigaciones de carácter geológico, hidrogeológico, geofísico, geológico-ambiental, sísmicos, de mecánica de suelos y mecánica de rocas más relevantes, de trabajos publicados en revistas científicas nacionales e internacionales, y en su mayor parte, en reportes técnicos inéditos de la Comisión Nacional del Agua, Petróleos Mexicanos, Instituto Mexicano del Petróleo y Comisión Federal de Electricidad, entre otros. Además se consultó la cartografía temática y topográfica del INEGI, escala 1:50,000.

Cabe mencionar que debido a la interacción de diversas disciplinas en esta investigación se utilizaron algunos términos comunes para cada una de ellas, que pueden no corresponder a una semántica pura.

II.2. INVESTIGACIÓN TEÓRICA

La consulta bibliográfica permitió contar con importantes datos aportados por diversos investigadores y técnicos, sirviendo como base para el conocimiento y descripción de los procesos geológicos en la Cuenca de México, que pudieran incidir negativamente en la adecuada operación de los ductos petroleros, en cada uno de los tres tipos de relieve seleccionados (planicie, piedemonte y montaña).

Únicamente se consideraron estos tres tipos de relieve, por ser en ellos en donde se han presentado efectos negativos en obras de ingeniería civil e industrial.

En estas áreas se analizaron los procesos siguientes, así como las posibles consecuencias secundarias:

- a) Subsistencia (para la *planicie*)
- b) Neotectonismo (para las tres áreas)
- c) Erosión fluvial (para las tres áreas)
- d) Deslizamiento o inestabilidad de laderas (para el *piedemonte* y la *montaña*)

Como consecuencia de un efecto negativo en los ductos, que generara una fuga, se consideró:

- e) Contaminación del acuífero local (para las tres áreas)
- f) Introducción de hidrocarburos a ductos urbanos (para la *planicie*)

A continuación se hace referencia de lo que implica cada uno de estos procesos, de acuerdo con el diccionario geomorfológico (Lugo-Hubp, 1989).

a) Subsistencia

La subsistencia se define como el hundimiento progresivo del fondo de una cuenca de acumulación paralelo al proceso de depositación de sedimentos. Para este caso se tomó en cuenta también el hundimiento debido a la extracción de agua subterránea.

Estos desplazamientos se miden tomando como referencia bancos de nivel ubicados en sitios considerados fijos.

b) Neotectonismo

El neotectonismo se refiere a los procesos tectónicos modernos, a los que se debe fundamentalmente el relieve. La edad de estos movimientos es considerada por la mayoría de los investigadores como del Neógeno-Cuaternario. También hay quienes consideran que su límite no es fijo, sino que depende de la región de que se trate.

Dado que el Cinturón Volcánico Transmexicano (CVT) se encuentra afectado por estructuras neotectónicas del Cuaternario, que pueden considerarse como fallas activas (Stemmons y Mc Kinney, 1977) se consideró conveniente realizar un análisis detallado de los modelos propuestos por Mooser (1975), Marín-Córdova *et al.* (1986(b)) y Cserna *et al.* (1988).

c) Erosión

Es el conjunto de procesos por medio de los cuales se produce separación de los productos del sustrato original. La intensidad con que éstos actúen depende de muchos factores: topografía, clima, litología, estructura geológica, actividad tectónica, etc. En este caso se consideró principalmente a los causados por los escurrimientos del agua de lluvia (erosión fluvial), sobre los cauces que cruzan a los *derechos de vía*, por lo que se relaciona también con el término socavación e impacto hidráulico.

TESIS CON

FALLA DE

d) Deslizamiento (inestabilidad de laderas)

Corresponde al movimiento lento de una masa de suelo o suelo y rocas en una ladera de más de 15° de inclinación del plano sobre el que resbala. Los deslizamientos se llevan a cabo favorecidos por infiltración de agua y contactos de rocas inclinadas en dirección de la pendiente de la ladera. Las dimensiones y espesores de las masas deslizantes son muy variables, las hay de cientos de miles de metros cúbicos lo mismo que de unas decenas de metros cúbicos.

Cabe señalar que en diversas ocasiones el movimiento ha sido repentino, afectando a diversas poblaciones y a su infraestructura.

e) Contaminación del acuífero

Se consideró importante analizar esta posibilidad, en virtud de que gran parte de la población en la Cuenca de México se abastece de agua potable a partir de agua subterránea (43 m³/s) correspondiendo según datos de la DGCOH a un 80% del total de abastecimiento, vinculándolo con las características hidrodinámicas del subsuelo, tanto de la zona no saturada como del acuífero en sí.

f) Introducción de hidrocarburos a ductos urbanos

Este posible efecto en la *planicie* fue considerado en razón a la cercanía de los ductos petroleros y el resto de la infraestructura urbana (tuberías de drenaje, de agua potable, de telefonía, etc.); tomando en cuenta además lo ya ocurrido en otros lugares, como fue el accidente de la ciudad de Guadalajara en el año de 1992 (Marín-Córdova y Quiroz, *op. cit.*(b)).

II.3. TRABAJOS DE CAMPO

Se efectuaron reconocimientos en el campo en las áreas específicas de los *derechos de vía* y en sus relaciones con los patrones litológicos y geológico estructurales.

Para la selección de las áreas específicas, se emplearon criterios basados principalmente en cuatro aspectos:

1. Su ubicación con respecto a los tres tipos de relieve considerados,
2. Su cercanía a las principales fallas de los modelos estructurales analizados
3. Los antecedentes en el área de efectos negativos en obras urbanas e industriales
4. La presencia de acuíferos importantes de la Cuenca de México

En las tres áreas se realizaron trabajos de campo que consistieron en su cartografía geológica detallada, incluyendo litología, estratigrafía y estructuras geológicas, apoyada además, con los datos obtenidos mediante la perforación de tres sondeos con equipo manual en la *planicie*, en los que se realizaron pruebas de permeabilidad de campo.

En la *montaña* se efectuó un levantamiento característico de mecánica de rocas (usual para proyectos de túnel), buscando su aplicación para laderas inestables, con el que se determinaron las características geomecánicas del macizo rocoso, basadas principalmente en las estructuras geológicas del mismo, tales como: contactos y fracturas.

II.4. ANÁLISIS INTERPRETATIVO

Concluidas las fases anteriores se llevó a cabo el análisis interpretativo de cada sitio expresando en forma cualitativa el peligro geológico definido, tomando como base tres niveles de susceptibilidad: baja, media y alta, en consideración a sus características de sismicidad, su cercanía a fallas activas, pendiente del terreno, presencia de acuíferos y cuerpos de agua, así como los antecedentes de efectos negativos en vías de comunicación, instalaciones industriales y/o urbanas, presas, etc.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

DE

CAPÍTULO III

FACTORES INVESTIGADOS

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

CAPÍTULO III

FACTORES INVESTIGADOS

Con base en la ubicación de los tres tramos de *derecho de vía* seleccionados de los ductos petroleros en la Cuenca de México, y del cúmulo de estudios técnicos y de investigación realizados en ella por diversas instituciones y dependencias estatales y federales, se estimó adecuado aplicar metodologías ampliamente utilizadas, para la determinación de los distintos factores considerados, en el entendido de que algunas de ellas no se han aplicado para el caso de los ductos petroleros, sino que han servido para otros fines, tales como cimentaciones de edificios, construcción de presas, túneles, obras viales, de drenaje, extracción de agua subterránea para diversos usos, etc.

Varios factores son aplicables a los diversos tipos de relieve considerados, como pudiera ser el caso de los geológicos: litología, estratigrafía y estructuras; los cuales son primordiales para la evaluación del comportamiento del subsuelo en cualquier sitio a nivel regional y local.

Las metodologías consideradas como aplicables a la determinación de los factores involucrados en los peligros geológicos y ambientales, que pueden incidir en la adecuada operación de los ductos petroleros localizados en la Cuenca de México, así como las consecuencias de impacto ambiental, que una fuga de hidrocarburos pudiera provocar en el suelo, el subsuelo y los acuíferos, presentan como características principal, ser aplicables en forma rápida y económica (Marín-Córdova y Quiroz, *op. cit.*(b)), además de tener un alto porcentaje de confiabilidad, en virtud de haberse utilizado extensamente para la evaluación de proyectos ingenieriles de diversa índole.

Las características descritas anteriormente, son de gran importancia en el ámbito del riesgo (Marín-Córdova y Quiroz, *op. cit.*(b)), ya que en general, no se dispone de tiempos prolongados de realización u observación para llegar a conclusiones aplicables a la prevención o mitigación de impactos ambientales; más aún si durante decenas de años, esta no ha sido la política imperante tanto a nivel académico como gubernamental, y en menor escala cuando los objetivos principales han sido aumentar la producción desmedida de los bienes materiales, restándole importancia a la realización de investigaciones al respecto y la aplicación de tecnologías consecuentes.

En este capítulo se hace mención de los factores definidos para el desarrollo de esta tesis, además de aquellos que se consideran necesarios para investigaciones específicas, que deben continuar en un futuro cercano en los sitios detectados con peligro alto.

III.1. FACTORES GEOLÓGICOS

Los factores geológicos considerados de gran interés son:

- Litología
- Estratigrafía
- Estructuras geológicas

Estos tres factores son ineludibles, para el apoyo de cualquier análisis de esta problemática, tanto para un proyecto futuro, como para la operación de instalaciones petroleras ya construidas.

La determinación de estos tres factores se debe basar tanto en características observables en superficie, como en reportes de cualquier sondeo indirecto (geofísica) o directo (exploraciones con máquina o a cielo abierto); estimándose como escala adecuada para determinaciones regionales, la de 1:50,000 y para condiciones locales 1:5,000, pudiendo estas variar en caso de análisis de mayor visión o de gran detalle.

En el aspecto litológico se consideraron además de la clasificación de las rocas, las condiciones de cementación y/o alteración de ellas, el tipo de suelos presentes y su relación con las características topográficas en cada uno de los sitios.

La estratigrafía implica la posición que guardan unas unidades litológicas con respecto a otras, así como sus espesores, debiéndose tomar en consideración que en la porción continental, los ductos petroleros se instalan a profundidades generalmente menores a los 10 metros.

Por lo que respecta a las estructuras geológicas presentes, se determinaron en forma detallada, ya que van a influir grandemente en el posible daño a los ductos y sus efectos posteriores.

Dentro de ellas se consideraron:

- Contactos
- Fracturas
- Fallas
- Discordancias
- Planos de fluidez
- Cavidades

Todas estas discontinuidades, se emplean para definir el grado de estabilidad de las laderas y tienen influencia en la circulación del agua subterránea y/o los contaminantes.

En la planicie (secuencia lacustre) para investigaciones específicas (no contempladas en la presente), varios autores dentro de los que destacan Zeevaert (1983) y Díaz-Rodríguez (1998 y 2003) manifiestan la gran importancia que tiene el conocimiento del comportamiento del suelo mediante el análisis sísmo-geodinámico, ya que las ondas sísmicas pueden originar fallas del suelo, perjudicándose construcciones, pavimentos y ductos.

Para la realización de este tipo de investigación se deben tomar en consideración la siguiente información básica (Zeevaert, 1997):

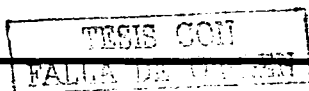
- Litoestratigrafía del sitio.
- Cohesión y ángulo de fricción interna de cada uno de los estratos.
- Módulo dinámico de rigidez para cada estrato.
- Períodos dominantes de vibración del suelo.
- Celeridad de la onda para cada estrato.
- Aceleración máxima orbital de la onda sísmica en la superficie del suelo, que deba asignarse al sitio.
- Presión sísmica en el agua de poro, originada en el suelo por la onda sísmica en cada estrato.

El objetivo de los ensayos dinámicos, consiste en definir las características de los suelos para proyectar obras civiles bajo condiciones sísmicas y de vibración por maquinaria o por vehículos.

III.2. FACTORES HIDROLÓGICOS

En esta investigación se utilizaron los datos que la actual Comisión Nacional del Agua, tiene de las mediciones en sus estaciones de aforo (Cruickshank-García, 1995).

Sin embargo en aquellas corrientes analizadas, en las que no se cuenta con esta información, se procedió de la siguiente manera: una vez calculada la dimensión (área), y la forma o disposición de la red hidrográfica de la corriente principal que pudiera afectar a los ductos, se determinó mediante métodos convencionales el escurrimiento máximo probable en el sitio del cauce, que los cruza (Aparicio, 1997; Arcos, 2000).



A este respecto, se han realizado algunas pruebas en laboratorio, buscando determinar las posibles socavaciones que se pudieran originar bajo tuberías colocadas dentro de los materiales aluviales del fondo de un río y la forma de reducir o evitar dicha socavación (Maza, 1968), presentando los ensayos llevados a cabo sobre este fenómeno de erosión local. Cabe mencionar que esta investigación en laboratorio, se realizó únicamente utilizando arena como material, en el cual se encontraba la tubería, tomando en cuenta los principales parámetros de socavación, como son:

- Características hidráulicas de la corriente.
- Características de localización de la tubería.
- Características del material del fondo.
- Características de las tuberías.

III.3. FACTORES HIDROGEOLÓGICOS

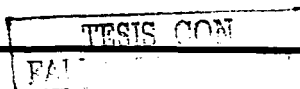
Los factores hidrogeológicos que fueron considerados para evaluar el riesgo de contaminación del agua subterránea en las diversas áreas, son aquellos empleados en los estudios hidrogeológicos tradicionales, en los cuales se define la profundidad del manto freático mediante mediciones piezométricas en los distintos pozos de la región.

En el caso del ex-Lago de Texcoco, esta información es abundante (Cruickshank-García, *op.cit.*) abarcando un período amplio de tiempo; contándose con más de un centenar de pozos, principalmente correspondientes a la empresa Sosa Texcoco, S. A., la cual explotó salmuera durante muchos años..

Asociando esta información con la obtenida por el Plan Lago de Texcoco de la Comisión Nacional del Agua (Cruickshank-García, *op.cit.*) y con el organismo operador del agua potable en el Estado de México, se analizaron además, los parámetros de dirección de flujo y de gradiente hidráulico; teniéndose así los elementos básicos necesarios, para el nivel que corresponde a esta investigación, con el fin de evaluar el posible impacto que una fuga en los ductos, podría generar al agua subterránea.

En la planicie, se estimó necesario además realizar pruebas de permeabilidad tipo Lefranc, directamente en el campo, con lo que se determinó este parámetro.

Otro estudio que cuenta con amplia información de carácter hidrogeológico, al cual se recurrió para analizar esta área, fue el que realizó el Instituto Mexicano del Petróleo en las instalaciones de Sosa Texcoco, S. A., (Marín-Córdova, *et al.*, 1992(a)).



Para el área de piedemonte en donde se encuentra, en la porción baja, el acuífero de Téllez, se recurrió a la amplia información de las decenas de pozos de la región, descritas en trabajos de Huizar-Álvarez *et al.* (1997 y 2003) para la Comisión Nacional del Agua (CNA).

III.4. FACTORES GEOTÉCNICOS

Con respecto a la determinación de las unidades geomecánicas presentes en la montaña, las cuales están directamente relacionadas con la inestabilidad de laderas, se estimó conveniente emplear los métodos que para tal caso y para las investigaciones de túneles, se vienen desarrollando.

Para ello y apoyado en el marco geológico e hidrogeológico del área, con los que se tuvieron definidos la litoestratigrafía y las estructuras geológicas, así como su asociación con el agua subterránea, se empleó la clasificación geomecánica de Bieniawski (1976) para macizos rocosos fracturados.

Este sistema de clasificación se considera adecuado en virtud de que evalúa la combinación de diversos factores tales como: la calidad de roca (RQD), la influencia del intemperismo, y el relleno de arcilla en las discontinuidades, entre otros. Esta clasificación es conocida como rock mass rating (RMR).

En un principio (Deere y Miller, 1966 y Barton *et al.*, 1974), se requería integrar en la clasificación los siguientes parámetros:

- Índice de calidad de la roca (RQD)
- Estado de intemperismo
- Resistencia a la compresión simple de la roca intacta
- Espaciamiento de planos de estratificación
- Espaciamiento de fallas y fracturas
- Rumbos y echados de las estructuras geológicas (discontinuidades)
- Abertura de las estructuras geológicas (discontinuidades)
- Continuidad de las estructuras geológicas
- Flujo del agua subterránea

En la pasada década de los setenta, después de haberse adquirido suficiente experiencia en la aplicación práctica de la clasificación geomecánica, Bieniawski modificó su sistema de clasificación, eliminando el *Estado de intemperismo* como un parámetro independiente, ya que su efecto está íntimamente relacionado con la resistencia a la compresión simple.

Otra adecuación consistió en incluir la abertura de las estructuras geológicas y la continuidad de las mismas en un nuevo parámetro denominado: condición de las discontinuidades.

Por otra parte, el rumbo y el echado de las discontinuidades se eliminaron de la relación de clasificación básica y sus efectos se toman como una corrección o ajuste, una vez que han sido considerados los demás parámetros.

Por lo tanto, los cinco parámetros que finalmente fueron determinados para la evaluación del macizo rocoso son los siguientes:

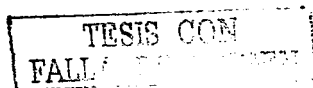
- 1.- Resistencia a la compresión de la roca intacta.
- 2.- Índice de calidad de la roca.
- 3.- Espaciamiento de discontinuidades.
- 4.- Condición de las discontinuidades.
- 5.- Condiciones del agua subterránea.

Con la clasificación del macizo rocoso sugerida por Bieniawski (*op. cit.*), se tienen las siguientes ventajas:

- a) Dividir al macizo rocoso en grupos de comportamiento similar.
- b) Proporcionar una buena base para la comprensión de las características del macizo rocoso.
- c) Facilitar la planeación y el proyecto de las construcciones en la roca, obteniendo datos cuantitativos que se requieren para la solución de problemas reales de ingeniería.
- d) Proporcionar una base común para una comunicación entre todos los profesionales involucrados en problemas geomecánicos.

Se aprecia así, que la aplicación de esta metodología para la definición de las características del macizo rocoso, en la montaña, presenta las siguientes ventajas:

- Es simple y con términos significativos.
- Está basada en parámetros medibles que pueden determinarse en el campo rápida y económicamente.



DE

CAPÍTULO IV

DATOS GENERALES DEL ÁREA

INVESTIGADA

TESIS CON
FALLA DE

CAPÍTULO IV

DATOS GENERALES DEL ÁREA INVESTIGADA

La Cuenca de México abarca una superficie de 9 600 km² en la región centro del país, ubicada en el *Cinturón Volcánico Transmexicano* (CVT). Abarca el Distrito Federal en su totalidad y parte de los estados de México, Hidalgo, Tlaxcala y Puebla. En ella se distinguen áreas con tipos de relieve distintivos de: planicie, lomerío, piedemonte y montaña (Tapia-Varela y López-Blanco, 2002), por las que cruzan los principales *derechos de vía* de los ductos petroleros, presentando una longitud aproximada de 500 km.

IV.1. LOCALIZACION DE LOS PRINCIPALES CORREDORES DE DUCTOS.

En la cartografía de la Cuenca de México editada por el INEGI, escala 1:250,000, se encuentran representadas las principales líneas de ductos que la cruzan. Estas líneas están contenidas en corredores denominados *derechos de vía*, adecuadamente señalados con postes y letreros para que no se construya ninguna obra encima de ellos y no se realicen trabajos con maquinaria pesada o se excave ya que se corre el riesgo de su ruptura.

Estos corredores se describen a continuación y se encuentran representados en la figura IV.1.1, relacionándolos con las características del relieve de la cuenca.

Se puede considerar que los principales *derechos de vía* que atraviesan la Cuenca de México están integrados por dos líneas con orientación noreste-suroeste y otras dos con rumbo noroeste-sureste; sin que éstas orientaciones correspondan necesariamente con la operación y circulación de los fluidos que conducen.

Las dos primeras atraviesan a la cuenca, desde el área del Ajusco, hacia la ex-Refinería de Azcapotzalco, de ahí hacia Teotihuacán, Otumba, Cd. Sahagún y Tecocomulco, saliendo del parteaguas de la Cuenca de México, hacia Huauchinango, el del extremo oriente (A-A') y desde la Sierra de las Cruces hacia Azcapotzalco, continuando a Chiconautla, Tezontepec y Pachuca; siguiendo hacia el exterior de la cuenca con rumbo a Atotonilco y Metztlán, el del extremo occidente (B-B')

Por lo que respecta a los dos derechos de vía con orientación noroeste-sureste, atraviesan a la Cuenca de México desde el área de Huehuetoca (al poniente), hacia la porción norte de la Sierra Nevada

(Sierra de Calpulalpan), pasando uno de ellos por los poblados de Tizayuca, continuando hacia Jaltepec y Emiliano Zapata (C-C'). El segundo (ubicado más al sur), cruza por Coyotepec, Hacienda Ojo de Agua, Tepexpan, Papalotla y Santa Cruz Moxolagua, continuando hacia afuera de la cuenca hacia San Martín Texmelucan, en el estado de Puebla (D-D').

De estas líneas principales, salen otros ramales de menores dimensiones; sin embargo, para el objetivo del presente estudio se consideraron los *derechos de vía* descritos en los párrafos anteriores.

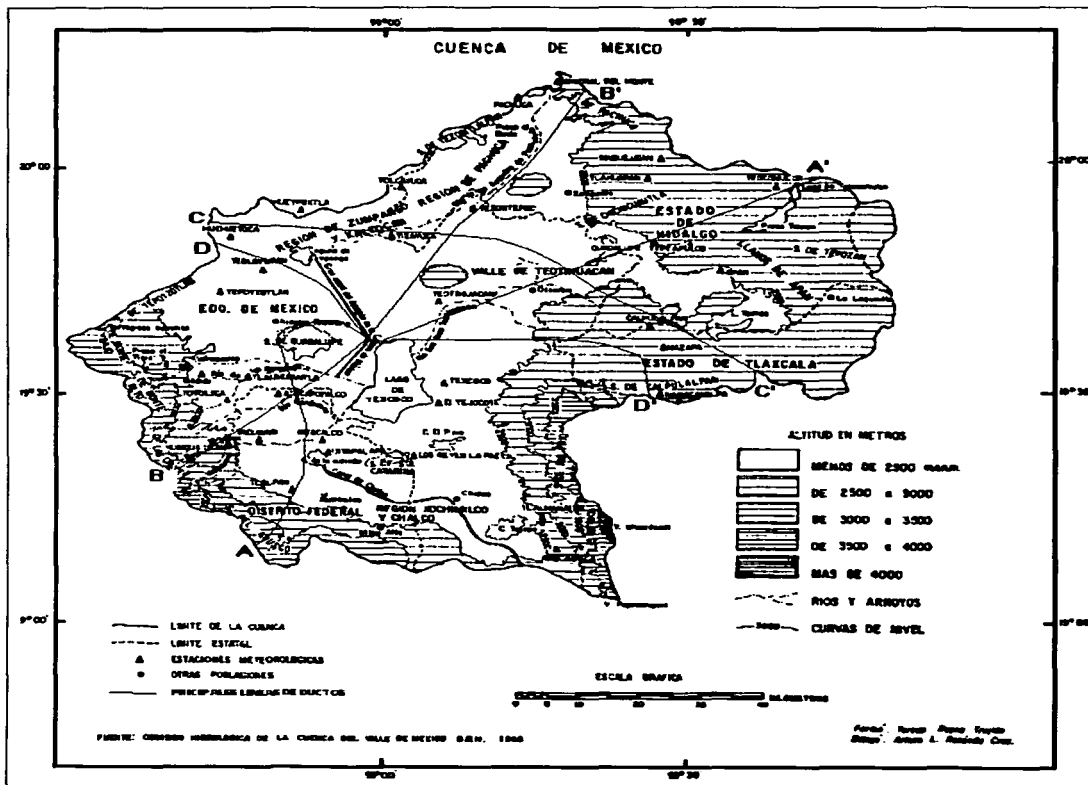


Figura IV.1.1. Localización de los principales *derechos de vía*.

IV.2. MARCO GEOLÓGICO REGIONAL

La información relacionada con la litología, estratigrafía, estructuras geológicas, hidrogeología, geomorfología, tectónica, geotecnia y mecánica de suelos de la Cuenca de México es vasta y variada, procedente de numerosos autores entre los que destacan: Mooser (1963, 1975), Marín-Córdova *et al.* (1986(a)), Aguayo (1987), Cserna *et al.* (1988), Demant (1978), Lugo Hubp (1997(a) y (b)), Huizar-Álvarez (1996), Marsal y Mazari (1959), Díaz – Rodríguez (1998), Campos-Enriquez *et al.* (1996 y 2003) y muchos otros no menos importantes.

IV.2.1. LITOESTRATIGRAFÍA

De manera resumida las formaciones cenozoicas de la Cuenca de México en diferentes áreas y sus alrededores, se muestran en la figura IV.2.1.1.

ERA	SISTEMA	SERIE	EDAD M.A.	SUR DE LA CUENCA DE MEXICO				PARTE CENTRAL DE LA CUENCA DE MEXICO	NORTE DE LA CUENCA DE MEXICO	
				PARTE OCCIDENTAL		PARTE ORIENTAL				
CENOZOICA	TERCIARIO	HOLOCENICA Y PLEISTOCENICA	1	ALUVION	GRUPO CHICHINAUTZIN	GRUPO CHICHINAUTZIN	ALUVION	ALUVION	ROCAS VOLCANICAS Y CONOS CENERITICOS	
		PLIOCENICA	?	FORMACION CUERNAVACA	MATERIAL CLASTICO	RIODACITA POPOCATEPETL	FORMACION TLAYECAC	FORMACION TARANGO	FORMACION TARANGO	ROCAS VOLCANICAS MAFICAS ATOTOMILCO
				ANDESITA ZEMPOALA	FORMACION CUAYUCA	FORMACION LAS CRUCES	FORMACION ALUSCO	FORMACION ZEMPOALA	FORMACION IZACCHUAT	ANDESITA JALPAN Y SAN CRISTOBAL
				FORMACION BUENA VISTA (ROCAS NO DIFERENCIADAS)	GRUPO VOLCANICAS (ROCAS NO DIFERENCIADAS)	GRUPO UXTILICO (ROCAS NO DIFERENCIADAS)	GRUPO VOLCANICAS (ROCAS NO DIFERENCIADAS)	GRUPO TEPEXCO (ROCAS NO DIFERENCIADAS)	ROCAS VOLCANICAS	FORMACION ZUMATE
		MIOCENICA	25	FORMACION TEPOZTLAN	FORMACION TEPOZTLAN	FORMACION TEPOZTLAN	FORMACION TEPOZTLAN	ROCAS VOLCANICAS	FORMACIONES SANTA GERTRUDIS REAL DEL MONTE PACHUCA	
				RIOLITA TILZAPOTLA	FORMACION TLAICA	ROCAS VOLCANICAS	ROCAS VOLCANICAS	FORMACION CORTEZA	GRUPO PACHUCA	
		OLIGOCENICA	36	GRUPO BALSAS	GRUPO BALSAS	GRUPO BALSAS	GRUPO BALSAS	GRUPO BALSAS	FORMACION ?	
				FORMACION ?	FORMACION ?	FORMACION ?	FORMACION ?	FORMACION ?	ROCAS VOLCANICAS NO DIFERENCIADAS	
		EOCENICA	58	GRUPO BALSAS	GRUPO BALSAS	GRUPO BALSAS	GRUPO BALSAS	GRUPO BALSAS	GRUPO BALSAS	
				FORMACION ?	FORMACION ?	FORMACION ?	FORMACION ?	FORMACION ?	FORMACION ?	
PALEOCENICA	63	FORMACION ?	FORMACION ?	FORMACION ?	FORMACION ?	FORMACION ?	FORMACION ?			

Figura IV.2.1.1. Tabla de correlación estratigráfica (Schlaepfer, 1968).

TESIS CON
FALLA DE PAGINA

A continuación se describen cada una de ellas, de las más antiguas a las más recientes:

IV.2.1.1. SISTEMA TERCIARIO

Formación Balsas. Las rocas más antiguas que se conocen en el subsuelo de la Cuenca de México consistente de sedimentos clásticos continentales del Terciario que se atribuyen a la Formación Balsas (Fries, 1956; 1962). El pozo Texcoco No. 1, que llegó a una profundidad de 2 065 m, encontró en su base un conglomerado heterogéneo con clastos calizos y fósiles del Cretácico Superior. La fauna parece corresponder a la Formación Mexcala del Senoniano. Sobre el conglomerado se encontraron limolitas arenosas rojas con intercalaciones conglomeráticas, limolitas calcáreas rojas con anhidrita o interestratificadas con tobas.

En la parte superior de esta secuencia se tiene una serie de derrames de composición basáltica.

El espesor que se atribuye a la Formación Balsas es de unos 700 m como mínimo; no se conoce su base y la toma de núcleos fue discontinua en el pozo antes mencionado; por lo que tampoco pudo definirse su límite superior.

Rocas Volcánicas del Terciario Medio. Estas rocas volcánicas se consideran las más antiguas que afloran en la Cuenca de México, principalmente en la base de las sierras de Las Cruces, de Río Frío y Nevada (Schlaepfer, 1968). Están cubiertas por potentes secuencias volcánicas terciarias más recientes y cuaternarias. Esta unidad comprende también algunos afloramientos aislados, en el interior de la cuenca.

No hay evidencia de que estas rocas provengan de un mismo centro eruptivo, ya que por su localización parece ser más probable que se hayan originado de distintos centros. Sin embargo, se cree que estas antiguas unidades volcánicas representan un sistema muy complejo con varios centros eruptivos y distintos periodos de vulcanismo activo seguidos por erosión, que abarcan seguramente un tiempo largo. Se tiene así, en este conjunto, unidades sobrepuestas y otras interdigitadas de diversas edades.

No se ha podido determinar el espesor de la antigua secuencia en la Cuenca de México, sin embargo, partiendo de la elevación de los afloramientos en la Sierra Nevada, se estima que alcance un espesor de 2,000 m en las partes más altas.

Formación Tepoztlán. La Formación Tepoztlán (Fries, 1960) aflora en el exterior del límite sur de la Cuenca de México; más al norte, dicha formación desaparece bajo los derrames de la Formación Chichinautzin. Fries (*op. cit.*) describe a la formación como un conjunto de rocas volcánicas epiclásticas andesíticas depositadas en capas de 0.5 m hasta 10 m de espesor por corrientes de agua y de lodo. Estas

rocas modeladas por la erosión, han originado una topografía accidentada con acantilados abruptos escalonados. Según Fries (*op. cit.*), el área-fuente de la Formación Tepoztlán se localiza al norte de los afloramientos actuales, y las rocas que originaron estos clastos, son las antiguas unidades volcánicas que afloran en la Cuenca de México.

Se considera que la Formación Tepoztlán es equivalente, por lo menos en parte, a las unidades comprendidas bajo el nombre de *Rocas Volcánicas del Terciario Medio* y se le atribuye una edad del Oligoceno Tardío-Mioceno Temprano o Medio, más antigua que la edad del Mioceno Temprano mencionada por Fries (*op. cit.*).

Formación Zempoala. Esta formación fue descrita por Fries (*op. cit.*) que la nombró como Andesita Zempoala. Esta unidad comprende rocas de composición andesítica, dacítica y riódacítica, compuesta por brechas volcánicas, derrames lávicos y capas tobáceas interestratificadas con algunos horizontes de lahares, con espesor mínimo de 800 m.

La Formación Zempoala descansa sobre la Formación Tepoztlán en la región cartografiada por Fries. A su vez, está cubierta por lavas de la Formación Chichinautzin.

Formación Ajusco. El nombre de *Andesita Ajusco* fue propuesto por Mooser (1962) para las lavas superiores del Cerro del Ajusco y de la Sierra de las Cruces que descansan discordantemente sobre rocas volcánicas más antiguas, probablemente del Plioceno temprano; están cubiertas por los depósitos de la Formación Tarango.

Siguiendo el criterio de restringir el nombre de las formaciones a las unidades volcánicas de un mismo centro eruptivo, se ha preferido incluir en la Formación Ajusco únicamente la secuencia volcánica de potentes derrames poco inclinados que constituyen el complejo formado por el Cerro del Ajusco y las alturas adyacentes que cubren discordantemente rocas dacíticas más antiguas, como puede verse unos 3 km al occidente del poblado de Ajusco: sin embargo, se estima que esta unidad puede correlacionarse con la Formación Las Cruces por su posición estratigráfica similar.

Formación Las Cruces. Schlaepfer (*op. cit.*) designa como Formación Las Cruces al conjunto de rocas volcánicas que forman las sierras de Las Cruces y de Monte Alto en la parte occidental de la Cuenca de México, y que provienen de centros eruptivos interrelacionados y alineados SSE-NNW.

Está constituida en su parte inferior por una secuencia potente de brechas volcánicas de composición andesítica con intercalaciones de derrames lávicos de la misma naturaleza.

La parte superior de la Formación Las Cruces consiste en una serie de derrames sobrepuestos de rocas de composición riodacítica, con inclinación generalmente suave, que varía con la topografía sepultada. Puede indicarse como localidad tipo la parte inferior de la barranca del Río Magdalena al poniente de Contreras, donde se observa la parte inferior de la formación, compuesta por brechas y cubierta discordantemente por los potentes derrames de lava de la parte superior (Schlaepfer, *op. cit.*).

La Formación Las Cruces descansa sobre rocas volcánicas antiguas que se incluyen en *Rocas Volcánicas del Terciario Medio*.

Formación Iztaccíhuatl. La Formación Iztaccíhuatl (Schlaepfer, *op. cit.*) comprende, en esta montaña, una serie de derrames lávicos sobrepuestos de composición que varía de dacítica a riodacítica. El espesor y la disposición estructural de los derrames son variables, según la topografía que sepultaron.

La Formación Iztaccíhuatl (Schlaepfer, *op. cit.*) está cubierta por lavas más recientes, como las que forman el llamado *pecho* del volcán Iztaccíhuatl y el cono actual del volcán Popocatepetl, junto con los derrames que escurrieron de este último hacia el sureste, constituyendo la Riodacita Popocatepetl de Fries (*op. cit.*), bajo cuyo nombre se comprenden todos los productos del vulcanismo tardío en el macizo de la Sierra Nevada.

Formación Tláloc. Se denomina Formación Tláloc (Schlaepfer, *op. cit.*) a un conjunto de derrames riodacíticos que forman la parte principal de la Sierra de Río Frío. Esta unidad que puede observarse al norte y noreste del poblado de Río Frío, comprende varias unidades morfológicas de origen volcánico, derivadas de uno o más centros eruptivos interrelacionados. La Formación Tláloc descansa sobre rocas volcánicas más antiguas que afloran en la margen occidental de la sierra mencionada.

Se considera que la Formación Tláloc es correlacionable en parte con la Formación Iztaccíhuatl, de la cual está separada por derrames lávicos más recientes. Por otra parte, en la base de la Sierra de Río Frío las lavas de la Formación Tláloc están interdigitadas con aluviones y tobas de la Formación Tarango.

Formación Tarango. La Formación Tarango (Bryan, 1948) está constituida por una secuencia de 200 a 300 m de tobas, aglomerados, grava volcánica de origen fluvial y capas delgadas de pómez depositada en la base de las montañas que limitan la Cuenca de México hacia el occidente.

Esta formación se correlaciona, por su posición estratigráfica, con la Formación Cuernavaca que aflora en la región inmediatamente al sur de la Cuenca de México.

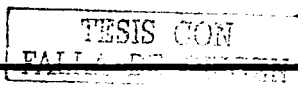
La Formación Tarango se encuentra cubierta por lavas recientes de la Formación Chichinautzin. En consecuencia, se estima que su edad abarca desde el Plioceno tardío hasta parte del Pleistoceno.

En su parte inicial a partir de 180 m, el pozo Texcoco No. 1 atraviesa una potente secuencia de arenas y gravas, con horizontes de ceniza y pómez además de coladas basálticas interestratificadas. También se encuentra una serie de margas y calizas lacustres a una profundidad de 450 m y posiblemente estos horizontes indiquen el cierre inicial de la Cuenca de México. Por ser una unidad de un mismo origen y depositada en una misma cuenca, se ha atribuido aquí esta secuencia a la Formación Tarango.

En la margen occidental de la Cuenca de México, la parte superior de la Formación Tarango ha sido bien estudiada por Zeevaert (1953), quien describió las secciones litológicas de numerosos pozos poco profundos perforados en la Ciudad de México y alrededores. Zeevaert (*op. cit.*) distinguió a los 30 m que la cima de la formación está cementada generalmente con carbonato de calcio y llamada por él, *Arena I Tarango* que sirve como base para los pilotes de las construcciones importantes de la ciudad y, debajo de capas de arcillas lacustres, los depósitos aluviales de la *Arena II Tarango*, que a su vez sobreyacen a una alternancia de aluviones y arcillas lacustres. El autor menciona la presencia de material fluvial muy grueso a una profundidad aproximada de 150 m, de antiguos suelos de la cuenca a 170 m y, debajo de estos, más aluviones. Las capas de gravas y arenas de la Formación Tarango constituyen los acuíferos principales de la Ciudad de México.

Formación Chichinautzin. Comprende todas las corrientes lávicas, tobas, brechas y materiales clásticos interestratificados, de composición andesítica y basáltica, que descansan encima de la Formación Cuernavaca o de unidades más antiguas. Esta unidad fue originalmente atribuida por Fries (*op. cit.*) al Cuaternario; sin embargo, él mismo mencionó posteriormente, que se encuentra interdigitada con las formaciones Tarango y Atotonilco el Grande, por lo cual, estimó que sus primeras erupciones tuvieron lugar en el Plioceno tardío.

Se ha acostumbrado llamar indiscriminadamente *Chichinautzin* a todas las unidades volcánicas más recientes de la Cuenca de México; sin embargo, se ha preferido restringir aquí el término Chichinautzin a la unidad volcánica compleja que se originó de los centros eruptivos situados sobre el parteaguas sur de la Cuenca de México y que representa un período largo de vulcanismo, que perduró desde el final del Plioceno hasta el Holoceno. La última erupción fue la del volcán Xitle, hace unos 2,400 años (Arellano, 1951); sin embargo, existen más de 30 dataciones que señalan edades desde los 1670 años (Siebe, 2000).



Riodacita Popocatepetl. Esta unidad fue definida por Fries (1965), quien incluyó bajo este nombre los derrames lávicos emitidos por el volcán Popocatepetl.

Corresponde a los productos volcánicos más recientes que forman el cráter actual de este volcán y a los derrames lávicos que cubren principalmente el lado sur; con ellos se correlacionan las últimas lavas del volcán Iztaccíhuatl, interdigitadas con depósitos glaciales (White, 1962). La *Riodacita Popocatepetl* descansa sobre el antiguo *Volcán Nexpayantla* de White (*op. cit.*), cuyas rocas están incluidas en la Formación Iztaccíhuatl.

IV.2.1.2. ROCAS VOLCÁNICAS PLIOCÉNICAS Y CUATERNARIAS

Se comprenden bajo este nombre los aparatos volcánicos y rocas asociadas a los eventos Chichinautzin y a la *Riodacita Popocatepetl*; (Nixon, 1982) pero derivadas de centros eruptivos probablemente independientes (Mooser, 1962). Están representadas por conos escoriáceos casi inalterados distribuidos en la parte central y septentrional de la Cuenca de México. Se incluyen igualmente en este grupo algunas unidades volcánicas recientes que aparecen en la vertiente occidental de la Sierra Nevada.

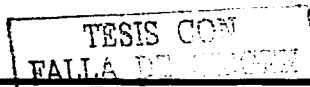
La composición de estas lavas es muy variada; mientras que los derrames más recientes de la Sierra Nevada son riodacíticos, en la cuenca se han encontrado dacitas, andesitas y basaltos.

Bryan (*op. cit.*) se basó en criterios edafológicos para determinar la edad de algunos volcanes de la Cuenca de México y atribuyó así una edad pre-Tacubaya al Peñón del Marqués y al Cerro de la Estrella localizados en la parte central y una edad pre-Becerra a la Sierra de Santa Catarina y al Cerro Xico.

Aluviones, Suelos y Capas Lacustres Cuaternarios. Se incluyen en estas unidades los depósitos más recientes de la Cuenca de México, que cubren discordantemente a las formaciones Tarango y Chichinautzin.

Los aluviones de las márgenes de la Cuenca de México fueron descritos por Bryan (*op. cit.*) quién estableció su secuencia estratigráfica y su interrelación con los periodos glaciales, basándose en trabajos propios, de Arellano (*op. cit.*) y de De Terra (1948).

La secuencia de Bryan (*op. cit.*) corresponde, por una parte, a ciclos de erosión y depósito y, por otro lado, a procesos climáticos que afectaron la formación de los suelos.



Se comprende bajo el nombre de *Capas Lacustres Cuaternarias* los sedimentos lacustres que ocupan el fondo de la Cuenca de México y que se depositaron después de los movimientos que afectaron los márgenes de esta última, posteriormente al depósito de la Formación Tarango (Bryan, *op. cit.*). Esta unidad comprende las fases lacustres de las formaciones pleistocénicas Tacubaya y Becerra y de las demás unidades propuestas por Bryan (*op. cit.*), tal como fueron definidas por Zeevaert (1953).

Zeevaert (*op. cit.*) menciona en particular, la compresibilidad muy alta de las arcillas lacustres Tacubaya, en las que con un pequeño incremento de carga se producen asentamientos notables.

La extensión de los depósitos lacustres en la cuenca es muy grande. De Terra (*op. cit.*) encontró la evidencia de antiguos niveles lacustres superiores al actual, indicando que posiblemente al final del Pleistoceno, el lago tenía una superficie mucho mayor que la actual.

En las porciones bajas se tienen los sedimentos lacustres interdigitados, con sedimentos aluviales y piroclastos. Su granulometría varía de arcillas a limos, arenas y gravas, dependiendo de la distancia a la fuente que les dio origen y a la profundidad a la que se encuentra.

Como materiales más recientes, se tienen los suelos, los aluviones en cauces actuales y los depósitos de talud al pie de las porciones altas.

IV.2.2. ESTRUCTURAS GEOLÓGICAS Y ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS MODELOS ESTRUCTURALES CONCEPTUALES

Este aspecto se desarrolló básicamente mediante el análisis de tres modelos geológico estructurales elaborados por :

Mooser (1975), Marín-Córdova *et al.* (1986) y Cserna *et al.* (1988) (figura IV.2.2.1.), donde se describen las estructuras y su evolución al interior y exterior de la Cuenca de México.

De acuerdo con la interpretación de Mooser (1975) se tienen 4 fosas principales denominadas: Cuautitlán, Peñones, Central y Oaxtepec, que constituyen grabens con orientación NE-SW, atravesando a la Cuenca de México (figura IV.2.2.1).

Posteriormente Marín-Córdova *et al.* (1986), en base a la información geológica mencionada en párrafos anteriores, definen 16 fallas NE-SW, que dentro de la Cuenca de México presentan una

separación de 4 a 6 km y afectan a las rocas más recientes constituidas por depósitos piroclásticos y lacustres, presentándose fracturadas, falladas y plegadas, así como agrietadas.

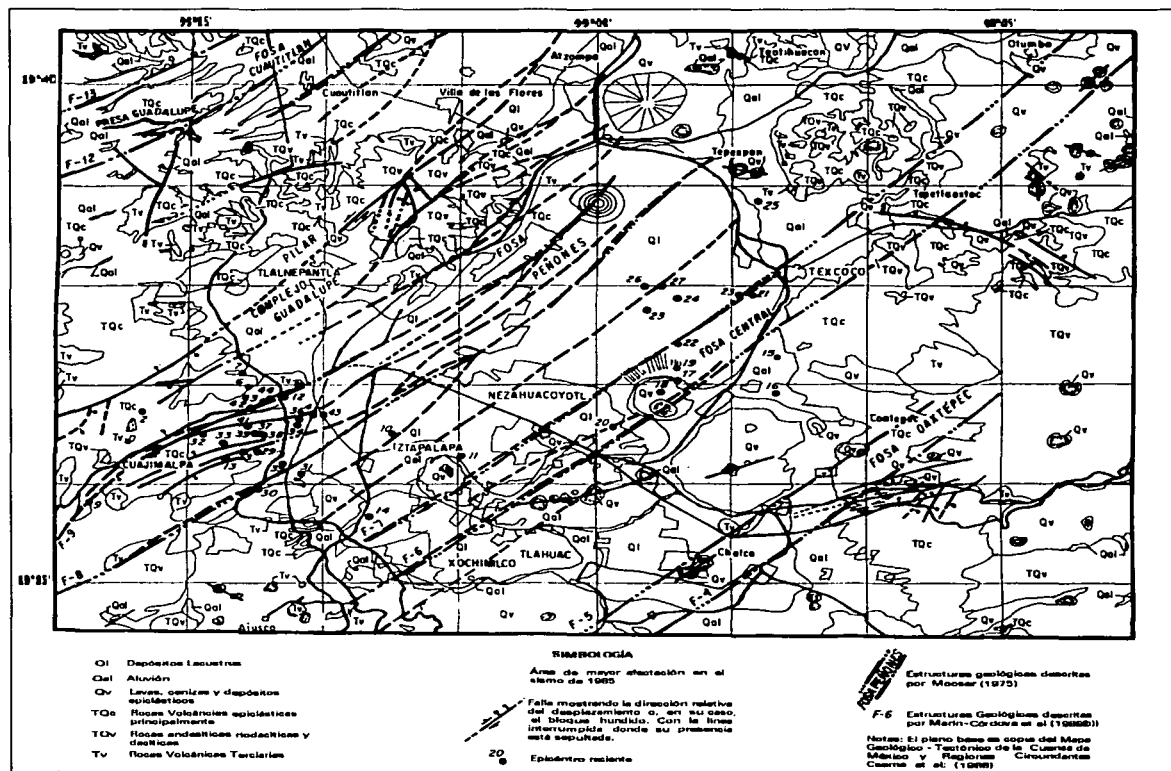


Figura IV.2.2.1. Modelos estructurales integrados.

A nivel regional, se tienen además de los sistemas de fallamiento transensional NE-SW, que cruzan a la cuenca desde el Popocatepetl hasta el área de Huehuetoca, los ejes distensivos NW-SE que se indican en la figura IV.2.2.2.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Marín-Córdova, 1987), así como estructuras anticlinales y sinclinales en rocas sedimentarias, en los estados de México, Hidalgo, Michoacán, Morelos, Puebla y Veracruz (Aguayo *et al.*, 1990).

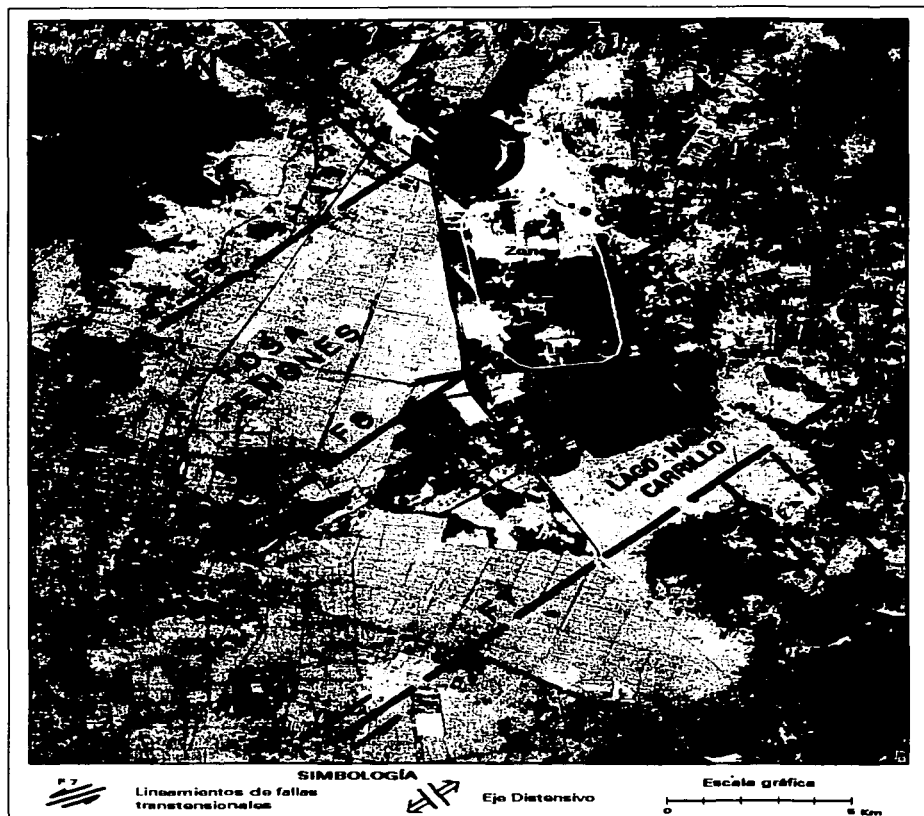


Figura IV.2.2.3. Área del ex-Lago de Texcoco donde se presentan los principales lineamientos de fallas transtensionales.

Además, en el aspecto geológico estructural los diversos autores identifican mediante imágenes de satélite, fotografías aéreas y reconocimientos directos en campo dentro y fuera de la cuenca a diversas fallas con orientación NE-SW y NW-SE (Aguayo y Trápaga, 1996).

Comparando el modelo de Mooser (1975) con el de Marín Córdova *et al.*, 1986 (b), se tendría que las fallas F-12 y F-13 corresponderían a la Fosa Cuautitlán; las fallas F-8 y F-9, a la Fosa Peñones; las F-6 y F-7 a la Fosa Central y las F-4 y F-5 a la Fosa Oaxtepec.

Por otra parte (Cserna *et al.*, 1988), hacen referencia a las fallas del río Magdalena y del río Hondo, correspondiendo a la Fosa Peñones (Mooser, *op. cit.*) y a las F-8 y F-9 (Marín-Córdova *et al.*, *op. cit.*). De acuerdo con el autor, la cartografía estructural estuvo basada en medio millar de puntos de observación en el campo y en el levantamiento de 55 secciones de las serranías que bordean la cuenca en el poniente y oriente, así como en la reinterpretación de la información gravimétrica existente en las partes centrales de la cuenca. Por la naturaleza del desplazamiento que registran, se consideran fallas de desplazamiento lateral.

Como se puede observar, los modelos estructurales descritos, son coincidentes en sus partes principales, variando únicamente en la porción que cubren de la cuenca, en el objetivo del estudio y en su forma de representación debido a la escala empleada, integrándose en el modelo de la figura IV.2.2.1.

Con estudios recientes efectuados por García Palomo *et al.* (2000 y 2002) y Campos-Enríquez *et al.* (2003), en el Cinturón Volcánico Trans-Mexicano, y particularmente en las regiones del Nevado de Toluca, México y de Apan, Hidalgo, se definen estructuras tipo horst y graben, con dimensiones regionales y orientaciones NE-SW, dentro de una gama de estructuras, describiendo corrimientos laterales durante el Mioceno Medio y posteriormente como fallas normales.

Correlacionando el mapa geológico de García Palomo *et al.* (2002), con los tres modelos estructurales considerados en esta investigación, corresponden las fallas Tolcayuca y Tizayuca, con la Fosa Cuautitlán de Mooser (*op. cit.*) y las F-12 y F-13 de Marín-Córdova *et al.* (*op. cit.*). La falla Apan del mismo autor, con la Fosa Central de Mooser (*op. cit.*) y con la F-6 de Marín-Córdova *et al.* (*op. cit.*).

Con relación al funcionamiento de estas estructuras y el agua subterránea, (Marín-Córdova *et al.*, 1986(a)), realizan la cartografía geológica de la Cuenca de México a escala 1:50,000, detectando alta permeabilidad, artesianismo e hidrotermalismo en los lineamientos estructurales (fallas y fracturas) identificados.

El análisis y la correlación de toda esta información permitieron interpretar el marco geológico y estructural de la Cuenca de México y áreas circunvecinas mostrado en la figura IV.2.2.4, donde se ilustran 16 fallas principales, de rumbos NE 45° - 55° SW, que delimitan a 15 bloques,



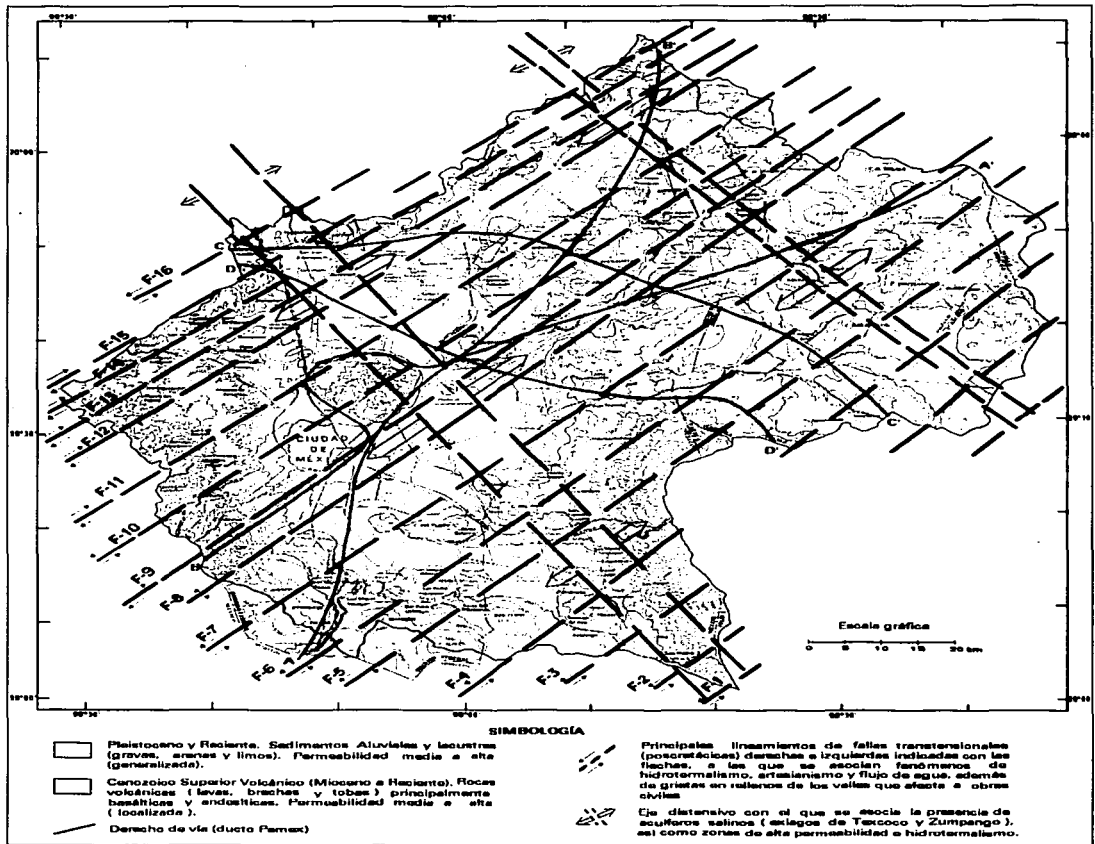


Figura IV.2.2.4 Estructuras geológicas mayores y su relación con los ductos (Marín Córdova y Torres Ruata, 1990).

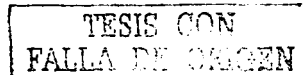
Según este modelo, los bloques están separados a partir de ejes orientados NW 35° SE, del Mioceno, generados por fallas normales de esa dirección, más bien locales. En general, el espaciamiento entre las fallas NE - SW varía de 4 a 6 km: además de las estructuras mencionadas, se tienen sistemas norte-sur y este-oeste, que afectan a las rocas más jóvenes (depósitos piroclásticos y lacustres), que están fracturados, fallados, plegados y agrietados.

Los 15 bloques principales detectados constituyen pilares y fosas, manifestados estas últimas en los valles de Tepexpan-Otumba y Tizayuca-Pachuca, delimitados por las fallas designadas 8 y 9 la primera, y 12 y 13 la segunda; denominadas Fosa Peñones y Fosa Cuautitlán respectivamente por Mooser, (1975). Cserna, *et al.*, (1988) atribuyen los ríos Magdalena y Hondo a fallas ubicadas en esos valles. Huizar-Álvarez (1996) identificó los componentes verticales de las fallas 12 y 13, en el subsuelo, por medio de correlación estratigráfica entre pozos de agua potable, en el ramal Tizayuca-Pachuca. Por otra parte, Marín-Córdova y Herrera-Moro (2000 (b)), deducen corrimientos horizontales de la F-12 mediante la instrumentación de la presa Guadalupe (Alberro *et al.*, 1976).

Por lo que respecta a las grietas y fracturas presentes en las unidades lacustres de las partes bajas de la cuenca, que afectan al material granular, reportadas en este trabajo de investigación, no corresponden a los procesos descritos por autores especializados en mecánica de suelos, que ampliamente han investigado la génesis de tales grietas, por esfuerzos de tensión o de contracción del terreno. Estas grietas y fracturas constituyen vías que facilitan la infiltración de contaminantes hacia los acuíferos, en caso de una fuga de hidrocarburos en los ductos.

Dentro de la Cuenca de México, las principales áreas donde se han estudiado estas grietas, que coinciden con los rumbos NE 45°-55° SW y NW 35° SE, (Marín-Córdova *et al.*, 2000), y que están afectando a diversas obras civiles, son:

- 1.- Área del evaporador solar El Caracol, Estado de México.
- 2.- Campo de explotación de pozos de salmuera Sosa Texcoco, Estado de México.
- 3.- Unidad Profesional de Zacatenco (IPN), Distrito Federal.
- 4.- Avenida Azcapotzalco esquina con Avenida de los Cien Metros, Distrito Federal.
- 5.- Indios Verdes (Avenida Insurgentes), Distrito Federal.
- 6.- Avenida Nacional y Autopista México-Pachuca, Estado de México.
- 7.- Libramiento Lechería-Texcoco, Estado de México.
- 8.- Avenida Emiliano Zapata en San Pedro Xalostoc, Estado de México.
- 9.- Acayuca, Hidalgo.
- 10.- Calzada Ignacio Zaragoza y Peñón del Marqués, Distrito Federal.
- 11.- Avenida Añil en el Palacio de los Deportes, Distrito Federal.
- 12.- Avenida Central de Nezahualcoyotl y Ecatepec, Estado de México.
- 13.- Lago San Juan de Aragón, Distrito Federal.
- 14.- Avenida Talismán, Distrito Federal.
- 15.- Avenida Iztapalapa, Distrito Federal.



- 16.- Área del Aeropuerto Internacional Benito Juárez, Distrito Federal.
- 17.- Carretera Federal a Cuernavaca, Distrito Federal.
- 18.- Zócalo y Alameda (centro), Distrito Federal.
- 19.- Echeagaray y la Florida, Estado de México.
- 20.- Lago Nabor Carrillo, Estado de México.
- 21.- Villa Coapa, Distrito Federal.
- 22.- Viaducto y Avenida Cuauhtémoc, Distrito Federal.
- 23.- Xico, Estado de México.
- 24.- Ixtapaluca, Estado de México.
- 25.- Ayotla, Estado de México.
- 26.- Chalco, Estado de México.

Considerando los rasgos morfológicos de la cuenca, la alineación de las fallas transtensionales NE-SW principales y la ubicación de las áreas agrietadas, se infirió un eje distensivo NW 35° SE, que une el volcán Popocatepetl y el área de Tequisquiác-Huehuetoca, así como la porción más baja de la Cuenca de México, correspondiente al antiguo Lago de Texcoco y a los antiguos manantiales termales del Peñón de los Baños (actualmente abatidos), donde los bloques NE-SW comienzan a separarse. Otro eje distensivo interpretado dentro de la cuenca, orientado NW 35° SE, pertenece al alineado con los valles de Ixmiquilpan (Hidalgo), la región de Apizaco (Tlaxcala) y el volcán La Malinche (figura IV.2.2.2).

IV.3. MARCO HIDROGEOLÓGICO REGIONAL

La descripción de las características hidrogeológicas regionales en la Cuenca de México, es de gran importancia para esta investigación en virtud de que, cualquier posibilidad de contaminación del recurso agua, presenta un alto riesgo para las poblaciones localizadas en ella, que constituyen la mayor concentración urbana en el país (figura IV.3.1.).

La explotación de aguas subterráneas se efectúa en materiales aluviales, lacustres y volcánicos de edad cuaternaria, así como en sedimentos y materiales volcánicos terciarios. La producción de los acuíferos es muy favorable; sin embargo, la extracción intensiva ha ocasionado la compactación de arcillas, lo que ha provocado el hundimiento de la Ciudad de México y de otras áreas.

A través de los estudios realizados, es posible conocer el funcionamiento de los acuíferos granulares existentes en el Valle de México; en el área de Apan, Hgo. el flujo dominante es de sureste a noroeste; en la de Tizayuca-Pachuca es de noreste a suroeste; en la de Cuautitlán, Méx. se inicia de oeste a este y se ramifica hacia el norte, este y sureste; en la planicie de Texcoco-Ciudad de México el flujo se

dirige a dichas ciudades; en la planicie de Xochimilco la dirección es hacia la Ciudad de México y en la planicie de Chalco se forma un cono de abatimiento local (Marín-Córdova *et al.*, 1986 (a)).

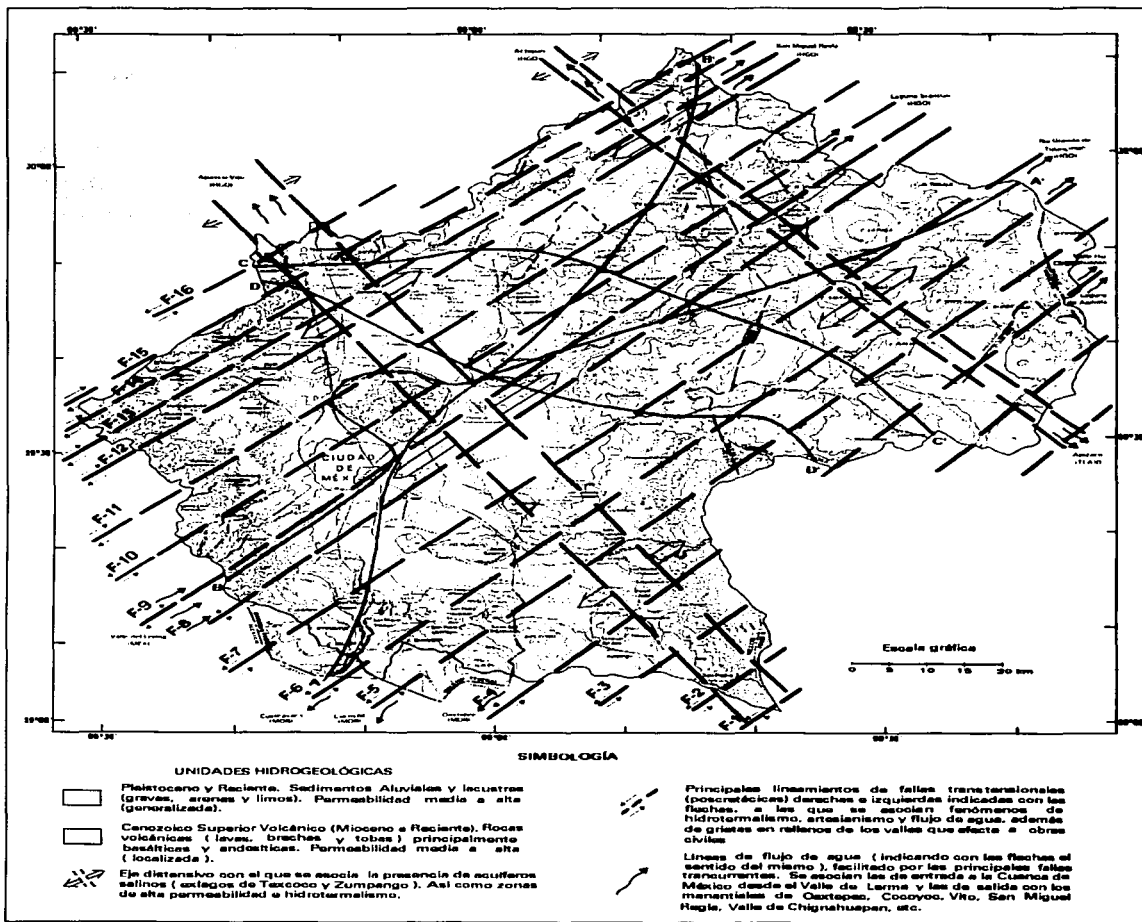


Figura IV.3.1. Unidades Hidrogeológicas (Marín Córdova y Torres Ruata, 1990).

La extracción total del agua proveniente de pozos en el valle, es aproximadamente de 50 m³ por segundo y se estima que la recarga total de los acuíferos es de 20 a 25 m³ por segundo.

De acuerdo con estudios anteriores (Marín-Córdova, *op. cit.*) realizados en la Cuenca de México y tomando en cuenta las distintas litologías, se han definido las unidades hidrogeológicas, caracterizándolas con los siguientes rangos de permeabilidad:

a) Permeabilidad Baja-Media.

En este rango, se consideró a la mayor parte de esa área cartografiada, estando integrada por los sedimentos lacustres ubicados en la parte baja, menor a la cota 2,240 m s.n.m.

En esta área se ubican las instalaciones de la planta de Sosa Texcoco, S. A., y el yacimiento explotado de salmuera (figura IV.2.2.3).

b) Permeabilidad Media.

Se engloban en este parámetro los materiales aluviales que bordean a la antigua área lacustre y la mayor parte de las tobas de las porciones bajas de las montañas.

En estas unidades y en las que se describen a continuación, se presentan las principales áreas de recarga para los acuíferos de la cuenca.

c) Permeabilidad Media-Alta.

Corresponden a este rango, los materiales de piedemonte de las sierras de Río Frío y Nevada, así como las brechas volcánicas y aglomerados de los conos cineríticos, además de algunas andesitas lajeadas y basaltos de los cerros de Chiconautla.

d) Permeabilidad Alta.

Estas condiciones se encuentran principalmente en los basaltos de la porción sur (Sierras de Chichinautzin y de Santa Catarina), así como sus piroclastos asociados.

Las unidades hidrogeológicas descritas corresponden a condiciones superficiales. La interstratificación de ellas causa variaciones de permeabilidad en el subsuelo, de acuerdo a la posición

que guarden unas con respecto a las otras en los sentidos vertical y horizontal, por la influencia de las estructuras mayores, descritas en párrafos anteriores (figura IV.3.1).

La infiltración del agua hacia el subsuelo se realiza tanto vertical como horizontalmente, siendo la primera de menor importancia en los materiales de la planicie, por su naturaleza arcillosa. Esta infiltración tiene lugar principalmente en época de lluvias a excepción de las áreas de la planicie, que se encuentran permanentemente inundadas con aguas residuales procedentes de las áreas urbanas aledañas, que forman una recarga de agua contaminada, como es el caso del Lago Nabor Carrillo y de los canales que cruzan el área, a través de agrietamientos que le ocasionan permeabilidad secundaria a los sedimentos lacustres.

A nivel regional se ha encontrado que los lineamientos estructurales definidos por fallas transtensionales con orientación promedio NE 50° SW, tienen gran relación con el agua subterránea.

Estos sistemas de falla se han venido definiendo con trabajos del Instituto de Geología de la UNAM (Marín-Córdova *et al.*, 1983) en áreas del estado de Michoacán y afectan a todo el Eje Neovolcánico guardando una íntima relación con manantiales, pozos artesianos, manifestaciones geotérmicas y alineamientos de focos sísmicos.

De todos los sistemas principales de falla que afectan a la región se observó que los orientados NE 50° SW y NW 30° SE, son los que más relación presentan con el funcionamiento del agua subterránea, sin que esto quiera decir que, en forma local, cualquiera de los otros también influyan (Marín-Córdova *et al.*, 1986 (a)).

Las fallas transtensionales principales, mencionadas en párrafos anteriores, de toda la cuenca se continúan más allá de la misma, (figura IV.3.1) constituyendo bloques que se separan tanto hacia el noreste como al suroeste a partir de un eje con orientación NW 30° SE, que va del flanco poniente del Popocatepetl al río del Salto uniendo las áreas hidrotermales de Cuautla, Izucar de Matamoros, Peñón de los Baños, Apaxco y Pathe.

Observando rasgos morfológicos tales como la longitud de los valles, se definió que la separación de estos bloques no es uniforme, sino que en algunos ha sido mayor, como es el caso del bloque formado por las fallas 8 y 9, que también limita el área de gran afectación en la Ciudad de México producida por el gran sismo de 1985 (figura IV.2.2.3).

Con respecto a la influencia que este modelo geológico tiene con el agua subterránea de la cuenca y de sus áreas vecinas, se definen principalmente una zona de entrada y 6 salidas (Marín-Córdova, y

Torres Ruata, 1990). Cabe hacer mención que no toda el agua que brote en los manantiales y sitios que a continuación se describen, es proveniente de las áreas citadas, ya que debe influir también la recarga local.

La entrada corresponde al flujo subterráneo que se deriva del valle de Toluca con dirección al noreste, localizándose manantiales a diferentes elevaciones dependiendo de los sitios locales de recarga, como son los de los Dinamos y Chapultepec; los cuales fueron disminuyendo su caudal conforme se incrementaba la extracción de agua en el valle de Toluca, abatiéndose el nivel freático.

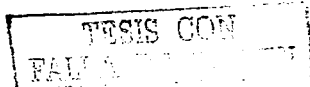
Por lo que respecta a las 6 salidas, las principales vías se relacionan también con los sistemas de falla NE 50° SW y NW 30° SE. Una de ellas corresponde a la región noroeste, donde se consideran fugas de la porción de Zumpango con elevación 2,240 m s.n.m. hacia los valles del río *El Salto* donde se tienen manantiales como es el caso de Vito y Apaxco, siendo algunos de ellos termales, que se encuentran a menor elevación. La segunda se encuentra en el valle de Pachuca (Elev. 2,480 m s.n.m.) comunicándose hacia el noreste principalmente por los lineamientos de falla NE-SW, por ser estas las porciones más permeables, manifestándose manantiales a las elevaciones 2,000 – 2,300 en las barrancas de Huasca de Ocampo y San Miguel Regla (manantiales Morelos, río Charro, los Reyes Tepetzala, Ixtula, Sembo, Alcholoya y otros).

También existe la posibilidad de flujo en esta porción del valle, hacia el noroeste (Actopan), por existir otro eje de apertura Actopan – Pachuca – Tlaxcala. En este eje se localiza la presa de *El Durazno* que desde su construcción en 1969, no ha almacenado agua, presentando filtraciones por la alta permeabilidad de los basaltos fracturados, sobre los que fue construida.

La cuarta área de flujo hacia el exterior de la Cuenca, se localiza en las unidades ígneas extrusivas con alta permeabilidad que afloran en la laguna de Tecocomulco y los llanos de Apan, que fluyen por las trazas de las fallas NE-SW, por ser los conductos más permeables y se manifiestan en los manantiales de Chignahuapan, donde hay presencia de calizas con cavidades de disolución.

En menor cantidad de acuerdo con lo observado en superficie, pero que también influye en esta infiltración hacia el exterior de la cuenca, se observa con dirección al S 35° E (eje de apertura), hacia los manantiales de Apizaco Tlaxcala.

Otro acuífero con posibilidades de alta filtración por lineamientos de fallas y fracturas regionales NE-SW, se estima desde Xochimilco – Tláhuac, hacia el sureste, relacionándose con los manantiales de Oaxtepec y Cocoyoc.



IV.4. MARCO GEOGRÁFICO Y GEOLÓGICO DE LOS PRINCIPALES CORREDORES DE DUCTOS

A continuación se hará la descripción de las características geográficas y geológicas en las que se sitúan los *derechos de vía* considerados (figura IV.2.2.4).

IV.4.1. DERECHO DE VÍA AJUSCO-TECOCOMULCO (A-A')

Este *derecho de vía* alcanza una longitud aproximada de 130 km, teniendo como acceso la carretera Cuernavaca – Distrito Federal – Teotihuacán – Otumba – Cd. Sahagún – Tecocomulco.

Las elevaciones de esta línea sobre el nivel medio del mar corresponden a 3,000 m en el Ajusco, descendiendo a 2,200 en la Ciudad de México, para continuar hacia el noreste ascendiendo en los parteaguas de las subcuencas y descendiendo nuevamente en los valles intermontanos, hasta salir de la Cuenca de México por Tecocomulco con una elevación de 2,600 m s.n.m.

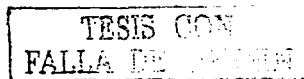
Litológicamente, en el área del Ajusco el *derecho de vía* se localiza en rocas ígneas (coladas y piroclastos) de composición básica e intermedia, cruzando por el piedemonte constituido por depósitos de talud, para llegar a los depósitos lacustres de la porción baja.

Hacia el noreste, cruza por el valle de Teotihuacán continuando por rocas ígneas extrusivas de carácter básico, hasta llegar al área de Tecocomulco en donde se encuentran rocas ígneas riolíticas y basálticas cubiertas en las porciones bajas por aluvión.

Con respecto a las estructuras geológicas mayores consideradas y por su orientación NE-SW, esta línea de ductos, cruza solamente tres ejes noreste-suroeste, y los dos ejes distensivos: Popocatepetl – Huehuetoca y Apizaco – Actopan (figura IV.2.2.4)

IV.4.2. DERECHO DE VÍA LAS CRUCES-PACHUCA (B-B')

La porción sur de este *derecho de vía*, se inicia a una elevación de 3,000 m s.n.m. en el sur de la Sierra de las Cruces, descendiendo hacia el área de Azcapotzalco, con altura de 2,200 m s.n.m. Desde este punto, continúa hacia el noreste cruzando por el valle de Tizayuca y el flanco poniente de la sierra de Los Pitos; el valle de Pachuca y subiendo nuevamente hacia la sierra del mismo nombre, con altura de 3,000 m s.n.m.; su longitud total aproximada es de 120 km.



Las unidades litológicas por las que atraviesan los ductos, están constituidas por coladas de andesitas y sus correspondientes piroclastos (tobas) en la Sierra de las Cruces. En la porción del área metropolitana de la Ciudad de México, continúa en suelos y depósitos lacustres, hasta llegar a Pachuca y ascender a la sierra, donde afloran rocas ígneas extrusivas de composición ácida (riolitas y dacitas) principalmente. Únicamente el tramo que cruza por el flanco oeste de la Sierra de Los Pitos, se localiza en rocas basálticas (tobas y coladas).

De la misma forma que el *derecho de vía* anterior, y debido también a su orientación NE-SW, las estructuras geológicas mayores que atraviesan esta línea de ductos son pocas, solamente seis, además de los dos ejes distensivos mencionados (figura IV.2.2.4).

IV.4.3. DERECHO DE VÍA HUEHUETOCA-TIZAYUCA-CALPULALPAN (C-C')

Se inicia en la región noroeste de la Cuenca de México, correspondiente al área de Huehuetoca, Méx., a la elevación de 2,400 m s.n.m., con rumbo al Este hacia Tizayuca, con elevación de 2,300 m, continuando por el flanco norte del Cerro Gordo hacia el valle de Otumba, ascendiendo por el lado norte de la Sierra de Calpulalpan, con altura de 3,000 m sobre el nivel del mar.

Las características geológicas de este transecto en el área de Huehuetoca, están representadas por rocas andesíticas y basálticas en el extremo norte de la Sierra de Tepetzotlán y sur de la Sierra de Tezontlalpan, continuando hacia la parte baja (regiones de Zumpango y Tizayuca), en depósitos tobáceos y sedimentos lacustres.

En la región norte de Cerro Gordo, se observan rocas basálticas y diversos conos cineríticos, ascendiendo hacia Calpulalpan en materiales de piedemonte constituidos por tobas y depósitos de talud.

La longitud de este transecto es de aproximadamente 100 km y las principales fallas que cruza son la mayoría de las orientadas noreste-suroeste. En su porción noroeste, atraviesa al eje distensivo Popocatepetl - Huehuetoca (figura IV.2.2.4).

IV.4.4. DERECHO DE VÍA HUEHUETOCA - COYOTEPEC - SANTA CRUZ MOXOLAGUA (D-D')

Este *derecho de vía* de ductos petroleros parte al igual que el anterior de la región de Huehuetoca (2,400 m s.n.m.) al noroeste de la Cuenca de México, en la porción norte de la sierra de Tepetzotlán, con dirección hacia el sureste, cruzando por la porción sur de la Laguna de Zumpango a 2,300 m s.n.m..

Continúa hacia la parte norte del ex-Lago de Texcoco a la misma elevación, siguiendo hacia el Este con rumbo al poniente de la sierra de Calpulalpan, en los alrededores del poblado de Nanacamilpa, saliendo de la Cuenca de México, hacia San Martín Texmelucan, a una cota de 3,000 m s.n.m.

Las unidades litológicas por las que atraviesa este transecto, están compuestas por andesitas en el extremo norte de la sierra de Tepetzotlán (área de Huehuetoca); continuando en tobas y sedimentos lacustres en la laguna de Zumpango y la porción norte del ex-Lago de Texcoco.

El *derecho de vía* continúa hacia la sierra de Calpulalpan en depósitos de piedemonte constituidos por tobas y brechas de salud. La longitud de este *derecho de vía* desde Huehuetoca hasta su extremo sureste es de aproximadamente 80 km.

Por lo que corresponde a su ubicación con respecto a los sistemas de falla mayores, cruza de la misma forma que el eje C-C' a gran número de fallas orientadas noreste-suroeste y al eje distensivo Popocatepetl - Huehuetoca (figura IV.2.2.4).

IV.5.MARCO HIDROGEOLÓGICO DE LOS PRINCIPALES CORREDORES DE DUCTOS.

Por lo que respecta a las unidades hidrogeológicas por las que cruza cada uno de los diversos derechos de vía de los ductos petroleros mencionados, se describirán a continuación, tomando como base la información hidrogeológica de estudios anteriores (Marín-Córdova y Torre Ruata, *op. cit.*).

IV.5.1. DERECHO DE VÍA AJUSCO - TECOCOMULCO (A-A')

La porción sur de este *derecho de vía*, se ubica en una zona de recarga de acuíferos, constituida por las coladas de lava y materiales piroclásticos del Ajusco, con características de alta permeabilidad.

En su tramo correspondiente a la planicie lacustre del área metropolitana de la Ciudad de México, los ductos fueron instalados en un multiacuífero cuyo primer nivel de aguas freáticas se localiza a poca profundidad (de 2.00 a 10.00 m), el cual se encuentra altamente contaminado (Marín-Córdova y Herrera-Moro, 1999), sin embargo, a profundidades mayores (acuíferos profundos), la calidad del agua es satisfactoria (Consejo Nacional de Investigación, 1995). Estas características son persistentes hasta el área de Tepexpan, exceptuando el tramo del ex-Lago de Texcoco (al sur) donde se ubica el yacimiento de salmuera que fue explotado por la Cía. Sosa Texcoco, S.A. durante varias décadas, donde la calidad del agua subterránea no es apta para consumo humano (Marín-Córdova *et al.*, 1992 (a)) (figura IV.2.2.3).

Este corredor de ductos continúa atravesando los valles de Otumba, Ciudad Sahagún y Tecocomulco, donde los niveles del agua subterránea son más profundos, del orden de los 80 m.

En la porción del área metropolitana de la Ciudad de México, se extrae un importante caudal de agua para el consumo de la ciudad y en los valles de Teotihuacán – Otumba, Cd. Sahagún y Tecocomulco, el agua extraída satisface los requerimientos de las diversas poblaciones del área como: Tepexpan, Teotihuacán, San Martín de las Pirámides, Otumba, Jaltepec, Ciudad Sahagún, Tepeapulco, Apan y Tecocomulco.

El extremo noreste de este *derecho de vía*, se localiza en otra zona de recarga de acuíferos constituida por rocas ígneas extrusivas fracturadas.

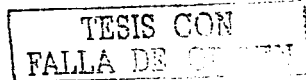
IV.5.2. DERECHO DE VÍA LAS CRUCES - PACHUCA (B-B').

En el extremo suroeste de este *derecho de vía*, se presentan características de permeabilidad media en las rocas andesíticas fracturadas de la sierra de Las Cruces; sin embargo los lineamientos de fallas transtensionales suroeste-noreste, descritas por Marín-Córdova *et al.* (1986 (a)), han originado permeabilidad secundaria con flujo del agua subterránea del valle de Toluca hacia la Ciudad de México, manifestándose en épocas pasadas en los manantiales inferiores de los Dinamos y de Chapultepec; algunos de ellos ya agotados, pero que en sus antiguos caudales se incluía tanto el agua proveniente de aquel valle, como de la recarga local en la sierra de Las Cruces.

Al pie de esta sierra y ya en la planicie lacustre, este lineamiento de ductos petroleros, se ubica en el multiacuífero descrito para el *derecho de vía A-A'*, hasta los alrededores del poblado de Tepexpan.

Posteriormente hacia el norte y al cruzar por el lado oriental del Cerro de Chiconautla y por el poniente del Cerro Gordo, las características de permeabilidad en esta área, compuesta por rocas ígneas extrusivas principalmente basálticas (lavas y brechas), es alta, por lo que no se encuentran niveles de manto freático a profundidades comercialmente explotables, pero que sin embargo, sí funcionan como zonas de recarga para los mantos freáticos que se explotan en los valles de Tizayuca Hgo. y Teotihuacán - Otumba, Méx. (Marín-Córdova *et al.*, 1986 (a)).

Hacia el extremo norte de este transecto, en el área de Pachuca, las características hidrogeológicas presentan permeabilidad media a baja.



IV.5.3. DERECHO DE VÍA HUEHUETOCA - TIZAYUCA -CALPULALPAN (C-C')

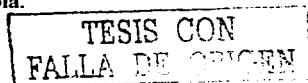
El extremo noroeste de este *derecho de vía*, corresponde al área del poblado de Huehuetoca, donde los materiales tobáceos presentan características de permeabilidad media, la cual es incrementada por fracturamientos y fallamiento noroeste-sureste y noreste-suroeste (Marín-Córdova *et al.*, 1986 (a)). Se consideró con base en los sistemas estructurales descritos en capítulos anteriores, la salida de agua subterránea de la Cuenca de México, hacia el valle vecino del río Tula, donde se tienen los manantiales de Apaxco y Vito, en el estado de Hidalgo.

Dadas estas características de permeabilidad en el subsuelo, el agua subterránea está presente a profundidades medias de 20 a 60 metros. Sin embargo, su calidad no es satisfactoria, estimándose dos posibilidades de contaminación: Una de carácter natural por la presencia de hidrotermalismo y la segunda por los efluentes conducidos hacia la laguna de Zumpango, provenientes principalmente de los ríos Cuautilán por el suroeste y de Las Avenidas de Pachuca, por el noroeste, así como por el Canal del Desagüe hacia el Tajo de Nochistongo y el Túnel de Tequisquiac, que eran los principales drenajes de la Cuenca de México antes de que fuera construido el drenaje profundo del *Emisor Central*, concluido en su primera etapa en el año de 1975 (Mooser, 1975 (a)).

Continúa con rumbo al este, hacia el área del poblado de Tizayuca; correspondiente al valle del río de Las Avenidas de Pachuca, donde se encuentran algunos pozos profundos con niveles de agua ubicados a más de 60 metros y de mediana calidad del agua (Marín-Córdova *et al.*, 1986 (a)), poco más al norte, se encuentra el ramal de pozos denominado Tizayuca - Pachuca, al lado poniente de la autopista México - Pachuca. El agua que se extrae con estos pozos, es utilizada para dotar a las poblaciones del área y los excedentes son enviados al área metropolitana del D.F.

Al cruzar este transecto por la porción norte del Cerro Gordo, se encuentra en las unidades hidrogeológicas de alta permeabilidad (basaltos, aglomerados y brechas basálticas), que constituyen una zona de recarga (Marín-Córdova *et al.*, 1986 (a)).

Con rumbo al sureste, los ductos atraviesan los llanos de Apan, donde se extrae agua subterránea mediante pozos con niveles freáticos entre 40 m y 120 m, con buena calidad; asciende por el flanco norte de la sierra de Calpulalpan, sobre rocas de mediana a baja permeabilidad (Marín-Córdova *et al.*, *op. cit.*), saliendo de la Cuenca de México con rumbo al valle de Puebla.



IV.5.4. DERECHO DE VÍA HUEHUETOCA COYOTEPEC - SANTA CRUZ MOXOLAGUA. (D-D')

Esta otra línea de ductos petroleros que atraviesa la Cuenca de México con orientación noroeste - sureste; cruza desde el poblado de Huehuetoca, en condiciones hidrogeológicas iguales a las descritas para el *derecho de vía Huehuetoca - Tizayuca - Calpulalpan*.

A diferencia del anterior, este se ubica por el lado sur de la laguna de Zumpango, con rumbo a la porción norte del ex-Lago de Texcoco. Las condiciones hidrogeológicas en este tramo, corresponden a depósitos lacustres de mediana a baja permeabilidad, las cuales integran al multiacuífero descrito en esta región geográfica, para los derechos de vía Ajusco - Tecocomulco (A-A') y sierra de Las Cruces - Pachuca (B-B'). El agua en esta área es de mediana calidad y la profundidad del nivel freático, varía entre 30 y 60 metros. De este punto continúa el Este, con dirección a la sierra de Calpulalpan en donde afloran materiales de piedemonte constituido por tobas, aglomerados y brechas con permeabilidad media a alta, que sirve como zona de recarga de los acuíferos granulares de los valles cercanos.

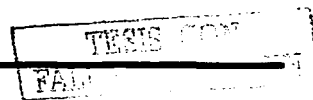
IV.6. SELECCIÓN DE LOS DISTINTOS TRAMOS DE DUCTOS EN DONDE SE REALIZARON INVESTIGACIONES DE DETALLE (FIGURA IV.6.2.1)

De acuerdo con las características geográficas, geológicas e hidrogeológicas a nivel regional y con las condiciones propias de cada una de las áreas que la integran, asociadas a los cuatro principales ejes de ductos petroleros que cruzan a la Cuenca de México, tanto en el sentido noreste-suroeste como noroeste-sureste, se propusieron los siguientes sitios para realizar las investigaciones de detalle, así como los peligros naturales que podrían impactarlos negativamente, aplicando los criterios establecidos, con los que se analizarían los tres tipos de relieve propuestos: planicie, transición o piedemonte y montaña.

En ellas se manifiestan ya diversos efectos negativos en diversas obras civiles, tales como: unidades habitacionales, caminos y presas.

IV.6.1. PLANICIE (1)

La superficie que abarca esta área dentro de la Cuenca de México es de aproximadamente 4,000 km², en los cuales se localizaban en épocas anteriores los lagos de: Texcoco, Zumpango, Xaltocan, San Cristobal, Xochimilco y Chalco (Reyna Trujillo, 1989) (figura IV.1.1), con elevaciones aproximadas sobre el nivel del mar que varían de los 2,240 m s.n.m. porción sur-suroeste a los 2,600 m s.n.m., en la región noreste.



De acuerdo con diversos estudios geológicos y geofísicos (Secretaría de Recursos Hidráulicos, 1964; Benhumea y Vázquez, 1988) en este sitio se tienen espesores de sedimentos lacustres granulares, producto de la erosión, transporte y depósito de materiales originados en las porciones altas, así como por extensos depósitos de materiales piroclásticos, producto de diversas erupciones de gran número de volcanes presentes en la región.

El espesor de estos sedimentos lacustres alcanza varios cientos de metros y en ellos predominan los materiales arcillosos y limosos, principalmente en la porción superficial.

Esta secuencia litológica se encontraba saturada, disminuyendo su contenido de agua tanto por el drenado de los lagos como por la explotación de los diversos acuíferos que contenía (Instituto de Geofísica, 1987).

Por esta razón se han presentado múltiples agrietamientos, además de consolidación de estratos, afectando a las diversas instalaciones (urbanas, industriales y de comunicación) que han sido construidas sobre ellos, como son: el evaporador solar de *El Caracol*, la carretera Texcoco-Chiconautla y diversos caminos vecinales.

Se adicionan el aspecto dinámico inducido por el neotectonismo de la región influenciado por las falla tensionales denominadas F-8 y F-9 y por procesos erosivos, con lo que se incrementan sus efectos.

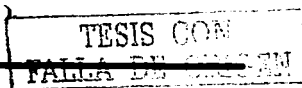
No obstante las dimensiones de la planicie, la aplicación de la metodología de investigación propuesta, se vió restringida en virtud de que se encuentra en gran medida, dentro del área metropolitana de la Ciudad de México.

Una porción dentro de las planicies que presenta características geológicas, hidrogeológicas y geotécnicas de interés, se localiza al noreste del ex-Lago de Texcoco, y en ella se encuentra un tramo del ramal Huehuetoca - Santa Cruz Moxolagua (D-D').

IV.6.2. PIEDEMONTE (TRANSICIÓN) (2)

Abarca una superficie aproximada de 4,000 km² con elevaciones que van de los 2,200 m a los 3,000 m s.n.m.

Está integrada de acuerdo con Mota Palomino, *et al.* (1992) por el Piedemonte Superior, el Piedemonte Inferior y el Piedemonte Volcánico (figura IV.6.2.1)



En este tipo de relieve el principal peligro geológico, estaría vinculado con la inestabilidad de las laderas, dependiendo de la inclinación de estas y de la naturaleza litológica de las distintas unidades.

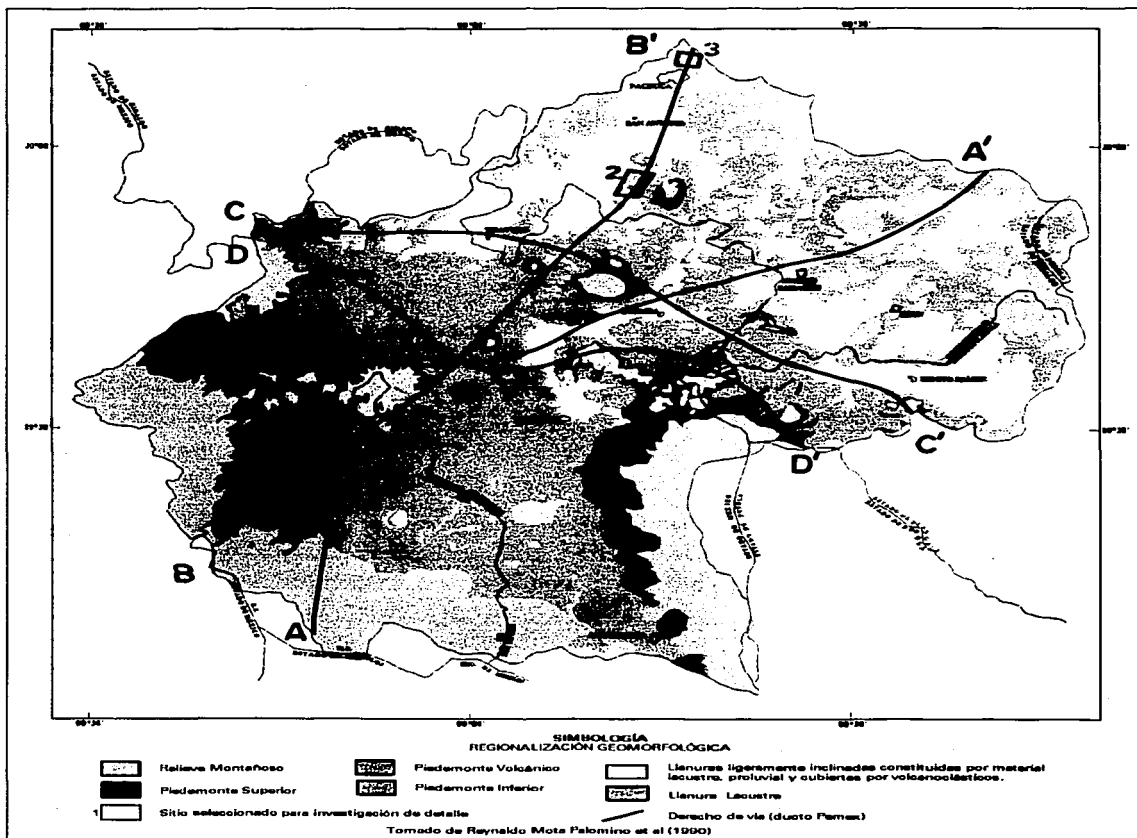


Figura IV.6.2.1. Localización de sitios para investigación de detalle.

El área seleccionada se localiza cercana a las fallas transtensionales denominadas F-11 y F-12.

Al igual que en el relieve lacustre los peligros a los ductos se incrementarían por los procesos erosivos causados por el escurrimiento de las aguas de lluvia.

Los agrietamientos en suelos más cercanos a esta área, se encuentran en el poblado de Acayucan afectando a la carretera y a terrenos agrícolas. Con respecto a la presencia de agua subterránea se tiene la cercanía del acuífero de Téllez.

Para la evaluación detallada de un tramo de ducto localizado en el piedemonte, con base en los criterios establecidos, el correspondiente al eje Sierra de Las Cruces - Pachuca (B-B'), en la porción oeste de la Sierra de los Pitos, al noreste de Tizayuca, como se indica en la figura IV.6.2.1.

IV.6.3. MONTAÑA (3)

La montaña cubre la menor superficie del total de la Cuenca de México, con aproximadamente 1,600 km² y elevaciones sobre el nivel del mar, comprendidas entre los 2,300 y 5,400 metros (figura IV.6.2.1).

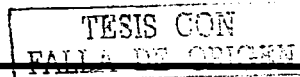
Bordean a la cuenca las sierras de Chichinautzin por el sur; la sierra de Pachuca por el norte y las sierras Nevada y Las Cruces por el oriente y poniente respectivamente. Hacia el noroeste se ubican las sierras de Monte Alto, Monte Bajo y Tepetzotlán. Al extremo noreste se encuentran las sierras de Tochac, Tecocomulco, Calpulalpan y Río Frio, que es la continuación hacia el norte de la Sierra Nevada.

Además en el interior de la cuenca se localizan las sierras de Santa Catarina, Guadalupe, Los Pitos y El Pino, así como los cerros del Peñón Viejo, Peñón de los Baños, Cerro Gordo, Chapultepec, Tlapacoyan y Zacaltepetl.

La naturaleza de ellos está compuesta por rocas ígneas extrusivas basálticas, andesíticas y riolíticas, que presentan discontinuidades formadas por planos de fluidez, fracturas y fallas con gran diversidad de orientación y dimensiones.

Con base en estas evidencias es de esperarse que los peligros a los ductos, que se podrían presentar en esta porción de la Cuenca de México, serían debidos a la inestabilidad de laderas, incrementándose en alguna forma, por efectos de neotectonismo y de erosión por impacto hidráulico.

Como caso para ser investigado en la montaña, se seleccionó un tramo del ducto Sierra de las Cruces - Pachuca (B-B'), en su extremo norte, correspondiente a la Sierra de Pachuca, como se muestra en la misma figura.

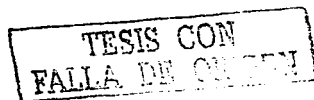


Esta área se encuentra próxima a las fallas transtensionales F-14 y F-13, existiendo como antecedente de afectación a diversos hundimientos en la ciudad de Pachuca y la alta permeabilidad de la presa *El Durazno*, así como el acuífero profundo de Pachuca y la presa de *San Pedro*.

De acuerdo con estudios realizados por Marín-Córdova y Aguayo (1989), algunos lineamientos de fallas con orientación noreste-suroeste y noroeste-sureste, presentes en la montaña, manifiestan su continuidad hacia el piedemonte y hacia el relieve de la planicie, afectando a diversas obras de ingeniería civil como ocurrió con los tanques de almacenamiento del cerro de Xico en el año de 1978 y en la calzada Ignacio Zaragoza, durante diversas épocas, entre otras áreas colindantes.

En el primer caso, la construcción de los tanques se suspendió, al encontrarse fracturas de dimensiones importantes: 0.40 m de abertura, cortando en toda su altitud al cerro (50 m) y cruzándolo diametralmente (400 m), continuando y profundizándose dichas fracturas en el material aluvial del Valle de Chalco, el cual se encuentra actualmente urbanizado.

En el segundo caso, los fracturamientos afectan al cerro del Peñón y a los fraccionamientos de Ixtapalapa, así como el área conocida con el nombre de *El Salado*, la cual ya también está urbanizada.



DE

CAPÍTULO V

CRITERIOS DE ANÁLISIS

CIENTÍFICOS Y TÉCNICOS

TESIS CON
FALLA DE CUBREN

CAPÍTULO V

CRITERIOS DE ANÁLISIS CIENTÍFICOS Y TÉCNICOS DE PELIGROS GEOLÓGICOS Y AMBIENTALES POTENCIALES

Tomando en cuenta la dimensión de la Cuenca de México, se hace necesario considerar primeramente, la utilización de los distintos métodos científicos y técnicos con los que se cubran grandes extensiones, pasando posteriormente a identificaciones locales. En la figura IV.6.2.1 se muestra la configuración geográfica de la Cuenca de México y sus características de relieve.

En este capítulo se hará referencia a esa evaluación regional, para continuar posteriormente con los niveles de detalle.

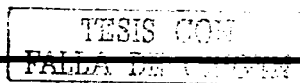
La gran dimensión de la Cuenca de México, aunada a su variedad de condiciones geográficas y geológicas, así como a los diversos asentamientos urbanos e industriales emplazados en ella, presenta condiciones de peligros geológicos y ambientales que ponen en peligro su adecuado funcionamiento y la vida misma de sus habitantes.

De forma tal que, es necesario analizar en detalle los posibles eventos que pudieran ocurrir (Secretaría de Gobernación, 1994), diagnosticando, previendo, evaluando y en caso de siniestro, mitigando los impactos al entorno.

Unas de las instalaciones que el avance de la industrialización hace imprescindible son las correspondientes a la infraestructura petrolera, tales como: las refinerías, las terminales de almacenamiento y distribución, las estaciones de servicio y los ductos.

Su adecuada ubicación, proyecto, construcción, operación y mantenimiento constituyen una actividad en la que la geología ambiental reviste vital importancia.

El presente trabajo de investigación pone de manifiesto, en el caso particular de los ductos petroleros que atraviesan esta gran diversidad de ambientes geográficos y geológicos, la necesidad de llevar a cabo actividades que conduzcan a definir los criterios adecuados, para prever los posibles peligros geológicos y ambientales en tres tipos de relieve que caracterizan a la Cuenca de México: planicie, piedemonte y montaña.



En cada una de estas áreas, los posibles peligros esperados en la instalación de los ductos, estarían afectados por diversos procesos:

TIPO DE RELIEVE	PELIGRO			
	Compactación Diferencial Asentamientos Agrícolamientos	Neotectonismo Fallas Activas	Inestabilidad de Laderas	Erosión (Impacto Hidráulico)
Planicie	X	X	-----	X
Piedemonte	-----	X	X	X
Montaña	-----	X	X	X

Como peligros adicionales al ambiente, una vez impactados los ductos y generándose una fuga de los hidrocarburos que conducen se podría presentar: explosiones, incendios, desabasto, contaminación de acuíferos y mortandad.

Los criterios de investigación que se consideran de mayor importancia para cumplir con los objetivos de la investigación son:

- Geológicos
- Geofísicos
- Hidrológicos
- Hidrogeológicos
- Geotécnicos

V.1. GEOLÓGICOS

Para definir la evolución geológica espacio-temporal de la Cuenca de México, es imperativo conocer su historia, tomando en cuenta los estudios previos aportados por diversos investigadores de las geociencias y mediante la consulta antecedente del acervo bibliográfico, lo que es fundamental para predecir las tendencias evolutivas de la geodinámica de la cuenca, a la que están asociados los estudios de riesgo e impacto ambiental.

La Cuenca de México, ha sido estudiada desde hace muchos años, por diversos autores y con enfoques muy variados, abarcando temas de geología básica hasta geología aplicada; como ejemplos de algunos de estos estudios, se pueden mencionar los realizados por Negendank,(1972), Schlaepfer (1968) y Mooser (1975) quienes redefinen la secuencia estratigráfica volcano sedimentaria de la Cuenca y la ubican espacial y temporalmente; este último autor describe además la evolución geológica de la Cuenca de México y su relación con el Cinturón Volcánico Transmexicano (Mooser, 1972) (figura V.1.1).

Posteriormente, Aguayo y Marín-Córdova (1987) destacan los rasgos estructurales de la cuenca y su relación con los sistemas conjugados de fracturamiento regional que afectan a la República Mexicana desde el margen del Pacífico hasta el del Golfo de México (figura IV.2.2.2).

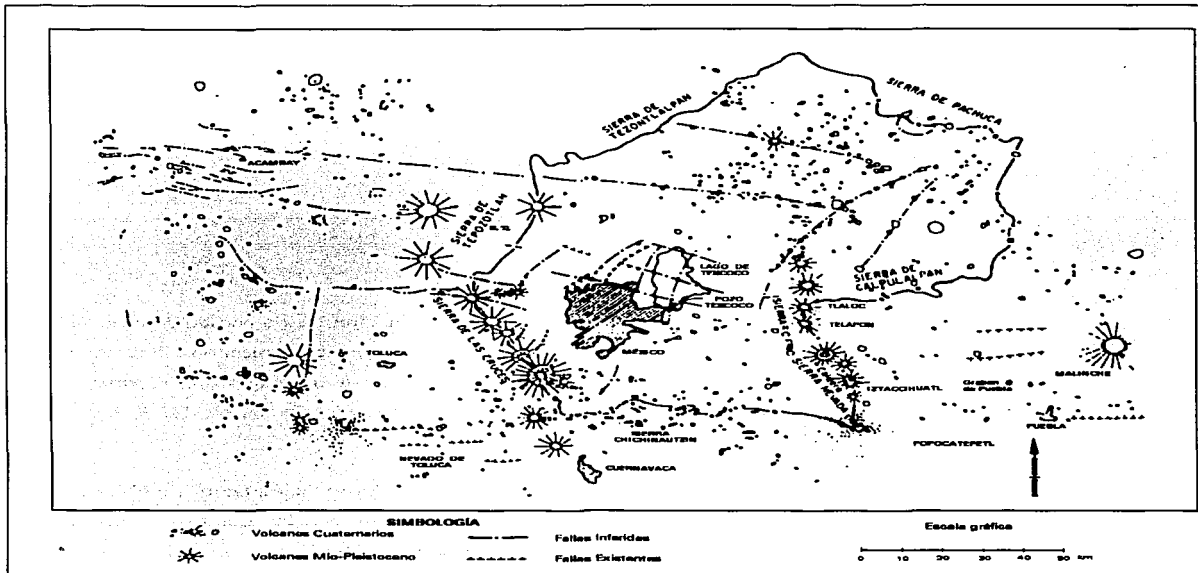


Figura V.1.1. Tectónica de la Cuenca de México (Mooser, 1963).

Marsal y Mazari (1959) reportaron los resultados de trabajos geofísicos, realizados desde 1953, destacando las características de los depósitos lacustres en la porción sur de la Cuenca.

A nivel regional, se cuenta con estudios de sensores remotos, fotogeológicos y geofísicos con fines cartográficos, estratigráficos y estructurales, tales como los realizados por Petróleos Mexicanos en 1986 y 1987 (Pérez-Cruz, 1988) a consecuencia de los efectos del sismo de 1985 (Marín-Córdova *et al.*, 2000(a)), mediante estudios sismológicos de reflexión y apoyado con la perforación de pozos profundos y control estratigráfico.

En la tabla V.1, se presentan los datos de ubicación y profundidad de estos pozos y de otros perforados por el Departamento del Distrito Federal.

TABLA V.1
POZOS PROFUNDOS PERFORADOS EN LA CUENCA DE MÉXICO

PERFORADO POR:	UBICACIÓN	PROFUNDIDAD (M)
PETRÓLEOS MEXICANOS	Texcoco-1	2065
	Copilco-1	2258
	Tulyehualco-1	3000
	Mixhuca-1	2452
	Roma-1	3200
DEPARTAMENTO DEL DISTRITO FEDERAL	Av. Cien Metros-1	2233
	San Juan de Aragón -2	2232
	Tláhuac-3	2241
	Río San Joaquín-4	2267
	La Castañeda-5	2317
	Av. Centenario-6	2350
	Coapa-7	2236
	Coapa-8	2234

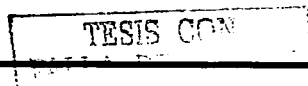
Marín-Córdova et al., 2000

Al término de estas perforaciones y mediante el análisis y correlación, se ha podido determinar que las rocas marinas del Cretácico, constituyen el basamento de la secuencia volcano-sedimentaria continental del Terciario y Cuaternario en la Cuenca de México, así como su complejidad estructural y estratigráfica, debidas a las diversas fuentes de aportación de los sedimentos y a la gran cantidad de focos de emisión de los derrames volcánicos y los materiales piroclásticos.

Mediante la compilación, selección, análisis y verificación de esta información tanto en gabinete, como en campo, se elaboró un mapa base georeferenciado, para identificar las grandes unidades litoestratigráficas de la cuenca, los suelos asociados a ellas, la secuencia estratigráfica de las distintas unidades, sus rasgos morfológicos y las principales estructuras geológicas presentes en la misma, así como la sismicidad, la susceptibilidad de vulcanismo y los posibles deslizamientos de suelo o roca.

Como complemento de esta información, se contó con datos topográficos, climatológicos y de vegetación, así como de los procesos erosivos característicos del área, mediante el análisis del acervo contenido en estudios de la C.N.A, S.A.R.H., Departamento del D.F. y otros.

Los resultados de estos estudios, se representan en planos con escalas desde 1:50,000 a 1:1,000,000, de acuerdo a los *derechos de vía* de los ductos petroleros, para identificar en forma preliminar el ámbito geológico en el cual se encuentran estos y a la vez, visualizar los posibles peligros naturales que pudieran incidir en su adecuada operación, en las tres regiones, determinando así el marco geológico regional, en donde se elaboraron los programas de investigación detallada para la evaluación de los peligros geológicos presentes.



V.2. GEOFÍSICOS

Los procedimientos de investigación del subsuelo, mediante métodos geofísicos han sido también empleados en forma amplia dentro de la Cuenca de México (Benhumea y Vázquez, 1988), tanto para determinar el marco geológico de la misma, como para la prospección de agua subterránea y la construcción de obras de ingeniería civil.

La correlación de la geofísica con la geología superficial y con barrenos exploratorios, ha permitido un conocimiento general del subsuelo, hasta profundidades que alcanzan los 3,000 m, cruzando los rellenos lacustres de los valles hasta la roca basal, que constituye el límite inferior de los sedimentos del Cuaternario y del Terciario.

En el área de Chalco – Xochimilco, mediante la exploración geofísica se determinó un espesor de sedimentos cuaternarios del orden de 800 m (Campos-Enríquez *et al.*, 1996).

Los principales métodos geofísicos aplicados para la investigación de la Cuenca, han sido en muchos casos de carácter sísmico y eléctrico; estos estudios se intensificaron a raíz de los sismos de 1985, como se mencionó en el inciso V.1 (Marín-Córdova *et al.*, 2000(a)).

En el noreste de la Cuenca de México, correspondiente a la subcuenca de Tecocomulco, Campos-Enríquez *et al.*, (2003), determinan los sistemas de fallas NW-SE y NE-SW, mediante estudios gravimétricos y magnéticos.

Por parte de la C.F.E. se realizaron investigaciones geofísicas de los primeros 500 m de profundidad, mediante métodos de sondeos eléctricos verticales y de refracción sísmica. De esta forma se determinó la secuencia estratigráfica del subsuelo, principalmente en el área metropolitana, obteniéndose además, los parámetros dinámicos de los suelos.

Con ello se han llevado a cabo interpretaciones del subsuelo, generando diversas secciones con orientaciones variadas, en las que se muestra la secuencia estratigráfica; las posibles estructuras geológicas del subsuelo y la presencia de agua subterránea; información fundamental para ubicar los diversos *derechos de vía* de los ductos, e interpretar junto con el marco geológico preestablecido, las condiciones tridimensionales a las que están y estarán sujetas las instalaciones petroleras.

Otro aspecto vinculado con este criterio geofísico de investigación, lo constituye la sismicidad natural en la Cuenca de México (Esteva, 1970; Esteva y Rascón 1985 y Ordaz *et al.*, 1996).

En la figura V.2.1. se presenta la localización de epicentros en el área metropolitana del Distrito Federal o Ciudad de México, de acuerdo con Figueroa (1971), la cual no es muy precisa, ya que fueron obtenidos en su mayoría, con un aparato de una sola componente. Localizó 49 eventos en la porción suroeste de la cuenca, tanto en las laderas de la Sierra de las Cruces y el Ajusco, como en la planicie.

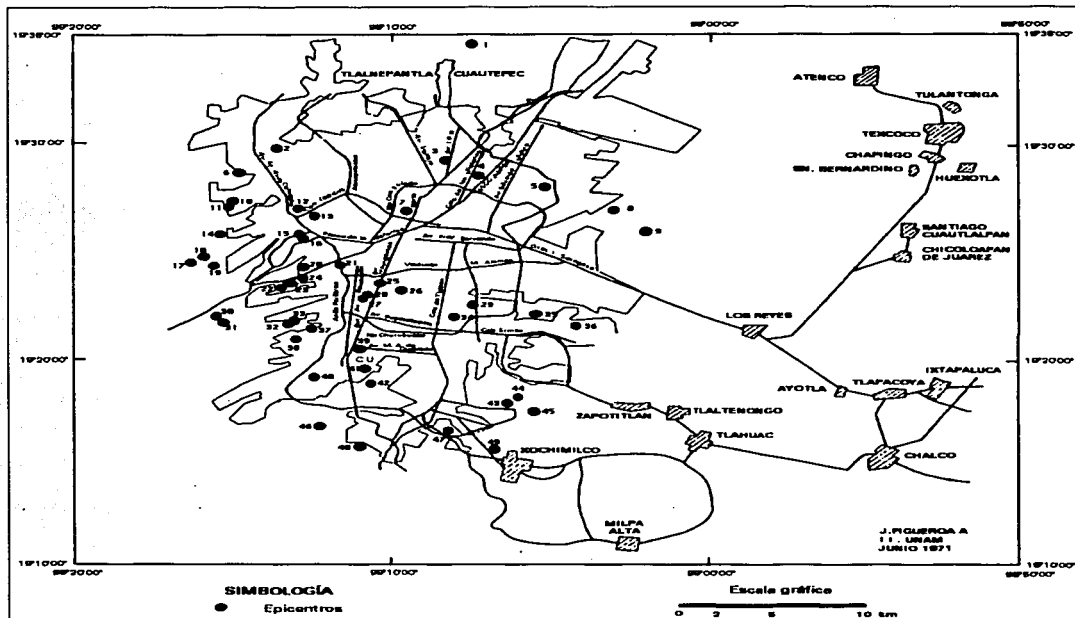


Figura V.2.1. Epicentros de sismos en el área Metropolitana (Figueroa, 1971).

Posteriormente, Mota Palomino *et al.*, (1992) presenta datos más detallados de epicentros de profundidad somera, originados en la Cuenca de México.

Más recientemente, Lermo *et al.* (1997), distinguen cinco regiones sísmicas dentro de la Cuenca de México:

1. La zona de contacto entre los derrames ígneos de las sierras volcánicas y los depósitos blandos de los exlagos de Xochimilco y Texcoco.

2. Estribaciones del volcán Peñón de los Baños.
3. Estribaciones de la Sierra de Guadalupe.
4. Subcuenca de Apan.
5. Región Juchitepec-Milpa Alta.

De acuerdo con Delgadillo *et al.* (2000), se cuenta con 12 estaciones digitales de periodo corto instaladas por el Instituto de Geofísica de la UNAM, presentando los resultados de sus observaciones realizadas en el periodo 1996-1999, localizando 211 eventos originados predominantemente en la región oriental de la Cuenca de México, en una franja con rumbo NW-SE, destacando las siguientes zonas de actividad:

1. Sismicidad relacionada con la actividad del volcán Popocatepetl.
2. Sismicidad ubicada al norte de Juchitepec.
3. Sismicidad comprendida entre el exlago de Texcoco- Río Frio.
4. Sismicidad ubicada cerca de la Hacienda Ojo de Agua.
5. Sismicidad localizada al sur de Tlaxcoapan, Hgo.

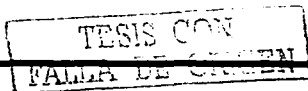
Las principales condiciones de la sismicidad en la cuenca, son una consecuencia de las propiedades geológicas del subsuelo, siendo desde este punto de vista, poco favorables, especialmente en las áreas de depósitos lacustres y de transición.

Estas condiciones son las siguientes:

- a) Agitación microsísmica muy amplia
- b) Sismos locales frecuentes
- c) Relaciones de daños inesperados como efectos de macrosismos distantes dentro del territorio nacional.

Con la investigación geofísica se contaría con los elementos necesarios para corroborar la estructura del subsuelo.

Debido a estas características sísmicas en la Cuenca de México, se hace necesaria la evaluación de su impacto en las líneas de ductos (Novak y Hindy, 1978 y Flores-Berrones y Vassilev, 1999).



V.3. HIDROLÓGICOS

Con base en las características de los escurrimientos del agua de lluvia en las distintas regiones de la Cuenca de México (figura V.3.1.), se han considerado once subcuencas las cuales se describen de acuerdo con su localización geográfica:

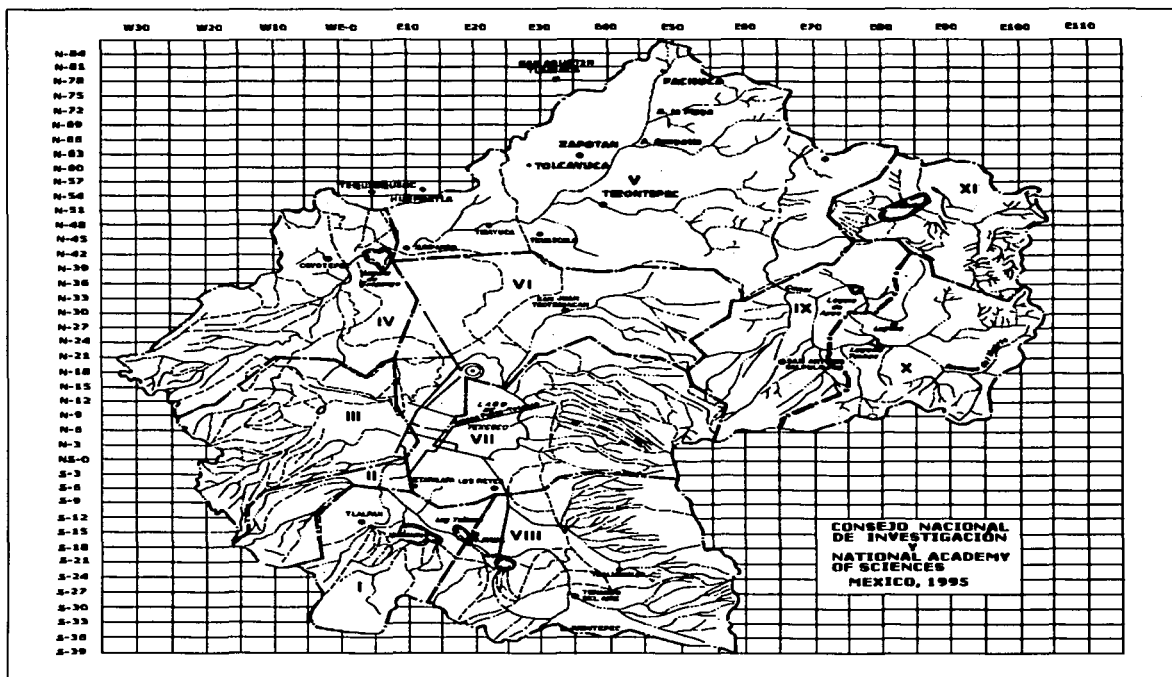


Figura V.3.1. Hidrografía de la Cuenca de México.

Subcuencas del sur (I y VIII). Aunque en las serranías de la región de Xochimilco, Tláhuac y Chalco, las precipitaciones son de las más abundantes, los cauces que baja de las sierras Cuautzin y Chichinautzin, tiene como característica sobresaliente la escasez de sus escurrimientos superficiales, debido a las condiciones de gran permeabilidad, constituidas por formaciones basálticas fracturadas y

aglomeráticas, observándose la ausencia casi total de drenaje. En cambio, por las mismas razones, el escurrimiento subterráneo es muy importante y existe gran cantidad de manantiales al pie de las sierras. Abarca desde el arroyo San Luis, afluente del río Ameca, hasta el río San Buenaventura, antiguo alimentador del Lago de Xochimilco.

Subcuencas del suroeste (II y III). Se inicia al sur con el río Eslava y termina con el río San Javier, se encuentra situado en la vertiente oriental de las serranías de las Cruces, Monte Alto y Monte Bajo, en una de las regiones más lluviosas del valle y, debido a las características geológicas formadas por andesitas y abanicos aluviales, los escurrimientos son de importancia. En virtud de que los cauces de estos ríos atraviesan la Ciudad de México, fueron encauzados y controlados a través de una cadena de presas, túneles y canales llamada *Sistema Hidráulico de Desviación Combinada*, que bordea la ciudad por el poniente y el norte, para descargar sus aguas al Lago de Texcoco con el fin de proteger a la ciudad de las crecientes.

Todos los ríos en la vertiente poniente del valle, siguen cursos con marcada dirección hacia el noreste, formando un drenaje bien desarrollado, constituido por numerosas corrientes que alcanzan hasta la planicie, donde antiguamente descargaban directamente a los lagos de México y Texcoco.

Subcuencas del noroeste (IV). Inciden las corrientes más importantes de la cuenca por su rendimiento individual, como son los ríos Cuautitlán y Tepetzotlán, que contribuyeron en épocas pasadas a las inundaciones de la Ciudad de México, que se deben a precipitaciones altas y a las características del suelo de la subcuenca donde prevalece la Formación Tarango.

Subcuencas del norte y noreste (V, IX, X y XI). Están constituidas por el río de Las Avenidas de Pachuca y las corrientes que alimentan a las que fueron cuencas cerradas de Apan, Tochac y Tecocomulco. La región es la de menor precipitación pluvial y sus características geológicas le proporcionan una permeabilidad media y alta; esto aunado a que la evaporación es más enérgica en esa área, debido a sus mayores temperaturas y vientos más fuertes, han determinado que las corrientes superficiales no sean caudalosas.

Subcuencas del oriente (VI y VII). Comprende los ríos que desaguan directamente en el Lago de Texcoco, e incluye desde el río San Juan Teotihuacán por el norte, hasta el Coatepec por el sur.

ALIAS CON
FALLA DE ORIGEN

ESTADO DE QUERÉTARO
DE LA CIUDAD DE QUERÉTARO

Estas corrientes, de mediano escurrimiento, constituyen un conjunto semejante al del poniente, aunque con escurrimientos menores. En la actualidad estos ríos son los que más contribuyen a mantener las mermadas aguas en el Lago de Texcoco.

Subcuencas del sureste (VIII). Lo constituyen los ríos de la Compañía, San Francisco y Ameca, los cuales reciben en sus cuencas lluvias de gran importancia.

Actualmente, los ríos de la Compañía y San Francisco se unen al llegar a la planicie de Chalco y ambos han sido encauzados artificialmente para llevar sus aguas al Lago de Texcoco, por el denominado Canal de Ayotla. Anteriormente descargaban directamente al ex-Lago de Chalco.

El río Ameca, sin incluir al arroyo San Luis, aunque recibe en su cuenca fuertes precipitaciones, tiene poco caudal, debido a que es muy permeable una parte de su cuenca y cauce. Este río que descargaba antes en el desaparecido Lago de Chalco, también ha sido encauzado artificialmente hacia el Lago de Tláhuac.

La serie de lagos que antes existían en la Cuenca de México, no se encontraban a un mismo nivel; siendo más altos en la periferia y más bajos hacia el centro. En consecuencia, el Lago de Texcoco era el recipiente final de los excedentes de todos ellos, y por lo mismo, el total de las corrientes existentes, con excepción de las confinadas en las cuencas cerradas de Apan, Tochac y Tecocomulco, eran tributarias parcialmente de dicho lago.

Las obras artificiales que se han construido a través de los años, han modificado las condiciones originales de estos lagos. Ahora pueden distinguirse tres recipientes aislados, por lo menos superficialmente, con excepción de una comunicación artificial que existe entre Xochimilco y Texcoco, a través del Canal Nacional y Río Churubusco. Los recipientes citados son los lagos de Zumpango, Texcoco y Xochimilco - Tláhuac - Mixquic y en ellos descargan todas las corrientes de lo que propiamente era el valle original.

El área total de la Cuenca de México es extensa (9,600 km²) y por ello es posible encontrar, dentro de ésta, condiciones hidrológicas muy diversas. Por lo tanto, y para facilitar el estudio de las diversas corrientes que forman el drenaje, (Consejo Nacional de Investigación, 1995) se ha dividido la cuenca en once zonas hidrológicas, buscando en cada una la mayor uniformidad posible de condiciones (tabla V.3.1.).

TESIS CON
FALLA DE CALIFICACIÓN

TABLA V.3.1.
ZONAS HIDROLÓGICAS DEL VALLE DE MÉXICO.

ZONA	NOMBRE	AREA (km ²)
I	Xochimilco	522
II	Churubusco	234
III	Ciudad de México	725
IV	Cuautitlán	972
V	Pachuca	2 087
VI	Teotihuacán	930
VII	Texcoco	1 146
VIII	Chalco	1 124
IX	Apan	637
X	Tochac	690
XI	Tecocomulco	533
T O T A L		9 600

El gran número de corrientes que descienden de las montañas que bordean a la Cuenca de México, no presentan uniformidades hidrológicas, sin embargo, todas ellas tienen en común un régimen torrencial, favorecido por las dimensiones reducidas de las subcuencas y las pendientes de sus cauces, generalmente escarpados; lo que determina que las avenidas sean bruscas, y las posibilidades de erosión y de impacto hidráulico que generen sobre las diversas obras, donde se incluyen los ductos que se encuentren en su camino, sea alta.

V.4. HIDROGEOLÓGICOS

Los requerimientos de agua para cubrir las necesidades de consumo humano, agrícola e industrial, provocaron una intensa exploración del subsuelo dentro de la Cuenca de México, identificando así los distintos acuíferos, presentes en ella (Marín-Córdova y Yoteco, 1998). Esto ha dado como resultado, para su abastecimiento, la necesidad de buscar alternativas de solución externas a la cuenca tales como las de Lerma y Cutzamala.

Con diversos estudios se han definido y evaluado en forma regional las diferentes unidades hidrogeológicas, (Marín- Córdova *et al.*, 1986(a)) así como algunos de sus parámetros hidrodinámicos tales como:

- Profundidad de niveles freáticos
- Permeabilidad
- Dirección de flujo.

Además, estos tipos de estudios han sido realizados por las dependencias federales, estatales y municipales encargadas de la exploración y explotación de los acuíferos granulares y rocosos, que en la actualidad se aprovechan (Marín-Córdova y Herrera Moro, 1999).

TESIS CON
FALLA DE CORTES

El potencial de los acuíferos en el subsuelo de la cuenca y su estado de sobre explotación son conocidas (Domenico and Schartz, 1990 y Durazo y Farvolden, 1989); no así sus tendencias evolutivas, por lo que se requieren estudios actualizados (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 1990) de forma tal que permitan conocer con certeza y oportunidad sus características hidrodinámicas en un futuro inmediato (Huizar-Álvarez, 1989, 1993 y 1999).

Es evidente que por la sobreexplotación de los acuíferos, se han originado grandes asentamientos diferenciales de los materiales que constituyen el acuitardo y la formación de agrietamientos importantes en los mismos afectando a gran número de áreas urbanas e industriales (Álvarez Manilla *et al.*, 2001), siendo conveniente analizar los efectos que producen en los ductos que transportan hidrocarburos (Flores-Berrones y Vassilev, *op. cit.*).

Estos aspectos hidrogeológicos están relacionados íntimamente con las condiciones climatológicas locales y regionales de la Cuenca de México, por lo que se tomaron en cuenta también los parámetros de precipitación, infiltración y escurrimiento de las aguas pluviales (Bear, 1972 y 1979).

Las características de las unidades hidrogeológicas relacionadas con las líneas de ductos, con los diversos acuíferos y con el posible impacto (por causas naturales o inducidas) que una fuga en ellos ocasionaría en el agua subterránea, permitirán conocer el peligro de contaminación de los acuíferos teniendo así un rango de seguridad en la calidad del agua que abastece a las poblaciones de la Cuenca de México.

V.5. GEOTÉCNICOS

Las distintas características de los suelos presentes en la Cuenca de México, al igual que sus condiciones de saturación debidas a los diferentes acuíferos regionales, también han motivado el desarrollo de procedimientos de investigación avanzada en el tema de la geotecnia (Díaz-Rodríguez, 1989 y Díaz-Rodríguez *et al.*, 1992).

En la planicie la presencia de arcillas saturadas y compresibles, y la sobre explotación de los acuíferos granulares asociados a ella, han generado, como se mencionó anteriormente, importantes asentamientos y fracturamientos en los suelos, con los consecuentes efectos en las obras de ingeniería civil construidas en ellos (Nabor Carrillo, 1969). Además se ha incrementado la permeabilidad secundaria en las secuencias estratigráficas lacustres, razón por la cual, se hace necesaria la aplicación de los métodos de investigación de mecánica de suelos para la identificación de las propiedades mecánicas y dinámicas, en las áreas de emplazamiento de los ductos petroleros.

Las principales propiedades que deberán tomarse en consideración son:

- Compresibilidad.- Mediante la prueba de consolidación unidimensional, se pueden estimar los asentamientos que ocurrirán bajo una cierta carga.
- Resistencia al esfuerzo cortante.- Mediante la prueba de *compresión triaxial*.
- Presión de poro.- Utilizando las mediciones de piezometría y de permeabilidad.
- Permeabilidad.- Mediante pruebas de campo y/o laboratorio.
- Período del suelo.- Utilizando métodos geofísicos.
- Módulo de rigidez al cortante.- Mediante el péndulo de torsión.

Todas estas características mecánicas y dinámicas, presentan de acuerdo con los diferentes tipos de suelo un amplio rango de variación, por lo que como menciona Zeevaert, (2002), *es obvio que cada zona sísmica debe desarrollar su propia tecnología de acuerdo al ambiente dominante y a las características sísmicas de los suelos en dicha región.*

Por lo que respecta a la clasificación de los suelos en los que se encuentran los ductos, permiten identificar los diversos factores que afectan a sus propiedades mecánicas.

Como criterio para la clasificación de los suelos se recomienda usar el *Sistema Unificado de Clasificación de Suelos* (SUCS) (Juárez Badillo y Rico Rodríguez, 1980), el cual, por sus características resulta el más descriptivo de los mismos, además de ser el más aceptado internacionalmente.

El SUCS, se basa en la determinación de las siguientes propiedades: Texturales (tamaño, clasificación, composición, forma) y propiedades índice (límite líquido, límite plástico y límite de contracción).

En la tabla V.5.1. anexa se presenta la clasificación de suelos (SUCS), que fue utilizada para el análisis correspondiente en esta investigación.

Los tres principales problemas y riesgos de los suelos para el diseño de estructuras y su cimentación, en el área de la Ciudad de México (Díaz-Rodríguez, 2003), corresponden a:

1. Propiedades mecánicas, estáticas y dinámicas.

Los suelos en esta área son altamente compresibles por lo que se tienen constantes asentamientos; así como un módulo dinámico de rigidez (G) bajo y saturación de agua que origina alta amplificación de las ondas sísmicas.



2. Subsistencia

Este proceso ocasiona grandes problemas a las obras de ingeniería y es provocado tanto por la extracción de agua subterránea de los suelos compresibles, como por fenómenos de isostasia, dando origen a grietas.

3. Sismicidad

Esta actividad ha producido graves efectos en obras civiles construidas en es área lacustre y no así en las de transición y roca.

La presencia de diversas clases de roca en las porciones altas de la Cuenca de México, especialmente de naturaleza ígnea, y su influencia en la adecuada cimentación y operación de los ductos petroleros, hacen necesaria la identificación y evaluación, desde el punto de vista de mecánica de rocas, del macizo rocoso, con lo que se podrán determinar los peligros que estas condiciones pueden representar para ellos. En este tipo de relieve, las condiciones geológicas naturales que existen, tienen además estrecha relación con sus propiedades estructurales (fallas, fracturas, planos de fluidez) y estratigráficas (contactos).

TABLA V.5.1.
CLASIFICACIÓN DE SUELOS (SUCS)

PROCEDIMIENTO DE IDENTIFICACIÓN EN EL CAMPO (Excluyendo las partículas mayores de 7.5 cm (3") y tratando las fracciones en pesos estimados)		SÍMBOLO (I.X.L. (GRUPO))		NOMBRES TÍPICOS		INFORMACIÓN NECESARIA PARA LA DESCRIPCIÓN DE LOS SUELOS	
SUELOS DE PARTICULAS GRUESAS (mas de la mitad del material es retenido en la malla N°200 (**)) (Las partículas de 0.075mm de diámetro (malla N° 200) son aproximadamente las mas pequeñas visibles a simple vista)	GRAVAS Más de la mitad de la fracción gruesa es retenida en la malla N°4 (Para clasificación visual puede usarse 1/2 cm como equivalente a la abertura de la malla N°4)	GRAVAS LIMPIAS (Poco o nada de partículas finas)	Amplita gama en los tamaños de las partículas y cantidades apreciables de todos los tamaños intermedios	GW	Gravas bien graduadas, mezclas de grava y arena, con poco o nada de finos	Dar el nombre típico, indiquense los porcentajes aproximados de gravas y arenas, tamaño máximo, angulosidad, características de la superficie y dureza de las partículas gruesas, nombre local y geológico, cualquier otra información descriptiva pertinente y el símbolo entre paréntesis. Para los suelos inalterados agregarse información sobre estratificación, compactación, cementación, condiciones de humedad y características de drenaje.	EJEMPLO Arena limosa con grava, con un 20% de grava de partículas duras, angulosas y de 15 cm de tamaño máximo, arena gruesa a fina de partículas redondeadas o subangulosas, alrededor de 15% de finos no plásticos de baja resistencia en estado seco, compacta y húmeda en el lugar, arena aluvial (SM)
	ARENAS Más de la mitad de la fracción gruesa pasa la malla N°4 (Para clasificación visual puede usarse 1/4 cm como equivalente a la abertura de la malla N°4)	GRAVAS CON FINOS (Cantidad Apreciable de partículas finas)	Fracción fina poco o nada plástica (para identificación véase grupo ML abajo)	GM	Gravas limosas, mezclas de grava, arena y limo		
		ARENAS LIMPIAS (Poco o nada de partículas finas)	Amplita gama en los tamaños de las partículas y cantidades apreciables de todos los tamaños intermedios	SW	Arenas bien graduadas, arenas con gravas, con poco o nada de finos		
		ARENAS CON FINOS (Cantidad apreciable de partículas finas)	Predominio de un tamaño o un tipo de tamaños, con ausencia de algunos tamaños intermedios	SP	Arenas mal graduadas, arenas con grava, con poco o nada de finos		
PROCEDIMIENTO DE IDENTIFICACIÓN EN LA FRACCIÓN QUE PARA LA MALLA N°40	RESISTENCIA EN INTACTO (N/A) (Características al remanece)	DILATANCIA (Inflación al saturar)	II (ACTIVIDAD) (Inflación en agua al 100%)				
		LIQUIDEZ (Características al remanece)	COMPACTACIÓN (Características al remanece)	PLASTICIDAD (Características al remanece)			
SUELOS DE PARTICULAS FINAS Más de la mitad del material pasa la malla N°200 (Las partículas de 0.075mm de diámetro (malla N° 200) son aproximadamente las mas pequeñas visibles a simple vista)	LIMOS Y ARCILLAS Límite líquido menor de 50	Nula a ligera	Rápida a lenta	Nula	ML	Limos inorgánicos, polvo de roca, limos arcillosos o arcillosos, ligeros y pesados	Dar el nombre típico, indiquense el grado y carácter de la plasticidad, cantidad y tamaño máximo de las partículas gruesas, color del suelo húmedo, nombre local y geológico, cualquier otra información descriptiva pertinente y el símbolo entre paréntesis. Para los suelos inalterados agregarse información sobre las estructuras, estratificación, cementación, condiciones de humedad y drenaje.
		Medio a alta	Nula a muy lenta	Medio	CL	Arcillas inorgánicas de bajo o medio plasticidad, arcillas con gravas, arcillas arcillosas, arcillas limosas, arcillas pobres	
	LIMOS Y ARCILLA Límite líquido mayor de 50	Ligera a media	Lenta	Ligera	OL	Limos orgánicos y arcillas limosas orgánicas de baja plasticidad	
		Ligera a media	Lenta a nula	Ligera a media	MH	Limos orgánicos, limos inorgánicos o diatomáceos, limos arcillosos	
		Alta a muy alta	Nula	Alta	CH	Arcillas inorgánicas de alta plasticidad, arcillas finas	
		Medio a alta	Nula a muy lenta	Ligera a media	OH	Arcillas orgánicas de media a alta plasticidad, limos orgánicos de media plasticidad	
SUELOS ALTAMENTE ORGÁNICOS		Fácilmente identificable por su color, olor, sensación esponjosa y frecuentemente por su textura fibrosa		PT	Turbe y otros suelos altamente orgánicos	EJEMPLO Limo arcilloso, café, ligeramente plástico, porcentaje reducido de arena fina, numerosos agujeros verticales de raíces, firme y seco en el lugar, locos (ML)	

(*) Clasificaciones de Proctors - Los suelos que poseen las características de una gruesa se ubican con la combinación de los dos símbolos. Por ejemplo GW-CL, mezcla de grava y arena bien graduada con cementación arcillosa

(**) Todos los tamaños de las mallas en esta carta son los U.S. Standard

Tomado de Juárez Badillo y Rico Rodríguez, 1980

Dado que las líneas de ductos quedan instaladas a profundidades someras, se considera que con la identificación directa en campo de las unidades litológicas, además de las características estratigráficas y estructurales, se puede dar una adecuada interpretación de los parámetros geomecánicos de los distintos materiales rocosos, sin necesidad de recurrir a la perforación de sondeos exploratorios, con lo cual, se elevarían los costos y se requeriría de un mayor plazo de investigación (Galván *et al.*, 1998).

Para ello se realizaron estaciones microestructurales en localidades previamente establecidas, para caracterizar las estructuras y los patrones estructurales de las unidades litológicas. Asociando el tipo de roca, la secuencia estratigráfica y los patrones estructurales que les afectan, se puede determinar el índice de calidad de roca (RQD), y el índice RMR (Rock mass rating), aplicando los criterios de Deer y Miller (1966) y Bieniawski (1976).

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

DE

CAPÍTULO VI

INVESTIGACIONES LOCALES

ESPECÍFICAS

TESIS CON
FALLA DE INGEN

CAPÍTULO VI

INVESTIGACIONES LOCALES ESPECÍFICAS

Con base en los peligros geológicos definidos con el análisis regional de la cuenca, en cada uno de los tres tipos de relieve considerados, se evaluaron bajo dos puntos de vista, los efectos que un evento de origen natural, podría ocasionar primeramente en los ductos y como segundo punto, los impactos que se provocarían en el ambiente al ocurrir alguna fuga en ellos.

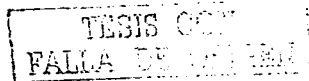
Es oportuno hacer mención de que en los tramos de *derecho de vía* de los ductos seleccionados y de acuerdo con la información de dominio público existente, así como con la Carta de Infraestructura Petrolera del Atlas de la República Mexicana, del Instituto de Geografía de la UNAM, se localizaron varias tuberías de diversos diámetros, que conducen una variedad de productos petroleros, en base a lo que se denominan: oleoductos, gasoductos y poliductos, buscando identificar a nivel local, en el presente capítulo, cuáles serían los peligros geológicos que pudieran presentarse en los tres derechos de vía de ductos petroleros seleccionados, para evaluar posteriormente en el capítulo VII, los daños a las instalaciones, así como al ambiente, incluyendo por supuesto al ser humano.

A continuación, se presenta el análisis realizado en cada uno de ellos.

VI.1. PLANICIE

En la planicie, fueron seleccionadas dos áreas (1' y 1). La primera de ellas localizada en la porción norte del ex-Lago de Texcoco y la segunda al norte de la Sierra de Guadalupe, en el área lacustre Xaltocan-Zumpango.

Con el fin de elegir el más representativo y de mayor interés, se efectuaron reconocimientos directos al área, con apoyo de cartografía topográfica y geológica de INEGI, escala 1:50,000. Uno de los tramos está contenido en el denominado ramal Huehuetoca-Santa Cruz Moxolagua (D-D') de la figura IV.6.2.1, y el otro en el ramal Ajusco-Tecomulco (A-A') corroborando que ambos se localizan en el área lacustre, con problemas de asentamientos visibles, principalmente en los pavimentos de los caminos que cruzan.



Uno de estos tramos corresponde al ubicado al norte de la Sierra de Guadalupe (1) y el segundo al sur del cerro de Chiconautla (1'). El primero de ellos entre los poblados de San Lorenzo Tetlixnac y Santa María Chiconautla y el segundo, entre Totolcingo y Tezoyuca

En las dos áreas se observó tanto en la cartografía geológica existente como en los reconocimientos directos en el campo, que los derechos de vía de ductos petroleros, se ubican en sedimentos lacustres; siendo característico que, tanto en el tramo de la carretera México-Pachuca para el primer caso y Chiconautla-Texcoco en el segundo, se presentan fuertes asentamientos y agrietamientos; encontrándose inclusive letreros sobre la carretera que indican el fenómeno como: *tramo con deformaciones*.

Es notable también que recientemente y no obstante los mencionados problemas para la cimentación de construcciones y la presencia de los ductos petroleros, el establecimiento de gran cantidad de fraccionamientos urbanos de interés social, se están llevando a cabo en forma acelerada, con el consiguiente riesgo que esto implica.

Con estos reconocimientos, se determinó que cualquiera de los dos tramos, podría ser seleccionado para el objetivo propuesto; sin embargo, se tomó la decisión del ubicado en la porción norte del ex-Lago de Texcoco, ya que de acuerdo con dos cartas de INEGI (Cetenal, 1977 e INEGI, 1997), correspondientes a vuelos de 1971 y 1994 respectivamente, los ductos fueron reubicados, debido a problemas importantes del subsuelo (figuras VI.1.1 y VI.1.1-A), lo cual resultó de interés para la evaluación del peligro geológico en ese *derecho de vía*.

Como se observa en estas dos figuras, el tramo seleccionado para este análisis de peligro geológico, se localiza en la porción norte del ex-Lago de Texcoco. Presenta una orientación NW-SE y tiene una longitud aproximada de 8 km. Su elevación con respecto al nivel del mar es de 2240 m.

VI.1.1. MARCO GEOGRÁFICO Y GEOLÓGICO

Las características generales del marco geográfico y geológico en el que se ubica este *derecho de vía*, son las siguientes:

El trazo marcado en la carta de INEGI, en el año de 1971, se localiza en su totalidad al sur de la carretera No. 136 Texcoco-Chiconautla, (figura VI.1.1) relocalizándolo en todo este tramo hacia el noreste (figura VI.1.1-A), según se muestra en la carta editada por INEGI en 1997, correspondiente al vuelo de 1994.

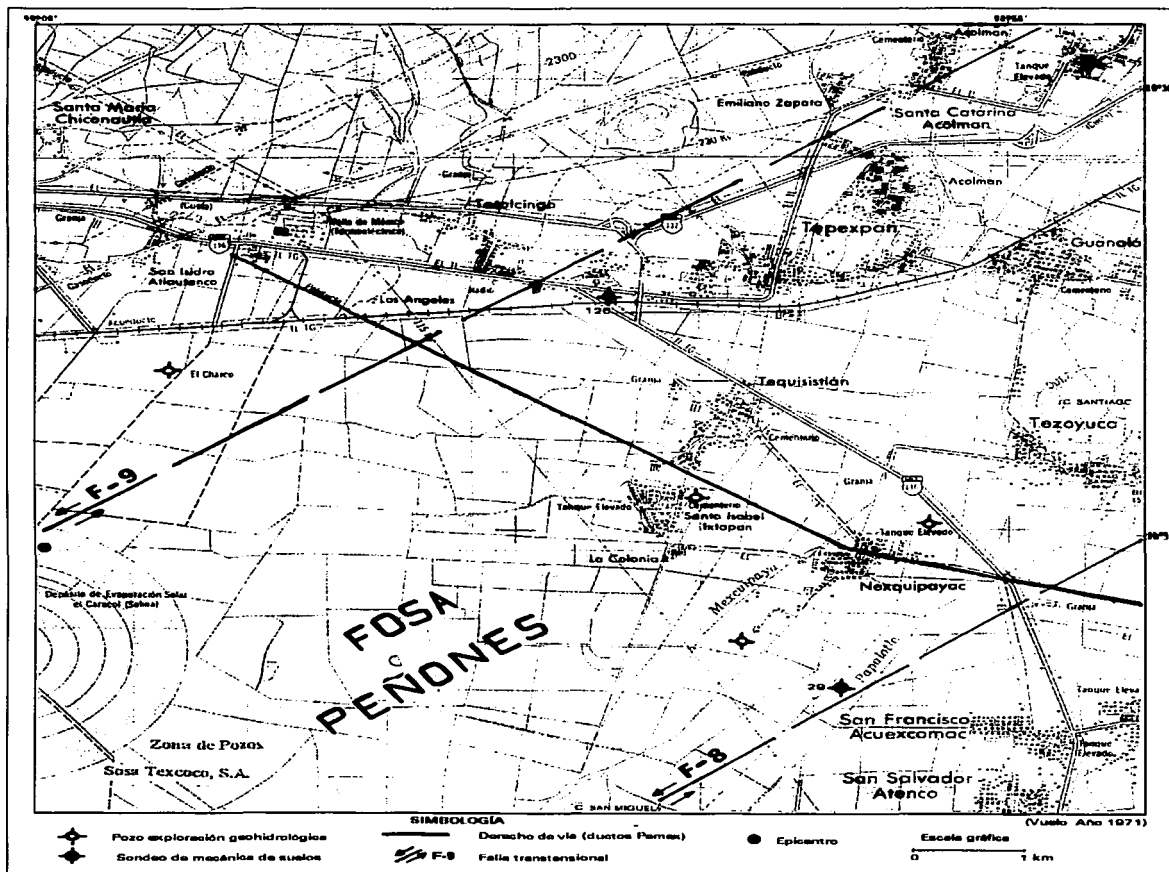


Figura VI.1.1. Área de planicie. Relación del derecho de vía de PEMEX (1971), con las principales fallas transensionales y los sondeos exploratorios.

Con base en la metodología propuesta y establecida en los capítulos anteriores, el peligro del tramo será analizado a continuación, utilizando principalmente criterios geológicos, hidrogeológicos y geotécnicos.

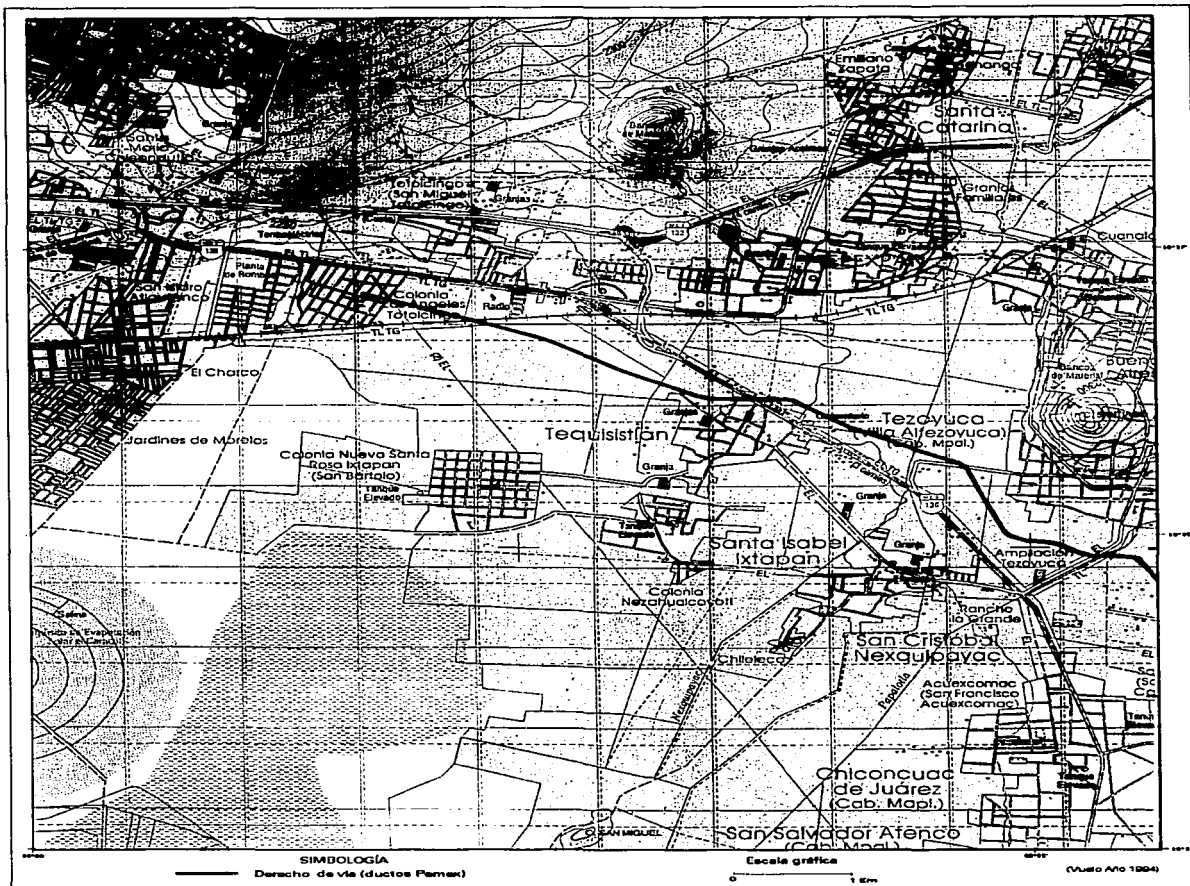


Figura VI.1.1-A. Área de planicie. Localización del derecho de vía de PEMEX (1994).

Las características litoestratigráficas y estructurales del sitio, corresponden a una secuencia de estratos arcillosos, limosos y arenosos depositados en un ambiente lacustre. De acuerdo con Murillo y García (1978), las unidades litológicas que constituyen el subsuelo en el área metropolitana de la Ciudad

de México, se extienden hacia el área del ex-Lago de Texcoco, con las siguientes características, descritas de la superficie hacia abajo:

❖ **Manto superficial.**

Formado por arcillas, arenas limosas y limos arcillosos, con espesor que varía de 1.5 m a 6.0 m

❖ **Formación arcillosa superior.**

De acuerdo con datos de varias decenas de sondeos exploratorios de mecánica de suelos a que hacen referencia los mismos autores su espesor varía de 17 m en el norte (alrededores de *El Caracol*), a más de 40 m hacia el sur (*Bordo Xochiaca*).

Se encuentra formada por arcillas de origen volcánico-lacustre.

❖ **Capa dura.**

Este ha sido un horizonte índice en una gran extensión del subsuelo del área lacustre con un espesor que varía de 3.5 m en la porción norte, hasta casi desaparecer hacia el sur (*Ciudad Netzahualcoyotl*). Se encuentra formado por materiales limosos, limoarenosos y arenosos principalmente.

❖ **Formación arcillosa inferior.**

Los mismos autores mencionan que esta unidad corresponde al mismo origen y características, que la formación arcillosa superior, diferenciándose por su menor contenido de agua, así como por su menor compresibilidad y mayor resistencia al corte.

Contiene además algunos lentes y estratos limoarenosos y de vidrio volcánico. Su espesor es variable del centro del ex-Lago de Texcoco (20 m), disminuyendo hacia la periferia.

❖ **Depósitos profundos superiores.**

Están formados por limos y arenas finas muy compactas, habiéndose encontrado a profundidades que varían de 32 m en el norte (evaporador solar de *El Caracol*) hasta 62 m en la porción sur, cercana al *Bordo Xochiaca*.

Esta secuencia estratigráfica descrita por Murillo y García (1978), es ampliamente utilizada por los especialistas de mecánica de suelos, correspondiendo con una descripción más geológica, a la realizada por Mooser *et al.*, (1986) a los depósitos que abarcan desde el Holoceno-Reciente hasta los de la denominada Tercera Glaciación (Illinois), que se presenta en la figura VI.1.1.1.

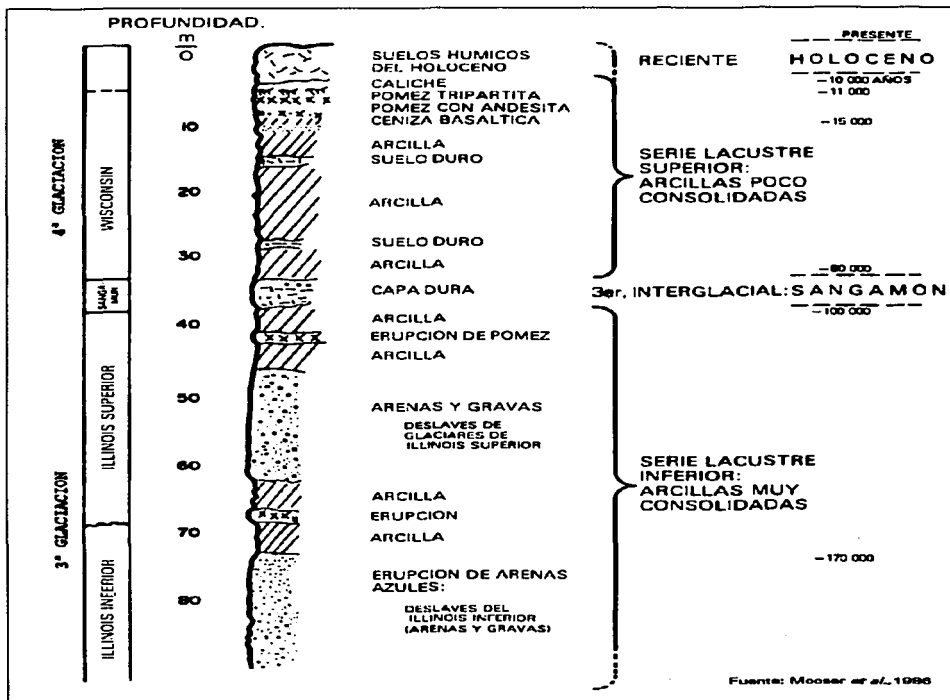


Figura VI.1.1.1. Secuencia estratigráfica en la planicie.

La tercera glaciación llamada Illinois y la cuarta, Wisconsin, ocurrieron una vez formada la Cuenca de México, debida al cierre por el sur, originado por la sierra de Chichinautzin (Mooser *et al.*, 1986).

Investigaciones recientes realizadas por Díaz-Rodríguez *et al.*, (1998), presentan una columna estratigráfica más detallada de los sedimentos lacustres en la porción sur de la Cuenca de México, relacionando sus propiedades físicas, químicas, mineralógicas y geotécnicas, hasta una profundidad de 40 metros; abarcando la Formación arcillosa superior, hasta la capa dura. Dichos estudios se han realizado en el área de la Ciudad de México, en el parque Ramón López Velarde.

TESIS COM
FALLA

Desde el punto de vista geológico estructural, la secuencia lacustre y el basamento local, están afectados por los lineamientos de fallas transtensionales NE-SW denominadas F-8 y F-9; encontrándose cercana al Eje Distensivo NW-SE Huchuetoca-Popocatepetl. (Marín-Córdova y Aguayo, 1989) (figura IV.3.1).

En esta área se han presentado en forma persistente, agrietamientos en los suelos y descensos en la elevación de la superficie del terreno, hasta de 0.40 m por año (Murillo y García, 1978).

Varios autores consideran que estos agrietamientos son debidos a procesos de desecación Murillo y García (*op.cit.*), y por la extracción de agua subterránea; sin embargo Marín-Córdova *et al.* (1986 (a)) han asociado algunos de ellos a los efectos de los lineamientos de fallas activas con orientación NE-SW, acelerados e incrementados por la extracción del agua de los acuíferos. Este tipo de agrietamientos ocurren en época de lluvias, al contrario de las de desecación que se manifiestan en épocas de estiaje.

Difieren también estos agrietamientos con respecto a los que ocurren en el área de transición entre los basamentos rocosos de los cerros y los materiales de relleno en los valles originados por asentamientos diferenciales, en que no bordean a dichos cerros, ni son concéntricas; sino que se presentan alejados de ellos o con orientación perpendicular a los mismos, coincidiendo con fracturas o fallas regionales de la roca.

Con referencia a las condiciones hidrológicas, los escurrimientos superficiales de agua, están constituidos por los ríos San Juan Teotihuacán y Papalotla, que llegan hasta el área federal del ex-Lago de Texcoco por el noreste. Sus escurrimientos en época de estiaje son propiamente nulos, ya que sus aguas son aprovechadas en diversos ejidos. Por el contrario, en el verano se reportan fuertes avenidas, como ocurrió el 17 de agosto de 1955, con una avenida máxima en el río Papalotla de 124 m³/seg. (Cruikshank-García, 1995), medidos en la estación de aforo *La Grande* localizada aproximadamente a 400 m aguas abajo del actual *derecho de vía*.

Las aguas superficiales que concurren en este sitio, provienen de una cuenca con precipitación media anual de 500 mm y superficie de 500 km² denominada subcuenca del Río San Juan Teotihuacan, que fluye por toda la longitud del valle Otumba-Tepexpan, con pendiente general de 0.5%. La precipitación pluvial media en la región entre los años 1981 a 1990 fue de 610 mm anuales, con un coeficiente de escurrimiento de 5.9 Hm³ (Cruikshank García, *op.cit.*).

El gasto máximo instantáneo en la estación Tepexpan fue de 42.6 m³/seg, el 20 de octubre de 1947.

TESIS CON
FALLA DE CUBRIL

La corriente más caudalosa del área oriente es el río Papalotla, el cual llega a la zona federal del Lago de Texcoco, por dos brazos: el Santa Rosa y el San Bartolo.

El área de esta subcuenca hasta la estación *La Grande*, es de 200 km², que como se mencionó anteriormente, ha presentado un gasto máximo instantáneo de 124 m³/seg en agosto de 1955.

En este valle, la mayor parte de los escurrimientos son aprovechados mediante derivadoras y sistemas de canales.

Por lo que respecta a las condiciones hidrogeológicas en el subsuelo, existe un multiacuífero (Marín-Córdova *et al.*, 1986(a)) desde profundidades someras hasta los 80 m continuando a mayor profundidad en unidades piroclásticas y coladas de lava hasta los 300 m, perforados con los pozos de agua potable de los poblados de Tequisistlán y Nexquipayac.

Con base en la información de diversos estudios, se tiene que el agua subterránea se encuentra en toda la longitud de los sedimentos lacustres, variando su transmisibilidad y su calidad, tanto horizontal como verticalmente.

Es ampliamente conocido el yacimiento de salmuera que la empresa Sosa Texcoco, S. A. explotó durante decenas de años, mediante cerca de mil pozos con profundidades hasta de 60 m, (Marín-Córdova *et al.*, 1992(a)) localizado al suroeste del *derecho de vía* de los ductos (figura VI.1.1).

Los horizontes productores de salmuera varían de un lado a otro dentro del campo de pozos en explotación, encontrándose entre los 11.00 m y los 58.00 m de profundidad, con concentraciones de álcali hasta de 7.5% P/V, para la elaboración de carbonato de sodio y sosa cáustica.

En lo que concierne al agua subterránea para uso público urbano, industrial y agropecuario, los organismos federales y estatales han realizado diversos estudios para conocer con mayor detalle el comportamiento de los acuíferos, tales como: censos de pozos, análisis físico-químicos y bacteriológicos, nivelaciones topográficas y piezometría de acuerdo con la publicación del *Proyecto Lago de Texcoco* (Cruickshank García, *op. cit.*).

En esa publicación, se reporta una profundidad promedio del nivel del agua, de 47 m, con un abatimiento anual promedio de 1.0 m. Cabe hacer mención que en la mayoría de estos pozos se coloca un ademe ciego hasta la profundidad de 60 m para evitar la extracción de las aguas someras contaminadas.

Finalmente y de acuerdo con sondeos de mecánica de suelos reportados en la publicación de *El subsuelo y la ingeniería de cimentaciones en el área urbana del Valle de México* (Murillo y García, *op.cit.*), el nivel de aguas freáticas en los pozos 29 y 126 (figura VI.1.1), también cercanos al *derecho de vía* de los ductos, se localiza a 3.10 m y 10.40 m respectivamente.

Por otra parte, en el aspecto sísmico, el epicentro más cercano al área, se indica en la misma figura VI.1.1 (Mota-Palomino *et al.*, 1992), ubicado aproximadamente a 5 km al suroeste del *derecho de vía*, con aceleraciones máximas registradas el 19 de septiembre de 1985 de 114 cm/seg.

VI.1.2. IDENTIFICACIÓN E IMPLICACIÓN DE LOS PELIGROS

Tomando como base el marco geológico descrito, integrado por las distintas unidades litoestratigráficas, sus características estructurales, su relación con las aguas superficiales y subterráneas, así como con la influencia sísmica regional y local, los peligros en este tramo del *derecho de vía* de los ductos de PEMEX, estarían originados por: la subsidencia, el neotectonismo y la erosión o impacto hidráulico.

Como efecto posterior y en caso de presentarse alguna fuga de los hidrocarburos que son conducidos en ellos, se tendrían contaminación del suelo, subsuelo y acuíferos, así como la posibilidad de que los mismos se introduzcan en las tuberías de los servicios urbanos, con los impactos mencionados en capítulos anteriores.

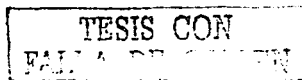
Los detalles de estas implicaciones se mencionan en el capítulo VII.

VI.1.3. FACTORES POR IDENTIFICAR EN LA PLANICIE

Para evaluar el fenómeno de subsidencia, se identificó primeramente la secuencia litoestratigráfica del sitio, hasta la primera capa dura (arenisca tobacea) definida con estudios geológicos, así como sus características geomecánicas determinadas con investigaciones precedentes de laboratorio de mecánica de suelos efectuadas en muestras del área, tales como:

A.- Propiedades Índice

- Contenido de agua
- Límite líquido
- Límite plástico
- Densidad de sólidos
- Relación de vacíos



B.- Propiedades Mecánicas

Compresibilidad
Resistencia al corte
Permeabilidad

C.- Propiedades Dinámicas

Pruebas de prospección sísmica vertical y horizontal
Módulo dinámico de rigidez (G). También llamado Módulo dinámico al cortante
Módulo dinámico de elasticidad (E)
Relación de Poisson
Amortiguamiento

La evaluación del *Impacto Hidráulico* se efectuó mediante el análisis de la información correspondiente a:

- Dimensiones de la cuenca
- Climatología
- Hidrometría
- Contexto geológico

Las *fallas transtensionales* se analizaron mediante la información geológica precedente, relacionándolas con la actividad tectónica local.

Para el efecto secundario de impacto al acuífero y a las tuberías urbanas, se definieron las características hidrodinámicas del primero, principalmente por lo que respecta a:

Profundidad del nivel freático (piezometría)
Permeabilidad
Dirección de flujo del agua subterránea
Transmisibilidad
Gradiente hidráulico

VI.2. PIEDEMONTE

Este *derecho de vía* de ductos petroleros seleccionado para su análisis detallado, se localiza en el área poniente de la Sierra de los Pitos, como se indica en la figura IV.6.2.1.

Está orientado norte-sur, entre las elevaciones 2320 y 2330 m s.n.m. con una longitud aproximada de 7 km, entre los poblados de Benito Juárez y Estación Téllez

VI.2.1. MARCO GEOGRÁFICO Y GEOLÓGICO

El tramo seleccionado cruza por una litología constituida por suelos de diferente granulometría, originados por el intemperismo, y la erosión de las rocas que forman a la mencionada sierra, siendo estas: tobas, basaltos, andesitas, riolitas y brechas sedimentarias.

Zamorano Orozco *et al.* (1997), menciona que esta sierra surgió entre el Plioceno Tardío y el Pleistoceno Temprano. Está integrada por tres grandes unidades:

El núcleo constituido por un conjunto de domos riolíticos cuya cima alcanza los 3,000 m s.n.m., cortado por fracturas y fallas normales NE-SW y NW-SE.

De acuerdo a los estudios de Aguayo y Marín-Córdova (1987), en el área se encuentran también dos lineamientos de fallas activas mayores de tipo transtensional orientadas NE-SW denominadas F-11 y F-12 (figuras IV.2.2.4 y VI.2.1.1).

El tramo de *derecho de vía* queda propiamente comprendido entre ambos lineamientos; solamente está cruzado por una falla normal NW-SE con desplazamiento hacia el SW (figura VI.2.1.1).

La segunda unidad se encuentra formada por el piedemonte con elevaciones entre 2,320 y 2,600 m. Observando las curvas de nivel de la carta INEGI escala 1:50,000, se evidencia claramente un abanico de mediana inclinación, que bordea a la unidad anterior, hacia el poniente, hasta la cota 2,320 m.

En los trabajos de Zamorano *et al.* (1997 y 2002) se menciona que como parte de la actividad volcánica o posterior a ella, se presentó una remoción por gravedad y agua, de grandes masas de clastos, dando lugar a la acumulación de tipo abanico o conos de deyección, integrados con los materiales piroclásticos.

Finalmente la tercera unidad consiste de un conjunto de volcanes de lava y tefra ubicados en el extremo suroeste del piedemonte. La principal composición de ellos es de tipo basáltico.

De esta forma, el tramo de ductos seleccionado se encuentra en la porción inferior del piedemonte.

Desde el punto de vista hidrológico la principal corriente que desciende de la sierra en esta porción, es conocida con el nombre de arroyo *El Muerto*, el cual nace a una elevación de 2,950 metros sobre el nivel del mar y en una distancia de 7 kilómetros con dirección al noroeste llega a la planicie (2,325 m s.n.m.).

En la porción sur, existen algunas corrientes menores, también de carácter intermitente, denominadas localmente arroyo *Xoconoxtle* y arroyo de *Guadalupe*.

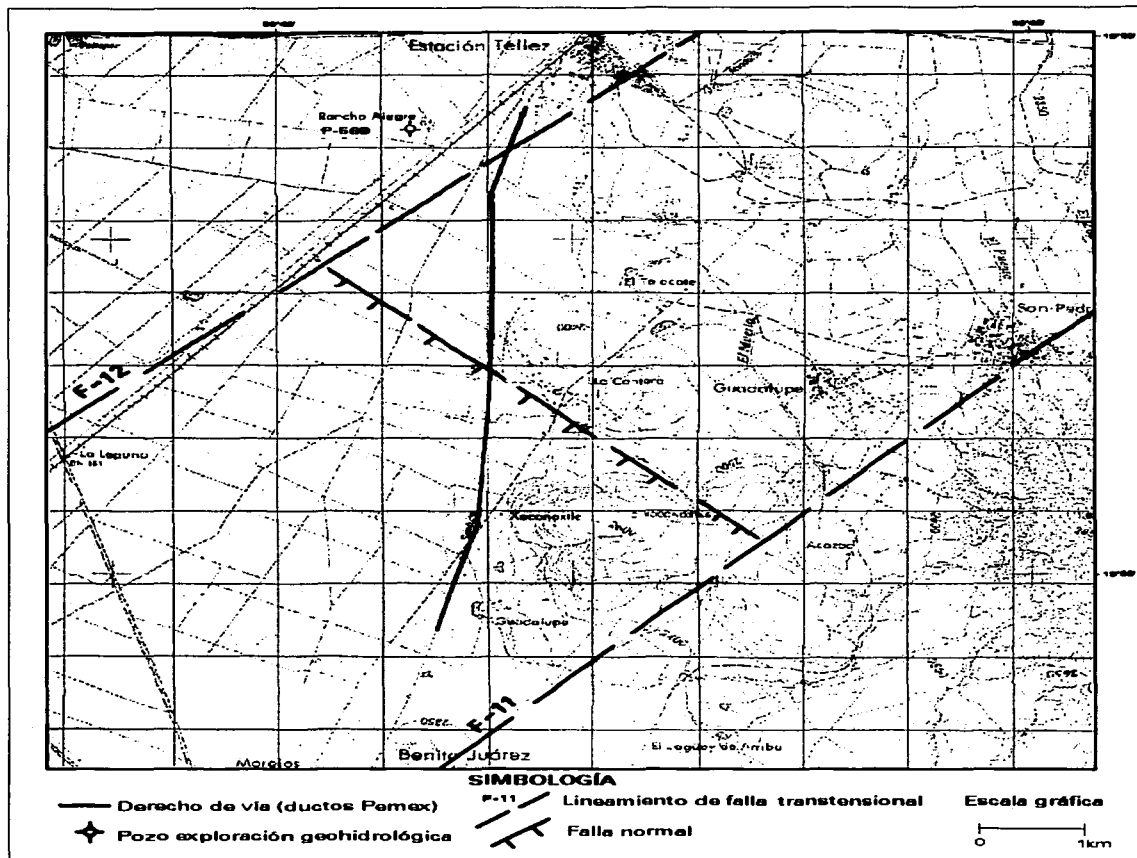


Figura VI.2.1.1. Área de *piedemonte*. Relación del derecho de vía de PEMEX con las principales estructuras geológicas.

Todos estos escurrimientos se integran a la cuenca del río Las Avenidas de Pachuca, el cual nace en el flanco sur de la sierra de Pachuca, fluyendo hacia el suroeste hasta la laguna de Zumpango.

De acuerdo con Huizar-Álvarez (1996), la cuenca de este río, cubre una superficie de 1,209 km² y conduce aguas negras de la ciudad de Pachuca y otros poblados menores.

Hidrogeológicamente, el área de la estación Téllez constituye un acuífero importante para la región, dotando de agua a las poblaciones cercanas, así como a Pachuca y al Distrito Federal. Los estudios de Huizar-Álvarez (*op. cit.*) reportan niveles del agua subterránea en esa cuenca, con profundidad de 62 m para 1976, con dirección de flujo regional hacia el sur.

Dentro del área de pozos cercanos al tramo de ductos, el denominado P-569, indicado en la figura VI.2.1.1, reportó una secuencia litológica, hasta la profundidad de 164 m constituida por una interestratificación de coladas de basalto con aglomerados y cenizas volcánicas (tobas).

En la publicación del Proyecto Lago de Texcoco, para el conjunto de pozos Tizayuca-Pachuca se reportan niveles promedio del agua subterránea con 86 m de profundidad.

VI.2.2. IDENTIFICACIÓN E IMPLICACIÓN DE LOS PELIGROS

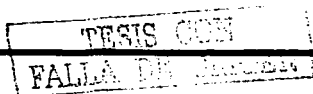
Desde el punto de vista geológico, los posibles peligros para este tramo de ducto, serían: el efecto de erosión generado por los escurrimientos provenientes de la sierra, y el posible peligro relacionado con los sistemas de fallas activas denominados F-11 y F-12 así como el efecto secundario que alguna fuga pudiera causar en el acuífero del sitio, el cual, como se mencionó, reviste gran importancia para la región.

En la carta de susceptibilidad a corrimiento de tierras en la Cuenca de México, realizada por Ortiz *et al.* (1992) se indica que en este flanco de la Sierra de Los Pitos, se tienen potencialmente deslizamiento de tierras y flujos de escombros tanto en forma potencial como activa, condicionados a fenómenos hidrometereológicos, especialmente sobre el piedemonte (Lugo Hubp y Salinas, 1996 y Lugo Hubp *et al.*, 1997(a)).

De tal forma y tomando en consideración los aspectos de cambios climáticos que a últimas fechas se han presentado en varios estados del país (Cenapred, 2001), con eventos que han afectado a diversas instalaciones y causado la pérdida de vidas humanas, este peligro se hace más factible.

VI.2.3. FACTORES POR IDENTIFICAR EN EL PIEDEMONTE

En el caso del tramo de ductos localizados al poniente de la sierra de Los Pitos, los fenómenos naturales que se definieron, corresponden principalmente a: erosión (impacto hidráulico) y deslizamiento de laderas, observándose como posible efecto posterior, la contaminación del acuífero de Téllez.



Para identificar los efectos que ocasionaría el impacto hidráulico, se determinaron los siguientes parámetros:

- Dimensiones de la subcuenca
- Hidrometría
- Climatología
- Contexto geológico

Los posibles deslizamientos de laderas se identificaron mediante la medición de los siguientes parámetros:

- Definición detallada del contexto geológico e hidrogeológico local.
- Establecimiento de las unidades geomecánicas del sitio.
- Efectos que se han presentado en las obras civiles de la localidad.

Con respecto al efecto secundario correspondiente a la posibilidad de contaminación en el acuífero de Téllez, se analizaron los mecanismos de transporte de los contaminantes, definiendo los parámetros de:

- Profundidad del nivel freático (piezometría)
- Transmisibilidad
- Permeabilidad
- Gradiente hidráulico
- Dirección de flujo del agua subterránea

VI.3. MONTAÑA

El tramo de ductos seleccionado, se localiza al noreste de la ciudad de Pachuca de Soto, capital del estado de Hidalgo (figura VI.3.1), abarcando una longitud aproximada de 3 kilómetros.

Tiene una orientación general de sur a norte, ascendiendo por la ladera sur del cerro de La Mesa.

VI.3.1. MARCO GEOGRÁFICO Y GEOLÓGICO

La elevación con respecto al nivel medio del mar en el tramo, va de la cota 2,440 m a la 2,660 m, cruzando en dos ocasiones la carretera federal Pachuca-Real del Monte.

En el tramo del extremo sur, asciende por una pendiente que se inicia de la cota 2,440 m a la 2,620 m, continuando con dirección al noreste por una meseta con alturas de 2,620 m a 2640 m, para atravesar finalmente por una pequeña barranca cuyo cauce desciende a la cota 2,580 m, afluente del río Las Avenidas en la cuenca alta del mismo. Aproximadamente a 1.5 km aguas abajo de este cruce de arroyo, se encuentra una pequeña presa para control de avenidas, utilizada también para dotar de agua potable a Pachuca.

Las unidades litológicas presentes, están constituidas por rocas ígneas extrusivas del tipo de las tobas, andesitas y brechas ígneas, del Terciario (Oligoceno-Mioceno), intensamente fracturadas y alteradas por procesos hidrotermales y de mineralización.

De acuerdo con la cartografía geológica de INEGI, las formaciones presentes en el área, integran al denominado Grupo Pachuca.

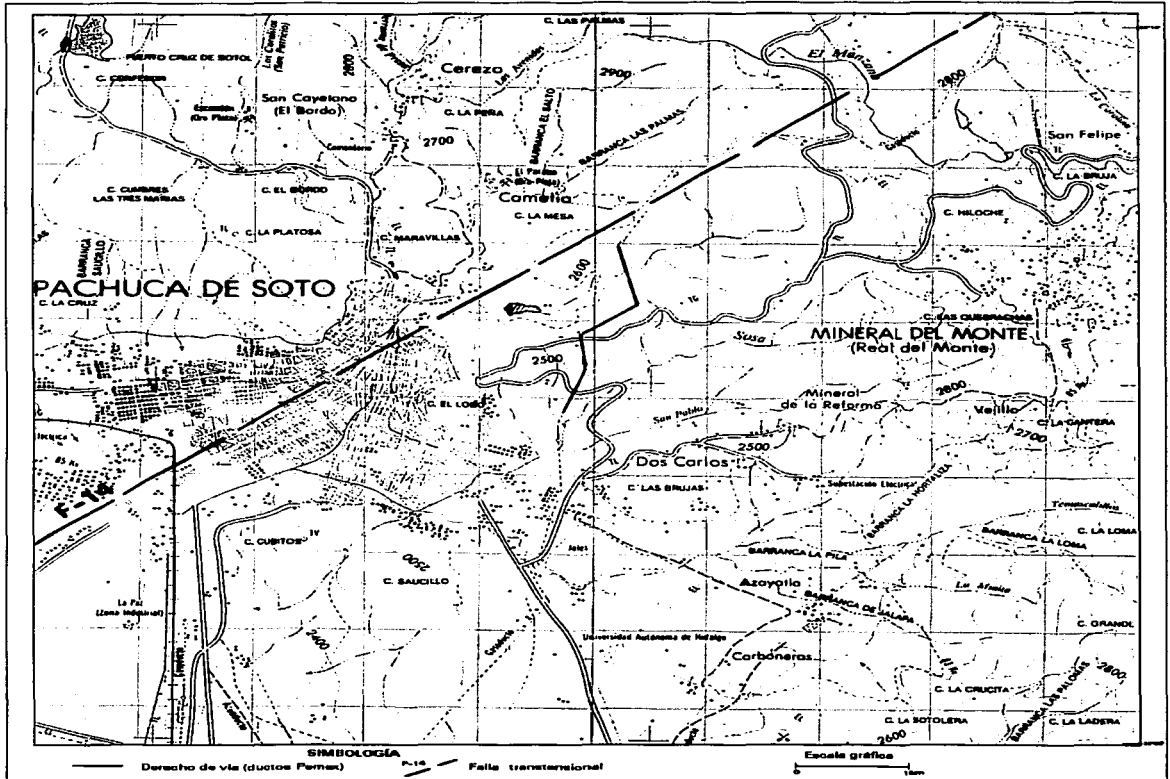


Figura VI.3.1. Área de *Montaña*. Relación del derecho de vía de PEMEX con los principales lineamientos de falla transensional

También son frecuentes los diques y vetas mineralizadas que tienen las mismas orientaciones que las fracturas y fallas de la región (NW-SE, N-S, E-W y NE-SW). En esta área, Marín-Córdova *et al.* (1986(b)), determinaron la presencia de una falla transtensional NE-SW, denominada F-14, la cual se muestra en la figura VI.3.1

Cubren a estas rocas en la parte sur del tramo seleccionado, material de talud, producto de la erosión de las partes altas.

Cabe hacer mención de que en el área también se han presentado desde hace mucho tiempo, hundimientos producidos por el colapso de múltiples obras mineras tales como túneles y socavones, teniéndose el caso más reciente en el cerro *Cubitos* (Marín-Córdova, 1997(a)), el cual afectó a varias decenas de casas en el sur de la capital del estado (Lara-Sánchez *et al.*, 1997).

Las principales corrientes que cruzan a los ductos, corresponden a los arroyos intermitentes *Sosa* y *La Mesa*, afluentes del río de *Las Avenidas*, que nacen a elevaciones de 2,900 m s.n.m. y descienden con rumbo al suroeste.

Desde el punto de vista del agua subterránea, a estos niveles no se tienen acuíferos someros.

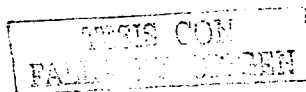
VI.3.2. IDENTIFICACIÓN E IMPLICACIÓN DE LOS PELIGROS

En este aspecto, los peligros que se identifican con posibilidades de afectación a los ductos, son: erosión por impacto hidráulico (socavación), en el tramo donde los ductos cruzan el pequeño cauce; deslizamiento de laderas; influencia de fracturas y fallas posiblemente activas y hundimientos por colapso de obras mineras.

Los efectos secundarios podrían consistir en: contaminación de acuíferos profundos y de embalses que almacenan agua utilizada para riego y consumo humano.

VI.3.3. FACTORES POR IDENTIFICAR EN LA MONTAÑA

En esta región geográfica de la Cuenca de México, se seleccionó un tramo del *derecho de vía* de los ductos petroleros al noreste de la ciudad de Pachuca.



De acuerdo con su ubicación respecto al contexto geológico e hidrogeológico, los procesos naturales que pudieran ocasionar peligro a ellos, serían:

- Erosión (Impacto hidráulico)
- Inestabilidad de ladera
- Estructuras neotectónicas
- Hundimiento por colapso de obras mineras.

Originado este último por actividades antropogénicas.

El efecto posterior una vez afectados los ductos, sería la contaminación de aguas superficiales y subterráneas.

Para la adecuada evaluación de la influencia de los mencionados procesos se considera necesario determinar los siguientes factores:

- Definir con detalle el marco geológico e hidrogeológico local.
- Establecer las unidades geomecánicas del sitio
- Correlacionar las características geológicas con la infraestructura de las obras mineras.

Por lo que respecta al efecto secundario, se analizarán los mecanismos de transporte de los contaminantes, tanto en el agua superficial como subterránea, definiendo los parámetros de permeabilidad, transmisibilidad y dirección de flujo.

Concluidas estas actividades se tuvieron las bases cualitativas del conocimiento con respecto al peligro geológico-ambiental, en ductos petroleros instalados en la Cuenca de México, para obtener posteriormente en forma precisa, los posibles impactos que sobre esos tramos de derechos de vía puedan generar los procesos de naturaleza geológica, con lo cual se podrán implementar medidas preventivas y de monitoreo.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

DE

CAPÍTULO VII

PELIGRO GEOLÓGICO Y

AMBIENTAL EN LAS ÁREA

ESPECÍFICAS

TESIS CON
FALLA DE

CAPÍTULO VII

PELIGRO GEOLÓGICO Y AMBIENTAL EN LAS ÁREAS ESPECÍFICAS

VII.1. PLANICIE

En el área de la planicie que abarca aproximadamente 2,000 km² de la Cuenca de México, se localizó mediante el análisis de la información previa, una porción ubicada al norte del ex-Lago de Texcoco (1), por donde atraviesan ductos de PEMEX, en la que se llevó a cabo la investigación detallada.

La información previa a la que se hace referencia, estuvo constituida principalmente por aquella de carácter geológico, geotécnico e hidrogeológico de las unidades cuaternarias, realizadas por diversos autores (geólogos e ingenieros civiles), siendo de interés fundamental (por los resultados obtenidos), la correspondiente a las fallas transtensionales noreste - suroeste (Marín-Córdova *et al.*, 1986(b) y 2001), ya que a nivel regional permitió detectar un tramo del *derecho de vía* de los ductos, que fue reubicado como se observa en la figura VII.1.1.

Comparando las cartas de INEGI de los años 1971 y 1994, se evidencia la modificación que Petróleos Mexicanos tuvo que realizar en ese tramo de ductos, el cual está comprendido entre las fallas transtensionales denominadas F-8 y F-9, mismas que coinciden con las trazas de los ríos Papalotla y Teotihuacán (Grande) respectivamente, en algunos de sus tramos.

VII.1.1. SUBSIDENCIA

En este aspecto se analizaron con detalle las columnas estratigráficas de los Sondeos 29 y 126 (Murillo y García, 1978), localizados en los municipios de Atenco y Tepexpan (figura VII.1.1) respectivamente; mencionándose a continuación sus datos petrofísicos.

SONDEO No. 29 PROF. EN M	PROF. TOTAL 8.30 M CLASIFICACIÓN (SUCS)	PROF. NAF. 3.10 M CONTENIDO DE AGUA (%)
0.00 - 1.30	CL	12
1.30 - 4.80	SM	19
4.80 - 7.00	CH	46
7.00 - 8.30	MH	70

TESIS CON
FALLA DE COPYRIGHT



Fotografía 1. Materiales arcillosos en la porción superior de la secuencia lacustre, que se aprovechan para la fabricación de ladrillos. Este banco se ubica al sur del derecho de vía, aproximadamente a 1 km.

En la tabla VII.1.1 se presentan las propiedades índice reportadas en un total de 99 Sondeos de mecánica de suelos, perforados en el ex-Lago de Texcoco (Murillo y García, *op. cit.*).

TABLA VII.1.1
VALORES DE PROPIEDADES ÍNDICE EN LAS UNIDADES LITOLÓGICAS
DEL EX-LAGO DE TEXCOCO

PROPIEDADES	CONTENIDO NATURAL DE AGUA w%		LÍMITE LÍQUIDO LL(%)		LÍMITE PLÁSTICO LP (%)		DENSIDAD DE SÓLIDOS S _s		RELACIÓN DE VACÍOS		RESISTENCIA AL CORTE S _{qu}	
	VALOR MEDIO	n	VALOR MEDIO	n	VALOR MEDIO	n	VALOR MEDIO	n	VALOR MEDIO	n	VALOR MEDIO	n
Unidad superficial	61	112	99	15	44	15	25	24	1.7	23	0.15	23
Unidad arcillosa superior	303	3355	301	624	71	624	246	2479	7.3	2466	0.13	1707
1ª capa dura	59	109	71	24	37	24	253	9	1.2	9	0.38	8

N = Número de determinaciones

S_{qu} = Resistencia al corte en prueba de compresión no confinada.

Murillo y García, 1978

Por lo que respecta a la *compresibilidad* en las unidades litológicas del ex-Lago de Texcoco, los mismos autores han manifestado que son más desfavorables que las de la Cd. de México, distinguiéndose dos áreas: una similar al área virgen y otra en la que las arcillas se han preconsolidado por bombeo (Cortés, 1999).

Para la Unidad Arcillosa Superior, el coeficiente de compresibilidad medio reportado en la proximidad de la carga de preconsolidación es de 4.14 cm²/kg. El valor máximo es de 10 cm²/kg, en el

TESIS CON
FALLA

área afectada por secado, disminuyendo con la profundidad (tabla VII.1.2). Con respecto a las *propiedades dinámicas* y debido a la gran deformabilidad de las arcillas, se han investigado sus propiedades dinámicas de vibración forzada no consolidada no drenada, con especímenes inalterados (tabla VII.1.3).

TABLA VII.1.2
VALORES DE PROPIEDADES

UNIDAD	PESO VOLUMÉTRICO (γ) ton/m ³	COHESIÓN DEL MATERIAL (c) ton/m ²	ANGULO DE FRICCIÓN EN GRADOS	COEFICIENTE DE COMPRESIBILIDAD cm ² /kg	ÍNDICE DE COMPRESIBILIDAD cm ² /kg
SUPERFICIAL	1.4	1.0	20		
ARCILLOSA SUPERIOR	1.15	0.5 a 1.0	-	4.14	Entre 11 y 0.8
CAPA DURA	1.5 a 1.6	0 a 10	25 a 36		

Murillo y García, 1978

TABLA VII.1.3
PROPIEDADES DINÁMICAS

PROFUNDIDAD (m)	MÓDULO DINÁMICO DE RIGIDEZ G (kg/cm ²)	MÓDULO DINÁMICO DE ELASTICIDAD E (kg/cm ²)	RELACIÓN DE POISSON (μ)
0 a 17	17.4	52.2	0.499
17 a 30	32.9	98.3	0.498

Murillo y García, 1978

De acuerdo con los múltiples resultados de los ensayos de mecánica de suelos, se observa que los materiales arcillosos en los que se ubica este *derecho de vía*, presenta alta compresibilidad y baja resistencia al esfuerzo cortante, por lo que se pueden presentar movimientos verticales importantes tanto a corto plazo (instantáneos) como a largo plazo, así como movimientos diferenciales.

VII.1.2. NEOTECTONISMO

El tramo del *derecho de vía* correspondiente a la planicie, fue seleccionado a nivel preliminar por su ubicación con respecto a las fallas transtensionales regionales denominadas 8 y 9 (figura VII.1.2.1) por Marín-Córdova *et al.* (1986).

Se ha interpretado con la misma información regional, que ambas fallas constituyen el graben México – Tepexpan – Teotihuacán. Este graben corresponde con la denominada *Fosa Peñones*, descrita por Mooser en 1975.

Morfológicamente coinciden con las trazas de los ríos San Juan Teotihuacán y Papalotla, en algunos de sus tramos, registrándose epicentros alineados con ellos, siendo los más cercanos al área No. 1, los numerados 2, 4, 5, 9, 12, 13, 14, 15 y 16 en las figuras VII.1.1 y VII.1.2.1.

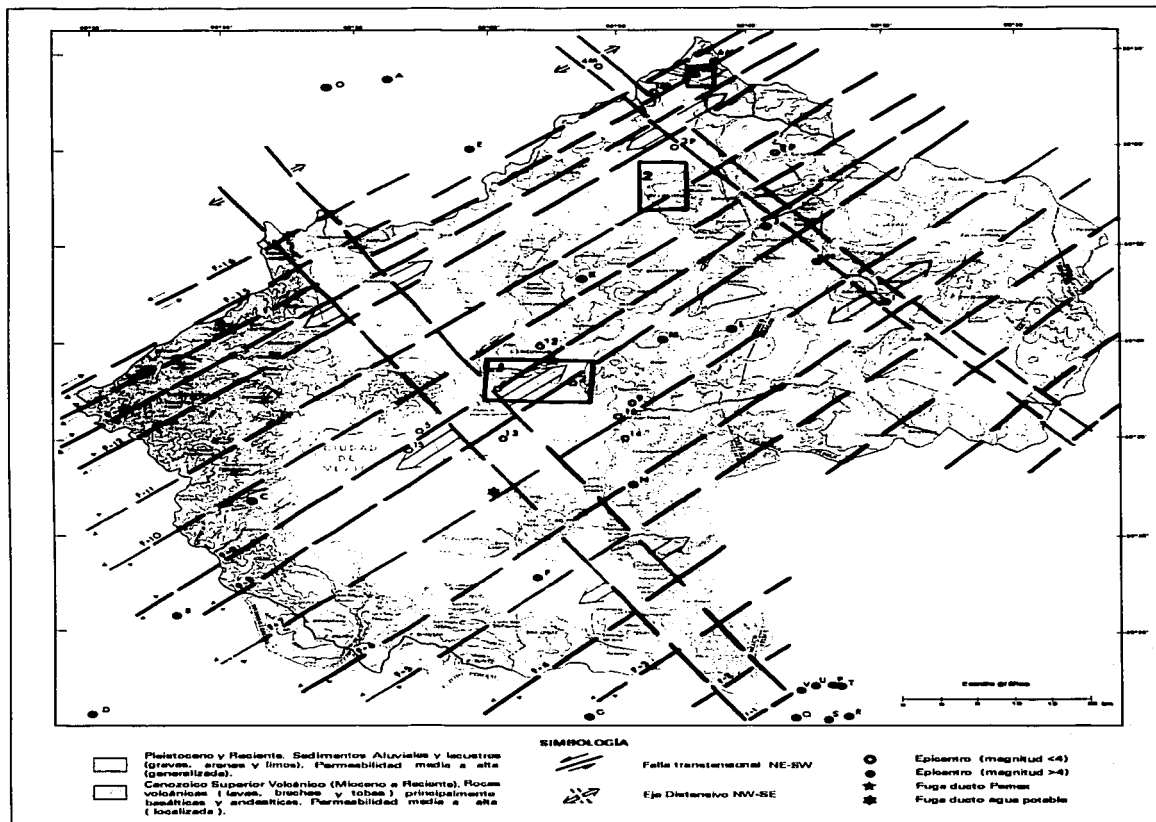


Figura VII.1.2.1. Neotectonismo en la Cuenca de México.

Entre estas dos estructuras geológicas (F-8 y F-9), se identifican diversos agrietamientos con orientación NE - SW que afectan tanto a la carretera principal Texcoco - Chiconautla, como los caminos secundarios Tequisistlán - Santa Isabel Ixtapan - San Cristóbal Nexquipayac, así como los sistemas de drenaje y agua potable, en los poblados ubicados entre las mismas (figura VII.1.1).

Debido a la afectación del *derecho de vía* correspondiente al trazo de 1971, localizado entre las estructuras F-8 y F-9, este fue reubicado hacia el noreste (figura VII.1.1); sin embargo continúa bajo los mismos efectos que le producen tanto los asentamientos de los sedimentos lacustres, como los de las fallas activas mencionadas.

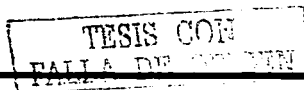
En el año de 1998, uno de los sismos ocasionó la afectación de la tubería de agua potable del ramal La Caldera – Nezahualcoyotl, que constituye la línea primaria de conducción, integrada por tubería de acero de 42" de diámetro, con espesor de pared de ¼ de pulgada (fotografías 2 y 3), con la consecuente fuga de agua.



Fotografía 2. Tubería de agua potable afectada por un sismo en el año de 1998, correspondiente al ramal La Caldera Nezahualcoyotl.

Por lo que respecta a los ductos de PEMEX, el mismo año se presentó una fuga en el sitio marcado en las figuras VII.1.1 y VII.1.2.1; sin embargo ésta, de acuerdo con PEMEX, se debió a una toma clandestina, sin que se haya podido comprobar por el autor en forma directa, ya que en la fecha de la visita ya había sido reparada (fotografía 4).

En la misma figura VII.1.2.1, se observa que ambas fugas debidas a roturas de las tuberías, están asociadas a los lineamientos de falla F-7 y F-9, así como en las cercanías del eje distensivo Popocatépetl-Tequisquiác-Huehuetoca.





Fotografía 3. Otra vista de la tubería de agua potable afectada por sismo (1998), el ramal La Caldera-Nezahualcoyotl.

Con base en la información obtenida en el Servicio Sismológico Nacional, entre los años de 1974 a 1998, cerca del área estudiada se han presentado diversos sismos, con epicentros indicados en la figura VII.1.2.1.



Fotografía 4. Área donde se presentó una fuga al parecer por toma clandestina en los ductos de PEMEX.

La magnitud de ellos y su profundidad se indican en la tabla VII.1.2.1.

TABLA VII.1.2.1
SISMOS LOCALES CERCANOS AL ÁREA DE LA PLANICIE (1974 – 1998)

No.	FECHA	PROFUNDIDAD (k m)	MAGNITUD
2	7/Enero/1982	5	2.6
4	26/Sept./1984	5	< 3
5	19/Nov./1984	-	< 3
9	31/Enero/1994	30	3.6
12	2/Junio/1995	40	3.4
13	26/Julio/1997	53	3.4
14	23/Junio/1998	8	3.3
15	17/Feb./1977	16	< 3
16	11/Oct./1977	4	< 3

Servicio Sismológico Nacional, UNAM, 2000.

Estos sismos locales que han ocurrido en el interior de la Cuenca de México, no obstante ser de magnitud menor a los que se generan en la costa del Pacífico, también representan un peligro para las obras civiles que se localizan en su cercanía.

El epicentro más cercano al área estudiada, con magnitud mayor corresponde al punto *M*, que alcanzó 4.1 en febrero de 1994; reportándose otro a una distancia menor (Punto 2), con magnitud de 2.6 el 7 de enero de 1982.

Estos epicentros, son algunos de los que se encuentran alineados con las estructuras geológicas definidas para esta área, denominadas F-8 y F-9, considerándose que representan un peligro alto para los ductos petroleros, por la canalización en ellas de la energía liberada.

VII.1.3. EROSIÓN (IMPACTO HIDRÁULICO)

Este efecto fue analizado en dos sitios, correspondiendo con las intersecciones de las principales corrientes, siendo estas el río Papalotla y el río San Juan Teotihuacán (Grande) (figura VII.1.1).

Por lo que respecta a la Cuenca del río Papalotla, se tiene una superficie de 200 km² y pendientes menores a $S = 0.01$ en su tramo de la planicie (últimos 7 km).

El río Grande presenta una superficie de su cuenca de 507 km² y pendientes de $S = 0.01$ como se muestra en la figura VII.1.1. Los datos principales reportados en las estaciones de aforo son (Cruickshank García, 1995):

- *Río San Juan Teotihuacán.*- Gasto medio 0.069 m³/seg, gasto mínimo 0.000 m³/seg, volumen anual 2.186 Hm³.

- *Río Papalotla*.- Gasto medio 0.103 m³/seg, gasto mínimo 0.000 m³/seg, volumen anual 3.244 Hm³.

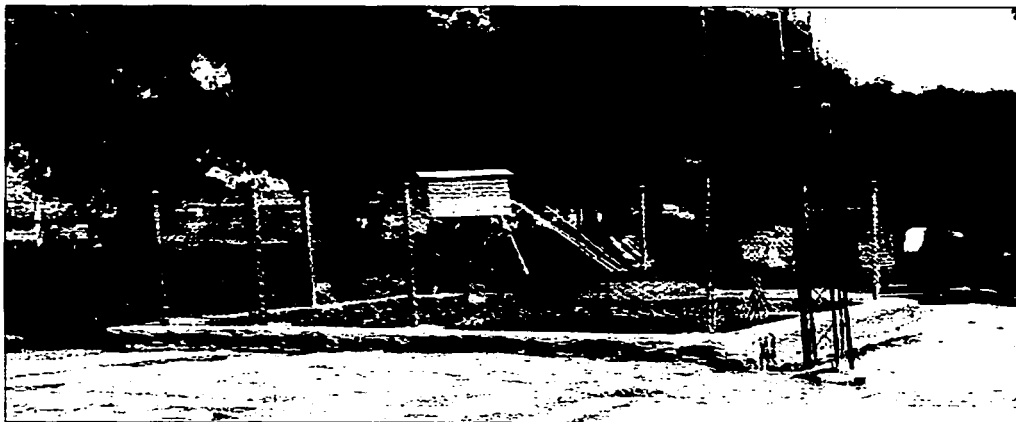
Los gastos máximos instantáneos han sido:

CORRIENTE	ESTACIÓN	ÁREA DE LA CUENCA km ²	GASTO MÁXIMO OBSERVADO		FECHA	PERÍODO OBSERVADO
			m ³ /seg.	m ³ /seg./ km ²		
R.S.J. Teotihuacán	Tepexpan	507.5	42.6	0.084	20/X/47	1945 – 1985
R. Papalotla	La Grande	200	124	0.619	17/VIII/55	1945 – 1985

El río San Juan Teotihuacán.- Su cauce natural llega a la zona Federal por el noreste; en el estiaje sus aguas son casi nulas porque se aprovechan en terrenos ejidales contiguas.

El río Papalotla.- Es el más caudaloso de las subcuencas del oriente y llega a la zona federal por dos brazos: El Santa Rosa y el San Bartolo.

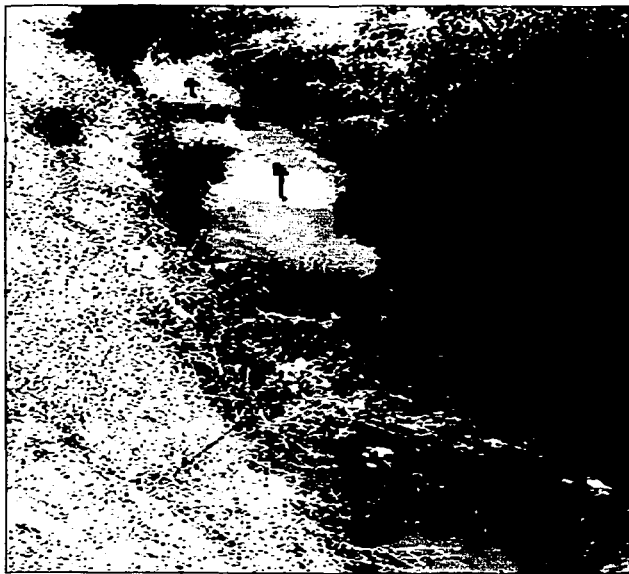
Las mediciones de los escurrimientos fluviales en ambas corrientes se obtienen en las estaciones de aforo denominadas Tepexpan y La Grande (fotografías 5 y 6), para los ríos San Juan Teotihuacán y Papalotla respectivamente.



Fotografía 5. Estación de aforo *La Grande*, en la margen izquierda del río Papalotla.



Fotografía 6. Vista hacia aguas abajo del sitio correspondiente a la estación de aforo La Grande.



Fotografía 7. Vista hacia aguas abajo del río Papalotla en el sitio de cruce de los ductos de PEMEX.

Con esta investigación se definió que el peligro de impacto hidráulico debida a estas dos corrientes principales en el área, era menor en la ubicación anterior del corredor de los ductos, debido a que el terraplén de la carretera Texcoco - Lechería, podía funcionar como bordo de contención, en caso de avenidas extraordinarias; no así en el trazo actual que se ubica aguas arriba de dicha carretera, en su cruce con el río Papalotla (fotografía 7) y con el río San Juan Teotihuacán.

VII.1.4. CONTAMINACIÓN DEL ACUÍFERO LOCAL

Para determinar el impacto que se pudiera ocasionar al acuífero local, se realizó el análisis para evaluar el potencial de contaminación del acuífero, calculando el factor de tránsito de la infiltración, con base en las características litoestratigráficas del subsuelo, sus coeficientes de permeabilidad y la profundidad al manto freático (Marín-Córdova, 1997(b)).

Respecto a la columna litoestratigráfica del área y tomando la información de los pozos cercanos, se elaboró la sección geológica A-A' (figura VII.1.4.1) con orientación suroeste - noreste, utilizando la clasificación litológica de los pozos Pc-146 y S- 126, la cual se describe a continuación:

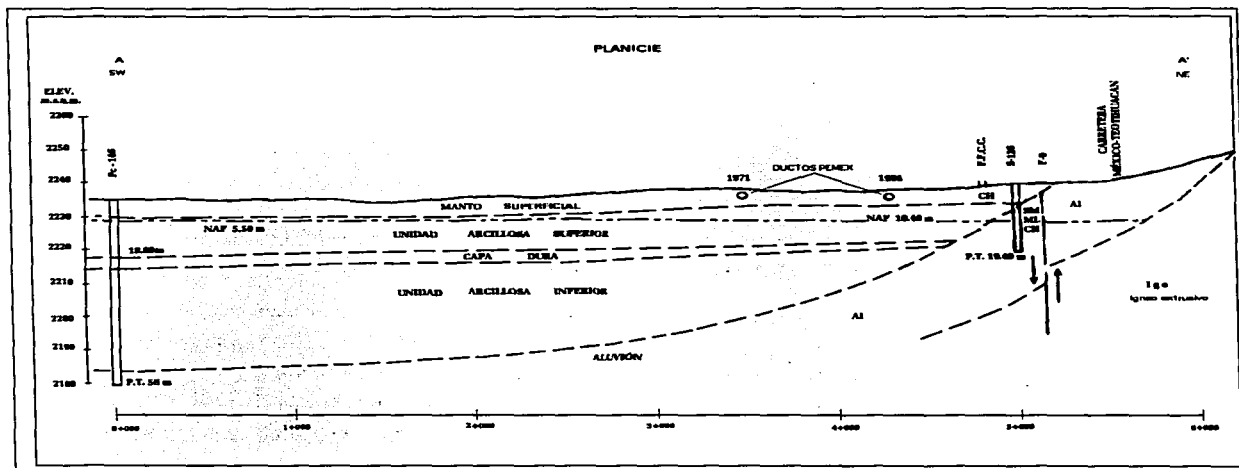


Figura VII.1.4.1. Sección geológica (planicie).

POZO Pc-146 Profundidad (m)	ELEVACIÓN 2235 m s.n.m. Descripción Litológica.
0.00 - 5.00	Arcillas, arenas limosas y limos arcillosos (Manto Superficial)
5.00 - 18.00	Interestratificación de arcillas con algunos horizontes de limo y arena fina. (Unidad Arcillosa Superior)
18.00 - 21.50	Materiales tobáceos limo arenosos y areno limosos (Capa dura).
21.50 - 51.00	Arcillas con lentes y estratos limo - arenosos. (Unidad arcillosa inferior)
51.00 - 56.00	Arenas, arcillas y algunas gravas (Aluvión).

El nivel de aguas freáticas se reportó a 5.50 m

POZO S-126 Profundidad (m)	ELEVACIÓN 2239 m s.n.m. Descripción Litológica.
0.00 - 5.50	Arcillas y limos arcillosos. (Manto Superficial), clasificado como ML y CH de acuerdo con el SUCS.
5.50 - 19.40	Interestratificación de arenas con limos y arcillas, clasificados como SM, ML y CH de acuerdo con el SUCS.

El nivel de aguas freáticas se reportó a 10.40 m.

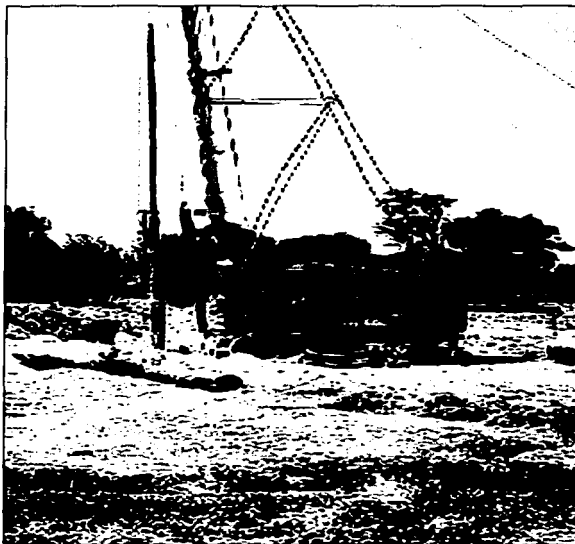
Durante los reconocimientos de campo, se encontró un equipo de perforación de percusión, en el sitio denominado Ramones 2 (fotografías 8 y 9), con el cual se estaba llevando a cabo la perforación de un pozo de reposición, con profundidad de 160 m del cual se obtuvieron las siguientes muestras litológicas:

POZO RAMONES 2 Profundidad (m)	ELEVACIÓN 2235 m s.n.m. Descripción Litológica.
0.00 - 20.00	Arcilla con algo de arena y limo.
20.00 - 23.00	Toba limo - arenosa.
23.00 - 60.00	Arcillas, limos y arenas con algunas gravas.
60.00 - 64.00	Toba areno limosa.
64.00 - 105.00	Arenas, limo y gravas.
105.00 - 160.00	Fragmentos de aglomerados

El primer nivel de agua encontrado en este pozo, se localizó a 4.00 m de profundidad, además para continuar la exploración. El nivel de explotación final fue de 40.0 m.

Para poder analizar la posibilidad de contaminación por hidrocarburos hacia el subsuelo y al primer acuífero somero, se realizaron tres exploraciones denominadas PE-1, PE-2 y PE-3 (figura VII.1.1) con profundidad máxima de 4.00 m, utilizando muestreadores manuales (fotografía 9-A); en ellos se llevaron a cabo pruebas de permeabilidad tipo Lefranc para terrenos someros, con la finalidad de calcular el coeficiente de permeabilidad K cuyas unidades se indican en cm/seg y el tiempo que tardarían los hidrocarburos en llegar al nivel estático.

Los materiales atravesados en los tres sondeos, corresponden a arcillas y limos con escasa arena.



Fotografía 8. Equipo de perforación por percusión en el sitio denominado *Ramones 2*.
Donde se perforó un pozo de reposición a 160 m de profundidad.



Fotografía 9. Pozo que se encuentra actualmente en operación en el sitio denominado *Ramones 2*.



Fotografía 9-A. Sondeo exploratorio con equipo manual, para la realización de pruebas de permeabilidad tipo Lefranc, para terreno somero.

Las pruebas de permeabilidad tipo Lefranc realizadas en los pozos, presentaron valores de 2.0×10^{-5} , 4.7×10^{-6} y 5.4×10^{-6} cm/seg en los pozos PE-1, PE-2 y PE-3 respectivamente.

Se puede apreciar que los valores de permeabilidad son bajos; sin embargo debido a que el primer nivel de aguas freáticas se localiza a poca profundidad (<10 m), se calculó el factor de tránsito de la infiltración para el caso de alguna fuga.

El coeficiente de infiltración (f) expresado en seg^{-1} , relaciona la velocidad promedio final de infiltración, contra los diversos espesores de los materiales que constituyen la zona no saturada, incluyendo además la porosidad de ellos, de acuerdo con la formula siguiente:

$$f = Ki/Ud$$

siendo:

K = conductividad hidráulica promedio de los materiales de la zona no saturada en m/seg.

i = gradiente hidráulico (adimensional).

U = porosidad promedio efectiva de los materiales de la zona no saturada (adimensional).

d = espesor de la zona no saturada en metros.

Para este caso, los valores considerados en el cálculo del factor de tránsito de la infiltración (f), son:

$$K = 1.0 \times 10^{-7} \text{ m/seg.}$$

$$d = 5.0 \text{ m}$$

$$U = 0.30$$

$$i = 1$$

$$\text{Resultando: } f = 1.0 \times 10^{-7} (1) / 0.30 \times 5$$

$$f = 6.6 \times 10^{-8} \text{ seg}^{-1}$$

Si tomamos en cuenta que el coeficiente fijado en la Norma Oficial Mexicana NOM-083-ECOL-1966 para el factor de tránsito de la infiltración es de $f < 3 \times 10^{-10} \text{ seg}^{-1}$, se observa que el factor obtenido es bastante mayor al establecido, ya que contaminaría al agua subterránea del primer nivel de aguas freáticas, en menos de los 100 años establecidos por la norma.

Para el cálculo de la velocidad promedio vertical, se empleó la fórmula

$$V = Ki/U$$

Siendo

$$K = 1.0 \times 10^{-7} \text{ m/seg.}$$

$$U = 0.30$$

$$i = 1$$

$$\text{Se tiene: } V = 1.0 \times 10^{-7} (1) / 0.30$$

$$V = 3.0 \times 10^{-7} \text{ m/seg.}$$

Con este valor se alcanzaría a dicho nivel de aguas freáticas en un lapso de 200 días.

Si además se toma en cuenta que la permeabilidad de los materiales granulares de los sedimentos lacustres, se ve incrementada por diversas fracturas (grietas), originadas por: 1) la pérdida de humedad de las mismas 2) la sobre explotación de los acuíferos y 3) las relacionadas con las fallas activas, el peligro de contaminación en corto tiempo al nivel de aguas freáticas somero, es más alto.

VII.1.5. INFILTRACIÓN DE HIDROCARBUROS A DUCTOS URBANOS

Este peligro se presentaría, si debido a una ruptura accidental o provocada en los ductos, se tuviera fuga de hidrocarburos, infiltrándose hacia el subsuelo, hasta el nivel freático somero (menor de 5.0 m), penetrando hacia el interior de los ductos urbanos.

Habiéndose analizado la velocidad de infiltración en los sedimentos lacustres y teniendo el conocimiento de la existencia de un gran número de instalaciones urbanas e industriales, que debido al descontrolado crecimiento del área conurbada de la Ciudad de México, con la consecuente falta de planeación y construcción de una infraestructura adecuada, el peligro de infiltración de hidrocarburos hacia el interior de los ductos urbanos podría presentarse principalmente en los poblados de Tezoyuca, Tequisistlán, Santa Isabel Ixtapan, San Cristobal Nexquipayac, Acuexcomac y San Pablito Caminilalco.

Durante los reconocimientos de campo, se observó además en este tramo, que el *derecho de vía* de los ductos petroleros, no es respetado, construyéndose sobre de él, todo tipo de obras como es el caso concreto de la *Escuela Preparatoria Oficial No. 14* (fotografía 10) en el camino que conduce al poblado de Ocopulco, con el consiguiente riesgo para su seguridad.



Fotografía 10. Escuela construida sobre el *derecho de vía*, en la planicie estudiada.

VII.1.6. NIVEL DE SUSCEPTIBILIDAD EN LA PLANICIE

De acuerdo con las observaciones de campo y los análisis de resultados, se consideran para cada uno de los peligros geológicos al *derecho de vía* de los ductos petroleros, los siguientes diagnósticos:

PELIGRO	NIVEL DE SUSCEPTIBILIDAD	DIAGNOSTICO
SUBSIDENCIA	ALTA	<p>Los materiales de la Unidad Arcillosa Superior, son altamente compresibles y con baja resistencia al esfuerzo cortante, por lo que los movimientos verticales tanto instantáneos como a largo plazo, son de magnitud importante.</p> <p>El <i>derecho de vía</i> de los ductos petroleros en el área estudiada, está sujeta a hundimientos y agrietamientos regionales y locales, causados principalmente por bombeo.</p>

PELIGRO	NIVEL DE SUSCEPTIBILIDAD	DIAGNOSTICO
NEOTECTONISMO	ALTA	<p>Con los modelos estructurales antecedentes de la Cuenca de México (Mooser, 1975, Marín-Córdova <i>et al.</i>, 1986(b) y Cserna <i>et al.</i>, 1988), se determinaron como fallas activas las denominadas F-8 y F-9, identificando como un área vulnerable para los ductos, la comprendida entre ambas; con lo que se detectó el tramo de <i>derecho de vía</i>, que manifiesta problemas y que fue reubicado por parte de PEMEX hacia el norte. Sin embargo, no obstante esta nueva localización, continúa ubicado tanto en los sedimentos lacustres arcillosos, como entre las trazas de las fallas mencionadas.</p>
EROSIÓN (IMPACTO HIDRÁULICO)	ALTA	<p>Se identificaron dos sitios a lo largo del tramo de ductos seleccionado, correspondientes a su cruce con los cauces de los ríos San Juan Teotihuacán (Grande) y Papalotla, en los que se reportan avenidas máximas instantáneas registradas, de 42 m³/seg y de 124 m³/seg., en los años de 1947 y 1955 respectivamente.</p> <p>El peligro por este impacto hacia los ductos, se estima mayor en la nueva ubicación que en la anterior, en virtud de que el bordo de la carretera, podía servir de contención para el <i>derecho de vía</i> anterior. Este peligro se vería aumentado si se toma en cuenta el incremento de las precipitaciones pluviales, (dentro de los cambios cíclicos), que en los años recientes se han manifestado en varias regiones del país, como es el caso de los estados de Veracruz, Chiapas, Tabasco, Guerrero, Puebla e Hidalgo, en el año de 1999.</p>
INFILTRACIÓN DE HIDROCARBUROS A DUCTOS URBANOS	ALTA	<p>Debido al descontrolado crecimiento del área conurbada de la Ciudad de México, con la consecuente falta de planeación y construcción de la infraestructura urbana adecuada, llegando inclusive a construirse obras urbanas e industriales sobre el <i>derecho de vía</i> de los ductos, este peligro se podría presentar principalmente en los poblados de Tezoyuca, Tequisistlán, Santa Isabel Ixtapan, San Cristobal Nexquipayac, Acuexomac y San Pablito Camimilalco. Este peligro se presentaría, si debido a una ruptura accidental o provocada en los ductos, se tuviera fuga de hidrocarburos, infiltrándose hacia el subsuelo hasta el nivel freático</p>

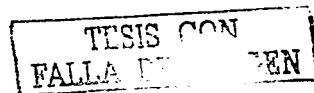
PELIGRO	NIVEL DE SUSCEPTIBILIDAD	DIAGNOSTICO
		somero (menor de 5.00 m), penetrando hacia el interior de los ductos urbanos.
CONTAMINACIÓN DEL ACUÍFERO LOCAL	ALTA	Las unidades arcillosas de la planicie, están caracterizadas por su alta porosidad y compresibilidad, por lo que han sido definidas como <i>acuitardos</i> , con niveles freáticos someros. En algunos sitios se manifiestan con gradientes piezométricos ascendentes, como es el caso del pozo PP-2 de Sosa Texcoco, aunque ya predominan con gradiente descendente. Con estudios geológicos recientes, así como de mecánica de suelos e hidrogeológicos, se han encontrado fracturas y grietas, originadas tanto por desecación, como por sobre explotación de los acuíferos y tectonismo, que ponen en contacto a los contaminantes superficiales con las unidades litológicas profundas, alterando la calidad del agua subterránea. Esta comunicación de los contaminantes en la superficie hacia niveles profundos, es más factible por las fracturas alineadas con las trazas de las fallas principales F-8 y F-9, por donde la permeabilidad de 10^{-7} cm/seg propio de la Unidad Arcillosa, se ve fuertemente incrementada a coeficientes de 10^{-3} cm/seg o más.

VII.2. PIEDEMONTE

Con las actividades desarrolladas se definió a nivel regional un tramo del *derecho de vía* de los ductos petroleros, que se ubica geográficamente al pie de la Sierra de Los Pitos (figura VII.1.2.1), indicado con el recuadro 2, en el cual se llevaron a cabo las evaluaciones de peligro geológico ambiental que en forma preliminar fueron determinadas como probables con base en la información histórica de carácter geológico e hidrogeológico.

Estos posibles peligros quedaron enmarcados en:

- Peligro por erosión (Impacto hidráulico)
- Peligro por deslizamiento de ladera.
- Peligro por neotectonismo
- Peligro de contaminación al acuífero local



A continuación se hará referencia a los resultados obtenidos del análisis de cada uno de ellos.

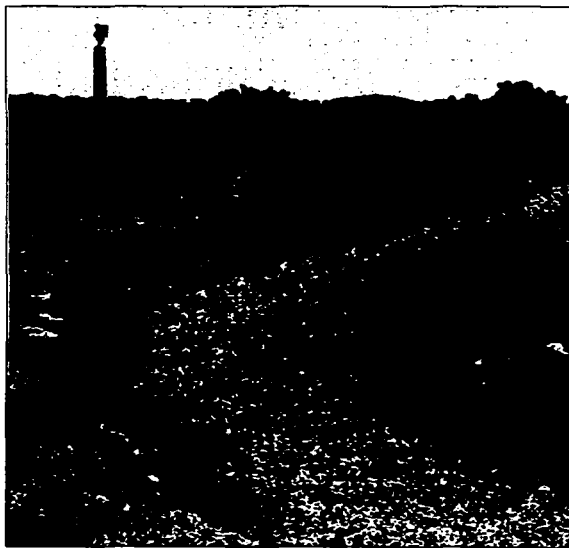
VII.2.1. EROSIÓN (IMPACTO HIDRÁULICO)

Este posible peligro fue analizado primeramente en dos sitios donde cruzan al *derecho de vía* un número igual de corrientes intermitentes, que descienden de la Sierra de Los Pitos (2950 m s.n.m.) denominados *El Muerto* y *Guadalupe*, definidos con el estudio regional. Sin embargo con el trabajo de investigación a detalle, se observó la incidencia que el río de Las Avenidas tuvo en el área, durante las lluvias de 1999, por lo que se incluyó también su análisis en el presente informe.

El sitio de cruce de ambas obras (*Río de Las Avenidas* y *derecho de vía*), se ubica en el extremo norte del tramo considerado inicialmente (figura VII.2.1.1). A continuación se hará referencia de las tres cuencas mencionadas.

VII.2.1.1. ARROYO EL MUERTO

La cuenca de este arroyo, abarca una superficie de 12 km², fluyendo con dirección sureste - noroeste, desde la elevación 2950 m s.n.m. hasta la 2325 m s.n.m., que corresponde a su cruce con el *derecho de vía* (fotografía 11), llegando al cauce del Río Las Avenidas por su margen izquierda a unos 200 metros más adelante (fotografía 12).



Fotografía 11. Sitio donde cruza el *derecho de vía*, con el arrollo de El Muerto. Las flechas indican la dirección del escurrimiento en épocas de lluvia.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

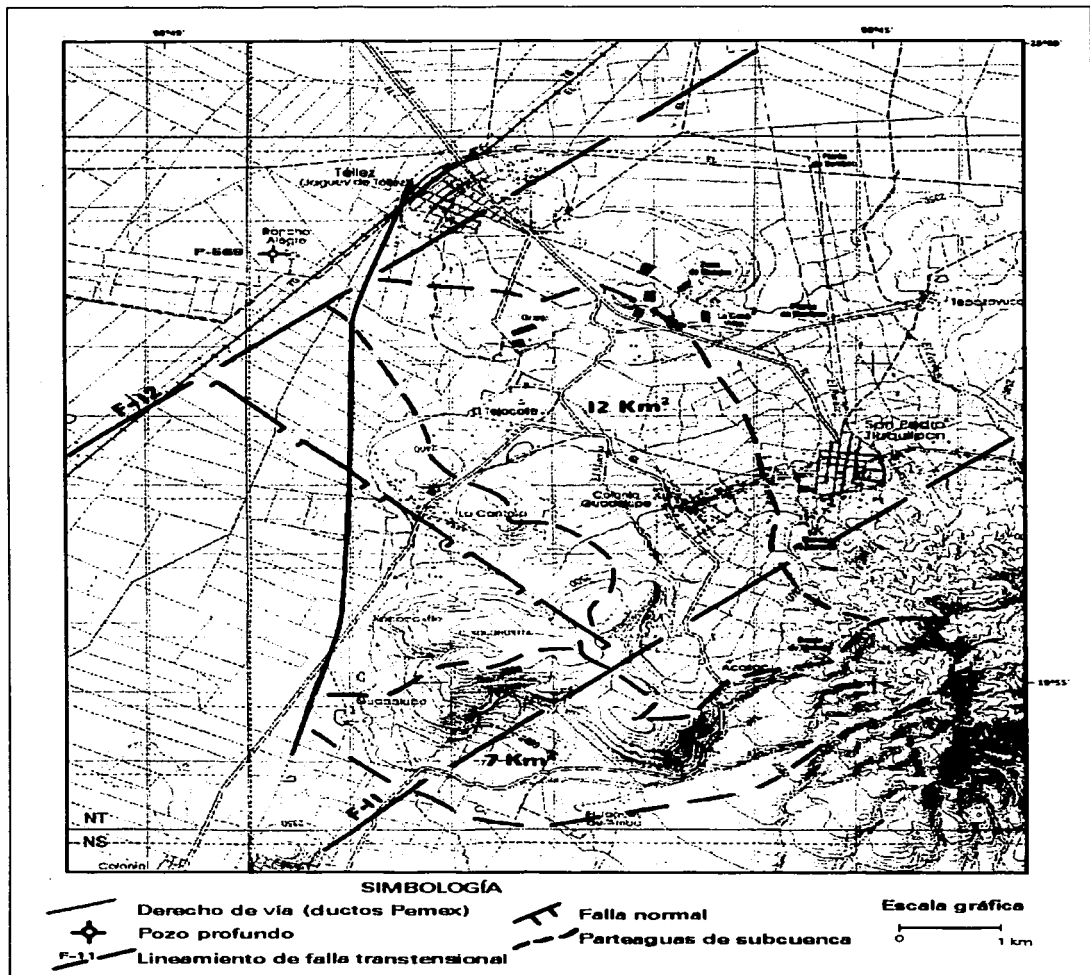


Figura VII.2.1.1. Peligro geológico y ambiental (piedemonte).

En su porción alta (elevaciones superiores a los 2600 m s.n.m.), escurre sobre rocas andesíticas intensamente fracturadas, continuando por los materiales brechoides que constituyen el gran abanico (cono de deyección) que forma el piedemonte (Zamorano *et al.*, 1997).



Fotografía 12. Margen derecha de río de *Las Avenidas*, cercana a la confluencia del arroyo *El muerto*.

La pendiente topográfica promedio obtenida de las curvas de nivel de la carta INEGI, escala 1:50,000 en la porción superior (entre las elevaciones 2600 y 2950 m s.n.m.) es de $S = 0.20$, continuando por el abanico aluvial con una pendiente promedio de $S = 0.05$ en los últimos 6000 metros, antes de llegar a su cruce con el *derecho de vía*.

La precipitación media anual en el área, de acuerdo con la carta de INEGI - E14-2, es de 500 mm y una temperatura media anual de 14 °C. El coeficiente de escurrimiento es de 0 a 5 %.

Para el cálculo del volumen máximo de escurrimiento (Q_p), y en virtud de que no existen estaciones de aforo sobre su cauce, se utilizó el método de la fórmula racional, que es semi empírico, pero que su uso se ha extendido por su sencillez (Aparicio, 1997 y Arcos, 2000).

Formula racional:

$$Q_p = 0.278 \text{ CIA en m}^3/\text{seg.}$$

donde:

C = Coeficiente de escurrimiento

A = Área drenada en km²

I = Intensidad de lluvia para una duración de tiempo de concentración (Tc)

siendo:

$$T_c = 0.0662$$

$$L = 0.77$$

$$S = 0.385$$

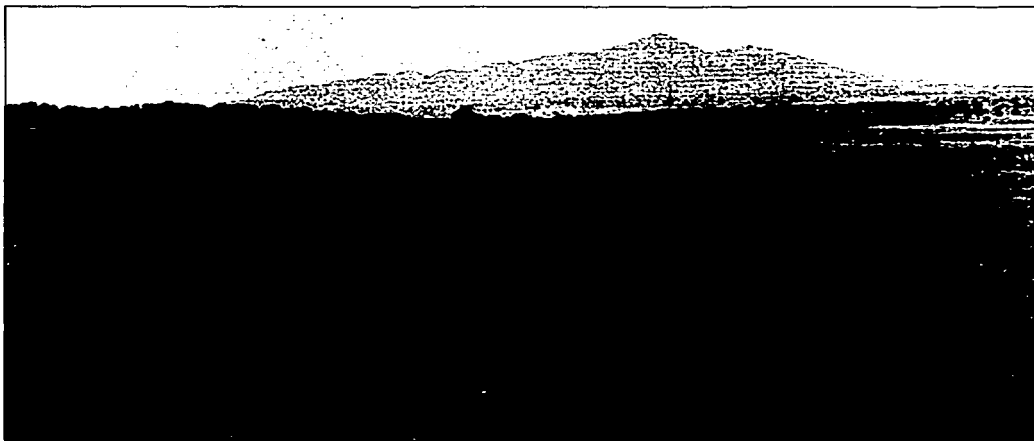
donde:

L = Longitud del cauce principal

S = Pendiente del cauce en decimales.

La intensidad de lluvia para el arroyo de El Muerto se tomó del Boletín Hidrológico No. 32 de la SARH, correspondiéndole de 25 a 45 mm/hr, dando un gasto máximo de 7.5 m³/seg.

En el reconocimiento realizado por este arroyo (fotografía 13), se pudo observar que aproximadamente a 100 m aguas arriba de su intersección con el *derecho de vía*, se ha salido el agua de cauce rompiendo el bordo de la margen izquierda (fotografía 14), con dirección hacia el suroeste. Esto ha ocurrido en varias ocasiones, de acuerdo con los lugareños, extendiéndose el agua por toda la planicie.



Fotografía 13. Vista hacia aguas arriba del arroyo *El Muerto*, al fondo se observa la sierra de *Los Pitos*.



Fotografía 14. Sitio donde en las épocas de avenidas el arroyo de *El Muerto* se ha salido, rompiendo el bordo de la margen izquierda.

VII.2.1.2. ARROYO GUADALUPE

Este arroyo se inicia también en la cima de la Sierra de Los Pitos, a una altura de 2950 m s.n.m., escurriendo en dirección oriente - poniente, cruzándose con el *derecho de vía* en la elevación 2320 m s.n.m.

El área de su cuenca es de 7 km², presentando en su porción superior (elev. 2600 y 2950 m s.n.m.) rocas andesíticas fracturadas, y en la porción inferior, brechas del abanico aluvial; únicamente la parte norte (media) se ubica en basaltos.

Las pendientes que presenta el cauce principal son similares a las del arroyo El Muerto, esto es: en la parte alta $S = 0.20$ y en los 5 kilómetros inferiores, de $S = 0.05$ las cuales fueron obtenidas en las curvas de nivel de la carta INEGI escala 1:50,000.

Cabe hacer mención que aproximadamente a unos 300 m aguas arriba, antes de llegar a su cruce con el *derecho de vía*, se tiene construido un pequeño bordo (fotografía 15 y 16), que en la época de visita (estiaje), no contenía agua. La capacidad aproximada de este bordo es de unos 15,000 m³ (5000 m² x 3m).

Dadas las características litológicas en la porción baja de este cauce (Bordo Guadalupe), constituida por tobos y basaltos escoriáceos, se estima un coeficiente alto de filtración.

Para el cálculo del volumen de escurrimiento en este arroyo se consideró también, además del área de la cuenca su coeficiente de escurrimiento y la intensidad de la lluvia, aplicando la misma Formula Racional con lo que se obtuvo para este arroyo un gasto máximo de $4.37 \text{ m}^3/\text{seg}$.



Fotografía 15. Arroyo Guadalupe al llegar al bordo del mismo nombre.



Fotografía 16. Bordo Guadalupe constituido por un pequeño vaso de aproximadamente 5.000 m^2 y altura máxima de 3.00 m .

VII.2.1.3. RÍO DE LAS AVENIDAS

Como se mencionó al inicio de este capítulo, durante los reconocimientos al área, se observaron los efectos, que las avenidas del agua en la época de lluvias del período pasado (1999), provocaron en el cauce de este río con el *derecho de vía*, razón por la que se incluyó este inciso, el cual no había sido considerado con los trabajos precedentes.

El Río de las Avenidas, nace en el flanco sur de la Sierra de Pachuca, fluyendo hacia el suroeste, hasta la laguna de Zumpango.

El área de su cuenca hasta el poblado de Tellez, localizado a unos 19 km al sur de Pachuca es de aproximadamente 300 km², conduciendo aguas negras de la ciudad de Pachuca y de los efluentes de las compañías mineras de Real del Monte y Pachuca.

De acuerdo con Huizar - Álvarez (1996), representa un volumen de 0.700 m³/s y es usada sin ningún tratamiento para el riego de una superficie de 35 km².

La pendiente topográfica en la Sierra de Pachuca obtenida de la misma carta topográfica de INEGI es de S= 0.10, los primeros 6 kilómetros; continuando en el área del valle con pendientes menores a 0.01, en una longitud de 16 km, hasta el cruce con el *derecho de vía*.

La precipitación media anual en la montaña va de 500 a 800 mm; correspondiendo también al área del valle, 500 mm. La temperatura media anual es de 12 °C en la porción norte y de 14 °C en la sur.

El coeficiente de escurrimiento es de 10 a 20% en la sierra y de 5 a 10% en el valle de acuerdo con las cartas temáticas de INEGI, escala 1:250,000.

En el sitio donde el río de las Avenidas (encauzado) se cruza con el *derecho de vía* de PEMEX, también se encuentra el bordo de la vía de ferrocarril y un terraplén de camino de terracería que conduce de estación Tellez hacia el sur, al Rancho Alegre.

En las fotografías 17, 18, 19 y 20 se puede observar los efectos que las lluvias del año 1999, ocasionaron a ese sitio; especialmente al camino de terracería, bajo del cual atraviesan los ductos, así como por debajo de la vía de ferrocarril y el cauce del río.

Aplicando la misma fórmula racional, el gasto máximo de avenida asciende a 33.36 m³/s.



Fotografía 17. Vista del cruce del río *Las Avenidas* (hacia aguas abajo) con el camino de terracería (reconstruido) y el *derecho de vía* de los ductos.



Fotografía 18. Cruce del *derecho de vía* de los ductos, con el río de *Las Avenidas* (hacia aguas arriba) y la vía de ferrocarril.



Fotografía 19. Otra panorámica tomada hacia el sur de las intersecciones de río Las Avenidas con el camino de terracería, la vía de ferrocarril y el *derecho de vía* de los ductos. Al fondo indicado con una flecha se observa la caseta de bombeo de uno de los pozos de Téllez.



Fotografía 20. Zanja de reinstalación de la tubería que conduce agua potable desde los pozos de Téllez hacia las poblaciones cercanas y hacia Pachuca.

VII.2.2. DESLIZAMIENTO EN LADERAS

Este posible peligro geológico, manifestado por Ortiz *et al.* (1992) en su carta de susceptibilidad a corrimiento de tierras en la Cuenca de México, indicada para el flanco poniente de la Sierra de Los Pitos, por donde cruza el tramo de ductos analizado, se investigó mediante los reconocimientos directos al campo.

El abanico aluvial que se identificó pudiera presentar deslizamientos; se inicia en la elevación 2550 m s.n.m. de la mencionada sierra y se encuentra cubierto en la porción inferior de la misma por materiales aluviales y rellenos del valle, en la elevación 2320 m s.n.m.

El abanico aluvial mencionado presenta una pendiente de 5% y está constituido por fragmentos andesíticos del tamaño de las gravas (2") con matriz tobácea.

Con los datos geológicos superficiales y la columna estratigráfica del pozo P-559, se construyó la sección NW - SE (figura VII.2.2.1) en la que se indica la ubicación de la falla F-12 y el ducto petrolero en ese tramo.

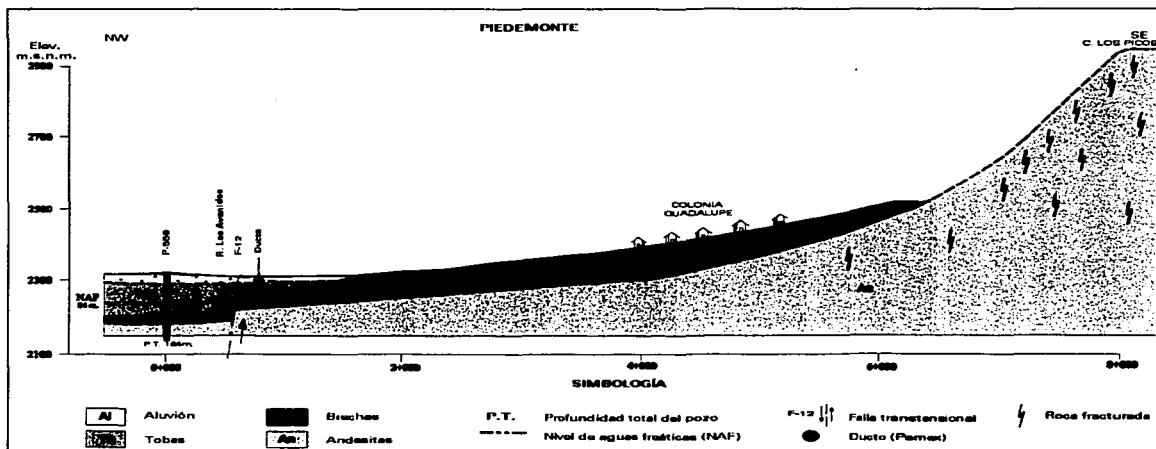


Figura VII.2.2.1. Sección geológica (piedemonte).

Con el propósito de detectar alguna evidencia que pudiera sugerir o confirmar que alguna de las obras civiles (casas), hubiera sido ya afectada por el posible deslizamiento de la ladera, se inspeccionaron las correspondientes a la colonia Guadalupe, sin haber encontrado ninguna evidencia al respecto, tales como cuarteaduras o agrietamientos en ellas.

Por esta razón, se considera a este peligro geológico como de potencialidad media.

VII.2.3. NEOTECTONISMO

Las estructuras geológicas más relevantes que se han detectado con diversos estudios geológicos en este tipo de relieve, corresponden a las fallas transtensionales denominadas F-11 y F-12 con orientación suroeste - noreste cruzando la segunda de ellas al tramo del *derecho de vía* analizado hacia su extremo norte (figura VII.2.1.1).

Estas tienen una componente vertical (salto), que fue interpretado por Huizar-Álvarez (1996), mediante la correlación de las columnas estratigráficas de 23 pozos profundos en el ramal Tizayuca - Pachuca, localizado a 6 km al poniente de la Estación Tellez.

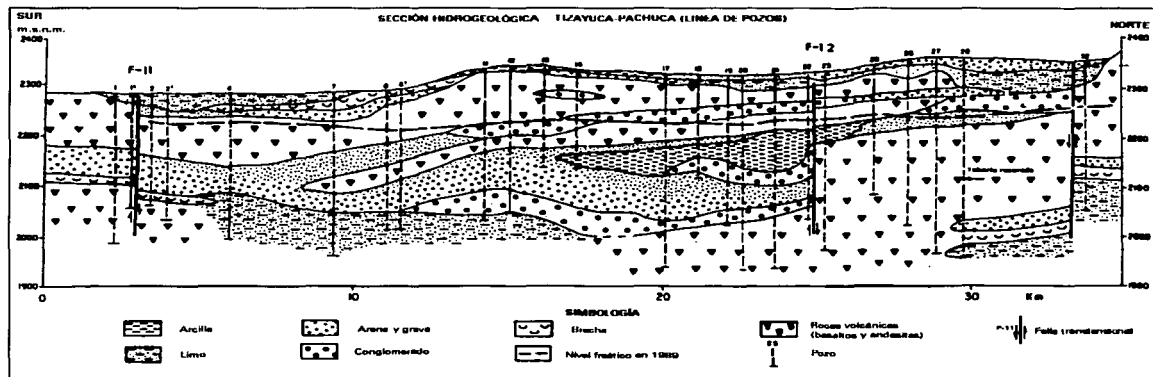


Figura VII.2.3.1. Sección hidrogeológica Tizayuca-Pachuca (Huizar-Álvarez, 1996).

Como se observa en la sección del mismo autor (figura VII.2.3.1), la secuencia estratigráfica hasta una profundidad de 300 m en promedio, está integrada por arcilla, arena y grava de relleno en el valle, a

los que subyace una interestratificación de brechas, conglomerados y rocas volcánicas (basaltos y andesitas), que han sido afectadas por fallas normales que dan origen a un *graben*, mismo que constituye el valle Tizayuca - Pachuca.

Por otra parte, de la información recabada en el Servicio Sismológico Nacional, entre los años de 1974 a 1998, en los alrededores del sitio estudiado, se encuentran los epicentros de diversos sismos locales, los cuales se indican en la figura VII.1.2.1.

La magnitud de los sismos y su profundidad, se presenta en la tabla VII.2.3.1.

TABLA VII.2.3.1
SISMOS LOCALES CERCANOS AL ÁREA DE PIEDEMONTE

No	FECHA	PROFUNDIDAD (km)	MAGNITUD
2 P	9/Mayo/1986	33	< 2.5
3 P	12/Mayo/1986	5	< 2.5
J	25/Feb./1994	16	4.0

Servicio Sismológico Nacional, UNAM; 2000

La relación de las estructuras geológicas descritas para esta área, con el posible efecto neotectónico no ha sido tan evidente como en la planicie (lacustre), analizada en el capítulo III, mediante la formación de fracturas y grietas que afecten a la infraestructura civil local, excepto por los agrietamientos con orientación NW - SE que se presentaron el año de 1999 en la porción sur del poblado de Acayuca localizado a 5 km al noroeste de la Estación Tellez y que coinciden con el eje distensivo denominado Actopan -Apizaco (figura VII.1.2.1).

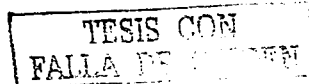
Estos agrietamientos afectaron tierras de cultivo y ligeramente la carretera Acayucan - San Pedro Huaquilpan.

De esta forma, el peligro por neotectonismo hacia los ductos, se estima medio y principalmente en el cruce de las estructuras denominadas F-11 y F-12.

VII.2.4. CONTAMINACIÓN DEL ACUÍFERO

Este peligro se estimó en el caso de que existiera alguna fuga de los hidrocarburos por un evento natural o inducido por alguna *toma clandestina*.

Las características del acuífero en este tramo están constituidas por un nivel de aguas freáticas con profundidad de 84 metros (pozo P-559).



En promedio de acuerdo con los datos de Huizar-Álvarez (*op. cit.*) La elevación del nivel de aguas freáticas en la porción norte del ramal de pozos Tizayuca, se localiza a 2270 m s.n.m. y en la porción sur a 2207 m s.n.m., representando esto una dirección del flujo de agua de noreste a suroeste.

Para la porción superior del acuífero, contenido en los sedimentos aluviales, los rangos de permeabilidad varían de 3.9×10^{-4} a 10^{-5} m/seg.

Considerando los parámetros de permeabilidad de estos acuíferos que dotan de agua potable (fotografías 19 y 20) a las poblaciones de los alrededores, incluyendo Pachuca y la porción norte del Distrito Federal, en el caso de una fuga, los hidrocarburos alcanzarían el nivel de aguas freáticas en un período que fluctuaría entre 3 y 4 días, con los consiguientes efectos que esto ocasionaría.

VII.2.5. NIVEL DE SUSCEPTIBILIDAD EN EL PIEDEMONTE

Del análisis de los resultados tanto de campo como de la información antecedente, el *derecho de vía* investigado en esta área geográfica de piedemonte, conduce a los siguientes diagnósticos:

PELIGRO	NIVEL DE SUSCEPTIBILIDAD	DIAGNOSTICO
NEOTECTONISMO	MEDIA	No se detectaron en la proximidad, efectos que confirmen su influencia, tales como fracturamientos y/o agrietamientos. Sin embargo, debido a que estos se encontraron a 5 km al noroeste, cercanos al poblado de Acayucan, afectando tierras de cultivo y levemente a la carretera Acayucan - San Pedro Huaquilpan, así como que el tramo de <i>derecho de vía</i> , se encuentra cruzado por sistemas de fallas importantes, se consideró una probabilidad de peligro media.
EROSIÓN (IMPACTO HIDRÁULICO) ARROYO EL MUERTO	MEDIA	Con los reconocimientos de campo se observó que la pendiente de este arroyo en sus últimos 6 kilómetros antes de llegar al <i>derecho de vía</i> es muy suave (0.05), disipando su energía hacia la planicie al salirse del pequeño cauce del arroyo El Muerto.

PELIGRO	NIVEL DE SUSCEPTIBILIDAD	DIAGNOSTICO
EROSIÓN (IMPACTO HIDRÁULICO) ARROYO GUADALUPE	BAJA	En este otro arroyo analizado, se determinó que además de presentar una pendiente suave similar al anterior (0.05), se tiene un pequeño bordo y además las rocas de naturaleza aglomerática permiten una gran infiltración, disminuyendo notablemente el escurrimiento superficial.
EROSIÓN (IMPACTO HIDRÁULICO) RÍO DE LAS AVENIDAS	MEDIA	Las características hidráulicas de este río con 300 km ² de cuenca hasta su cruce con el <i>derecho de vía</i> , así como una precipitación pluvial más elevada (800 mm) en la montaña, origina un mayor peligro a los ductos, el cual se ve disminuido por la baja pendiente del terreno (0.01) y la intensa utilización de sus aguas para el riego de amplias superficies que se ubican entre Pachuca y Téllez.
DESLIZAMIENTO EN LADERA	MEDIA	En el tramo de piedemonte por el que cruza el <i>derecho de vía</i> , las características topográficas y geológicas, constituidas por pendiente baja (0.05) y fragmentos andesíticos angulosos del tamaño de las gravas, con matriz tobácea sin que se note ningún corrimiento en las construcciones urbanas locales, no permiten que el peligro de deslizamiento de ladera, sea alto; sin embargo por su ubicación en el contexto geológico estructural se consideró una probabilidad de peligro media, factible de presentarse.
CONTAMINACIÓN DEL ACUÍFERO	ALTA	Dadas las características litoestratigráficas y estructurales del subsuelo en este del <i>derecho de vía</i> , estudiado y de acuerdo con los valores del coeficiente de permeabilidad que se le adjudica (3.9×10^{-4} a 10^{-5} m/seg), y considerando la profundidad del nivel de aguas freáticas del sitio (84 m), cualquier fuga de hidrocarburos en estos ductos, alcanzaría al manto del agua subterránea en un plazo de 4 días máximo.

VII.3. MONTAÑA

El tramo de *derecho de vía*, de los ductos petroleros, considerado para su estudio en esta área geográfica, quedó ubicado en el flanco sur de la Sierra de Pachuca (figura VII.3.1), con una longitud aproximada de 3 km.

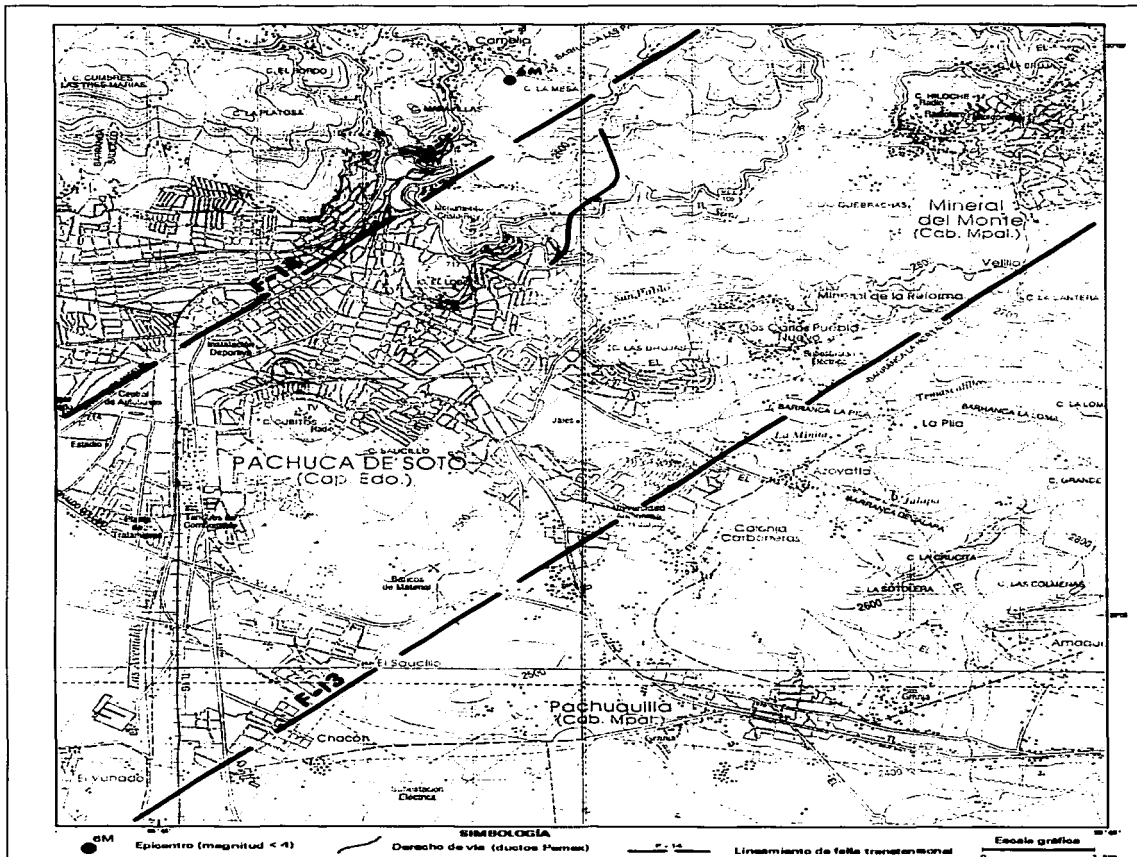


Figura VII.3.1. Peligro geológico y ambiental (montaña).

Por lo que respecta a los posibles peligros identificados con los reconocimientos regionales previos, serían:

- ◇ Erosión (Impacto hidráulico)
- ◇ Deslizamiento en laderas
- ◇ Contaminación de acuíferos profundos y de embalses superficiales
- ◇ Neotectonismo
- ◇ Hundimientos por colapso de obras mineras

Cabe hacer mención que durante el proceso del estudio de detalle, se observó que en este tramo del *derecho de vía*, solamente se encuentra una tubería de gas; sin embargo debido a que se maneja en forma prioritaria el término de *prevención* en este trabajo, se consideró la posible instalación a futuro por este *derecho de vía*, de ductos que transportarán hidrocarburos líquidos.

VII.3.1. EROSIÓN (IMPACTO HIDRÁULICO)

Este peligro fue analizado en el extremo norte del tramo seleccionado (figura VII.3.1.1), en donde cruza un arroyo intermitente (San Pedro) (fotografías 21 y 22).

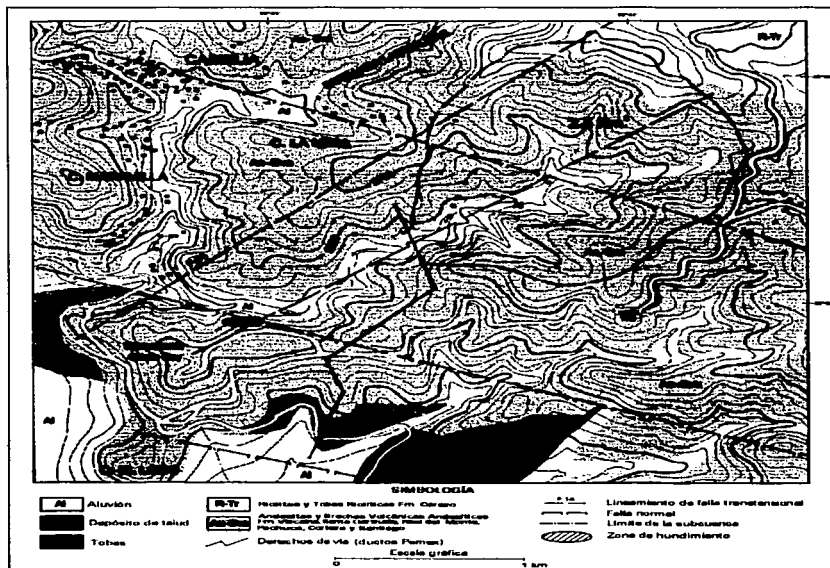


Figura VII.3.1.1. Geología superficial (montaña).

El área de la cuenca de este arroyo, hasta el sitio donde cruza el *derecho de vía*, es de 2.5 km² y va de la elevación 2900 m s.n.m., a la 2570 m s.n.m. La pendiente media, obtenida de las curvas de nivel de la carta INEGI escala 1:50,000, de esta cuenca es de $S = 0.16$, con una precipitación media anual de 600 mm. La temperatura media anual registrada es de 14 °C.

De acuerdo con INEGI, el coeficiente de escurrimiento es de 10 a 20%.



Fotografía 21. Presa para control de avenidas sobre el arroyo San Pedro. Al fondo, hacia aguas abajo se encuentra el área norte de Pachuca.



Fotografía 22. Detalle del ducto de PEMEX, observándose la erosión de su material de cobertura; quedando ya expuesto.

Durante los reconocimientos directos al sitio, se observó que en el cauce, el material de acarreo está constituido por gravas, guijarros y bloques de hasta 0.60 m (fotografías 23 y 24), lo cual manifiesta la capacidad de carga de la corriente.



Fotografía 23. Vista hacia aguas arriba del arroyo San Pedro en su cruce con el *derecho de vía*, en donde se observa su poder erosivo y de arrastre, con bloques de hasta 0.60 m.

Otro aspecto relevante que manifiesta el poder erosivo de ella, es la remoción del material de cobertura que fue colocado sobre el ducto, para su protección (relativa), el cual consistía de una mampostería junteada con concreto pobre.

Para calcular el gasto máximo de avenida, se utilizó como en los casos anteriores, la fórmula racional, obteniendo para una intensidad de lluvia de 125 mm/hr un valor de 12.71 m³/seg.

Además de este fenómeno geológico que puede afectar al ducto, durante los reconocimientos de campo, se detectó un posible banco de cantera a escasos 50 m hacia aguas arriba, que de acuerdo con los lugareños va a ser explotado comercialmente por lo que se utilizarán barrenos y explosivos; actividades que también van a incidir en la seguridad del ducto.



Fotografía 24. Otro aspecto del arroyo San Pedro, donde se observa que el material de cobertura del ducto (mampostería), fue erosionado.

VII.3.2. DESLIZAMIENTO EN LADERAS

Para el análisis de este peligro y de acuerdo con lo especificado en capítulos anteriores, se procedió a la determinación de las unidades geomecánicas presentes en la montaña; específicamente en la parte sur del tramo del *derecho de vía* seleccionado.

Dichas unidades geomecánicas están directamente relacionadas con la inestabilidad de la ladera y se basan en el marco geológico e hidrogeológico del sitio.

En este aspecto y principalmente por lo que se refiere al conocimiento litoestratigráfico y estructural, se cuenta con un acervo de información de la exploración y explotación minera que lleva más de 400 años; ya que en el distrito minero de Pachuca - Real del Monte, se inició la explotación de minerales de oro y plata principalmente, hacia principios del siglo XVI.

De acuerdo con estudios realizados por Geyne *et al.* (1963), las rocas del distrito, están integradas por interestratificaciones de productos volcánicos del Oligoceno Temprano al Plioceno Tardío, los cuales sobreyacen en forma discordante sobre formaciones marinas mesozoicas fuertemente plegadas.

Las rocas volcánicas se encuentran ligeramente inclinadas y tienen composición desde riolitas a basaltos, predominando las dacitas y andesitas.

Los autores citados mencionan en su trabajo que el espesor original máximo de la secuencia volcánica probablemente alcanzó 2600 m.

El mismo paquete Terciario, ha sido deformado por movimientos de intensidad variable, de ligera a fuerte, ocasionando la formación de gran número de fallas, principalmente de tipo normal, con rumbos que comprenden desde el noroeste hasta el sureste.

La secuencia litoestratigráfica y su relación con fallas, diques y vetas, se presentan en la figura VII.3.2.1 que corresponde a una sección geológica norte - sur, elaborada por los mencionados autores y que coincide aproximadamente con el trazo del *derecho de vía* seleccionado.

En esta sección geológica, se observa la secuencia estratigráfica, constituida por las siguientes formaciones, mencionadas de la más reciente a la más antigua.

- | | |
|-----------------------------------|---------------------------|
| - Formación Vizcaína (Tv) | - Formación Pachuca (Tp) |
| - Formación Santa Gertrudis (Tsg) | - Formación Corteza (Tc) |
| - Formación Real del Monte (Tr) | - Formación Santiago (Ts) |

Estas formaciones se encuentran cubiertas parcialmente en superficie por suelo de poco espesor, así como por depósitos de talud y aluvión en las pendientes pronunciadas el primero y en el cauce del arroyo San Pedro, el último.

Los contactos entre las diversas formaciones, de acuerdo con los autores mencionados, han sido desplazados por fallas; encontrándose también diques predominantemente cuarcíferos (Tpf) y dacíticos (Tph), así como vetas mineralizadas.

Para el análisis de estabilidad de ladera se consideró el tramo de mayor pendiente topográfica, que corresponde al cadenamiento que se encuentra entre las estaciones 9.300 y 9.500 km, con elevaciones de 2560 m s.n.m. la primera y 2600 m s.n.m. la segunda, lo que indica una pendiente promedio de 0.20.

En este tramo, las formaciones que constituyen el subsuelo hasta la profundidad del ducto, corresponden a las denominadas: Formaciones Vizcaína y Real del Monte.

Estas formaciones están compuestas por derrames de lava andesítica, con horizontes de brecha y toba (fotografías 23-A y 24-A), fuertemente intemperizadas por acción hidrotermal. En la sección geológica se representa con la nomenclatura Tv y Tr.



Fotografía 23-A. Formación Vizcaína (Tv), constituida por una colada de andesita que sobreyace a una toba arenosa, metamorfizada por contacto. Se observa el fracturamiento de la familia 1.



Fotografía 24-A. Corte en la ladera del Cerro de Cristo Rey, donde se manifiestan los dos sistemas de las familias 1 y 2.

Hacia la porción sur del *derecho de vía* seleccionado, las rocas andesíticas de estas formaciones se encuentran cubiertas por depósitos de talud.

Para evaluar las características geomecánicas de las andesitas y brechas andesíticas que constituyen a las Formaciones Vizcaína y Real del Monte, en las cuales se desplantó el ducto (figura VII.3.2.1), se llevó a cabo el levantamiento detallado de las estructuras geológicas denominadas en términos de ingeniería civil *discontinuidades*.

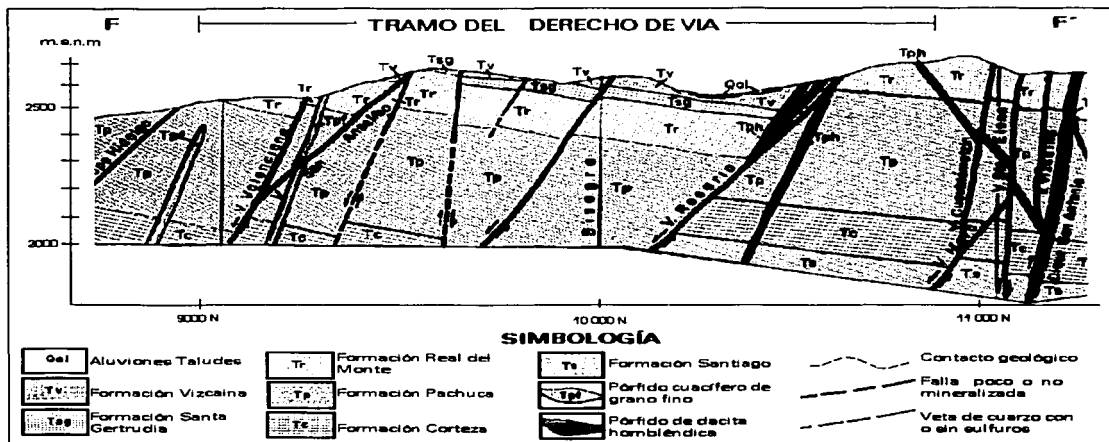


Figura VII.3.2.1. Sección geológica (montaña) (Geyne *et al.*, 1963).

El levantamiento en los afloramientos de roca y en los cortes de los caminos que circundan el área, estuvo enfocado principalmente a determinar las características geológicas que permitieran aplicar las clasificaciones geomecánicas de Barton *et al.* (*op. cit.*) y Bieniawski (*op. cit.*)

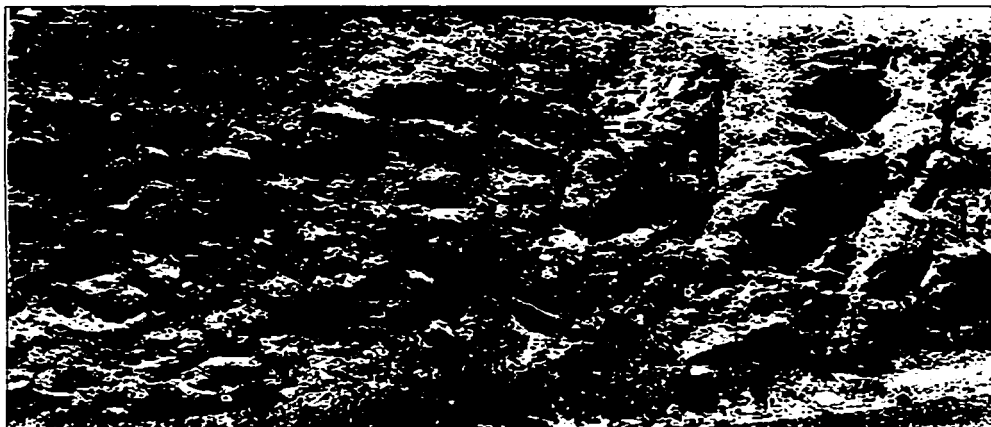
La primera *discontinuidad* corresponde a superficies de contacto entre la colada de andesita y las brechas andesíticas que le subyacen. Entre ambas unidades se encuentra un material tobáceo de textura arenosa, alterado por metamorfismo de contacto, originado por la colada superior (fotografía 23-A). Sus datos estructurales son:

Rumbo de contacto NW 05° SE
 Rumbo del echado N 85° E
 Angulo del echado 15°

TESIS CON
 FALLA DE CALZEN

Por lo que respecta a los sistemas de fracturamiento se encontraron las siguientes familias (fotografías 25 y 26):

FAMILIA	RUMBO DE FRACTURA	RUMBO DEL ECHADO	ANGULO DEL ECHADO
1	NW 70° SE	S 20° W	80°
2	NE 52° SW	N 38° W	60°
3	N - S	Este	45°
4	E - W	Norte	75°
*5	Este - Oeste	Sur	80°



Fotografía 25. Sistemas de fracturas de la familia 2 con echado de 60° y familia 3 con echado de 45°.

Se encontró una quinta familia (*) de fracturas, paralelas al corte de la carretera Pachuca – Real del Monte, de carácter local, por lo que se denominaron de *gravedad*. Estas son originadas por la falta de apoyo debido al corte del talud.

Para poder aplicar el sistema de clasificación de Bieniawski, (*op. cit.*) para macizos rocosos fracturados, se determinó el índice de calidad de la roca (R Q D), así como la continuidad, el espaciamiento y la abertura de las discontinuidades y su relación con el agua subterránea.

TESIS CON
FALLA DE INGEN

El índice de calidad de la roca (R Q D), se determinó analizando de acuerdo con la separación (espaciamiento) entre fracturas, cuantas se encontrarían por metro cúbico, resultando lo siguiente:

Familia de Fracturas	Número de Fracturas / m ³
F 1	1
F 2	8
F 3	8
F 4	8
TOTAL	25



Fotografía 26. Familia de fracturas N°. 4, con echado de 75° al norte y familia F-5 con echado de 80° al sur.

Este número corresponde en general al macizo rocoso. Únicamente en el corte de la carretera Pachuca - Real del Monte, se presenta la familia F-5, incrementándose el número de fracturas con ocho más por metro cúbico; dando así un total de 33 para este caso.

El número total de fracturas por metro cúbico (densidad), se conoce como número de fracturas volumétricas (Jv), cuyo valor se relaciona empíricamente con el índice de calidad de la roca (R Q D) por medio de la ecuación:

$$R Q D = 115 - 3.3 Jv.$$

Por lo que se tendría un R Q D para el macizo rocoso de 32.5% y de 6.1% para el material del talud en el corte de la carretera, indicando esto una calidad de la roca, *mala* y *muy mala* respectivamente, de acuerdo con la tabla VII.3.2.1.

TESIS CON
FALLA DE BOGOTÁ

TABLA VII.3.2.1
ÍNDICE DE CALIDAD DE LA ROCA (R Q D)

DESCRIPCIÓN DE CALIDAD DE LA ROCA	R Q D %
Muy mala	0 - 25
Mala	25 - 50
Regular	50 - 75
Buena	75 - 90
Excelente	90 - 100

Bieniawski, 1976

Para definir los términos descriptivos de continuidad, espaciamento y abertura, se consideró:

TABLA VII.3.2.2
CONTINUIDAD DE LAS FRACTURAS

R A N G O	DESCRIPCIÓN
> 20 m	Muy continuas
6 - 20 m	Continuas
2 - 6 m	Medianamente continuas
< 2 m	Poco continuas

Bieniawski, 1976

TABLA VII.3.2.3
ESPACIAMIENTO DE LAS FRACTURAS

R A N G O	DESCRIPCIÓN
> 2.0 m	Muy espaciadas
0.60 - 2.0 m	Espaciadas
0.20 - 0.60 m	Medianamente espaciadas
0.06 - 0.20 m	Próximas
< 0.06 m	Muy próximas

Bieniawski, 1976

Por lo que se refiere a la abertura, los parámetros establecidos se indican en la tabla VII.3.2.4

TABLA VII.3.2.4
ABERTURA DE LAS FRACTURAS

R A N G O	DESCRIPCIÓN
> 200 mm	Ancha
60 - 200 mm	Moderadamente ancha
20 - 60 mm	Medianamente angosta
6 - 20 mm	Muy angosta
< 6 mm	Extremadamente angosta

Bieniawski, 1976

TESIS CON
FALLA DE

Con base en estos parámetros, se elaboró la tabla VII.3.2.5, en la que se concentra la calificación dada al macizo rocoso de la Formación Vizcaina, en la que se ubica el *derecho de vía*.

TABLA VII.3.2.5
CARACTERÍSTICAS DEL FRACTURAMIENTO

FAMILIA	POSICION RUMBO Y ECHADO	CONTINUIDAD	ESPACIAMIENTO	ABERTURA	FORMA Y RUGOSIDAD
F1	NW 70° SE S20° W - 80°	Muy Continuas > 20 m	Espaciadas 1.00 a 3.00 m	Muy Angosta 6 a 20 mm	Irregular Rugosa
F2	NE 52° SW N 38° W - 60°	Muy Continuas > 20 m	Próximas 0.05 a 0.20 m	Muy Angosta 6 a 20 mm	Irregular Rugosa
F3	Norte - Sur Este - 45°	Muy Continuas > 20 m	Próximas 0.05 a 0.20 m	Muy Angosta 6 a 20 mm	Irregular Rugosa
F4	Este - Oeste Norte - 75°	Muy Continuas > 20 m	Próximas 0.05 a 0.20 m	Muy Angosta 6 a 20 mm	Irregular Rugosa
F5 (Gravedad)	Este - Oeste Sur - 80°	Medianamente Continuas 2 a 6 m	Próximas 0.05 a 0.20 m	Muy Angosta 6 a 20 mm	Irregular Rugosa
CONTACTO	NW 05° SE N 85° E-15°	Muy Continuas > 20 m	Muy Espaciada > 2.0 m	Extremadamente Angosta < 6 mm	

Por lo que respecta a sus propiedades de resistencia a la compresión simple, se consideró un valor estadístico para las andesitas, que varía entre 1300 y 2000 kg/cm², lo cual indica una resistencia alta, de acuerdo con los parámetros de Deere y Miller (1966).

TABLA VII.3.2.6
CLASIFICACIÓN DE LA ROCA INTACTA BASADA EN LA RESISTENCIA
A LA COMPRESIÓN (DEERE Y MILLER, 1966)

CLASE	DESCRIPCIÓN	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE (kg./cm ²)
A	Resistencia muy alta	> 2250
B	Resistencia alta	1120 - 2250
C	Resistencia media	560 - 1120
D	Resistencia baja	280 - 560
E	Resistencia muy baja	< 280

Con la finalidad de evitar la inestabilidad de la ladera sobre el *derecho de vía*, se han construido muros de mampostería (fotografía 27); sin embargo, se observó que dicho muro ha perdido su cimentación, debido a la mala calidad de la roca que produce su inestabilidad y los efectos erosivos causados por los escurrimientos durante las épocas de lluvia.



Fotografía 27. Muro de mampostería para contener la inestabilidad del talud. Se observa también el efecto erosivo en su cimentación. El derecho de vía se ubica perpendicular a la fotografía, en medio de los dos postes que sirven de señalamiento.

VII.3.3. NEOTECTONISMO

Con base en el marco geológico estructural definido, tanto con la cartografía regional, como la local, descrita ya en el inciso anterior (VII.3.2), en donde se definieron: una falla transtensional regional (F-14) y un gran número de fallas normales e inversas localizadas con la amplia investigación y explotación de los minerales en el distrito de Pachuca - Real del Monte, que se indican en la sección geológica de la figura VII.3.2.1, se analizó adicionalmente la información recabada en el Servicio Sismológico Nacional, correspondiente al período comprendido entre los años de 1974 a 1998. Con esto se ubicaron los epicentros más cercanos al área estudiada, indicándose en la figura VII.1.2.1.

En la tabla VII.3.3.1, se presentan los datos correspondientes a cada uno de ellos.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

TABLA VII.3.3.1.
SISMOS LOCALES CERCANOS AL ÁREA DE MONTAÑA

No.	FECHA	PROFUNDIDAD (km)	MAGNITUD
1 M	8/Mayo/1986	33	< 3
4 M	15/Sept./1986	5	< 3
6 M	8/Oct. / 1984	1	< 3

Servicio Sismológico Nacional, UNAM, 2000

Los efectos neotectónicos en esta porción (norte) de la Cuenca de México no han sido muy evidentes con respecto a las áreas del sur de la misma; sin embargo se han presentado algunos agrietamientos de importancia, con efectos trascendentales para las obras civiles, tales como las causadas en la porción norte del cerro de Cubitos, donde en el mes de Marzo de 1995, resultaron afectadas varias casas que se colapsaron instantáneamente, manifestándose dos fracturas, con orientación NE - 55° SW paralelas a la F-13; sin dejar a un lado, la influencia que en estos casos tienen también las obras mineras del área, de los cuales se comentará en el inciso siguiente.

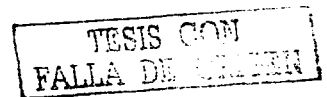
VII.3.4. HUNDIMIENTO POR COLAPSO DE OBRAS MINERAS

Los efectos que estos fenómenos han ocasionado a diversas áreas en las poblaciones de Pachuca y su vecina Real del Monte, motivaron la necesidad de analizar el posible efecto que las obras mineras pudieran ocasionar en los *derechos de vía* de los ductos petroleros, con el consecuente peligro que esto implicaría.

Como se mencionó en párrafos anteriores, la explotación de minerales en el distrito de Pachuca - Real del Monte, se inició a principios del siglo XVI, por lo que de acuerdo con estudios anteriores (Geyne *et al., op. cit.*), para el año de 1963 se habían producido mas de 38 millones de kilogramos de plata fina y más de 192,000 kilogramos de oro, entre otros minerales.

Para finales del siglo XVII ya se explotaban laboríos hasta de 250 m de profundidad, en la mina Trinidad, utilizando malacates para desaguar los niveles inferiores.

Hacia la segunda mitad del siglo XVIII y principios del XIX, se realizó el denominado *Gran proyecto de desagüe*, que consistió en la construcción de socavones, entre los que se encuentran el ubicado en la barranca de Azoyatla, denominado socavón del Tesoro y otro hacia el norte de la veta Vizcaína llamado socavón de Omitlán.



Entre los años de 1795 y 1801, cuando se consideraba tener éxito en el desagüe de las minas, ocurrieron fuertes lluvias que aumentaron las corrientes de agua subterránea, inundándose nuevamente.

Posteriormente, para el año de 1828, con la participación de los ingleses, se introdujeron bombas accionadas por vapor, que sustituyeron a los malacates para la extracción del agua en el interior de las minas.

En el siglo XX, con la introducción de la energía eléctrica a gran escala, se colocaron bombas centrífugas, con lo que se simplificó el desagüe, permitiendo trabajar en las minas a mayor profundidad y a menor costo.

De acuerdo con los estudios de Geyne *et al.* (*op. cit.*), las vetas que atraviesan al tramo del derecho de vía analizado, son las de *Analcos - Rosario* en su extremo norte y las de *Guadalupe - San Anselmo* y *Valenciana* en su extremo sur (figura VII.3.4.1).

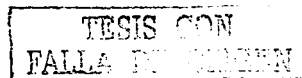
Con base en esos mismos estudios, se sabe que la veta *Analcos - Rosario*, tiene una longitud total de afloramiento de 4 km. Su porción occidental y centro, aflora como una franja de 8 a 10 m de ancho y está compuesta por vetas y vetillas de cuarzo. En su porción oriental aflora como una zona de falla que se identifica por el hecho de que se encuentra separando a las formaciones *Pachuca* y *Real del Monte*, así como a esta última y a la *Vizcaína*.

La veta *Analcos - Rosario*, se ha explotado en el subsuelo en una longitud de 3 km y desde la superficie hasta una profundidad máxima de unos 400 m.

Las vetas *Guadalupe - San Anselmo*, se extienden hacia el sureste, con una longitud de 1.4 km, uniéndose con la veta *Valenciana*. Estas vetas afloran en las formaciones *Pachuca* y *Real del Monte*, como una franja discontinua de pequeñas fracturas rellenas de cuarzo. Los cuerpos de mineral, tuvieron espesores entre 1 y 3 metros.

En la veta de *Guadalupe* se encontraron menas con longitud de 625 m y altura de 280 m.

La veta *Valenciana* en su porción occidental, se encuentra cubierta por aluvión; no así su parte este, que aflora como pequeñas vetas de cuarzo, por una longitud de 400 m, continuando como una falla sin mineral por otra longitud de 2 km.



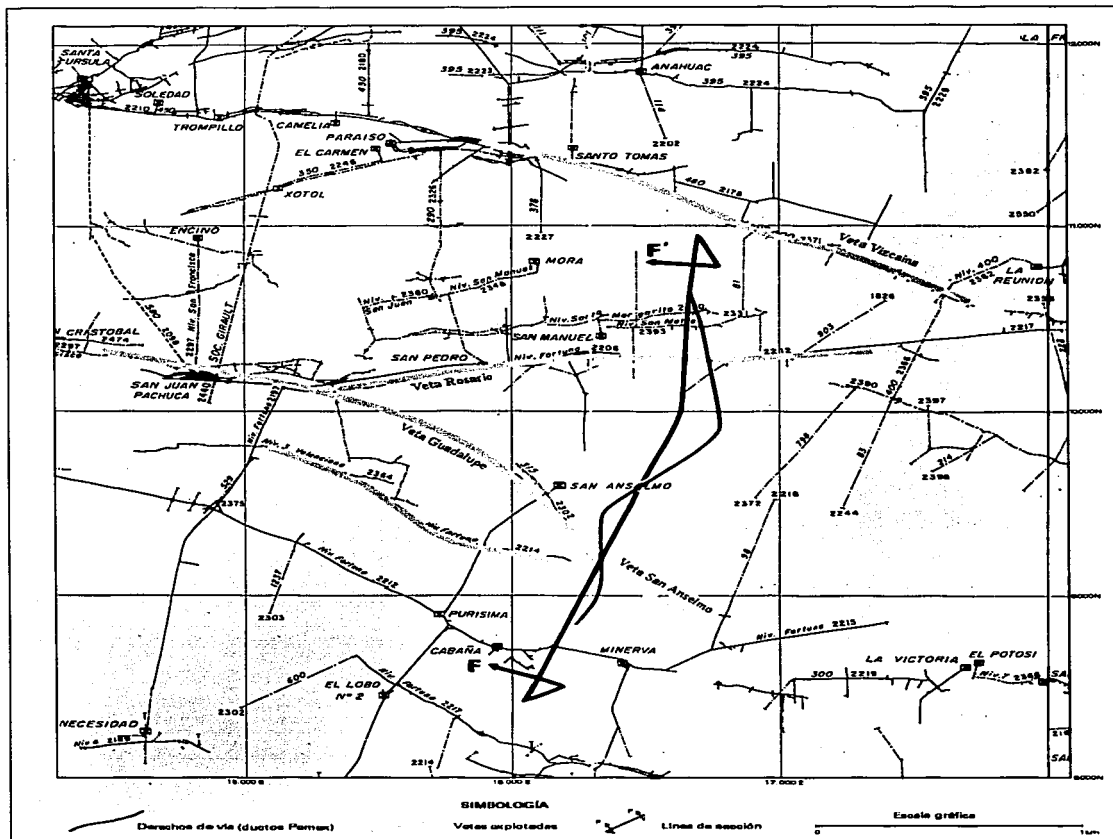


Figura VII.3.4.1. Vetas mineras que cruzan al derecho de vía (montaña) (Geyne et al., 1963).

La explotación de estas tres vetas dieron origen a zonas de debilidad en el subsuelo, que se manifiesta en la superficie, sobre el camino que conduce al monumento del *Cristo Rey* (fotografías 28, 29, 30 y 31), el cual presenta agrietamientos longitudinales y en la ladera norte del mismo cerro (margen izquierda del arroyo San Pedro), como se observa en las mismas fotografías, aunado al intenso fracturamiento y fallamiento del macizo rocoso de mala calidad.



Fotografía 28. Panorámica tomada hacia el poniente, desde la margen izquierda del arroyo *San Pedro*, donde se observan los hundimientos motivados tanto por la mala calidad del macizo rocoso como por la influencia de las obras mineras.

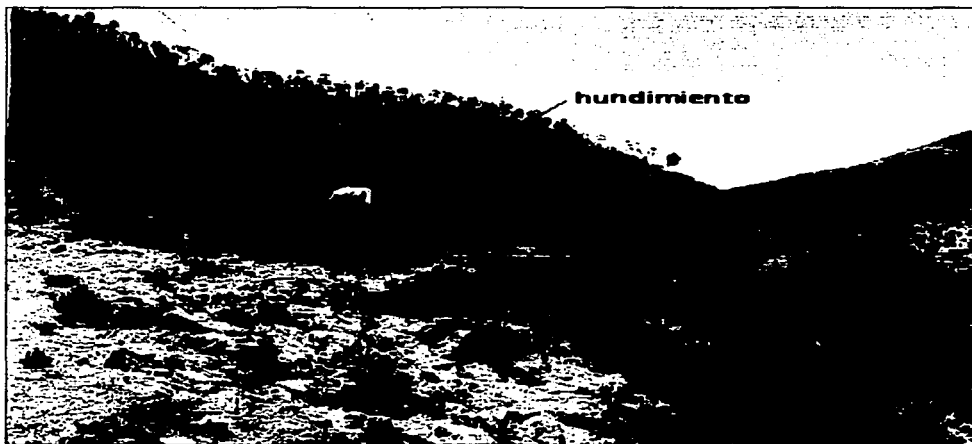
Todo esto indica el alto peligro que se tiene para el *derecho de vía*, debido a estos procesos geológicos, incrementados por la explotación minera en el subsuelo.



Fotografía 29. Agrietamiento del camino al monumento de Cristo Rey, indicativo del mismo fenómeno geológico mencionado.



Fotografía 30. Margen derecha del arroyo San Pedro. El área bardeada corresponde al Tiro San Pedro.



Fotografía 31. Otro detalle de la margen izquierda del arroyo San Pedro, donde se presenta la inestabilidad de la ladera y los hundimientos causados por las obras mineras.

TESIS CON
FALLA DE MARGEN

VII.3.5. CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS Y EMBALSES

Para la explotación de las minas y mediante bombeo, los niveles de agua en el distrito minero se han mantenido hasta la elevación 2075 m s.n.m. Según datos recabados, el volumen de extracción de agua es de aproximadamente 18,500 litros por minuto (308 l.p.s)

Las elevaciones con respecto al nivel del mar en el tramo de montaña analizado, van de los 2430 a los 2600 m s.n.m., por lo que la distancia máxima al nivel freático (abatido), es de 525 m; sin embargo, no obstante la aparente gran profundidad al mismo, los sistemas de fracturamiento naturales, incrementados por las fracturas inducidas por la explotación de los minerales, han generado una alta permeabilidad, originando que cualquier fuga de un ducto que conduzca hidrocarburos líquidos, podrían alcanzar al mencionado nivel de aguas subterráneas en pocos días, indicando esto un peligro alto para la contaminación de acuíferos, además del gran peligro que se tendría al generarse gases en el interior de las obras mineras.

VII.3.6. NIVEL DE SUSCEPTIBILIDAD EN LA MONTAÑA

Una vez descritos y analizados los resultados obtenidos, para el área de montaña seleccionada, se determinaron los siguientes diagnósticos para cada uno de los peligros geológicos considerados:

PELIGRO	NIVEL DE SUSCEPTIBILIDAD	DIAGNOSTICO
NEOTECTONISMO	MEDIA	Los efectos neotectónicos en esta porción de la Cuenca de México, no han sido muy evidentes, sin embargo la intensa extracción de minerales originan oquedades que debilitan la resistencia en el subsuelo, por lo que los efectos negativos en obras civiles son más factibles de ocurrir aún con sismos de baja intensidad.
EROSIÓN (IMPACTO HIDRÁULICO)	ALTA	La capacidad de erosión y transporte del arroyo San Pedro, no obstante la pequeña dimensión de su cuenca (2.5 km ²), es evidente, debido a su fuerte pendiente (16%) y a la presencia de bloques de hasta 0.60 m, así como a la socavación que presenta el cruce del <i>derecho de vía</i> con el arroyo.

PELIGRO	NIVEL DE SUSCEPTIBILIDAD	DIAGNOSTICO
DESPLAZAMIENTO EN LADERAS	ALTA	Originado por el intemperismo y mineralización de las rocas andesíticas, aunado al intenso fracturamiento y fallamiento regional y local, las características del macizo rocoso analizado presentan calidad de roca (RQD) <i>mala</i> y <i>muy mala</i> ; notándose los efectos del deslizamiento en las laderas, en varios sitios en las proximidades del <i>derecho de vía</i> .
HUNDIMIENTO POR COLAPSO DE OBRAS MINERAS	ALTA	La mala calidad del macizo rocoso, asociado a la infiltración de agua hacia el subsuelo, han originado ya, en diversas ocasiones, colapsos instantáneos en la región Pachuca - Real del Monte, por lo que este fenómeno es evidente.
CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS Y EMBALSES	ALTA	Las vías de infiltración hacia el subsuelo dadas las condiciones petrofísicas descritas, son generalizadas en el área estudiada; presentándose además valores de permeabilidad secundaria altos, por lo que este proceso representa un alto peligro para el entorno.

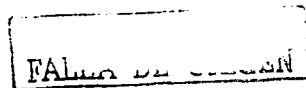
TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

DE

CAPÍTULO VIII

CONCLUSIONES

TESIS CON
FALLA DE CUBIEN



CAPÍTULO VIII CONCLUSIONES

La importancia de la seguridad en la instalación y operación de los ductos de hidrocarburos, con respecto a los peligros geológicos que les pueden afectar, queda evidenciada con los razonamientos que se presentan en esta tesis; así como los efectos que para el entorno se han inferido.

En este capítulo se mencionan en primer lugar las conclusiones correspondientes a cada una de las tres áreas con diferente tipo de relieve; en segundo lugar las acciones recomendables para definir la instalación de ductos petroleros y su adecuada ubicación y en tercer lugar, de manera específica, algunas de las posibles medidas de prevención y/o mitigación en la Cuenca de México.

VIII.1. CONCLUSIONES DE LAS ÁREAS ESPECÍFICAS

VIII.1.1. PLANICIE

En este tipo de relieve, los cinco peligros analizados correspondientes a: subsidencia, neotectonismo, erosión (impacto hidráulico), contaminación del acuífero local e infiltración de hidrocarburos a ductos urbanos, fueron considerados cualitativamente con una susceptibilidad alta. Para la subsidencia se determinó con base en las características litoestratigráficas presentes en el subsuelo, constituida por la secuencia de sedimentos lacustres, altamente compresibles aunados a la intensa extracción de agua subterránea.

Por lo que respecta al neotectonismo, relacionando este con la cercanía a fallas activas, se debe a la presencia de las fallas activas F-8 y F-9.

Estos dos procesos (subsidencia y neotectonismo) ya manifiestan daños a diversas obras.

Con respecto a la erosión (impacto hidráulico), la contaminación y la infiltración de hidrocarburos a ductos urbanos, están relacionados con las grandes dimensiones de las cuencas de los ríos Papalotla y Teotihuacan (Grande), para el primer caso y con la permeabilidad primaria y secundaria de los suelos para el segundo; así como con la poca profundidad a la que se encuentran los ductos urbanos para el último.

VIII.1.2. PIEDEMONTE

Los cuatro peligros analizados en esta área, correspondientes a los procesos de erosión, deslizamiento en ladera, neotectonismo y contaminación de acuífero; únicamente este último se consideró con susceptibilidad alta, dada la permeabilidad de la secuencia sedimentaria.

Los otros tres peligros fueron estimados con valores de susceptibilidad media y baja, sin que a la fecha se tengan antecedentes de afectación a las diversas obras ahí constituidas.

VIII.1.3. MONTAÑA

En el relieve de montaña, cuatro de los cinco peligros analizados fueron considerados con valores de susceptibilidad alta, correspondiendo a los procesos de erosión, deslizamiento en ladera, hundimiento por colapso de obras mineras y contaminación de acuíferos y embalses; habiéndose ya presentado en varias ocasiones estos daños, en muchas obras de diversa índole construidas en esta área específica.

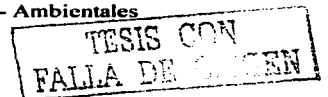
VIII.2. ACCIONES RECOMENDABLES

VIII.2.1. ANÁLISIS DEL ENTORNO REGIONAL Y LOCAL

Como se demostró durante el desarrollo de esta investigación, en la cual se analizaron en su primera fase los posibles peligros geológicos a nivel regional que pudieran influir en los principales *derechos de vía* de ductos petroleros en la Cuenca de México, la ubicación adecuada de ellos, no debe limitarse a la unión más corta entre dos puntos, ni debe ajustarse su instalación considerando únicamente condiciones geológicas homogéneas, ya que estas no existen en ningún sitio.

Cada región y área local contienen una gran diversidad de características que la hacen única y que deben conocerse con suficiente detalle antes de que sean instalados los ductos, mediante estudios diversos en los que destacan:

- Geológicos
 - Litoestratigráficos.
 - Estructurales.
 - Hidrogeológicos.
 - Geomorfológicos.
 - Neotectónicos.
 - Geotécnicos.
 - Geológico - Ambientales



- Mecánica de Suelos.
- Mecánica de Rocas.
- Topográficos.
- Hidrológicos.

VIII.2.2. DETERMINACIÓN DE LOS POSIBLES PELIGROS

Solamente cuando se cuenta con este cúmulo de conocimientos bien definidos en algún sitio, se pueden evaluar los peligros que los procesos naturales provocarían en los ductos, ocasionando efectos negativos que conlleven desastres y catástrofes en algunos casos irremediables, contando así con los elementos necesarios para recomendar y en su caso implementar las medidas de ingeniería que eviten o minimicen dichos peligros.

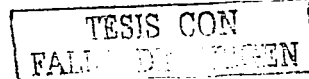
Este conocimiento detallado del peligro geológico a los ductos y sus implicaciones al entorno, será de mayor utilidad y tendrá un menor costo si se realiza en forma preventiva, como se ha hecho énfasis en el presente trabajo de investigación.

VIII.2.3. ESTABLECIMIENTO DE PROGRAMAS DE MONITOREO

En los sitios definidos con peligro para los ductos es recomendable la elaboración e instalación de programas de monitoreo, que proporcionen información oportuna para tomar las medidas adecuadas ante cualquier eventualidad.

En ellos deberán estar contemplados tanto los ambientes superficiales (agua y suelo), como subterráneos (subsuelo y acuíferos) y estarán apegados al marco geológico ambiental determinado con las diversas investigaciones ya realizadas.

Deberán incluir perforaciones y pruebas en pozos para obtener información geológica puntual, así como la geometría de fracturas y fallas, además de la elevación del nivel del agua subterránea. Estos sondeos deben de ser suficientes en número y espaciados adecuadamente de tal forma que se puedan realizar correlaciones e interpretaciones válidas.



VIII.2.4. AMPLIACIÓN DEL PROGRAMA DE INVESTIGACIÓN

En forma regional y con base en los resultados obtenidos con esta tesis en solamente tres sitios dentro de la Cuenca de México, es clara la imperiosa necesidad de continuar con este tipo de investigaciones, ya que por ejemplo, desde el punto de vista de *erosión (impacto hidráulico) a los ductos*, únicamente se analizaron en forma parcial, tres subcuencas de las once que la constituyen, especialmente si se toma en cuenta que la precipitación y el escurrimiento varían ampliamente de un año a otro, debiéndose sustentar el peligro admisible en un adecuado análisis hidrológico (Escalante-Sandoval y Reyes, 2002), utilizando técnicas estadísticas de análisis de frecuencias. Son recomendables además, los mapeos geológicos y geomorfológicos analíticos como base para investigaciones más particulares.

Los factores correspondientes a las fallas activas y a las laderas inestables (Oropeza *et al.*, 1998), se deben investigar específicamente con detalle en otros sitios de la cuenca.

Como actividades destacadas que se recomiendan realizar en cualquier investigación de fallas activas, sin que se deban de aplicar en todos los sitios, se tienen:

- a) Marco geológico y sismotectónico.
- b) Descripción del sitio y de sus características superficiales y del subsuelo.
- c) Investigación de antecedentes en revistas, publicaciones, mapas, fotografías aéreas, sensores remotos y comunicaciones personales de profesionistas que conozcan acerca de las condiciones geológicas del sitio.
- d) Investigaciones de campo en la superficie y el subsuelo.
- e) Conclusiones
- f) Recomendaciones

Para el caso de las laderas inestables, las principales determinaciones corresponderán a :

- a) Pendiente del talud.
- b) Marco geológico.
- c) Presencia de fallas activas.
- d) Vegetación.
- e) Precipitación pluvial



En forma local, es importante también realizar investigaciones específicas y con mayor profundidad de diversos tópicos tales como: procesos de contaminación, migración de contaminantes (Cortés *et al.*, 1998) y dinámica de suelos, entre otros.

También es recomendable realizar estudios de radar de penetración terrestre, con lo que se deduciría la estructura del subsuelo, para interpretar como podría ser el comportamiento de las tuberías con respecto a la subsidencia. Este método es novedoso y aporta una buena resolución en las primeras decenas de metros de profundidad.

Se deberán crear además bancos de datos confiables, conforme se cuente con mayor información, elaborando con ellos las estadísticas necesarias para la retroalimentación de los diversos programas.

Esto se hace más relevante, si lo visualizamos a nivel nacional incluyendo tanto la parte continental como la marina, donde se tienen importantes instalaciones petroleras con programas de expansión.

Es importante además, generar y establecer pruebas en laboratorios enfocadas a esta problemática, entre los que se incluyen: mecánica de suelos, mecánica de rocas, geoquímica e hidráulica.

VIII.2.5. PREPARACIÓN DE INVESTIGADORES Y TÉCNICOS

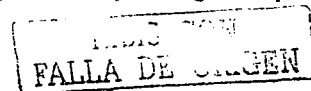
Para llevar a cabo las acciones recomendadas es imprescindible contar con el personal adecuado tanto en número como en calidad, evitando así la improvisación.

VIII.3. MEDIDAS DE PREVENCIÓN Y/O MITIGACIÓN EN LA CUENCA DE MÉXICO

En los incisos siguientes se hará referencia a ciertas alternativas de prevención y/o mitigación que se recomiendan para las tres áreas geográficas investigadas.

VIII.3.1. SUBSIDENCIA Y NEOTECTONISMO

Los procesos geológicos que inciden en los ductos petroleros que corresponden a subsidencia (en el área de la planicie) y neotectonismo (en las tres áreas), pueden evitarse, para el primer caso mediante su reubicación hacia condiciones de roca firme, fuera de los sedimentos lacustres, con el consiguiente costo que esto implicaría, además de la dificultad de conseguir áreas libres de construcciones urbanas,



comerciales o industriales, que como se observa en algunas de las fotografías, han invadido inclusive el *derecho de vía*. Por lo que respecta a los dos casos, la opción consiste en la instalación de tuberías con especificaciones tales que soporten los movimientos verticales o absorban los mismos, sin que se vean afectados.

Además tendrían que estar diseñados y contruidos para soportar los desplazamientos laterales que ocasionan las fallas transtensionales, principalmente en su cruce con dichos lineamientos y que representan un peligro que es incrementado por los efectos sísmicos.

VIII.3.2. EROSIÓN (IMPACTO HIDRÁULICO)

Por lo que respecta a la erosión (impacto hidráulico) en la planicie, esta sería mayor en el cauce del río Papalotla, en el que se ha reportado caudales instantáneos de hasta $124 \text{ m}^3/\text{seg}$; que en el río San Juan Teotihuacán (Grande), donde se midió en 1947, la avenida máxima, con $42 \text{ m}^3/\text{seg}$.

En las otras cuatro subcuencas estudiadas correspondientes a las corrientes del río Las Avenidas y arroyos El Muerto, Guadalupe y San Pedro, las tres primeras áreas de piedemonte y la última de montaña, los valores más altos de avenida máxima, correspondieron al río de Las Avenidas con $33.36 \text{ m}^3/\text{seg}$ y al arroyo de San Pedro, con $12.71 \text{ m}^3/\text{seg}$. Este último además del valor alto de su avenida máxima está influenciado por la fuerte pendiente 16%.

Para evitar este proceso, se recomienda construir bordos en las cuencas, que rompan los gastos pico de las avenidas máximas. En este caso también, el acelerado crecimiento de la mancha urbana en algunas áreas estudiadas (principalmente en la planicie), dificulta la posibilidad de contar con *boquillas*, para la construcción de dichos bordos.

VIII.3.3. INESTABILIDAD EN LADERAS

Con la investigación realizada, se definió para este proceso un peligro alto en la montaña, incrementado por la presencia en el subsuelo de obras mineras.

En este caso particular, es recomendable evitar que los ductos queden ubicados en las áreas de peligro alto, una vez que estas hayan sido definidas con precisión o que se establezcan las laderas con procedimientos ingenieriles tales como: tendido de taludes y/o anclajes de las rocas

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

VIII.3.4. CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS

Por lo que respecta a la contaminación de acuíferos y a la introducción de hidrocarburos a ductos urbanos, como consecuencia de una fuga natural o provocada, se puede recomendar la construcción de barreras impermeables, con materiales naturales y sintéticos o ambos, especialmente en las áreas de mayor permeabilidad con los que se evitaría la infiltración de los contaminantes hacia el subsuelo y particularmente a los mantos freáticos (Cenapred, 1998).

Complementariamente, es conveniente la instalación de pozos de monitoreo ubicados en forma estratégica, de acuerdo con las características del marco geológico e hidrogeológico, con los que se detecte la presencia de los hidrocarburos fugados antes de que lleguen a los sitios vulnerables.

Con estas medidas se alcanzará la seguridad tan necesaria en los ductos de hidrocarburos para evitar catástrofes, con un alto costo económico y en vidas humanas.

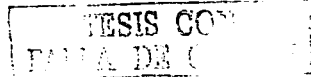
Un aspecto de gran relevancia, en el que se considera conveniente insistir, es el hecho de que se comprenda cabalmente, que la problemática presentada en esta tesis, requiere de una participación interinstitucional e interdisciplinaria, con lo que se alcanzará la tan necesaria solución de la misma.

Finalmente, se debe considerar a los ductos, no como una instalación complementaria de la industria petrolera, sino que forman parte de las obras de mayor importancia en la vida del hombre.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

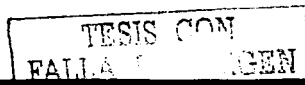
- Aguayo Camargo, J. E., Marín-Córdova, S., 1987, *Origen y evolución de los rasgos morfolotectónicos post-Cretácicos de México*. Boletín de la Soc. Geol. Méx. Tomo XLVIII, N° 2, p. 15-39.
- Aguayo Camargo, J. E., Marín-Córdova, S., Sánchez, F., 1990, *Evolución geológica de la Cuenca de México*, Simposio sobre tópicos geológicos de la Cuenca del Valle de México, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, p.25-41.
- Aguayo Camargo, J. E. y Trápaga, M. R., 1996, *Geodinámica de México y Minerales del Mar*, colección La Ciencia desde México N° 141. SEP, Fondo de Cultura Económica, p. 102.
- Alberro, A. J., León, T. J. L., Hanel, J. J., Vera, P. M., Flores, N. J., 1976, "Guadalupe", *Contaminamiento de presas construidas en México*, S. R. H., C. F. E., Instituto de Ingeniería, UNAM. P.3-39.
- Álvarez Manilla, A. A., Garnica, A. P. y Martínez, P. G. E. I., 2001, *Metodología para determinar la influencia de la extracción de agua subterránea en la infraestructura del transporte*, Instituto Mexicano del Transporte, Publicación Técnica. N° 172, 54 p.
- Aparicio, M. F. J., 1997, *Fundamentos de Hidrología de superficie*, Edit. Limusa, 303 p.
- Arcos, R. D., 2000, *Evaluación de coeficientes de recarga a los acuíferos de la Cuenca de México*. Tesis de maestría en hidráulica. I. P. N. p. 80.
- Arellano, A. R. V., 1951 (1953), *Estratigrafía de la Cuenca de México*, Mem. Cong. Cient. Mexicano, Vol. 3, p. 172 - 186.
- Barton, N., Lien, R. y Lunde, J., 1974, *Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support*. *Rock Mechanics*, Vol. 6, N° 4. p.189-236.
- Bear, J., 1972, *Dynamics of fluids in porous media*, Amer. Elsevier, N. Y. p. 764.
- Bear, J., 1979, *Hydraulics of ground water*, New York, Mc Graw-Hill, p. 567.
- Benhumea León, M. y Vázquez Contreras, A., 1988, *Estudios Geofísicos del Valle de México*. Comisión Federal de Electricidad, 58 p.
- Bieniawski, Z. T. 1976, *Rock mass classification in rock engineering*, Proc. Symposium on exploration for rock engineering. Johannesburg. Vol. 1, p. 97-106.
- Bryan Kirk, 1948, *Los suelos complejos y fósiles de la Altiplanicie de México en relación a los cambios climáticos*, Bol. Soc. Mexicana, Vol. 13, p. 1-20.
- Campos-Enríquez, J.O., Delgado Rodríguez, O., Chávez Segura, R., Gómez Cabrera, P. T. y Flores Márquez, E. I., 1996, *The sub-surficial structure of Chalco sub-basin (Mexico City) inferred from a geophysical cooperative study*, *Geophysics*, Vol. 62, p. 23-29.



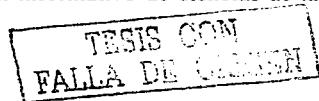
- Campos-Enríquez, J.O., Alatríste-Vilchis, D. R., Huizar-Álvarez, R., Marines-Campos, R. and Alatorre-Zamora, M. A., 2003, *Sub-surface structure of the Tecocomulco sub-basin (northeastern México Basin) inferred from geophysical studies and relationship to the regional tectonics*. Geofísica Internacional, p. 3-24.
- Cenapred, 1998, *Fundamentos de geotecnia ambiental y su aplicación en la remediación de sitios contaminados y el diseño de barreras impermeables*.
- Cenapred, 2001, *Diagnóstico de peligros e identificación de riesgos de desastres en México*, Atlas Nacional de la República Mexicana, p. 103-159.
- Cetenal, 1977, *Carta Topográfica escala 1:50,000 Texcoco E14 B21*.
- Consejo Nacional de Investigación y National Academy of Sciences, 1995, *El agua y la Ciudad de México*, 353 p.
- Cortés, P. M. A., 1999, *El hundimiento del suelo en la ciudad de México*, Revista Hidráulica Urbana, N° 5, D G C O H. p. 15-23
- Cortés, S. A., Huizar A. R., Marín, C. S. y Pineda, O., 1998, *Injection sea water to test a case study of ground water contamination*, Proc. Annual Meeting exposition. Geol. Soc. Amer. (51561)
- Cruickshank García, G., 1995, *Proyecto Lago de Texcoco Rescate Hidroecológico*. p. 111.
- Cserna Zoltan de, De la Fuente-Duch, M., Palacios Nieto, M., Triay, L., Mitres Salazar, L. M., Mota Palomino, R., 1988, *Estructura geológica, gravimetría, sismicidad y relaciones neotectónicas regionales de la Cuenca de México*, Boletín 104. México, Instituto de Geología. UNAM, 71 p.
- Deere, D. U. y Miller, R. P., 1966, *Engineering classification and index properties for intact rock*. Tech. rept. No. AFWL-TR-65-116, U.S. Air Force Weapons Lab, New Mexico.
- Delgadillo, M., Quintanar, L. y Jiménez, Z., 2000, *Cinco años de sismicidad local registrada por la red sísmica del Valle de México*, Memorias del simposio Internacional de Riesgos Geológicos y Ambientales en la Ciudad de México, p. 134-141.
- Demant, A., 1978, *Características de Eje Neovolcánico Transmexicano y sus problemas de interpretación*, Revista del Inst. de Geol., UNAM. 2, p. 172-187.
- De Terra, Hellmuth, 1948, *Historia del Valle de México en las postrimerías del Cuaternario en relación con el hombre prehistórico*. Bol. Soc. Geol. Mexicana, Vol. 13, p. 77-79.
- Díaz - Rodríguez , J. A., 1989, *Behavior of Mexico City clay Subjeted to undrained repeated loading*. Canadian Geotechnical Journal 26 (1): p. 159-162.
- Díaz - Rodríguez, J. A., Leroueil, S. and Alemán, J. D., 1992, *Yielding of Mexico City clays and other natural clays*, Journal of Geotechnical Engineering, American Society of Civil Engineers, Vol. 118 N° 7, p 981-995.
- Díaz - Rodríguez, J. A., Lozano Santacruz, R., Dávila-Alcocer, V. M., Vallejo, E. and Girón, P., 1998, *Physical, chemical, and mineralogical properties of Mexico City sediments: a geotechnical perspective*, Can Geotech, J. 35 p. 600-610.
- Díaz - Rodríguez, J. A., 2003, *Characterization and engineering properties of Mexico City lacustrine soils*, Swets & Zeitlinger, Lisse, ISBN 90 5809 5371, p. 725-755.



- Domenico, P.A., and Scharz, F. W., 1990, *Physical and chemical hydrogeology*. John Wiley and Sons, N. Y., 824 p.
- Durazo, J. y Farvolden, R. N., 1989, *The Groundwater Regime of the Valley of Mexico, from Historie, Evidence and Field Observations*. Journal of Hydrology, 112, p. 171-190.
- Escalante-Sandoval, C. A. y Reyes Chávez, L., 2002, *Técnicas Estadísticas en Hidrología*, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, 298 p.
- Esteva, M. L. O., 1970, *Regionalización sísmica de México, para fines de ingeniería*. Revista Ingeniería, Vol. 40, N° 2. p. 229-246.
- Esteva, M. L. y Rascón, Ch. O., 1985, *Aspectos de Ingeniería*. Revista de Ingeniería, N° 3. México.
- Figueroa, A. J., 1971, *Sismicidad en la Cuenca del Valle de México*. Boletín 289. México. Instituto de Ingeniería, UNAM.
- Flawn, P. T., 1970, *Environmental Geology. New York*, Harper and Row
- Flawn, P. T., 1975, *Prologo Rev. Environmental Geology*, Springer-Verlag, N.Y. USA, Vol. 1, N° 1, p. 3.
- Flores Berrones, R. y Vassilev, V. H., 1999, *Consideraciones sísmicas en el diseño de tuberías*, Revista de Ingeniería Hidráulica en México, Vol. XIV, N° 2, p. 49-64.
- Fries, C. Jr., 1956, *Bosquejo Geológico de las partes central y occidental del Estado de Morelos y área continuas de los Estados de Guerrero y México: México D.F.*, Cong. Geol. Internal. 20, libro – guía de la Excursión, C-9, p. 17-53.
- Fries, C. Jr., 1960, *Geología del Estado de Morelos y de partes adyacentes de México y Guerrero, región central meridional de México*, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Bol. 60, 236 p.
- Fries, C. Jr., 1962, *Hoja Pachuca 14 Q-e (11), con resumen de la geología de la hoja Pachuca, estados de Hidalgo y México*, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Carta Geológica de México, Serie de 1:100 000, mapa con texto al reverso.
- Fries, C. Jr., 1965, *Resumen de la geología de la Hoja Cuernavaca, Estado de Morelos*, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Carta Geológica de México, Serie de 1:100000.
- Galván, G. E., Marín, C. S. y Cruz, R. D., 1998, *Estudio de hundimientos acelerados en la zona norte del Distrito Federal*, Memorias de la Reunión Nacional de Mecánica de Suelos. Puebla, Pue.
- García Palomo, A., Macías, J. L. y Garduño, V. H., 2000, *Miocene to recent structural evolution of the Nevado de Toluca volcano region central, México*, Tectonophysics 318, p. 281-302.
- García Palomo, A., Macías, J. L., Tolson, G., Valdez, G. and Mora, J. C., 2002, *Volcanic stratigraphy and geological evolution of the Apan region, east-central sector of the Trans-Mexican Volcanic Belt*, Geofísica Internacional, Vol. 41, N° 2, p.133-150.
- Gayne, A. R., Fries, C. Jr., Segerstrom, K., Black, R. F. y Wilson, I. F., 1963, *Geología de yacimientos minerales del Distrito de Pachuca – Real del Monte*, Edo. de Hidalgo, México. Publicación 5E del Consejo de Recursos Naturales no Renovables. 180 p.



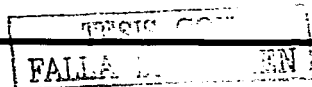
- Huizar Álvarez, R., 1989, *Contribución á l'étude géologique et hidrogeologique de la plaine de Chalco – Amecameca et de son bassin versant (Mexique)*, Tesis Doctoral, Universidad Franche-Comte. Francia. p. 1-60.
- Huizar Álvarez R., 1993, *Simulación matemática del sistema acuifero de Chalco – Amecameca, México*, Geofísica Internacional, Vol. 32, N° 1, p.57 -79.
- Huizar Álvarez R., 1996, *Hydrochemistry of the aquifers in the rio, Las Avenidas basin, Pachuca, Hidalgo, Mexico*, Water, air and soil pollution 96, p.185 – 201.
- Huizar Álvarez, R., Campos-Enríquez, J. O., Lermo-Samaniego, O., Delgado-Rodríguez and Gonzalez, H., 1997, *Geophysical and hydrogeological characterization of the sun-basin of Apan and Tochac (Mexico Basin)*, Geofis. Int., 36, p. 216-233.
- Huizar Álvarez, R., Méndez, G. T., 1998, *Patterns of ground water hydrochemistry in Apan Tochac sub-basin*, Mexico. Hydrological Sciences – Journal 43 (5), p. 669.
- Huizar Álvarez, R., 1999, *Hidrogeología de la subcuenca Apan-Tochac, estados de Hidalgo y Tlaxcala*, Rev. Mexicana de Ciencias Geológicas, Vol. 16, N°2, p.217-219.
- Huizar Álvarez, R., Hernández, G., Carrillo Martínez, M., Carrillo Rivera, J. J., Hergt, T., Angeles, G., 2003, *Geologic structure and groundwater flow in the Pachuca-Zumpango sub-basin, Central México*, Environmental Geology, 43, p.385-399.
- INEGI, 1985, *Cartas topográficas y geológicas, escala 1:250,000*. Hoja Pachuca (F14-11) y Hoja Cd. De México (E14-2)
- INEGI, 1985, *Carta Topográfica escala 1:50,000 Tizayuca E14 B11*
- INEGI, 1985, *Carta Topográfica escala 1:50,000 Pachuca F14 D81*
- INEGI, 1997, *Carta Topográfica escala 1:50,000 Texcoco E14 B21*
- INEGI, 1997, *Carta Topográfica escala 1:50,000 Cuautitlán E14 A29*
- Instituto de Geofísica, UNAM., 1987, *Modelo de simulación numérica del flujo de salmuera en los estratos de Sosa Texcoco, Valle de México*. Informe inédito de la empresa Sosa Texcoco, S. A.
- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 1990, *Sobreexplotación y contaminación en aguas subterráneas*, Serie Divulgación 27, p. 45
- Instituto Mexicano del Petróleo, 1999, *Análisis de riesgo, para garantizar la seguridad en instalaciones petroleras*. Gaceta IMP Año II N° 62 p. 5-6.
- Instituto Mexicano del Petróleo, 1999, *Mas del 50 por ciento de los ductos que hay en México, con ingeniería del IMP*, Gaceta IMP, Año II N° 64, p. 13-15.
- Instituto Mexicano del Petróleo, 1999, *El IMP, único en el ámbito nacional en tecnología de ductos*. Gaceta IMP, Año II, N° 65, p. 13-15.
- Iturbe Angüellez, R., Flores, T. C., Chávez, L. C., Castro, R. A. y Rodríguez, R. D., 1998, *Sanearamiento de sitios contaminados*, Geounam, Boletín informativo de ciencias de la tierra, Vol. 5, N° 1, p. 40-45.



- Juárez Badillo, E. y Rico Rodríguez, A., 1980, *Fundamentos de mecánica de suelos*, (Tomo I), Edit. Limusa, México.
- Lara-Sánchez, J., Pascacio Toledo, R., Alatríste Vilchis, D. R., Hernández Pérez, I. and Campos-Enriquez, J. O., 1997, *Detection of abandoned early mining tunnels in the developing urban sectors of the Pachuca mining district (Pachuca city, Hidalgo state Mexico). A resistivity, gravity and GPR study*, International Exposition and Sixty-Seventh Annual Meeting, Dallas Texas, November 2-7, 1997, Vol. I, p 235-239.
- Legget, Robert F., 1971, *Review of environmental biology by Peter T. Flawn*, American Journal of Science, Vol. 271, N°2, p. 16.
- Lermo, J., Soto, J., Huidobro, A., Cuenca, J., Mijares, H., Meza, C. y Flores, J., 1997, *Análisis preliminar de la sismicidad de la Cuenca de México y zonas aledañas*, Memoria del XI Congreso Internacional de Ingeniería Sísmica, Veracruz Ver. México, Vol. 1, p. 205-215.
- Lugo Hubp, J., 1989, *Diccionario geomorfológico*, Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, p. 30.
- Lugo Hubp, J., Cordero Estrada, M. y Zamorano Orozco, J. J., 1995, *Relieve litología y riesgos en la zona urbana de la Delegación Álvaro Obregón*, Distrito Federal, México, Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Geología, p. 52-67.
- Lugo Hubp, J. y Salinas Montes, A., 1996, *Geomorfología de la Sierra De Guadalupe (al norte de la Ciudad de México) y su relación con peligros naturales*, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, p. 240-251.
- Lugo Hubp, J., García A. M. T., Zamorano J. J. y Salas M.O., 1997(a), *Causas principales de deslizamientos de tierra en el estado de Hidalgo*, Resúmenes II Convención sobre la evolución geológica de México y recursos asociados, Instituto de Geología, UNAM, Pachuca, Hgo., México, p. 33 - 34.
- Lugo Hubp, J., Zamorano J. J. y Tamarro L. M., 1997(b), *Geomorfología preliminar de la sierra de los Pitos, Hidalgo*, Resúmenes II Convención sobre la evolución geológica de México y recursos asociados. Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra e Instituto de Geología, UNAM., p. 94.
- Marín Córdova, S., Aguayo, C. J. E., Mandujano, V. J. y Gascón, V. I., 1983, *Geología con fines económicos en los municipios de Jungapeo. Cd. Hidalgo, Zinapécuaro y Zitacuaro, en el estado de Michoacán*, Convenio Inst. Geol. UNAM y Gobierno del Estado de Michoacán, Inédito, 40 p.
- Marín Córdova, S., Aguayo, C. J. E., Huizar, A. R. y Mandujano, V. J., 1986(a), *Geología en el Valle de México, con fines geohidrológicos*, Convenio Inst. Geol. UNAM y CAVM N°. 85-405, Inédito, 90 p.
- Marín Córdova, S., Aguayo, C. J. E. y Mandujano, V. J., 1986(b), *Sistemas Mayores de fallamiento en la Cuenca de México y su relación con la sismicidad.*, Resúmenes de la VIII Convención Geológica Nacional; México, DF. p. 209-211.
- Marín Córdova, S., y Aguayo, C. J., 1989, *Evolución Geológica de la Cuenca de México e importancia de sus rasgos estructurales*, Ecología Urbana (Volumen especial), Sociedad Mexicana de Historia Natural, p. 65 - 75.
- Marín Córdova, S. y Torres Ruata, C., 1990, *Carta Hidrogeológica de la Rep. Mexicana. Esc. 1:4'000.000*, Atlas de la República Mexicana. Instituto de Geografía, UNAM.

- Marín Córdova, S., Hernández, B. H. y Morales, R. L., 1992(a), *Revisión y análisis de las condiciones hidrogeológicas del yacimiento de Sosa Texcoco, S. A.*, Informe Interno IMP (Inédito), 142 p.
- Marín Córdova, S. y Quiroz, A. J., 1992(b), *Detección, evaluación y limpieza de la contaminación por gasolina en el acuífero local del área Alamo Industrial, en la ciudad de Guadalajara Jalisco*, Informe Inedito IMP, 164 p.
- Marín Córdova, S., 1997(a), *Investigación geotécnica del colapso de ladera en el Cerro Cubitos, en Pachuca, Hgo.*, Informe inédito, División de Estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería, UNAM, 17 p.
- Marín Córdova, S., 1997(b), *Vinculación de la geología en la contaminación por hidrocarburos*, Memorias del I Simposium Internacional de Geología Ambiental, Confinamiento de Residuos y Contaminación de Suelo y Subsuelo, SEMARNAP-IMP-CIGM., 14 p.
- Marín Córdova, S. y Yoteco, H. J., 1998, *Evaluación hidrogeológica del acuífero del Valle de México*. Memorias del Simposium El Agua, Un enigma para el Tercer Milenio. Nezahualcoyotl, México, ODAPAS, UNAM, C.I.G.M.
- Marín Córdova, S. y Herrera Moro, C. M., 1999, *Estudio geológico ambiental en el proyecto de relleno sanitario de Cd. Nezahualcoyotl*, I. Informe Inédito Colegio de Ingenieros Geólogos de México, p.1-36.
- Marín Córdova, S., Aguayo, C. J. E., Huizar, A. R. y Rauda, R. N., 2000 (a), *Análisis de grietas y hundimientos, Estrategia para el Manejo Eficiente del Agua de la Ciudad de México*, Informe Inédito, Batelle, Instituto Mexicano del Petróleo y Universidad Autónoma Metropolitana, 25 p.
- Marín Córdova, S. y Herrera Moro, C. M., 2000 (b), *Riesgo geológico sobre las presas localizadas en la porción suroeste de la Cuenca de México por fenómenos neotectónicos*, Memorias del Simposio Internacional de Riesgos geológicos y ambientales en la Ciudad de México, UNAM; p.53-62.
- Marín Córdova, S., Díaz Rodríguez, J. A., Juárez Badillo, E., Chávez, G. M., Valdez, M. F. y Hernández, B. H., 2001, *Nuevo Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México, Diagnóstico Geotécnico Ambiental*, División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería, PUMA, UNAM, Informe Inédito, 34 p.
- Maza, A. J. A., 1968, *Socavación bajo tuberías*, México, Instituto de Ingeniería UNAM., Series del Instituto de Ingeniería N°. 203, p. 56.
- Marsal, R. J. y Mazari, M., 1959 (1969), *El subsuelo de la Ciudad de México: México D. F.*, Facultad de Ingeniería, UNAM, 377 p.
- Mooser, F., 1962, *Bosquejo geológico del extremo sur de la Cuenca de México*, 20 Cong. Geol. Interna., México. Libreto guía, Exc. C-9, p. 9-16.
- Mooser, F., 1963, *Historia tectónica de la Cuenca de México*. Bol. Asoc. Mexicana. Geol. Petrol. Vol. 15, p. 239-246.
- Mooser, F., 1972, *El Eje Neovolcánico mexicano, debilidad cortical prepaleozoica, reactivada en el Terciario*. Memorias de la II Convención Nacional de la Sociedad Geológica Mexicana. Mazatlán, Sin., p. 186-187.
- Mooser, F., 1975, *Historia geológica de la Cuenca de México*, Memorias de las obras del Sistema de Drenaje Profundo del Distrito Federal, D.D.F. México, Tomo I, p.7-38.

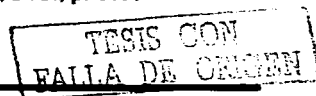
- Mooser, F., Tamez, E., Santoyo, E., Holguin, E. y Gutierrez, C.E., 1986, *Características geológicas y geotécnicas del Valle de México*, Departamento del Distrito Federal, Comisión de Vialidad de Transporte Urbano, 32 p.
- Mota Palomino, R. Zamorano, J. J., Ortiz, M. A., Fraustro, O., 1992, *Regionalización geomorfológica y sismicidad*, Carta de principales fenómenos naturales que provocan desastres en la Cuenca de México, Atlas de la República Mexicana. Instituto de Geografía, UNAM.
- Murillo, F. R. y García, A. G., 1978, *Ex Lago de Texcoco en El Subsuelo y la Ingeniería de Cimentaciones en el área urbana del Valle de México*, Simposio Soc. Mex. de Mecánica de Suelos, p. 51-81.
- Nabor Carrillo, 1969, *El hundimiento de la ciudad de México y Proyecto Texcoco*, Contribución de Proyecto Texcoco al VII Congreso Internacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Cimentaciones, Secretaría de Hacienda y Crédito Público, México, p. 121 - 144
- Negendank, J. F. W., 1972, *Volcanics of the Valley of Mexico*, N. J. B. Miner Abh: 116, p. 308- 320.
- Nixon, G. T., 1982, *The relationship between Quaternary volcanism in Central Mexico and the seismicity and structure of subducted ocean lithosphere*, Geol. Soc. Am. Bull., 93, p. 514-523.
- Novak, N. y Hindy, A., 1978, *Dynamic Response of Buried Pipelines*, Memorias Sixth European Conference on earthquake engineering, Dubrounik, Yugoslavia p.1-8
- Ordaz, M., Meli, R., Montoya, D. C., Sánchez, L., Pérez-Rocha, L. E., 1996, *La sismicidad en la Ciudad de México*, Riesgos ambientales para la salud de la Ciudad de México, Programa Universitario del Medio Ambiente, UNAM, p. 285-303.
- Oropeza Orozco, O., Zamorano, O. J. J., Ortiz, P. M. A., 1998, *Peligros geomorfológicos en México: remoción en masa, los desastres en México, una perspectiva multidisciplinaria*, Universidad Iberoamericana y Universidad Nacional Autónoma de México, p.149-184.
- Ortiz-Perez, M. A., Zamorano, O. J. J., Lugo H. J. y Fraustro, O., 1992, *Susceptibilidad a corrimiento de tierras*, Carta de principales fenómenos naturales que provocan desastres en la Cuenca de México Atlas de la República Mexicana. Instituto de Geografía, UNAM.
- Pérez - Cruz, G. A., 1988, *Estudio sismológico de reflexión del subsuelo de la Ciudad de México*, Tesis de Maestría. Fac. de Ingeniería, UNAM. 83 p. (Inédito).
- Reyna Trujillo, T., 1989, *Aspectos climáticos de la Cuenca del Valle de México*, Ecología Urbana, Soc. Méx. de Historia Natural, Vol. especial, p.25-39.
- Schlaepfer, C. J., 1968, *Resumen de la Hoja México, DF. y estados de México y Morelos*, Hoja México 14 Q-h (5), Carta geológica de México, serie 1:1'000,000, Inst. de Geol., UNAM.
- Secretaría de Gobernación, 1990, *Glosario de Protección Civil*, p.101.
- Secretaría de Gobernación, 1994, *Atlas Nacional de Riesgos*, Dirección General de Protección Civil, México, p.5-20.
- Secretaría de Recursos Hidráulicos, 1964, *Investigación geofísica en la zona Xochimilco - Chalco - Amecameca*, Comisión Hidrológica de la Cuenca del Valle de México, p.151.
- Servicio Sismológico Nacional, UNAM, 2000, *Sismos en la Cuenca de México*, (Inédito), 5p.



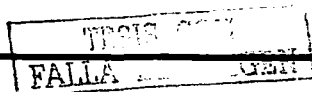
- Siebe, C., 2000, *Age and archaeological implications of Xitle volcano, southwestern Basin of Mexico City*, Journal of volcanology and geothermal research, p. 45-64.
- Slemmons, D. B. y Mac Kinney, R., 1977, *Definition of active fault*, U. S. Army Corps of Engineers, Waterway Experiment Station, Misc. paper S-77-8, 22p.
- Tapia - Varela, G., y López -Blanco, J., 2002., *Mapeo geomorfológico analítico de la Cuenca de México: Unidades morfogénicas a escala 1:100,000*, Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, Vol. 19, N° 1, p.50-65.
- White, S. E., 1962, *El Istaccihuatl*, Instituto Nacional de Antropología e Historia, Investigaciones 6, 80 p.
- Wilson Albert, R., 1991, *Environmental Risk: Identification and management*, Lewis Publishers, Inc., 413 p.
- Zamorano-Orozco, J. J., Tamarro L. M. y Lugo Hubp J. L., 1997, *Geomorfología preliminar de la Sierra de Los Pitos Hidalgo*, Resúmenes II Convención sobre la evolución geológica de México y Recursos Asociados, p. 94.
- Zamorano-Orozco, J. J., Tanarro-García, L. M., Lugo Hubp, J. L. y Sánchez-Rubio, G., 2002, *Evolución geológica y geomorfología del complejo dómico Los Pitos, norte de la Cuenca de México*, Revista Mexicana de Ciencias Geológica, Vol. 19, N° 1, p. 67-79.
- Zeevaert, L., 1953, *Outline on the stratigraphical and mechanical characteristics of the unconsolidated sedimentary deposits in the basin of valley of Mexico*, 4º. Congr. INQUA. Roma-Pisa, Actas, Vol. 2. p.3-12.
- Zeevaert, L., 1983, *Foundation engineering for difficult subsoil conditions*, 2nd ed. Van Nostrand Reinhold Company, New York.
- Zeevaert, L., 1997, *Riesgo del mal comportamiento de la superficie del suelo y cimentaciones debido a las ondas sísmicas*, p. 1-34

BIBLIOGRAFÍA COMPLEMENTARIA

- Aguilar Martínez, G. y Sánchez – Gómez, M. L., 1993, *Vulnerabilidad y riesgo en la Ciudad de México*, México, Ciudades N° 17, p.20.
- American Society for Testing and Materials, 1995, *Standard Guide for risk based corrective action applied at petroleum release sites*. ASTM-e-1739-95.
- Carr, M. J., 1976, *Underthrusting and Quaternary faulting in northern Central America*, Geol. Soc. América, 87, p. 825-829.
- Castany, G., 1963, *Traité pratique des eaux sou terraines*, Ed. Dunod, París.
- Cherry, J. A., R. W. Gillham and J. F. Barker, 1984, *Contaminants in ground-water contamination*, Studies in Geophysics; National Academy Press. Nashington, D.C., p. 179.



- Comisión de Vialidad y Transporte Urbano, 1986, *Características geológicas y geotécnicas del Valle de México*, p. 1-32.
- Cortés, A., Durazo, J., Farvolden, R. N. 1996, *Studies of isotopic hydrology of the basin of Mexico and vicinity: annotated bibliography and interpretation*, Journal of Hydrology 198 (1997) p. 346-376.
- Da Costa, Nunes A. J., 1971, *Factores Geomorfológicos e Climáticos na Estabilidade de Taludes de Estradas*, Revista Latinoamericana de Geotecnia, Vol. 1 N° 3, p. 191 – 211.
- Dasmann, R. F., 1972, *Environmental conservation*. 3rd. edic; John Wiley and Sons. New York, N Y.
- Davis, M. L., Cornwell, D.A., 1991, *Introduction to Environmental Engineering*. Ed. Mc. Graw – Hill, Inc. Estados Unidos de Norteamérica.
- Demant, A., 1987, *Interpretación geodinámica del vulcanismo del eje volcánico transmexicano.*, Revista del Inst. de Geol. UNAM, Vol. 5, N° 2.
- Durazo, J., 1996, *Acuitardo superficial y contaminación acuífera*, Ingeniería Hidráulica en México, Ciudad de México, Vol. XI, N° 2, p. 5 – 14.
- Ellstein, R. A., 1971, *Predicción de Asentamientos en Función de Observaciones de Campo*. Revista Latinoamericana de geotecnia, Vol. 1 N° 3. p. 224 – 230.
- Free, J. R., Browning, J. M. and Musgrave, J. W., 1940, *Relative infiltration and related physical characteristics of certain soils*. U. S. Dep. Agriculture Tech. Bul. 729. Washington, D. C.
- Freeze, R. A., and J. A. Cherry, 1979, *Ground water*. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.Y., 604p.
- Gillham, W. R. and Cherry, A. J., 1982, *Contaminant migration in saturated unconsolidated geologic deposits*, Geological Society of America. Special Paper 189, p. 31-62.
- Hafner, P., 1995, *Proyecto de saneamiento de suelos y aguas subterráneas*, Talleres de reparación y mantenimiento con una central de gas en el mismo recinto, Ferrocarriles Alemanes Stuttgart. Informe inédito, p.1-23.
- Hiriart, B. F., 1980, *Contribuciones al Desarrollo de la Ingeniería en México*, Comisión Federal de Electricidad.
- Hoek, E. y Brown E. T., 1980, *Underground excavations in rock*, The Institution of Mining and Metallurgy. Imperial College, London.
- Hoek, E. y Palmieri, A., 1998, *Geotechnical risks on large civil engineering projects*, 8th International I A E G Congress. Balkema, Rotterdam. p. 79 – 88
- Horrillo, J. J. y Villabal, R., 1998, *Estabilidad Hidrodinámica*, Memorias del taller de aplicación del criterio transitorio para evaluación de tubería submarina en la Sonda de Campeche IMP y PEMEX, p. 1-13.
- Huizar Álvarez, R., Marín Córdova, S. y Cortés Silva, A., 1999, *Aplicación del trazador cloruro de sodio en la determinación de parámetros hidrodinámicos en Cuernavaca, Mor.*, IX Seminario de Especialidades Tecnológicas (ININ, IMP e IIE). Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, 12 p.
- Hunt, B., 1985, *Flow towel in multiaquifer system*, Water Resour, Res. Vol. 21, N°11, p.1637-1641.



- Instituto de Geografía, UNAM, 1992, *Principales Fenómenos Naturales que provocan desastres en la Cuenca de México*, Medio Ambiente, Atlas Nacional de México, Vol. 2., 10.
- International Society for Rock Mechanics, Commission on Standardization of Laboratory and Field Tests, 1978, *Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses*. Int. Journal Rock Mech. Min. Sei. And geomech. Abstr., Vol. 15 p. 319-368. Pergamon Press Ltd.
- International Society for Rock Mechanics, 1980, *Basic Geotechnical description of rock masses*, Document N° 1., Int. J. Rock Mech. Min. Sei. and Geomech. Abstr., Vol. 18, p. 85 - 110, Pergamon Press. Ltd., p. 185- 201.
- Juárez Badillo, E., 1961, *Mecanismo de la grietas de tensión en el Valla de México*, Tesis Doctoral de Ingeniería, DEPI, UNAM, 64 p.
- Kanaori, Y., 1998, *Seismic risk assessment of the active Lake Ohara – W. Yauneyama fault system*, 8th International I A E G Congress. Balkema, Rotterdam, p. 79 –88.
- Kayakin, V. V. y Paraboutchev, 1998, *Prediction and prevention of emergency situations associated with geological proceses*, 8th International I A E G Congress Balkema, Rotterdam. p. 1137 - 1142.
- Maderrey, R. L. E., 1973, *Cuenca del Río Pabellón Obtención de los elementos físicos que influyen en el régimen hidrológico. Cuenca del río Pabellón, afluente del río Aguascalientes*, Revista Recursos Hidráulicos, Vol. II, N° 2., p. 166 - 176.
- Marín Córdova, S., 1975, *Estudio geológico de la presa Huachinanta, Edo de Puebla.*, Informe Interno. Secretaría de Recursos Hidráulicos, p. 30.
- Marín Córdova, S., 1978, *Estudio geológico de la presa El Batán, Edo de Querétaro.*, Informe Interno. Secretaría de Recursos Hidráulicos, p. 23.
- Marín Córdova, S. y Menache, V. A., 1991, *Estabilidad de Taludes en el área de Chinforinazo Norte, Municipio de Minatitlán, Edo. de Colima*, Informe Inédito IMP, p. 60.
- Marín Córdova, S., 2001, *Estudio geológico ambiental en el área de la Mesa de Copoya en Tuxtla Gutierrez, Chiapas*, Informe Inédito, Colegio de Ingenieros Geólogos de México, p.1-45.
- Mazari, H. M. and. Maclay, D. M., 1993, *Potential for ground water contamination in Mexico City*, In Environmental Science Technology., p. 794-802.
- Mitre Salazar, L. M., 1996, *Geología y riesgos asociados en el Valle de México*, Publicado en Riesgos ambientales para la salud en la Ciudad de México, Programa Universitario del Medio Ambiente, UNAM, Informe, p. 267-276.
- Mitre Salazar, L. M., 1998, *Las ciencias de la tierra aplicadas al estudio de riesgos, análisis y perspectivas en la ciudad de México*, Los desastres en México, una perspectiva multidisciplinaria, Universidad Iberoamericana y UNAM, p. 210-222.
- Ordóñez, E., 1895, *Las rocas eruptivas del suroeste de la Cuenca de México*, Inst. Geol. de México. Boletín 2.
- Oviedo de L., A., 1970, *El conglomerado Texcoco y el posible origen de la Cuenca de México*, Rev. Inst. Mex. del Petróleo.
- Petter, C. W., 1993, *Contaminante Hydrogeology*, Macmillan Publishing Company, 458 p.

- Programa Universitario de Medio Ambiente, 1998, *Administración y análisis de riesgo*, Apuntes del Curso Taller, 230 p.
- Ragozin, A. L., 1998, *Theory and practice of geological risk assessment and management*, 8 th International I A E G Congress. Balkema, Rotterdam. p. 879 – 886
- Río de la Loza, L., 1862, *Un vistazo al Lago de Texcoco*, Bol. Soc. Mex. Geografía y Estadística, Tomo IX.
- Rueda, G. J. 1997, *Procesos terrestres peligrosos*, Curso Geología Ambiental División de Educación Continua, Fac. Ingeniería, UNAM, p. 20-34
- Sánchez - Díaz, L. F., 1989, *Los acuíferos de la Ciudad de México, su estado actual y alternativas de solución para su control y conservación*, Tesis de Maestría en Ciencias, Instituto Politécnico Nacional, ESIA. (Inédito), 382 p.
- Sánchez, S. M. T. *et al.*, 1991, *Carta de Infraestructura Petrolera escala 1:4'000.000*, Atlas de la República Mexicana, Instituto de Geografía, UNAM.
- Springall, G. R., 1969, *Drenaje en Cuenas Pequeñas*, Rev. Instituto de Ingeniería, U N A M, p. 23.
- S.R.H., 1963-1964, *Hidrología de la Cuenca del Valle de México*, Comisión Hidrológica de la Cd. del Valle de México, Tomo I.
- Strahler, A., 1952, *Hypsometric (area – altitude curve) analysis of erosional topography*, Geological Society of America Bulletin, Vol. 63., p. 923-938.
- Suárez, R. G. y Jimenez, J. Z., 1987, *Sismos en la Ciudad de México y el terremoto del 19 de Septiembre de 1985*, Cuadernos de Instituto de Geofísica /2, UNAM, 52 p.
- Taméz González, E., 1964, *Principios de diseño y construcción de presas de tierra*, Secretaría de Recursos Hidráulicos. México DF., p.17-40.
- Tood, D. K., 1980, *Ground water Hydrology*, 3rded. New York, London, Wiley and Sons.
- Urrutia, J. y Castillo, L., 1977, *Un Modelo del Eje Volcánico Mexicano*, Bol. de la Soc. Geol. Mex. Vol. 38., p.18-28.
- Vázquez Contreras, A. y Benhumea, L. M., 1988, *Análisis de las vibraciones en la demolición de edificios por explosivos en la ciudad de México*, Comisión Federal de Electricidad, 54 p.
- Wintergerst, T. L., 1996, *La sismicidad en la Ciudad de México: la Prevención de sus desastres*, Publicado en riesgos ambientales para la salud de la Ciudad de México, Programa Universitario del medio ambiente. UNAM, Informe, p 297-308.
- Zacaula, S. M. A., 1977, *Estudio geohidrológico de los acuíferos del Lago de Texcoco*, Edo. de México, Tesis Licenciatura, I.P.N.
- Zeevaert, L., 2002, *La teoría de la sismo geodinámica y su aplicación en la ingeniería sísmica*, Memorias del Segundo Congreso Panamericano de Enseñanza Aprendizaje de ingeniería Geotécnica, Guayaquil-Ecuador, p 312-331.
- Zúñiga Meléndez. H. *et al.*, 1998, *Consideraciones geomecánicas para el diseño y la evaluación de líneas submarinas en la Sonda de Campeche*.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN